



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Expresión Gráfica, Diseños y Proyectos

Área de Conocimiento: Proyectos de Ingeniería. Expresión Gráfica Diseño y Proyectos

TRABAJO FIN DE GRADO

# **Estudio termográfico del efecto del apriete sobre las temperaturas en conexiones eléctricas**

Doble Grado en Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Daniel Alcaraz Mora

Tutor: Francisco José Soto Lara

Cotutores: Enrique Navarrete de Galvez, Luis Rodríguez Passolas Cantal

MÁLAGA, junio de 2023

## ÍNDICE GENERAL

1.1. RESUMEN .....	2
1.2. ABSTRACT .....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1. INTRODUCCIÓN.....	4
2.2. OBJETIVO.....	5
2.3. METODOLOGÍA .....	6
3. ESTADO DEL ARTE .....	8
3.1. HISTORIA DE LA TERMOGRAFÍA.....	9
3.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	10
3.3. VENTAJAS Y USOS DE LA TERMOGRAFÍA .....	12
3.4. IMAGEN TÉRMICA.....	13
3.5. APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA.....	17
3.5.1. MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CIVILES .....	18
3.5.2. CONTROL DE LA DEFORMACIÓN.....	19
3.5.3. INSPECCIÓN DE LAS MÁQUINAS.....	19
3.5.4. CONTROL DE LA CORROSIÓN.....	20
3.5.5. CONTROL DE LA SOLDADURA .....	21
3.5.6. CONTROL EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL .....	22
3.5.7. CONTROL DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS.....	23
4. TERMOGRAFÍA APLICADA A INSTALACIONES ELÉCTRICAS .....	24
4.1. USO DE TERMOGRAFÍA PARA LA MONITORIZACIÓN DE COMPONENTES ELÉCTRICOS ...	25
4.2. PRINCIPALES CAUSAS DE FALLO EN EQUIPOS ELÉCTRICOS .....	26
4.3. FALLO POR ARCO ELÉCTRICO .....	26
4.3.1. ARCO ELÉCTRICO EN SERIE.....	27
4.3.2. ARCO ELÉCTRICO EN PARALELO.....	28
4.4. PROTECCIONES CONTRA ARCO ELÉCTRICO .....	29
5. MÉTODO CIENTÍFICO EXPERIMENTAL .....	30
5.1. MATERIALES.....	31
5.2. MONTAJE EXPERIMENTAL .....	37
5.3. MEDIDA DE LA RESISTENCIA EN LAS UNIONES ATORNILLADAS .....	39
5.4. POTENCIA DISIPADA EN LA CONEXIÓN ELÉCTRICA.....	42
6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	43
6.1. RESULTADOS .....	44

6.1.1. RESULTADOS TEÓRICOS.....	44
6.2. CONCLUSIONES .....	58
6.3. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	59
7. ANEXOS .....	61
8. REFERENCIAS.....	62

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Montaje del experimento .....	7
Ilustración 2 Termómetro de bombillas de Galileo .....	9
Ilustración 3 Cámara termográfica .....	12
Ilustración 4 Filtrado de imagen con filtro Wiener .....	15
Ilustración 5 Filtrado de imagen con filtro de la media .....	15
Ilustración 6 Uso de termografía para monitorización de estructuras.....	18
Ilustración 7 Aplicación de la termografía en el control de la deformación .....	19
Ilustración 8 Aplicación de termografía en inspección de maquinaria industrial .....	20
Ilustración 9 Aplicación de termografía en el control de la corrosión .....	21
Ilustración 10 Aplicación de la termografía en el control de soldadura.....	21
Ilustración 11 Aplicación de la termografía en la industria aeroespacial.....	22
Ilustración 12 Aplicación de la termografía en instalaciones eléctricas.....	23
Ilustración 13 Proceso de formación de arco eléctrico .....	27
Ilustración 14 Fenómeno del arco eléctrico .....	27
Ilustración 15 Arco eléctrico en serie .....	28
Ilustración 16 Arco eléctrico en paralelo .....	28
Ilustración 17 Modelo Acti9 iC40N .....	29
Ilustración 18 Multímetro de petaca5 .....	30
Ilustración 18 Multímetro de petaca HP.....	31
Ilustración 19 Multímetro Fluke 87V MAXIlustración 18 Multímetro de petaca HP.....	31
Ilustración 19 Multímetro Fluke 87V MAX .....	33
Ilustración 20 Pinza amperimétrica Fluke 325Ilustración 19 Multímetro Fluke 87V MAX.....	33
Ilustración 20 Pinza amperimétrica Fluke 325.....	32
Ilustración 21 Magnetotérmicos ChintIlustración 20 Pinza amperimétrica Fluke 325 .....	34
Ilustración 21 Magnetotérmicos Chint .....	33
Ilustración 22 Diferenciales ChintIlustración 21 Magnetotérmicos Chint.....	34
Ilustración 22 Diferenciales Chint .....	34
Ilustración 23 ClemasIlustración 22 Diferenciales Chint .....	35
Ilustración 23 Clemas .....	34
Ilustración 24 Placa de pladurIlustración 23 Clemas .....	36
Ilustración 24 Placa de pladur.....	35
Ilustración 25 Cámara térmica FLIR T540Ilustración 24 Placa de pladur .....	37
Ilustración 25 Cámara térmica FLIR T540 .....	36

Ilustración 26 Resistencia de cartuchollustración 25 Cámara térmica FLIR T540 .....	37
Ilustración 26 Resistencia de cartucho .....	37
Ilustración 26 Resistencia de cartucho .....	37
Ilustración 27 Esquema eléctrico .....	38

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ley de Planck .....	10
Ecuación 2 ley de Stefan-Boltzmann.....	10
Ecuación 3 Ley de desplazamiento de Wien .....	11
Ecuación 4 Media de temperatura máxima correlativa .....	25
Ecuación 5 Resistencia en un conductor .....	40
Ecuación 6 Resistividad.....	41
Ecuación 7 Resistencia en un conductor .....	41
Ecuación 8 Resistencia de contacto .....	42
Ecuación 9 Potencia disipada .....	42
Ecuación 10 Potencia inicial.....	43
Ecuación 11 Resistencia nueva.....	43
Ecuación 12 Intensidad nueva .....	43
Ecuación 13 Potencia nueva .....	43
Ecuación 14 Temperatura estimada conductor.....	45
Ecuación 15 Resistencia teórica de contacto .....	49
Ecuación 16 Resistencia del conductor .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 intensidad y voltaje .....	45
Tabla 2 Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asignada al conductor .....	45
Tabla 3 Intensidades admisibles para cables con conductores de cobre .....	46
Tabla 4 Temperatura real estimada en el conductor para cable 1,5mm <sup>2</sup> .....	46
Tabla 5 Presión de contacto según pares de apriete.....	48
Tabla 6 Resistencia de contacto.....	49
Tabla 7 Resistencia del conductor para cable 1,5mm <sup>2</sup> .....	50

Tabla 8 Potencia disipada en la resistencia para cable 1,5mm2 .....	51
Tabla 9 Intensidad frente a Temperatura. Cable 2,5mm2.....	52
Tabla 10 Intensidad frente a Temperatura. Cable 4 mm2.....	53
Tabla 11 Intensidad frente a Temperatura. Cable 6mm2.....	53
Tabla 12 Temperatura de Servicio frente a Resistencia. ....	54
Tabla 13 Temperatura de Servicio frente a Resistencia. ....	54
Tabla 14 Temperatura de Servicio frente a Resistencia. ....	54
Tabla 15 Intensidad frente a potencia disipada.....	55
Tabla 16 Intensidad frente a potencia disipada.....	55
Tabla 17 Intensidad frente a potencia disipada.....	56
Tabla 18 Temperatura de servicio frente a Resistencia total .....	56

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Relación entre temperatura de servicio y corriente para cable de 1,5mm2 .....	47
Gráfica 2 resistencia de contacto con respecto par de apriete.....	49
Gráfica 3 Relación entre temperatura de servicio y resistencia del conductor .....	51
Gráfica 4 Relación entre potencia disipada y corriente.....	52
Gráfica 5 Intensidad frente a Temperatura. Cable 2,5 mm2 .....	52
Gráfica 6 Intensidad frente a Temperatura. Cable 4 mm2 .....	53
Gráfica 7 Intensidad frente a Temperatura. Cable 6 mm2 .....	53
Gráfica 8 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.....	54
Gráfica 9 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.....	54
Gráfica 10 Temperatura de Servicio frente a Resistencia. ....	54
Gráfica 11 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 2,5 mm2.....	55
Gráfica 12 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 4 mm2.....	55
Gráfica 13 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 6 mm2.....	56
Gráfica 14 Temperatura de Servicio frente a Resistencia Total .....	57
Gráfica 15 Ampliación de la gráfica 14 .....	57

# RESUMEN

1

## 1.1. RESUMEN

La termografía ha surgido como una potente herramienta para la supervisión y el diagnóstico de manera no intrusiva en diversas aplicaciones como el control de la corrosión en maquinaria, el control de la soldadura, para controlar la deformación en estructuras o realizar estudios precisos de deformación y tolerancia en la industria aeroespacial. El objeto de esta investigación va a ser la monitorización de instalaciones y equipos eléctricos, en particular, la identificación de patrones térmicos anómalos asociados a fallos eléctricos, como el calentamiento resistivo excesivo en conexiones atornilladas. Este TFG presenta un estudio exhaustivo sobre la relación entre la variación del par de apriete en las uniones atornilladas y el cambio de temperatura que se produce, además de sus implicaciones para la seguridad eléctrica.

Para ello, llevaremos a cabo un experimento en el que realizaremos una variación sistemática del par de apriete aplicado en las uniones eléctricas y supervisaremos los cambios de temperatura resultantes, siendo conscientes de la posibilidad de provocar fallos de arco eléctrico. El objetivo es establecer una correlación entre el par de apriete y el comportamiento térmico, para el cual haremos uso de una cámara térmica.

**PALABRAS CLAVE:** termografía, arco eléctrico, cámara térmica, par de apriete, conexiones eléctricas

## 1.2. ABSTRACT

Thermography has emerged as a powerful tool for non-intrusive monitoring and diagnosis in various applications such as corrosion control in machinery, welding control, deformation control in structures or precise deformation and tolerance studies in the aerospace industry. The focus of this research will be the monitoring of electrical installations and equipment, specifically, the identification of anomalous thermal patterns associated with electrical faults, such as excessive resistive heating in bolted connections. This TFG presents a comprehensive study of the relationship between torque variation in bolted joints and the temperature change that occurs, as well as its implications for electrical safety.

To this end, we will carry out an experiment in which we will systematically vary the torque applied to electrical joints and monitor the resulting temperature changes, being aware of the possibility of arcing faults. The aim is to establish a correlation between the torque and the thermal behavior, for which we will make use of a thermal camera.

**KEYWORDS:** thermography, electric arc, thermal camera, tightening torque, bolted connections.

# INTRODUCCIÓN

2

## 2.1. INTRODUCCIÓN

La seguridad eléctrica es de vital importancia en los sistemas eléctricos modernos, y las uniones atornilladas desempeñan un papel crucial en su fiabilidad y rendimiento. Una aplicación inadecuada del par de apriete y las variaciones de temperatura pueden provocar un aumento de la resistencia, calentamiento en el sistema y posibles fallos, pudiendo conducir finalmente a arco eléctrico.

De acuerdo con el National Fire Report en Estados Unidos [1] entre el 20% y el 30% de los incendios domésticos son debidos a defectos por arco eléctrico, de hecho, los fallos o averías eléctricas fueron la segunda causa principal de incendios domésticos en 2019, representando aproximadamente el 13% de los incendios domésticos notificados. 46.700 incendios fueron reportados en Estados Unidos entre los años 2015 y 2019 debidos a fallos por arco eléctrico, lo que supone más de 1,5 billones de dólares en daño directo a la propiedad, 430 muertes y 1070 heridos directos.

En la Unión Europea [2] se reportan dos millones de incendios domésticos al año, un 33% de esos incendios son debidos a fallos en instalaciones eléctricas, esto conlleva a 25 mil muertes por incendios al año y hasta medio millón de personas heridas.

En España un 25% de las causas de los incendios son los arcos eléctricos [3], además, en 2012 un 5,8% de los accidentes mortales en España se debieron a contacto con corriente eléctrica o fuego, elevándose la cifra a 9,1% en el sector de la construcción [3]. Además, cada año se registran aproximadamente 2000 ingresos por quemaduras por arco eléctrico en los centros especializados [3]. A través de fuentes como seguros AXA sabemos que el 50% de las organizaciones que sufren un incendio desaparece al cabo de cinco años.

Lo más alarmante es que según la normativa actual relativa a protecciones eléctricas vigente en España, la ITC-BT24 no contempla utilizar de manera obligatoria dispositivos de detección de fallos por arcos eléctricos, Arc Fault Detection Devices (AFDD en adelante), simplemente es una recomendación desde junio de 2019 en la Guía de Aplicación del Reglamento de Baja Tensión (ITC-BT 29).

Como contraste, en Estados Unidos y Canadá se exige en muchas aplicaciones distintas el uso de AFDD, obligando en la última modificación de ley en 2014 [4] a proteger todo tipo de circuito eléctrico en la vivienda, independientemente de si es un dormitorio o no. Otros países de la Unión Europea como Alemania [5] sí exigen el uso obligatorio de AFDD en la normativa DIN VDE 0100-420:2019-10 desde finales de 2017. Otro país que también ha hecho obligatorio el uso de AFDD es Reino Unido, recientemente en marzo de 2022 [6] introdujeron la decimotava versión del Amended 2 (AMD2) (BS7671:2018+A2:2022) con cambios relativos al uso de AFDD en cualquier tipo de instalación.

Si bien estas protecciones suponen un gran avance, no son tampoco la solución definitiva ya que solo protegen el circuito aguas abajo de estas y no siempre son económicamente justificables, es por ello por lo que se pretende profundizar en el efecto que tiene el par de apriete en el aumento de la temperatura, ya que existen herramientas como los destornilladores dinamométricos que nos permiten ajustar el par a la presión en la unión atornillada a la especificada por el fabricante.

Esto es esencial ya que un mal apriete es en la mayoría de los casos, el causante de los fallos eléctricos. Actualmente el REBT en España no obliga a usar herramientas específicas para asegurar un correcto par de apriete en una instalación eléctrica. Esto se aplica también a otros países donde tampoco supone una obligación el uso de herramientas externas para el cercioramiento del correcto par de apriete, sino simplemente una recomendación. Es por ello por lo que en este estudio se va a insistir en el uso de destornilladores dinamométricos para comprobar minuciosamente el par de apriete y poder demostrar su gran relevancia en el montaje de las instalaciones eléctricas.

## 2.2. OBJETIVO

El propósito de este estudio es analizar la relación entre el par de apriete en las uniones eléctricas y el impacto en los cambios de temperatura. Recurrimos al uso de termografía, con el fin de ver cómo un incorrecto par de apriete puede afectar al funcionamiento de la instalación y a la seguridad.

Los objetivos específicos del experimento consistirán en determinar el efecto de diferentes niveles de par de apriete sobre la resistencia eléctrica de las uniones atornilladas, ayudándonos a establecer una correlación entre el par y la temperatura, usando un destornillador dinamométrico y una cámara térmica para controlar y analizar los cambios de temperatura en las uniones atornilladas a medida que varían los niveles de par de apriete. Esto nos ayudará a analizar en última instancia la posibilidad de que se produzcan fallos por arco eléctrico debido a un par de apriete inadecuado: Al examinar la relación entre el par de apriete, la resistencia y la temperatura, el experimento pretende identificar los niveles críticos de par de apriete en los que las conexiones pueden volverse susceptibles a fallos por arco eléctrico.

Todo esto nos proporcionará información sobre la importancia de un par de apriete adecuado para evitar fallos eléctricos y además contribuirá al desarrollo de directrices para la gestión de conexiones atornilladas: A partir de los resultados experimentales, el objetivo es elaborar recomendaciones prácticas y directrices para el diseño, la instalación y el mantenimiento de las uniones atornilladas y poder así hacer una valoración de estos aspectos a partir de la termografía. Estas directrices tendrán como objetivo mejorar la fiabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos, haciendo hincapié en la importancia del control del par de apriete para conseguir instalaciones eléctricas seguras y eficientes.

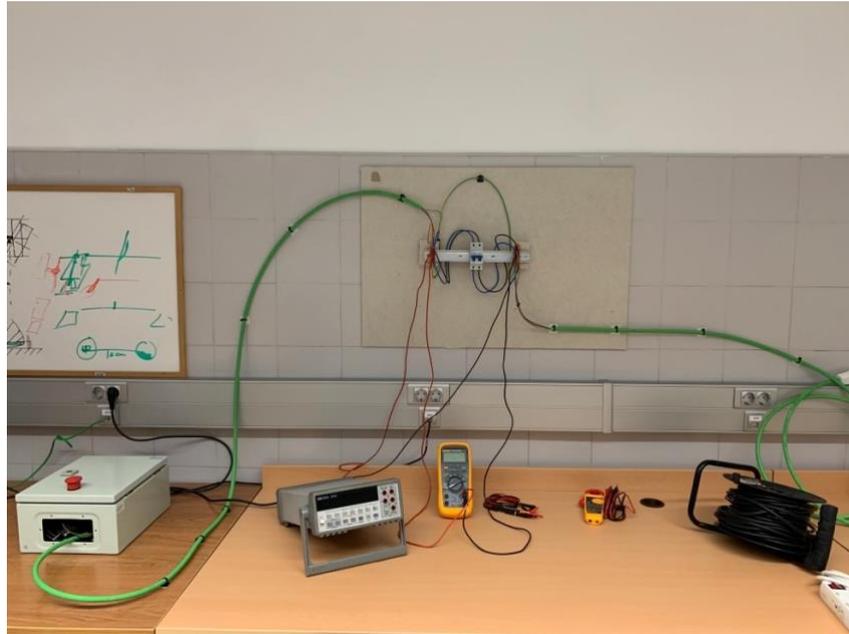
## 2.3. METODOLOGÍA

Se va a realizar el experimento en un entorno de laboratorio controlado dentro de la Escuela de Ingenierías Industriales equipado con el banco de pruebas que dispondrá de los siguientes dispositivos: conexiones Wago, carga eléctrica variable, una cámara termográfica (Flir T540) y multímetros (Fluke 87V Max, multímetro de petaca HP y la pinza amperimétrica Fluke 325), además de un cuadro de seguridad que incluirá seta de corte, diferencial de 30mA y magnetotérmicos. El circuito se construirá sobre placas de pladur para minimizar las interferencias térmicas.

Durante el experimento se seguirán los siguientes pasos para realizar el montaje que se detalla en el Anexo de Planos:

- Preparación inicial: Se montará el banco de pruebas, se calibrarán todos los instrumentos y equipos y se verificará su precisión.
- Tara de equipos de medida sin carga
- Variación del par de apriete: Se aplicarán diferentes niveles de par a las conexiones analizadas utilizando un destornillador dinamométrico (Wiha). Los valores de par se seleccionarán basándose en las normas y recomendaciones del fabricante y el sector.
- Aplicación de corriente: Se aplicará una carga eléctrica variable al circuito, y la corriente se ajustará incrementalmente para simular diferentes condiciones de carga eléctrica.
- Medición de la temperatura: La cámara térmica se utilizará para medir y registrar la temperatura de las conexiones atornilladas, centrándose en las zonas de concentración potencial de calor.
- Medición de la resistencia: Los multímetros se utilizarán para medir la caída de tensión de las uniones atornilladas en cada condición de par y corriente.
- Recogida de datos: Se recogerán y registrarán los datos de temperatura, corriente, voltaje y resistencia junto al par de apriete aplicado respectivamente para su posterior análisis.
- Análisis de datos: Los datos recogidos se analizarán para examinar la relación entre los cambios de par, resistencia y temperatura en las uniones atornilladas. Se utilizarán análisis estadísticos y representaciones gráficas para identificar tendencias y patrones. Obtendremos además la potencia disipada en la conexión eléctrica.

A continuación, en la ilustración 1 puede verse el montaje del experimento en el laboratorio:



*Ilustración 1 Montaje del experimento*

Fuente: Elaboración propia

La hipótesis del experimento es que un par de apriete inadecuado provocará un aumento de la temperatura. Se prevé que los resultados demuestren una clara correlación entre el par de apriete y los cambios de temperatura en las uniones atornilladas, lo que respalda la importancia de aplicar un par de apriete adecuado para mejorar la seguridad y el rendimiento eléctricos.

La investigación será llevada a cabo por un alumno de último curso de la universidad de Málaga junto con el equipo de ingenieros pertenecientes al departamento de expresión gráfica y proyectos y el departamento de organización, además de investigadores y técnicos en sistemas eléctricos y análisis térmico. Esta colaboración entre profesionales garantizará mediciones precisas, análisis de datos fiables e interpretación de los resultados. El calendario de los ensayos dependerá del montaje del banco y del proceso de recogida de datos. Además del proceso de colecta del equipo, ya que parte de este va a ser una donación por parte de las empresas correspondientes del material y el equipo y otra parte va a ser adquirido, pero se estima que abarcará de varias semanas a varios meses.

# ESTADO DEL ARTE

3

### 3.1. HISTORIA DE LA TERMOGRAFÍA

El primer intento de medir con precisión el calor se remonta al siglo II D.C, con el invento del termómetro de bombillas. Este aparato se mejoró con el tiempo (ilustración 1) hasta que a finales del siglo XVI Galileo desarrolló el primer termómetro, que permitía medir de forma precisa la temperatura mediante un sistema constituido por un pequeño jarrón lleno de agua, unido a un fino tubo que ascendía verticalmente, con una gran cámara de cristal vacía en la parte superior. Los cambios de temperatura de la cámara superior ejercían una presión positiva o negativa sobre el agua de abajo, haciendo que ésta subiera o bajara por los finos tubos. [7]



*Ilustración 2 Termómetro de bombillas de Galileo*

Fuente: «The History of Thermography». Lisa's Thermography and Wellness (blog), 19 de junio de 2018

En 1800, William Hershel, astrónomo real del rey Jorge III, rey de Gran Bretaña e Irlanda, descubrió un gran avance en la termología. Mientras experimentaba con prismas para separar los distintos colores del arco iris, Hershel descubrió un nuevo espectro de luz no visible: la luz infrarroja. 35 años después del descubrimiento de Hershel comenzó la termometría moderna con la invención de un dispositivo termoeléctrico. [7]

La década de 1920 trajo consigo el uso de la fotografía para registrar el espectro infrarrojo, lo que condujo al uso de la termografía en otros campos, como el de la guerra. Durante los años 30, 40 y 50, la termometría experimentó grandes mejoras en la obtención de imágenes con sensores especiales de

infrarrojos. Durante la Segunda Guerra Mundial los infrarrojos se utilizaron para diversas aplicaciones militares, como la detección de movimientos de tropas. [7]

En los 60 se publicaron grandes cantidades de investigación y muchas organizaciones de médicos empezaron a mostrar su dedicación al uso de las imágenes térmicas. Organizaciones como la Academia Americana de Termología, introdujeron esta ciencia a una mayor escala pública y privada. A mediados de los años 70, gracias al uso de miniordenadores que proporcionaban pantallas en color, análisis de imágenes y las grandes ventajas del almacenamiento de imágenes y datos, se establecieron los estándares detallados de la termografía. En 1982, la Comisión Federal de Medicamentos (FDA) aprobó la termografía médica para su uso "cuando se produzcan variaciones de la temperatura de la piel". Y en 1988, el Departamento de Trabajo de Estados Unidos introdujo la cobertura de la termografía en los trabajadores federales [8].

## 3.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En la teoría de la radiación térmica, el cuerpo negro se considera como un objeto hipotético que absorbe todas las radiaciones incidentes e irradia un espectro continuo según la ley de Planck como sigue: [8]

$$L_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp \left( \frac{C_2}{\lambda T} \right) - 1 \right]}$$

(Ecuación 1)

La Ecuación 1 se corresponde con la Ley de Planck, donde:

$\lambda$  es la longitud de onda de la radiación ( $\mu\text{m}$ )

$L_{\lambda}$  es la potencia radiada por el cuerpo negro por unidad de superficie y por unidad de ángulo sólido para una determinada longitud de onda ( $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ),

T es la temperatura en escala absoluta (K)

$C_1$  y  $C_2$  son la primera y segunda constantes de radiación respectivamente.

Al integrar la ley de Planck sobre todas las frecuencias, se obtiene la ley de Stefan-Boltzmann que se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{q}{A} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{Ecuación 2})$$

La Ecuación 2 se corresponde con la Ley de Stefan-Boltzmann, donde:

$q$  es la tasa de emisión de energía (W)

$A$  es el área de la superficie emisora ( $m^2$ )

$T$  es la temperatura absoluta (K)

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,676 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

$\varepsilon$  es la emisividad de la superficie emisora para una longitud de onda y una temperatura absoluta  $T$  fijas

La longitud de onda del pico del espectro de emisión también está relacionada con la temperatura absoluta de la superficie emisora mediante la ley de desplazamiento de Wien, que se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda_{max} T = 2897,7 \mu\text{m K} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La Ecuación 3 se corresponde con la Ley de desplazamiento de Wien, donde  $\lambda_{max}$  = pico de onda,  $T$  = temperatura absoluta.

La radiación infrarroja emitida por un cuerpo es detectada sin contacto por un detector de infrarrojos y, mediante la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 2), se obtiene la temperatura del cuerpo. Los detectores de infrarrojos son la pieza principal de los sistemas IRT (Infrared Thermography). Existen varios tipos de detectores que pueden clasificarse en dos categorías principales, a saber, térmicos (como pirómetros, bolómetros, etc.) y semiconductores (como detectores fotoconductores, fotovoltaicos). Los detectores de infrarrojos suelen estar colocados dentro de una carcasa protectora, formada por las disposiciones ópticas (lentes, espejos, etc.), los elementos detectores, el sistema de refrigeración y la electrónica asociada. De ahí que también se llamen cámaras de infrarrojos.

Las primeras cámaras consistían en un detector de un solo elemento y dos espejos de barrido (uno horizontal y otro vertical). En las cámaras más avanzadas de segunda generación, se implementaron dos espejos de exploración similares junto con detectores de matriz. Las cámaras modernas de tercera generación (ilustración 2) carecen de espejos y disponen de grandes detectores bidimensionales. En estas cámaras también se aplican, mediante procesado de imagen en tiempo real en el procesador de la cámara, varias técnicas de mejora de la imagen, como la integración con retardo de tiempo, que aumentan la resolución y la sensibilidad de los sistemas. Las cámaras más antiguas tienen menor resolución espacial, mayores niveles de ruido, menor rango dinámico, capacidad de almacenamiento de datos limitada y sin procesamiento de imágenes integrado. La ventaja de estos nuevos sistemas es que para realizar las inspecciones se requiere de muy poco equipamiento y este es ligero y portátil. [9]



Ilustración 3 Cámara termográfica

Fuente: <https://isotest.net/comprar/camaras-termograficas/fluke-tis-series/>

### 3.3. VENTAJAS Y USOS DE LA TERMOGRAFÍA

La principal ventaja de la termografía es que es un método de inspección no invasivo, por lo que no requiere paralizar la instalación o sistema a inspeccionar y permite realizar la inspección de forma eficaz, además que nos permite inspeccionar de forma segura y sin contacto, por lo que por ejemplo en una instalación eléctrica, minimizamos el riesgo de electrocución.

Es una medida en tiempo real, por lo que, en caso de tratarse en sistemas mecánicos, eléctricos..., podemos ver cómo reacciona el sistema de acuerdo con el movimiento, variaciones en los parámetros de alimentación..., mostrando los cambios de forma inmediata.

Es bidimensional, es decir, para una misma superficie puede medirse la temperatura en dos puntos diferentes.

Además, es multidisciplinar, gracias a las imágenes podemos observar patrones térmicos, comportamientos, anomalías...

Gracias a todas estas características, la termografía ha podido extenderse a muchos campos muy distintos como la medicina, la veterinaria, la electricidad, la edificación, los procesos industriales, la automoción, la navegación, los sistemas de seguridad...

El termógrafo es el encargado del manejo de la cámara termográfica, si bien es experto en el uso y manejo de la cámara, no conoce todas las disciplinas a las que se puede aplicar la termografía, por lo que además del propio termógrafo será necesario un profesional de la materia debe examinar las imágenes para obtener resultados relevantes. Esto implica dos cosas: la primera que la termografía permite obtener resultados a distancia, ya que no es necesario desplazar al profesional a realizar la inspección, sino que es posible enviarle las fotografías y que éste pueda tomar decisiones desde su oficina. Otro factor para tener en cuenta en la termografía es que los resultados dependen en un alto porcentaje del análisis de imagen que se haya hecho. [9]

### 3.4. IMAGEN TÉRMICA

La imagen térmica es crucial para el análisis termográfico, por lo que hay que asegurarse antes de guardarla que está bien tomada y puede apreciarse la intensidad de la radiación térmica claramente.

Hay que tener en cuenta que la imagen térmica muestra la intensidad de radiación térmica, no la distribución de temperaturas y que las diferencias de radiación no se traducen en diferencias de temperatura, es decir, sobre un mismo objeto que se esté trabajando, puede estar a la misma temperatura, pero tener distintas emisividades, quedando reflejado en la imagen térmica. El error común es pensar que en la misma superficie hay diferencia de temperatura, mientras que realmente lo que ocurre es que hay diferentes emisividades.

Por tanto, lo que muestra realmente la cámara térmica son las temperaturas aparentes y no las reales, pudiendo definir en este contexto temperatura aparente como: “la temperatura leída, no compensada o corregida de la cámara termográfica” por lo que nos mostrará toda la radiación incidente en la superficie a medir la temperatura, independientemente de la fuente de la que proceda la radiación infrarroja.

El análisis de imágenes puede hacerse de forma cualitativa o cuantitativa, según convenga. [10]

### **Análisis cualitativo:**

Las imágenes térmicas se analizan para determinar, demostrar, localizar y evaluar anomalías de diversos grados. El 90% de las comprobaciones son de este tipo, normalmente se establecen grados de actuación sobre el problema como: Grado 1: reparar de forma urgente, Grado 2: programa reparación, Grado 3: revisar en la próxima inspección.

Para este tipo de análisis usamos la temperatura aparente sin compensación.

### **Análisis cuantitativo:**

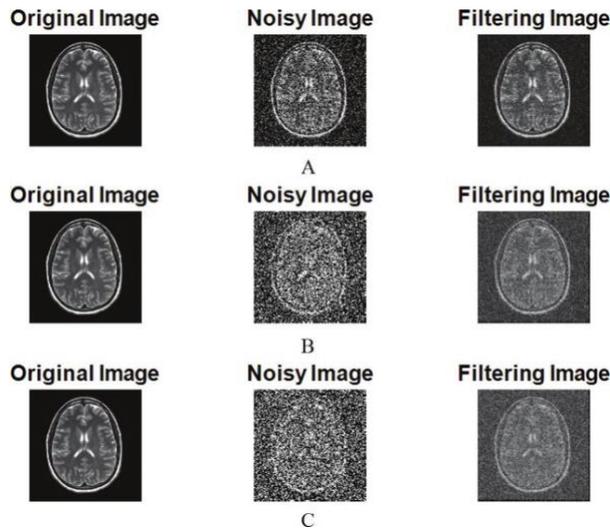
En este caso, determinamos la temperatura o las temperaturas de las partes de la imagen térmica que interesan para poder extraer conclusiones. Este análisis se realiza con temperaturas reales, con compensación de los parámetros de objeto de emisividad y temperatura aparente reflejada.

Para poder sacar conclusiones, habrá que observar las temperaturas y compararlas con las referencias, bien con los datos publicados por algún organismo de referencia o bien por los datos históricos de funcionamiento.

Normalmente, en el análisis de imágenes térmicas la imagen es captada por la cámara termográfica, que genera un perfil de temperatura diferente para cada muestra se implementan en una red neuronal artificial para la clasificación de la imagen. La imagen se procesa principalmente en cinco pasos, como se indica a continuación: toma de imágenes, preprocesamiento de imágenes, segmentación de imágenes, extracción de características y clasificación. El preprocesamiento, la extracción de características y la clasificación son los cuatro procesos principales.

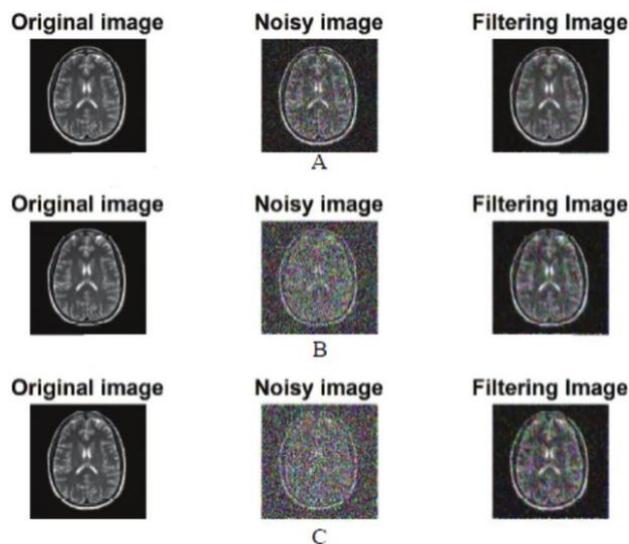
**Paso 1: Preprocesamiento de imágenes**

El preprocesamiento es el primer paso para la conversión de la imagen térmica en una imagen en escala de grises, seguido de un proceso de filtrado y redimensionamiento de la imagen para eliminar las partes no deseadas. Para el filtrado de imágenes se utiliza el filtro wiener (ilustración 3) y el filtro de la media (ilustración 4). El filtro de la media produce un buen resultado en comparación con el filtro wiener. Así que el filtro de la media se utiliza para el proceso de filtrado. [11]



*Ilustración 4 Filtrado de imagen con filtro Wiener*

Fuente: Ali, Hanafy. «MRI Medical Image Denoising by Fundamental Filters», 2018.



*Ilustración 5 Filtrado de imagen con filtro de la media*

Fuente: Ali, Hanafy. «MRI Medical Image Denoising by Fundamental Filters», 2018.

El filtrado de la media no lineal se utiliza para eliminar el ruido de una imagen. El funcionamiento del filtro de la media se realiza sobre la imagen a través de los píxeles, intercambiando cada valor con el valor de los píxeles vecinos de la media. El diseño de los píxeles vecinos se conoce como "ventana", que se desliza, píxel a píxel en toda la imagen. La media de la imagen se estima, en primer lugar, categorizando todos los valores de los píxeles en una secuencia numérica de la ventana y, a continuación, el valor del píxel que se contabiliza realmente con el valor de la mediana del píxel. El píxel de entrada que se intercambia por la media del píxel se incorpora alrededor del píxel en la ventana.

El algoritmo de filtrado de la media ordena en la ventana los valores de los píxeles en secuencia creciente o decreciente y selecciona el valor de la mediana de la imagen. La media se calcula por dos valores medios.

Para resaltar, o mejorar, las características de una imagen, como el contraste o los límites, la detección de un borde, se utiliza la mejora de la imagen, mediante la aplicación de los filtros de Wiener o de la media para hacer una presentación visual que sea más aplicable para el análisis. El proceso de mejora aumenta el rango vital de la característica seleccionada para que se pueda detectar fácilmente. La mejora de la imagen incluye la manipulación del contraste y el nivel de gris, la eliminación de los bordes y el ruido... etcétera. La mejora de la imagen es un tema muy importante debido a su utilidad esencialmente en todas las aplicaciones de procesamiento de imágenes.

## **Paso 2: Segmentación de imágenes**

Tenemos cuatro métodos de segmentación: segmentación basada en la clasificación, segmentación basada en los bordes, segmentación basada en el umbral y segmentación basada en la región. La segmentación de imágenes consiste en dividir una imagen en varias regiones (agrupaciones de píxeles), asignando a cada segmento una categoría, bien por color, textura... consiguiendo así clasificar las distintas partes de la imagen.

El análisis y el procesamiento de una imagen dependen de su segmentación. Este puede realizarse directamente en la imagen real o a través del color individual del plano. En base al valor de intensidad del color para segmentar la imagen se establece el umbral ya que los valores de intensidad se mantienen en una región de color homogénea. La gama de colores específica de un objeto puede detectarse fácilmente a partir de toda la imagen. El valor medio del color necesario se calcula y se compara con los valores de cada píxel RGB de una imagen utilizando la medida de distancia Mahalanobis o la medida de distancia Euclidiana. [5]

### **Paso 3: Extracción de características**

Para la extracción de características se evalúa el área de un objeto. La imagen de entrada puede ser numérica o lógica. Si es una imagen numérica, esta se corresponde 100% con los datos captados por el sensor, si es una imagen lógica, estamos ante una representación ideal de una imagen original. Si la entrada es numérica, se evalúan los píxeles que no son cero, como el área, la media, la desviación estándar y los valores mínimos y máximos de RGB. Estas características se calculan a partir de las imágenes, ya que todas las características extraídas tienen valores diferentes para las distintas imágenes térmicas y, sobre la base de estos parámetros, también se pueden clasificar las imágenes normales y contaminadas.

### **Paso 4: Clasificación**

Una vez extraídas las características, las imágenes se clasifican mediante una red neuronal artificial. Las características determinadas de una imagen se utilizan como entradas, es decir, el número de variables de entrada es idéntico al número requerido de características. La red neuronal artificial también puede tener capas ocultas definidas por el usuario. Estas permiten la organización adicional no lineal de los atributos de entrada. La red neuronal artificial no es el sistema lineal, como el método permite añadir información adicional, correlacionar y disminución de datos.

## **3.5. APLICACIONES DE LA TERMOGRAFÍA**

Podemos distinguir dos tipos de técnicas de análisis termográfico: técnicas activas y pasivas.

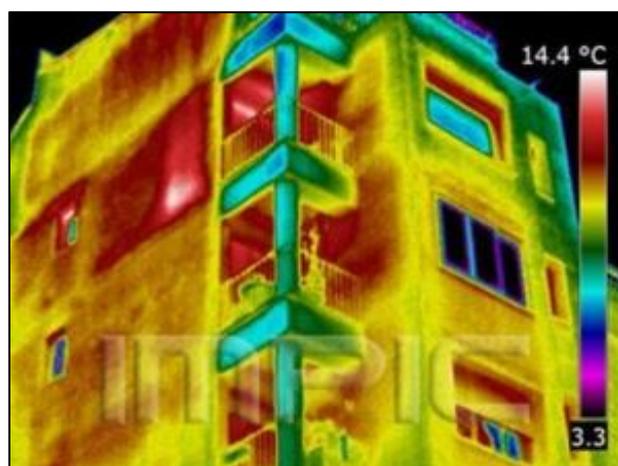
Las técnicas de análisis pasivas se realizan sin la aplicación de algún estímulo externo. Las usamos para monitorizar instalaciones eléctricas, metalúrgicas, civiles, mecánicas, además de aplicaciones médicas y vigilancia.

Las técnicas de análisis activas requieren de un estímulo externo, como ondas de calor, estímulos ópticos, ultrasónicos... Para ello podemos producir una excitación por fase pulsada, calentamiento escalonado o vibrotermografía. Algunas aplicaciones son la detección de defectos como despegues, delaminaciones o grietas, además de averiguar el grosor del recubrimiento y poder hacer una caracterización.

Las maquinarias defectuosas, las condiciones de carga eléctrica inadecuadas y los componentes metálicos o no metálicos dañados presentan en general patrones de temperatura anormales. Además, la temperatura es uno de los parámetros de control más importantes en diversos procesos industriales. La identificación de patrones de temperatura anormales y la medición de la temperatura en línea realizada sin contacto mediante termografía ayudan al diagnóstico temprano de los fallos probables y se pueden adoptar medidas preventivas adecuadas para evitar paradas importantes. Además, la termografía permite registrar las variaciones dinámicas de la temperatura en tiempo real y la interpretación de las imágenes térmicas infrarrojas codificadas por colores adquiridos es más fácil y rápida. Basándose en los valores de temperatura medidos, se pueden tomar decisiones adecuadas sobre los programas de mantenimiento y reparación. Así, se puede ayudar a reducir los daños en los equipos, el tiempo de inactividad del sistema y los costes de mantenimiento. Debido a estas ventajas, la termografía se ha establecido como una herramienta eficaz de supervisión en diversos campos. A continuación, se muestran algunas aplicaciones

### 3.5.1. MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS CIVILES

Las estructuras de hormigón, los puentes, las carreteras, los sistemas de agua y alcantarillado, los puertos, los aeropuertos y los edificios, son parte de nuestras vidas y la supervisión del estado de estas estructuras es esencial para garantizar la seguridad pública. Aunque la obtención de imágenes precisas del hormigón necesita requisitos adicionales debido a su composición heterogénea, la distribución variable del tamaño del grano y las diferentes propiedades de los materiales que lo componen. Otras limitaciones son las geometrías complejas, la accesibilidad restringida y la existencia de refuerzos. La aplicación de la termografía confluye en la detección de huecos y grietas, el desprendimiento de frescos, la adhesión de muros, el atrapamiento de humedad y el análisis de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado. [12]



*Ilustración 6 Uso de termografía para monitorización de estructuras*

Fuente: Fenercom, «Guía de la Termografía Infrarroja Aplicaciones en Ahorro y Eficiencia Energetica», 2011

### 3.5.2. CONTROL DE LA DEFORMACIÓN

Los materiales pueden experimentar varios tipos de condiciones de carga durante su funcionamiento que pueden reducir drásticamente su vida útil. La carga tenaz o de fatiga provoca deformaciones en los componentes y parte de la energía mecánica se convierte en energía térmica, lo que a su vez aumenta la temperatura del componente. La termografía es una técnica excelente para controlar la evolución de la temperatura de la superficie durante dichas deformaciones y proporciona indicaciones tempranas de fallo. El análisis termográfico puede proporcionar indicaciones tempranas sobre la zona de fallo durante la carga de tracción.

Se ha utilizado la termografía para controlar la deformación por tracción en el acero inoxidable AISI tipo 316 de grado nuclear a temperatura ambiente. Se observó que la temperatura aumenta continuamente durante la deformación plástica progresiva y que el inicio del fallo puede identificarse claramente por el aumento repentino de la temperatura en la región de fallo. [12]

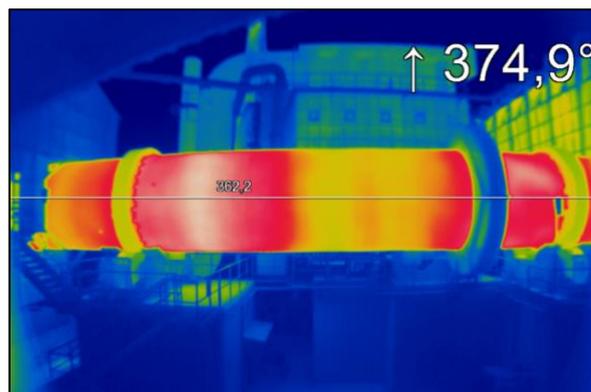


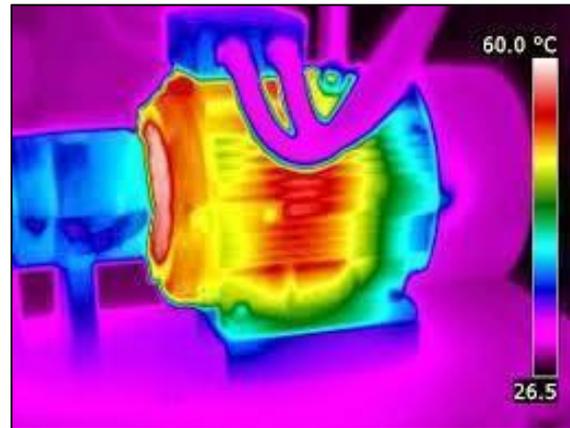
Ilustración 7 Aplicación de la termografía en el control de la deformación

Fuente: <https://www.termagraf.com/termografia/industria/>

### 3.5.3. INSPECCIÓN DE LAS MÁQUINAS

Los desajustes del estator o del rotor, los cojinetes defectuosos y la lubricación inadecuada pueden provocar serios fallos mecánicos a menos que se adopten prácticas de control preventivo y medidas correctivas. Se ha informado de que la supervisión periódica de las distribuciones de la temperatura de la piel de los tubos de la planta de proceso en intervalos regulares es esencial para garantizar un rendimiento óptimo, una mayor vida útil de los tubos y un funcionamiento seguro de la planta.

Se han inspeccionado las distribuciones de temperatura de los condensadores refrigerados por aire mediante análisis termográfico y se estudiaron los efectos de la temperatura del aire ambiente, el flujo de aire natural y los defectos superficiales en el rendimiento de las unidades. Los estudios indican que la termografía puede utilizarse para la monitorización del estado de las estructuras de las turbinas eólicas con el fin de evitar fallos prematuros de las palas de las turbinas durante su funcionamiento. [12]



*Ilustración 8 Aplicación de termografía en inspección de maquinaria industrial*

Fuente: <https://ge2ingenieria.com/blog/mantenimiento-productivo>

### 3.5.4. CONTROL DE LA CORROSIÓN

La corrosión provoca enormes pérdidas económicas en diversos sectores industriales. Como la corrosión va acompañada de la pérdida de materiales, provoca variaciones en la temperatura de la superficie y, por tanto, la termografía es una herramienta excelente para controlar los cambios de temperatura de la superficie asociados a los daños por corrosión.

Se utilizaron técnicas termográficas transitorias para la caracterización de defectos de corrosión ocultos. Se desarrolló un modelo de transferencia de calor en 3D para los daños por corrosión y se propuso un sencillo algoritmo basado en la derivada temporal de la temperatura de la superficie para la detección de la variación de espesor inducida por la corrosión. Las zonas corroídas pueden caracterizarse por el máximo contraste térmico y el tiempo de aparición del máximo valor de contraste. [12]

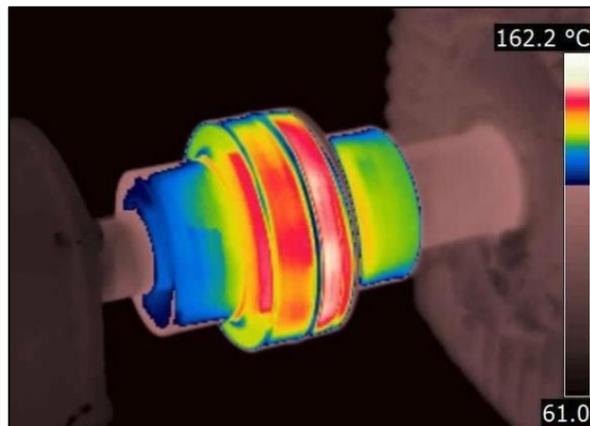


Ilustración 9 Aplicación de termografía en el control de la corrosión

Fuente: <https://camarastermograficas.com.mx/camaras-vision-termica.html>

### 3.5.5. CONTROL DE LA SOLDADURA

La soldadura es uno de los métodos de unión más utilizados tanto para materiales metálicos como no metálicos. Las uniones soldadas son el origen de cualquier debilidad estructural en la mayoría de los casos y, por lo tanto, las uniones soldadas deben ser supervisadas de forma rutinaria para garantizar la integridad estructural de los productos.

Se emplearon técnicas de termografía pulsada para la inspección de las juntas soldadas y se observó que la extensión de la zona afectada por el calor podía determinarse a partir de las imágenes de fase adquiridas. También se verificó, mediante imagen térmica (IRT), que la zona afectada por el calor se vuelve más estrecha a medida que aumenta la velocidad de soldadura. La IRT se ha utilizado ampliamente para la supervisión en línea de la penetración de la soldadura, el control de los procesos de soldadura, el control de la deposición de material, el control del sistema de soldadura, la garantía de calidad de la soldadura láser y la supervisión en línea de la calidad del proceso de corte por chorro de agua abrasivo. [12]

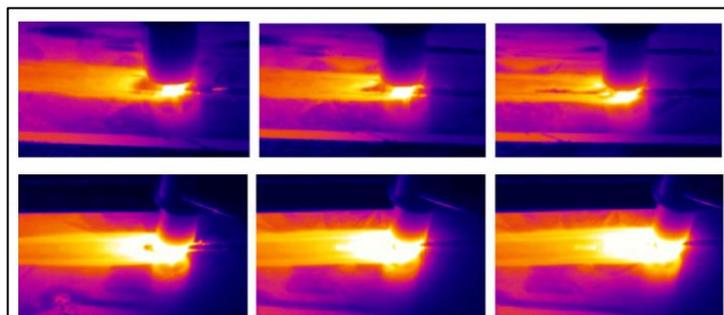


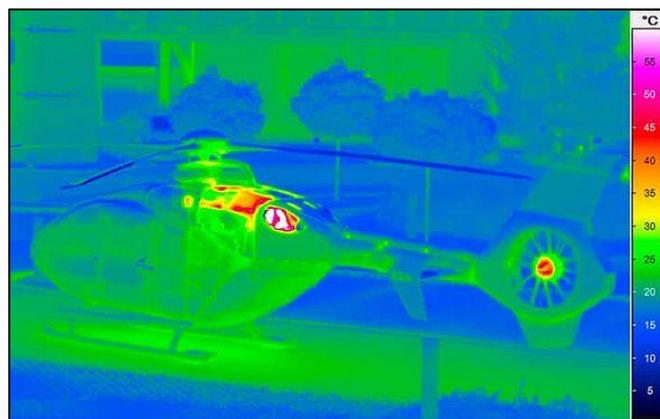
Ilustración 10 Aplicación de la termografía en el control de soldadura

Fuente: <https://automaatio.samk.fi/quality-inspection-of-welding-seam-in-realtime-with-thermal-imaging/>

### 3.5.6. CONTROL EN LA INDUSTRIA AEROESPACIAL

Para la fabricación de componentes aeroespaciales se utilizan habitualmente varios tipos de estructuras de materiales compuestos ligeros (como los polímeros reforzados con fibra de carbono y de vidrio, las estructuras de paneles de abeja, los paneles sándwich, etc.). Estos componentes son propensos a sufrir defectos como delaminaciones, desuniones, inclusiones extrañas, porosidad, entrada de agua, fallos en los nodos y aplastamiento del núcleo. Para garantizar la integridad estructural de los componentes fabricados, es necesario realizar un control periódico de los mismos. La termografía es una herramienta de control de estado ampliamente aceptada en la industria aeroespacial, principalmente porque la inspección puede realizarse en grandes áreas sin necesidad de desmontar los componentes de la aeronave. Como el proceso es sin contacto, el tiempo de inspección es considerablemente menor que el de otras técnicas de control.

En general, la humedad corroe las estructuras de nido de abeja y, al mismo tiempo, se reduce la resistencia adhesiva. Por lo tanto, la detección de la entrada de agua en las estructuras compuestas es de suma importancia. Para detectar la penetración de agua en los materiales compuestos se utilizaron técnicas basadas en la termografía. Toda la estructura se enfría por debajo del punto de congelación del agua y posteriormente se calienta hasta la temperatura ambiente. La energía de transición de fase (necesaria para la fusión del agua) se detecta mediante análisis termográfico y la localización de la penetración del agua puede identificarse a partir de los termogramas. [13]



*Ilustración 11 Aplicación de la termografía en la industria aeroespacial*

Fuente: <https://www.infratec.de/thermografie/anwendungsgebiete/luftfahrt-raumfahrt/>

### 3.5.7. CONTROL DE LOS COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

La termografía ha encontrado amplias aplicaciones en la monitorización del estado de los componentes eléctricos. La corrosión, las conexiones sueltas, los contactos dañados, los cables desgastados, la sobrecarga o el desequilibrio de la carga son los principales tipos de fallos en los componentes eléctricos que provocan un aumento anormal de la temperatura que puede ser fácilmente monitorizado por las cámaras termográficas. La temperatura de funcionamiento de un equipo eléctrico típico en condiciones normales de carga puede considerarse como el dato de referencia y cualquier aumento de la temperatura de funcionamiento debe considerarse como una indicación de un probable fallo.

El uso de termografía en el control de componentes eléctricos es el objetivo de esta investigación, por lo que se le dedicará una sección completa más adelante. [13]



*Ilustración 12 Aplicación de la termografía en instalaciones eléctricas*

Fuente: <https://tpcgenerators.com/commercial-industrial-electrical-contracting-services/>

# **TERMOGRAFÍA APLICADA A INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

4

## 4.1. USO DE TERMOGRAFÍA PARA LA MONITORIZACIÓN DE COMPONENTES ELÉCTRICOS

Podemos usar la termografía para supervisar el estado de varios tipos de equipos eléctricos, como centros de control de motores, transformadores, subestaciones y conmutadores, baterías de condensadores, líneas eléctricas aéreas, accionamientos, paneles de luz y electricidad, cables y bandejas eléctricas, regletas y fuentes de alimentación.

Podemos clasificar las fuentes de fallos eléctricos en tres apartados basándonos en los estudios de casos realizados durante el periodo 1999-2005. El máximo número de fallos (48%) se encontró en las conexiones, específicamente en las conexiones atornilladas, mientras que el 45% de los fallos se encontró en los contactos de los seccionadores. Se pueden clasificar las anomalías térmicas inducidas por los fallos en tres categorías: graves (sobrecalentamiento  $>130$  °C), prioritarias (sobrecalentamiento 100-130 °C) y programadas (sobrecalentamiento 75-100 °C). Para los tipos de averías graves, los trabajos de reparación y mantenimiento deben comenzar inmediatamente, mientras que, para las averías de tipo prioritario y programado, los trabajos de reparación y mantenimiento deben llevarse a cabo lo antes posible y cuando sea posible, respectivamente. [13]

En el caso de los dispositivos eléctricos, los límites de temperatura pueden clasificarse según: límite de temperatura ambiente nominal, aumento de temperatura admisible y temperatura máxima de funcionamiento admisible, que se puede considerar como la suma de la temperatura ambiente nominal y el aumento de temperatura admisible. Estos límites se refieren a dispositivos que funcionan con una carga nominal y una temperatura ambiente especificada. Sin embargo, durante una inspección termográfica, los dispositivos eléctricos no siempre funcionan a su carga nominal. Para obtener la temperatura máxima permitida corregida,  $\Delta T_{max,corr}$  (en °C) utilizamos la siguiente ecuación: [14]

$$\Delta T_{max,corr} = \left[ \left( \frac{A_M}{A_R} \right)^2 T_R \right] + T_{ambM} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Aquí en la Ecuación 4: Media de la temperatura máxima correlativa,  $A_M$ ,  $A_R$ ,  $T_R$  y  $T_{ambM}$  son la carga medida en amperios, la carga nominal en amperios, el aumento de la temperatura nominal obtenido a partir del valor estándar (°C) y la temperatura ambiente medida (°C) respectivamente.

Recientes avances en el campo de los circuitos integrados y la tecnología de estado sólido han dado lugar al uso generalizado de placas de circuito impreso (PCB) que contienen millones de circuitos electrónicos. Este tipo de circuitos de alta densidad requiere el uso de múltiples fuentes de alimentación

a bordo y numerosas uniones electrónicas que son lugares potenciales de fallos. La identificación y localización de estos fallos es esencial para que las placas de circuito impreso funcionen sin errores. En general, los fallos producen patrones de temperatura anormales que pueden ser detectados por la termografía. El uso reciente de soldaduras sin plomo con un alto punto de fusión puede dar lugar a una carga de temperatura adicional para los circuitos electrónicos y la inspección térmica puede utilizarse para la supervisión de la temperatura en tiempo real en estos casos.

## 4.2. PRINCIPALES CAUSAS DE FALLO EN EQUIPOS ELÉCTRICOS

Según FM Global Insurance Report, en 2011 el 64% de los fallos en equipos industriales fueron incendios, el 22% de estos incendios fueron producidos por fallos eléctricos, el 6% por ignición espontánea, el 7% por sobrecalentamientos y el 3% por chispas. [15].

La Asociación Internacional de Servicios de Rescate y Bomberos constata que se producen hasta 266 millones de euros en daños a la propiedad de edificios industriales cada año y según la European Fire Academy, se piden hasta 2,5 millones de euros en reclamaciones de seguros [15].

En las instalaciones eléctricas la mayoría de los fallos se producen por arco eléctrico, esto es debido a que el cable está dañado o la conexión se suelta.

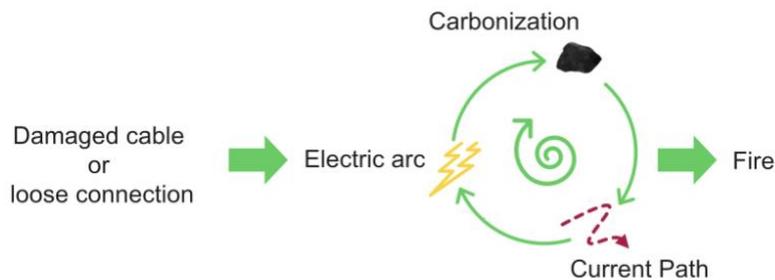
## 4.3. FALLO POR ARCO ELÉCTRICO

Podemos definir arco eléctrico como “la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa.” [16]

Cada año, a nivel mundial, mueren cientos de trabajadores debido a arcos eléctricos. Según el departamento de estadísticas laborales de los Estados Unidos, cada año existe un promedio de 1710 quemaduras eléctricas [16]. Esta cifra tiene una tendencia descendente, ya que actualmente se toman mayores medidas de seguridad además de que existen las protecciones adecuadas para el trabajador.

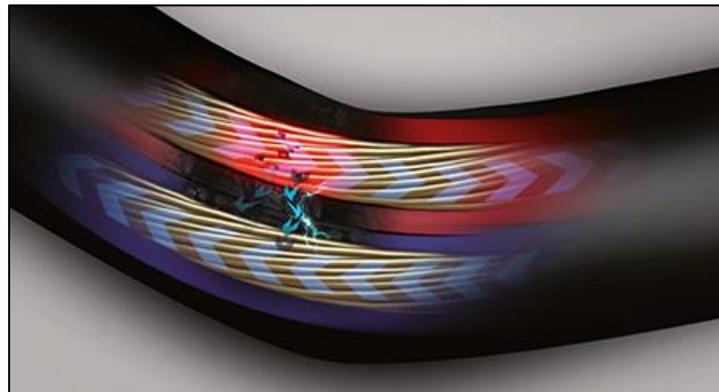
En las instalaciones eléctricas se produce arco eléctrico bien por un cable dañado, en mal estado o por una mala conexión o una conexión debilitada. Esto produce un aumento de temperatura, que viene con

la carbonización del cable y del material aislante. Como el carbono se deposita de forma no homogénea, las corrientes que lo atraviesan generan arcos eléctricos que facilitan su recorrido. Entonces, cada arco amplifica la carbonización de los materiales aislantes, produciéndose así una reacción que se mantiene hasta que la cantidad de carbono es lo suficientemente alta como para que un arco lo inflame espontáneamente hasta llegar por accidente al incendio del aislamiento del cable o el enchufe.



*Ilustración 13 Proceso de formación de arco eléctrico*

Fuente: Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC»



*Ilustración 14 Fenómeno del arco eléctrico*

Fuente: Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC»

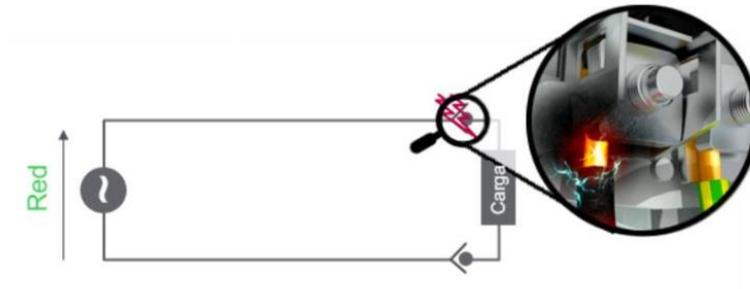
Podemos distinguir dos tipos de fallo por arco eléctrico: en serie y en paralelo.

### 4.3.1. ARCO ELÉCTRICO EN SERIE

Este fenómeno resulta de un arco entre dos partes del mismo conductor.

Cuando un conductor está dañado o una conexión no está bien apretada, se produce un punto caliente localizado que carboniza los materiales aislantes en las proximidades de ese conductor.

Al ser el carbono un material conductor, permite el flujo de la corriente que se vuelve excesiva en varios puntos.



*Ilustración 15 Arco eléctrico en serie*

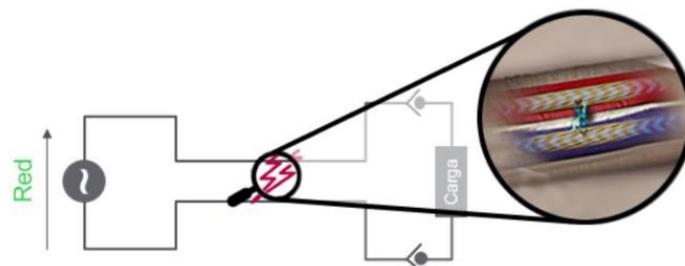
Fuente: Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC»

### 4.3.2. ARCO ELÉCTRICO EN PARALELO

Cuando los materiales aislantes entre dos conductores tensos están dañados, puede establecerse una corriente importante entre los dos conductores, pero es demasiado débil para ser considerada como un cortocircuito, y es indetectable por los dispositivos de protección de corriente residual, ya que esta corriente no va a tierra.

Al pasar por estos materiales aislantes, estas corrientes de fuga optimizan sus trayectorias generando arcos que transforman gradualmente los materiales aislantes en carbón.

La característica común de estos fenómenos es la ignición del fuego por arcos, por lo que la detección de la presencia de arcos es una forma de evitar que se conviertan en un desastre.



*Ilustración 16 Arco eléctrico en paralelo*

Fuente: Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC»

## 4.4. PROTECCIONES CONTRA ARCO ELÉCTRICO

Actualmente, en España, según la normativa vigente más actual, los detectores de arco eléctrico, AFDD se recomiendan en la Guía de Aplicación del Reglamento de Baja Tensión desde junio de 2019 (ITC-BT 29) basados en la norma UNE-EN 62606 y con criterios de selección según UNE-HD 60364-5 [17].

La norma IEC 60364 recomienda instalar dispositivos de detección de arcos eléctricos en los siguientes entornos [17]:

- Alojamientos para dormir, como dormitorios (en residencial), hoteles, residencias etc.
- Lugares con materiales de construcción inflamables, como edificios de madera
- Estructuras de propagación de incendios, como edificios de gran altura
- Lugares con riesgo de incendio debido a la naturaleza de los materiales procesados o almacenados, como graneros, talleres de carpintería, almacenes de materiales inflamables...
- Lugares con riesgo de poner en peligro bienes irremplazables, como museos

Utilizamos dispositivos AFDD para proteger los circuitos eléctricos en caso de arco eléctrico. Se instalan en el origen del circuito final que quiera protegerse, los AFDD deben reaccionar rápidamente en caso de defecto de arco y aislar el circuito en un tiempo limitado. Estos dispositivos analizan de manera continua la señal eléctrica de la instalación mediante un algoritmo, para su correcto funcionamiento debe estar conectado en serie con un dispositivo contra cortocircuitos.

Cogiendo como referencia el modelo Acti9 iC40N ARC Arc fault detection device de Schneider, ante un arco eléctrico en serie, el dispositivo se inicia con 2,5 A y se dispara en 1 segundo, en paralelo se inicia con 75A y se dispara en 120ms. En el caso que el arco eléctrico ocurra en un circuito paralelo de fase a tierra, éste se inicia con 5A, y se dispara en 500ms. [18]



Ilustración 17 Modelo Acti9 iC40N

Fuente: Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC»

# **MÉTODO CIENTÍFICO EXPERIMENTAL**

5

En este apartado describiremos qué materiales son necesarios para llevar a cabo el experimento, y un paso a paso de cómo se ha montado cada componente y la función de estos.

## 5.1. MATERIALES

- **MULTÍMETROS DE PETACA**

Es un dispositivo de medición electrónico portátil que puede medir una serie de valores eléctricos, como la tensión y la resistencia.



*Ilustración 19 Multímetro de petaca HP*

Fuente: <https://keysight.com>

Para nuestro experimento, el multímetro de petaca es útil porque puede medir los valores eléctricos en el circuito, permitiéndonos controlar el comportamiento del circuito a medida que ajustamos el par de apriete en las conexiones atornilladas.

Midiendo los valores de tensión en el circuito, podemos determinar la potencia que fluye a través del circuito y calcular la cantidad de calor generado. Esta información puede utilizarse para correlacionar el par de apriete de las conexiones atornilladas con las lecturas de temperatura obtenidas de la cámara térmica.

Además, el multímetro de petaca puede ayudarnos a garantizar que los parámetros eléctricos del circuito se encuentran dentro de los límites de seguridad durante el experimento. Si los valores de corriente o tensión superan los niveles de seguridad, podemos ajustar el circuito o interrumpir el experimento para evitar daños en el equipo o riesgos eléctricos.

- **MULTÍMETRO FLUKE 87V MAX**



*Ilustración 22  
Multímetro Fluke 87V  
MAX*

El Fluke 87V Max es un multímetro digital de alta calidad diseñado específicamente para su uso en entornos industriales exigentes. Estas son algunas de las características y ventajas del Fluke 87V Max:

El Fluke 87V Max ofrece mediciones de alta precisión de tensión y resistencia, capacitancia y temperatura, lo que garantiza que podamos obtener lecturas precisas de

los parámetros eléctricos de nuestro circuito.

Fuente:  
<https://www.fluke.com/>

**Funciones de seguridad:** El Fluke 87V Max incluye funciones de seguridad integradas, como un termómetro integrado y un filtro de paso bajo que nos permite medir con precisión la tensión y la frecuencia en variadores de frecuencia.

**Fácil de usar:** El Fluke 87V Max es fácil de usar, con una gran pantalla retroiluminada que nos permite ver nuestras medidas con claridad, incluso en zonas poco iluminadas.

**Versátil:** El Fluke 87V Max ofrece una amplia gama de funciones de medida, incluyendo capacitancia, frecuencia, ciclo de trabajo y comprobación de diodos, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones.

**Registro de datos:** El Fluke 87V Max incorpora una función de registro de datos que nos permite registrar nuestras medidas a lo largo del tiempo, lo que facilita el seguimiento de los cambios en el comportamiento del circuito a medida que ajustamos el par de apriete en las conexiones atornilladas.

- **PINZA AMPERIMÉTRICA FLUKE 325**



*Ilustración 23 Pinza amperimétrica Fluke 325*

La pinza amperimétrica Fluke 325 es una herramienta útil para medir la corriente en un circuito sin tener que desconectar ningún cable. Estas son algunas de las características y ventajas:

**No invasiva:** La pinza amperimétrica Fluke 325 mide la corriente sin tener que interrumpir el circuito ni desconectar ningún cable, lo que la convierte en una herramienta cómoda y segura para medir la corriente.

**Medidas precisas:** La pinza amperimétrica Fluke 325 tiene una capacidad de detección True RMS (Root Mean Square) que le permite proporcionar lecturas precisas de la corriente alterna y continua. También tiene un rango de medida de corriente CA/CC de 400 amperios, lo que la hace adecuada para una amplia gama de aplicaciones.

Fuente:

<https://es.farnell.com>

**Características de seguridad:** La pinza amperimétrica Fluke 325 cuenta con funciones de seguridad integradas, como una mordaza de gran tamaño que puede alojar conductores de hasta 30 mm de diámetro y un comprobador de continuidad integrado que nos avisa de la presencia de un circuito.

**Registro de datos:** La pinza amperimétrica Fluke 325 incorpora una función de registro de datos que nos permite registrar nuestras medidas a lo largo del tiempo, lo que facilita el seguimiento de los cambios en el comportamiento del circuito a medida que ajustamos el par de apriete en las conexiones atornilladas.

**Durabilidad:** La pinza amperimétrica Fluke 325 está fabricada para durar, con un diseño resistente que puede soportar duras condiciones de trabajo.

## • MAGNETOTÉRMICOS CHINT



*Ilustración 24*  
*Magnetotérmicos*  
*Chint*

Fuente:  
<https://www.leroymerlin.es>

Los magnetotérmicos Chint son un tipo de disyuntor que combina protección magnética y térmica para evitar daños en los circuitos eléctricos. Estas son algunas de las características y ventajas:

**Doble protección:** Los magnetotérmicos Chint ofrecen protección magnética y térmica, lo que los hace más fiables y eficaces a la hora de evitar daños en los circuitos eléctricos. La protección magnética dispara el disyuntor si se produce un aumento repentino de la corriente, mientras que la protección térmica dispara el disyuntor si la corriente se mantiene por encima de un determinado nivel durante un periodo prolongado.

**Fáciles de instalar:** Los magnetotérmicos Chint son fáciles de instalar, con instrucciones sencillas y claras que facilitan la correcta configuración del disyuntor.

**Fiables:** Los Magnetotérmicos Chint están diseñados para ser altamente fiables, con componentes y materiales de alta calidad que garantizan un rendimiento duradero.

**Personalizables:** Los Magnetotérmicos Chint vienen en una variedad de tamaños y clasificaciones de corriente, lo que facilita encontrar el disyuntor adecuado para nuestras necesidades específicas.

**Económicos:** Los magnetotérmicos Chint son rentables en comparación con otras marcas de disyuntores, lo que los convierte en una buena opción para proyectos con un presupuesto limitado.

**Seguridad:** Los magnetotérmicos Chint incorporan funciones de seguridad, como un botón de prueba que nos permite comprobar el funcionamiento del disyuntor y un indicador de disparo que nos avisa cuando el disyuntor se ha disparado.

- **DIFERENCIALES CHINT**



*Ilustración 25*  
*Diferenciales Chint*

Fuente:  
<https://www.leroymerlin.es>

Los Diferenciales Chint, también conocidos como Dispositivos de Corriente Residual (DDR), son dispositivos de seguridad diseñados para detectar e interrumpir rápidamente la corriente eléctrica en caso de fallo o fuga a tierra. Éstas son algunas de las características y ventajas de los diferenciales Chint que los hacen útiles para nuestro experimento:

**Seguridad:** Los diferenciales Chint proporcionan una capa adicional de seguridad para nuestro circuito eléctrico al detectar e interrumpir la corriente eléctrica en caso de fallo o fuga a tierra. Esto ayuda a evitar descargas eléctricas y otros peligros eléctricos.

**Tiempo de respuesta rápido:** Están diseñados para responder rápidamente a las faltas a tierra, con tiempos de disparo tan cortos como 30 milisegundos. Esto ayuda a minimizar el riesgo de lesiones o daños a los equipos en caso de fallo eléctrico.

**Fáciles de instalar:** Los diferenciales Chint son fáciles de instalar, con instrucciones sencillas y claras que facilitan la correcta configuración del dispositivo. Pueden instalarse en el cuadro principal o en un subcuadro, dependiendo de nuestras necesidades específicas.

**Personalizables:** Los diferenciales Chint vienen en una gran variedad de tamaños y valores de corriente, lo que facilita encontrar el dispositivo adecuado para nuestras necesidades específicas. También se pueden configurar con distintos niveles de sensibilidad, en función del nivel de protección que necesitemos.

**Botón de prueba incorporado:** Los diferenciales Chint tienen un botón de prueba incorporado que nos permite comprobar la funcionalidad del dispositivo y asegurarnos de que funciona correctamente.

- **CONEXIONES DE ENSAYO. BORNAS DE APRIETE POR TORNILLO O CLEMAS**



*Ilustración 26*  
*Clemas*

Fuente:  
<https://www.leroymerlin.es>

Las clemas son un tipo de conector eléctrico que utiliza un tornillo para asegurar y establecer una conexión entre cables y equipos eléctricos. Estas son algunas de las características y ventajas:

**Versatilidad:** Las clemas se pueden utilizar con una amplia gama de tamaños de cable, lo que los convierte en una opción versátil para conectar diferentes tipos de equipos eléctricos.

**Seguridad:** Los terminales de tornillo proporcionan una conexión segura y fiable, ya que el tornillo garantiza que el cable esté firmemente sujeto en su lugar y hace que sea menos probable que la conexión se suelte.

**Fáciles de instalar:** Los terminales de tornillo son fáciles de instalar, con un diseño sencillo que permite conectar rápida y fácilmente los cables a los equipos eléctricos.

**Duraderos:** Los terminales de tornillo suelen estar fabricados con materiales de alta calidad, como latón o cobre, lo que los hace duraderos y capaces de soportar condiciones de funcionamiento duras.

**Mantenimiento:** Los terminales de tornillo son fáciles de mantener, ya que los tornillos se pueden apretar periódicamente para garantizar que la conexión siga siendo segura.

- **PLACA DE PLADUR**



*Ilustración 27 Placa de pladur*

Fuente:  
<https://www.slauf.com>

El pladur es un material muy utilizado en la construcción por su facilidad de instalación y su bajo coste. En nuestro experimento, utilizaremos pladur para montar el circuito eléctrico y evitar interferencias térmicas en la cámara debido a la reflectividad. Estas son algunas de las características y ventajas del pladur:

**Aislante:** El pladur es un buen aislante, lo que significa que puede ayudar a evitar la pérdida o ganancia de calor del ambiente. Esto puede ayudar a mantener una temperatura más estable dentro del circuito eléctrico y evitar fluctuaciones de temperatura no deseadas.

**Resistencia al fuego:** Los paneles de yeso son inherentemente resistentes al fuego, lo que puede ayudar a evitar la propagación de incendios dentro del circuito eléctrico. Esto es especialmente importante en nuestro experimento, ya que trabajaremos con altas temperaturas y corrientes eléctricas.

**Reflectividad:** El pladur tiene una baja reflectividad, lo que puede ayudar a evitar cualquier interferencia térmica en la cámara causada por los reflejos de otras superficies. Esto puede garantizar que nuestra cámara térmica sea capaz de medir con precisión la temperatura de los componentes eléctricos y las conexiones atornilladas.

**Dúctil:** El pladur es un material ligero y fácil de trabajar, lo que puede facilitar el montaje y la colocación del circuito eléctrico. También se puede cortar fácilmente a medida y con herramientas estándar.

**Económico:** El pladur es un material rentable, que puede ayudar a mantener bajo el coste total de nuestro experimento. Está muy extendido y se puede adquirir fácilmente en la mayoría de las tiendas de materiales de construcción.

- **CÁMARA TÉRMICA FLIR T540**



*Ilustración 28 Cámara térmica FLIR T540*

Fuente: <https://es.rs-online.com/>

La cámara térmica Flir T540 es una herramienta potente y versátil para nuestro experimento. Algunas de sus características y ventajas son:

**Alta resolución:** La Flir T540 tiene un detector de alta resolución (464 x 348 píxeles), que puede proporcionar imágenes térmicas detalladas del circuito eléctrico y las conexiones atornilladas. Esto puede ayudarnos a medir con precisión la temperatura y detectar cualquier punto caliente o anomalía térmica.

**Amplio rango de temperatura:** La Flir T540 puede medir temperaturas que oscilan entre -20 °C y 1200 °C, lo que resulta ideal para nuestro experimento, ya que trataremos con altas temperaturas en el circuito eléctrico.

**Sensibilidad térmica:** La Flir T540 tiene una sensibilidad térmica de 0,03°C, lo que puede ayudarnos a detectar incluso pequeñas diferencias de temperatura dentro del circuito. Esto puede ser especialmente útil para identificar zonas de posible sobrecalentamiento o inestabilidad térmica.

**Múltiples modos de medición:** El Flir T540 ofrece múltiples modos de medición, incluyendo medición puntual, medición de área y análisis isotérmico. Estos modos pueden ayudarnos a analizar los datos de temperatura de diferentes maneras e identificar cualquier tendencia o patrón.

**Conectividad:** El Flir T540 tiene conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, lo que nos puede permitir transferir los datos de temperatura a un ordenador o dispositivo móvil para su posterior análisis. Esto puede ayudarnos a analizar rápida y fácilmente los resultados de nuestro experimento y realizar los ajustes necesarios.

- **CARGA VARIABLE**



*Ilustración 29 Resistencia de cartucho*

Fuente:  
<https://www.resistencias.com>

El calentador que utilizaremos como elemento puramente resistivo en el circuito tiene varias características y ventajas:

**Potencia calorífica constante:** El calentador está diseñado para proporcionar una salida de calor constante, lo cual es esencial para nuestro experimento, ya que necesitamos mantener una temperatura estable dentro del circuito.

**Alta resistencia:** El calentador tiene una resistencia alta, lo que significa que consumirá una cantidad significativa de corriente cuando se conecte al circuito eléctrico. Esto nos permitirá medir el efecto de diferentes pares

en el circuito eléctrico y las conexiones atornilladas.

**Fácil de controlar:** El calentador es fácil de controlar y se puede ajustar a diferentes configuraciones de temperatura, lo que nos puede ayudar a variar la temperatura dentro del circuito y observar el efecto de diferentes pares.

**Fiabilidad:** El calentador es un componente fiable y duradero, lo cual es esencial para nuestro experimento, ya que necesitamos asegurarnos de que no fallará ni funcionará mal durante el proceso de prueba.

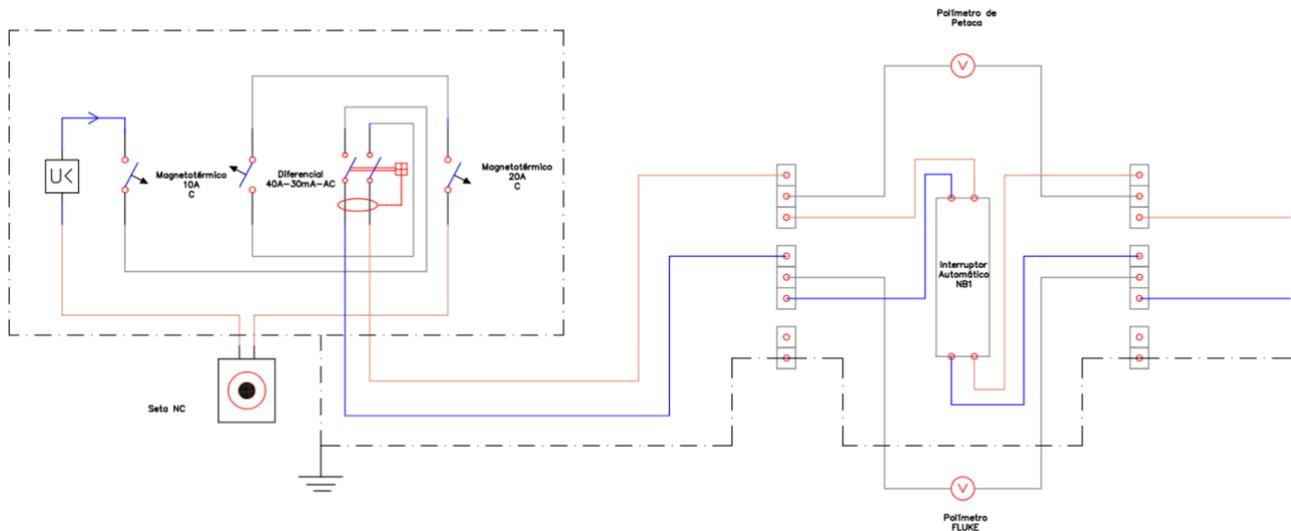
**Funciones de seguridad:** El calentador tiene funciones de seguridad integradas, como el apagado automático y la protección contra sobrecalentamiento, que pueden evitar cualquier peligro potencial o accidente durante el experimento.

## 5.2. MONTAJE EXPERIMENTAL

Se estableció que el montaje experimental consistiría en construir un circuito eléctrico compuesto por dos bloques: la caja de protección y el banco de pruebas con las conexiones atornilladas.

En primer lugar, la caja de protección compuesta por un interruptor general de corte (IGA) con seta con un contacto NC. La seta tiene un magnetotérmico (PIA) unipolar de 10 A que protege la maniobra, seguido por un diferencial AC de sensibilidad 30mA. Abajo el circuito tiene un magnetotérmico (PIA) de 20 A, curva C.

El segundo bloque del circuito se compone por una conexión atornillada sobre la que tomaremos las mediciones de temperatura. A la entrada y a la salida tenemos dos bornas de conexión Wago con tres puntos de conexión cada una. En paralelo cada una tiene conectado un voltímetro. Todo esto va conectado a un aparato puramente resistivo.



*Ilustración 31 Esquema eléctrico*

Fuente: elaboración propia

Todo lo descrito anteriormente va montado sobre una placa de pladur en la pared para evitar las interferencias por reflexión a la hora de tomar las fotografías térmicas. La cámara térmica se sitúa en frente para realizar las mediciones.

El experimento tiene como objetivo obtener una relación entre la temperatura y el par de apriete en uniones atornilladas y ver cómo el par de apriete puede afectar al circuito hasta el punto de provocar un fallo por arco eléctrico. Para ello, se seguirían los siguientes pasos:

En primer lugar, se prepara la superficie de pladur y se coloca sobre ella todos los elementos del circuito. Las conexiones se disponen siguiendo un patrón específico que permita que la corriente eléctrica fluya por el circuito según lo previsto. Los pares de apriete se ajustan conforme a lo indicado por el fabricante.

A continuación, se enciende la cámara termográfica y se coloca delante del circuito. La cámara se calibra siguiendo las instrucciones del fabricante para garantizar mediciones precisas de la temperatura. El objetivo es medir la temperatura de los diferentes componentes y de las uniones atornilladas del circuito.

Se conecta la fuente de carga eléctrica variable al circuito y conectamos la carga variable. Los valores de corriente utilizados en el experimento se seleccionaron basándose en el flujo de corriente esperado a través del circuito en escenarios de uso típicos sabiendo que nuestro rango debe ir de 0 a 16<sup>a</sup>, por lo que escogeremos valores que estén comprendidos entre estos extremos.

Las lecturas de temperatura se toman utilizando la cámara térmica. Los multímetros se utilizan para medir los valores de corriente y tensión en el circuito. El valor de par recomendado por el fabricante se utiliza como valor de referencia para el experimento.

A continuación, se aumenta gradualmente el par en las conexiones atornilladas en pequeños incrementos o disminuciones. Después de cada incremento o disminución, se vuelven a tomar las lecturas de temperatura utilizando la cámara térmica, y se utilizan los multímetros para medir los valores de corriente y tensión en el circuito.

Se repiten los dos pasos anteriores para cada valor de corriente utilizado en el experimento. Para cada combinación de par y corriente, las lecturas de temperatura se toman varias veces, en este caso consideramos cinco como una cantidad suficiente para garantizar la coherencia y obtener un valor medio de temperatura. Variamos los pares gradualmente.

El experimento continúa hasta completar el programa previsto (por determinar)

Los datos recogidos durante el experimento se analizan para determinar la relación entre el par y la temperatura en las uniones atornilladas por medio de análisis de regresión.

Se documentan y presentan los resultados, junto con recomendaciones sobre las mejores prácticas en el montaje y mantenimiento de circuitos eléctricos para evitar riesgos como incendios y fallos en los equipos.

### **5.3. MEDIDA DE LA RESISTENCIA EN LAS UNIONES ATORNILLADAS**

Podemos utilizar métodos empíricos o teóricos para obtener la resistencia en la unión atornillada.

Para medir la resistencia en la unión atornillada de manera empírica tendremos que usar el multímetro digital (DMM) para medir la caída de tensión en la conexión atornillada y, a continuación, calcular la resistencia mediante la ley de Ohm (también puede ser medida). Primero hay que desconectar la conexión atornillada y, a continuación, conectar el multímetro digital en paralelo con la conexión. Una vez conectado

el DMM, se aplica una corriente medida con las pinzas a la conexión y mide la caída de tensión a través de la conexión utilizando el DMM. También podemos utilizar un micro ohmímetro, que es un instrumento especializado diseñado específicamente para medir valores bajos de resistencia. Para utilizar el micro ohmímetro, lo conectamos a la conexión atornillada. A continuación, el micro ohmímetro aplicará una corriente conocida a la conexión y medirá la caída de tensión a través de la conexión para calcular la resistencia. [19].

Para calcular la resistencia eléctrica de una conexión atornillada en un circuito de corriente alterna mediante ecuaciones, hay que tener en cuenta los factores que afectan a la resistencia, como las dimensiones de la conexión, los materiales utilizados y la frecuencia de la corriente alterna. Vamos a partir de la fórmula más sencilla para calcular la resistencia eléctrica en un conductor [20]:

$$R = \rho * l/A \quad (\text{Ecuación 9})$$

La Ecuación 5 se corresponde con la Resistencia en un conductor, donde:

R es la resistencia en ohmios

$\rho$  (rho) es la resistividad del material en ohmios-metro

l es la longitud de la conexión en metros

A es el área transversal de la conexión en metros cuadrados

Para utilizar esta ecuación, necesitamos conocer la resistividad (medida de la facilidad con la que un material permite que la electricidad fluya a través de él, varía en función del material) del material utilizado para la conexión.

La resistividad de un material generalmente aumenta con la temperatura, y esto se puede explicar usando un coeficiente de temperatura de resistividad ( $\alpha$ ) y la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) [21]:

$$\rho = \rho_0 * (1 + \alpha * \Delta T) \quad (\text{Ecuación 11})$$

La Ecuación 6 se corresponde con la Resistividad, donde:

$\rho_0$  es la resistividad a una temperatura de referencia (a menudo temperatura ambiente)

$\alpha$  es el coeficiente de temperatura de resistividad para el material

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura de referencia

Si lo sustituimos en la ecuación original, se nos queda de la siguiente manera en la Ecuación 7:

Resistencia de un conductor:

(Ecuación 13)

$$R = \rho_0 * (1 + \alpha * \Delta T) * (L / A)$$

Para estimar la resistencia de una conexión atornillada en un circuito de corriente alterna hay que tener en cuenta factores adicionales que pueden afectar a la resistencia de la conexión, como la resistencia de contacto en la interfaz entre las dos superficies de contacto de la unión. Este término puede verse afectado por la temperatura, y puede introducir un término relacionado con la diferencia de temperatura. A medida que aumenta la temperatura, la resistencia de contacto normalmente disminuye debido al aumento de la expansión térmica y al reblandecimiento de las superficies de contacto.

Hay varios modelos que intentan incorporar el efecto de la temperatura en la resistencia de contacto en conexiones atornilladas, como el modelo de Holm y el modelo de Kanoh-Nishimura [22]. Estos modelos suelen utilizar ecuaciones empíricas para describir la dependencia de la temperatura de la resistencia de contacto.

El modelo de Kanoh-Nishimura relaciona la resistencia de contacto con la diferencia de temperatura entre las superficies de contacto:

$$R_c = R_0 \exp(-\beta \Delta T) \quad \text{(Ecuación 15)}$$

La Ecuación 8 se corresponde con la Resistencia de contacto, donde:

$R_c$  es la resistencia de contacto.

$R_0$  es la resistencia de contacto con diferencia de temperatura cero.

$\beta$  coeficiente de temperatura de la resistencia de contacto.

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre las superficies de contacto.

## 5.4. POTENCIA DISIPADA EN LA CONEXIÓN ELÉCTRICA

La potencia disipada ( $\Delta P$ ) representa el aumento de potencia debido al aumento de resistencia en la unión atornillada. Este valor indica la potencia sobrante que se está disipando como calor en la conexión [23].

Para obtener la potencia disipada debemos tener en cuenta la Ecuación 9: Potencia disipada:

$$\Delta P = P_{\text{inicial}} - P_{\text{nueva}} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Para obtener la potencia inicial medimos la intensidad y el voltaje en el circuito y usamos la siguiente fórmula:

$$P_{\text{inicial}} = V_{\text{inicial}} * I_{\text{inicial}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Para calcular la potencia nueva, aplicaremos el par de apriete deseado y calcularemos la resistencia de acuerdo con la ecuación 11 [24]:

$$R_{\text{nueva}} = R_{\text{inicial}} * (1 + \alpha * \Delta T) \quad (\text{Ecuación 21})$$

donde:

$R_{\text{inicial}}$  es la resistencia a una temperatura de referencia.

$\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica (que obtenemos a partir de catálogos de fabricantes).

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura de referencia.

Tras esto, podemos calcular la nueva intensidad que circula por el circuito utilizando la ley de Ohm en la ecuación 12:

$$I_{\text{nueva}} = V_{\text{inicial}} / R_{\text{nueva}} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Por último, calculamos la potencia nueva ( $P_{\text{nueva}}$ ) utilizando la Ecuación 13:

$$P_{\text{nueva}} = V_{\text{inicial}} * I_{\text{nueva}}. \quad (\text{Ecuación 25})$$

# RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## 6.1. RESULTADOS

Debido a dificultades técnicas y de recursos humanos, no ha sido posible realizar el experimento en los plazos previstos tras dos cursos académicos. Sin embargo, basándonos en la hipótesis y en los resultados esperados de la investigación, se podrían anticipar los siguientes resultados: el análisis de los datos recogidos debe revelar una clara correlación entre el par de apriete aplicado a las uniones atornilladas y los cambios de temperatura. Si se usa el par de apriete correcto e indicado y nos cercioramos de ello utilizando un destornillador dinamométrico, deberíamos comprobar que el rango de temperatura de funcionamiento es óptimo y no supone ningún peligro para la seguridad.

Si el par de apriete no es el indicado por el fabricante, observaremos un incremento anómalo de la temperatura, o bien por la presión excesiva en la unión, o bien por conexiones sueltas que tienen contacto intermitente, pudiendo llevar eventualmente a un fallo de la instalación eléctrica y a la producción de un arco eléctrico. Todo esto podría observarse en tiempo real con la cámara térmica, monitorizando así la instalación y pudiendo prevenir además posibles fallos futuros.

### 6.1.1. RESULTADOS TEÓRICOS

A continuación, presentamos un enfoque teórico para investigar el comportamiento de las uniones atornilladas en sistemas eléctricos. Aunque las limitaciones prácticas nos impidieron llevar a cabo el experimento previsto, vamos a utilizar ecuaciones y cálculos teóricos para estimar los principales parámetros descritos a lo largo del TFG como puede ser la resistencia de contacto, la resistencia del conductor o la temperatura estimada del conductor.

Aunque la ausencia de datos experimentales limita el nivel de certeza de nuestras conclusiones, el análisis teórico nos sirve como punto de partida para futuras investigaciones. Los parámetros y relaciones que vamos a calcular pueden guiar futuras configuraciones experimentales, permitiendo una recogida de datos más específica y la validación de las predicciones teóricas. Además, nuestro enfoque teórico contribuye al conjunto de conocimientos sobre la relación entre el par de apriete en uniones atornilladas y la temperatura del conductor allana el camino para futuras investigaciones en esta área de la ingeniería eléctrica.

Los dos parámetros desde los que partiremos serán la corriente y la tensión. La tensión representa el voltaje nominal del sistema eléctrico, fijado en 220V y la corriente que circula por el circuito eléctrico tendrá una gama de valores de corriente, que abarcará desde 0 A hasta 16 A, para nuestro caso partiremos de 3 amperios y realizaremos incrementos de 3 amperios. Realizaremos un total de 5 muestras, por lo que nuestra tabla 1 queda inicialmente así:

Tabla 1 intensidad y voltaje

Fuente: Elaboración propia

Cable 1,5 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Corriente (A)	Voltaje (V)
1	3	220
2	6	220
3	9	220
4	12	220
5	15	220

El primer parámetro que calcularemos será la temperatura real estimada en el conductor, para ello usamos la ecuación 14 que obtenemos en el Anexo 2 de la Guía de Aplicación del Reglamento de Baja Tensión [25]:

$$T = T_o + (T_{max} - T_o) * (I/I_{max})^2$$

(Ecuación14)

Donde:

$T_o$  es la temperatura ambiente en el conductor.

$T_{max}$  es la temperatura máxima admisible para el conductor según el tipo de aislamiento.

$I$  es la intensidad prevista para el conductor.

$I_{max}$  es la intensidad máxima admisible para el conductor según el tipo de aislamiento.

Con todo esto, suponemos una temperatura ambiente de 25°C ya que el experimento tendrá lugar en el laboratorio con temperatura controlada. Para la temperatura máxima admisible, suponemos 160°C tal y como nos indica el reglamento ITC-BT-07 en la tabla 2 [26].

Tabla 2 Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asignada al conductor

Fuente: ITC-BT-07

Tipo de Aislamiento seco	Temperatura máxima °C	
	Servicio permanente	Cortocircuito t ≤ 5s
Policloruro de vinilo (PVC)		
S ≤ 300 mm <sup>2</sup>	<b>70</b>	<b>160</b>
S > 300 mm <sup>2</sup>	<b>70</b>	<b>140</b>
Polietileno reticulado (XLPE)	<b>90</b>	<b>250</b>
Etileno Propileno (EPR)	<b>90</b>	<b>250</b>

Para la intensidad usaremos los valores definidos previamente y para la intensidad máxima usaremos la tabla A de intensidades máximas admisibles del ITC-BT-19 [27]:

Tabla 3 Intensidades admisibles para cables con conductores de cobre

Fuente: ITC-BT-19

Sección mm <sup>2</sup> COBRE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	16,5	19	20	21	24	--
2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	23	26	26,5	29	33	--
4	20	21	23	24	27	30	31	34	36	38	45	--
6	25	27	30	32	36	37	40	44	46	49	57	--
10	34	37	40	44	50	52	54	60	65	68	76	--
16	45	49	54	59	66	70	73	81	87	91	105	--
25	59	64	70	77	84	88	95	103	110	116	123	140
35	--	77	86	96	104	110	119	127	137	144	154	174
50	--	94	103	117	125	133	145	155	167	175	188	210
70	--	--	--	149	160	171	185	199	214	224	244	269
95	--	--	--	180	194	207	224	241	259	271	296	327
120	--	--	--	208	225	240	260	280	301	314	348	380
150	--	--	--	236	260	278	299	322	343	363	404	438
185	--	--	--	268	297	317	341	368	391	415	464	500
240	--	--	--	315	350	374	401	435	468	490	552	590
300	--	--	--	361	401	430	461	500	538	563	638	678
400	--	--	--	431	480	515	552	600	645	674	770	812
500	--	--	--	493	551	592	633	687	741	774	889	931
630	--	--	--	565	632	681	728	790	853	890	1028	1071

Se indican como 3x los circuitos trifásicos y como 2x los monofásicos.  
A efecto de las intensidades admisibles los cables con aislamiento termoplástico a base de poliolefina (Z1) son equivalentes a los cables con aislamiento de policloruro de vinilo (V).

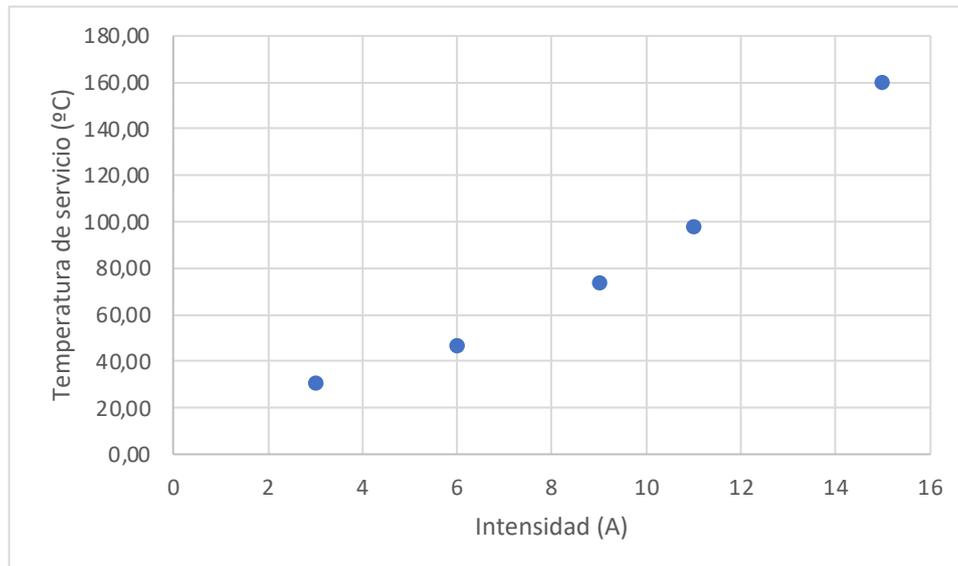
Con todo esto, si tenemos en cuenta los datos anteriores de intensidad y corriente, si cogemos una sección de cable de 1,5mm obtendríamos los siguientes resultados mostrados en la tabla 4:

Tabla 4 Temperatura real estimada en el conductor para cable 1,5mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Cable 1,5 mm <sup>2</sup>			
Nº Ensayo	Corriente (A)	Voltaje (V)	Temperatura(°C)
1	3	220	35,04
2	6	220	65,17
3	9	220	115,37
4	11	220	160,00

En la gráfica 1 puede verse la relación entre la temperatura de servicio y la corriente circulante para un cable de 1,5mm<sup>2</sup>:



Gráfica 1 Relación entre temperatura de servicio y corriente para cable de 1,5mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

En este caso, cuando la corriente empieza a fluir al principio, la temperatura puede aumentar rápidamente debido al efecto de calentamiento Joule. Sin embargo, a medida que el cable se calienta, la velocidad de aumento de la temperatura puede disminuir debido a factores como la disipación del calor y la capacidad del cable para disiparlo. La relación entre la temperatura y la corriente en un cable no suele ser logarítmica ni lineal, sino más bien compleja y no lineal. El comportamiento de la temperatura y la corriente de un cable depende de varios factores, como las propiedades del material del cable, la sección transversal, la longitud, el aislamiento y las condiciones ambientales. En este caso, además se observa como la temperatura aumenta drásticamente cuando se sobrepasan los 11 A estimados de corriente máxima para un cable de 1,5mm<sup>2</sup> de sección.

A continuación, vamos a calcular la resistencia en un conductor y la resistencia de contacto. La resistencia en un conductor se refiere a la oposición inherente que encuentra el flujo de corriente dentro del material conductor. Desempeña un papel importante en la determinación de la disipación de potencia y la caída de tensión a través de la conexión. La resistencia de contacto se refiere a la resistencia eléctrica entre dos o más elementos en uniones atornilladas o de otro tipo. La resistencia de contacto afecta a la calidad y fiabilidad de la conexión eléctrica, ya que puede introducir resistencia adicional y dificultar la transferencia eficaz de la corriente.

Para la resistencia de contacto utilizamos la ecuación 15 [28]:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{nP}}$$

Donde:

$\rho$  es la resistividad eléctrica, para este caso, el cobre es  $1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ .

H es la dureza del material, para el cobre es  $3,43 \cdot 10^8 \frac{N}{m^2}$ .

n es el número de puntos de contacto entre el cable y la superficie.

P es la fuerza ejercida en la unión, la obtenemos a partir del par y la distancia.

Esta ecuación depende por tanto del número de puntos de contacto y de la presión de contacto. Si tomamos el par de apriete recomendado por el fabricante, 2Nm [29] y consideramos que la distancia entre la unión atornillada y el cable es de 20mm, valor estándar recomendado para cuadros y conmutadores según la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, National Electrical Manufacturers Association) [30]. La presión de contacto es el cociente entre el par de apriete y la distancia entre elementos, para los datos mencionados obtenemos una presión de 100N.

A continuación, en la tabla 5 se muestra cómo la presión de contacto queda definida según los pares de apriete que vamos a utilizar para calcular la resistencia de contacto:

Tabla 5 Presión de contacto según pares de apriete

Fuente: elaboración propia

Cable 1,5 mm <sup>2</sup>	
Par de apriete (Nm)	P(N)
1	50
1,5	75
2	100
2,5	125
3	150

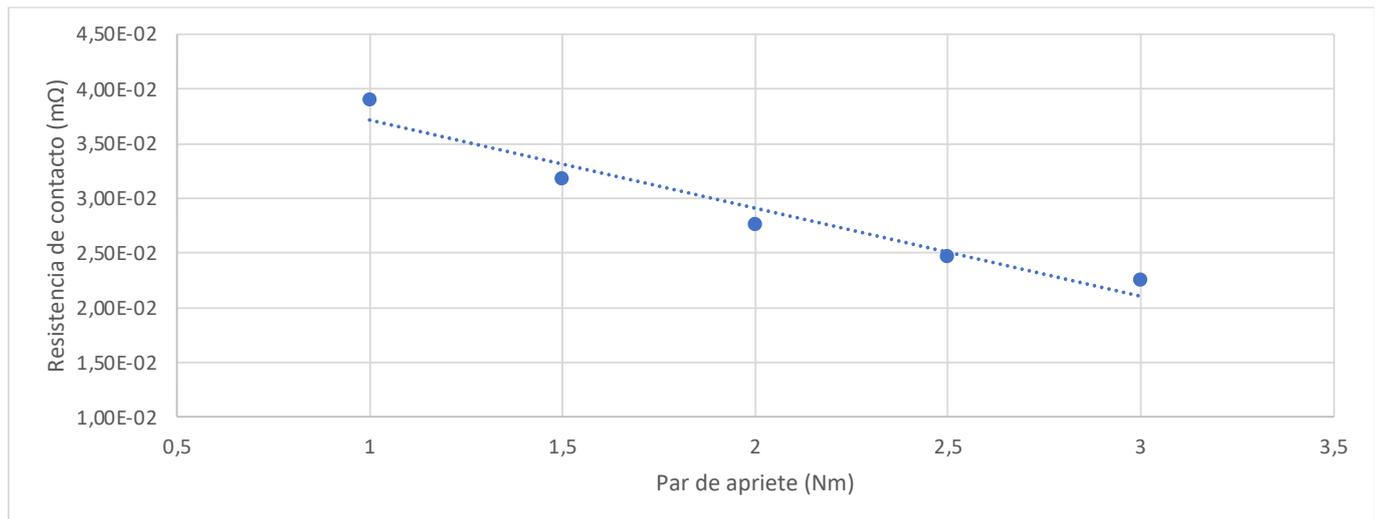
En la tabla 6 mostrada a continuación, podemos observar cómo esta presión de contacto afecta a la resistencia de contacto de la siguiente manera:

Tabla 6 Resistencia de contacto

Fuente: elaboración propia

Cable 1,5 mm <sup>2</sup>			
Nº Ensayo	Par apriete (Nm)	Resistencia de contacto Rc ( $\Omega$ )	Resistencia de contacto Rc (m $\Omega$ )
1	1	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$
2	1,5	$3,18 \cdot 10^{-5}$	$3,18 \cdot 10^{-2}$
3	2,5	$3,90 \cdot 10^{-5}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$
4	2,5	$2,47 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^{-2}$
5	3	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$

En la gráfica 2 podemos observar la relación lineal que sigue el par de apriete con respecto la resistencia de contacto:



Gráfica 2 resistencia de contacto con respecto par de apriete

Fuente: elaboración propia

Aumentamos los valores de par de 1 Nm a 3 Nm, la resistencia de contacto disminuye de  $3,90 \cdot 10^{-2}$  m $\Omega$  a  $2,25 \cdot 10^{-2}$  m $\Omega$ , por lo que estamos ante una relación inversamente proporcional entre el par y la resistencia de contacto.

Esto significa que a medida que aumenta el par aplicado a la conexión atornillada, la resistencia de contacto tiende a disminuir. Esta relación es esperable porque la aplicación de un valor de par de apriete más elevado puede mejorar el contacto entre las superficies de contacto, reduciendo cualquier separación, oxidación o contaminantes que puedan impedir una buena conductividad eléctrica. Para el

propósito de nuestra investigación, mantendremos el par constante en 2Nm e iremos variando el resto de los parámetros.

Para la resistencia del conductor utilizaremos la ecuación 16 [31]:

$$R = \rho_o \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot \left(\frac{L}{A}\right) \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

$\rho_o$  es la resistividad eléctrica a temperatura ambiente, para este caso, el cobre es  $1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ .

$\alpha$  es el coeficiente de temperatura de resistividad para el material, para el cobre  $0,0038 \frac{1}{^{\circ}C}$ .

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura con respecto a la temperatura de referencia (temperatura ambiente).

L es la longitud de cable en metros, para este caso vamos a considerar 30cm.

A es la sección del conductor.

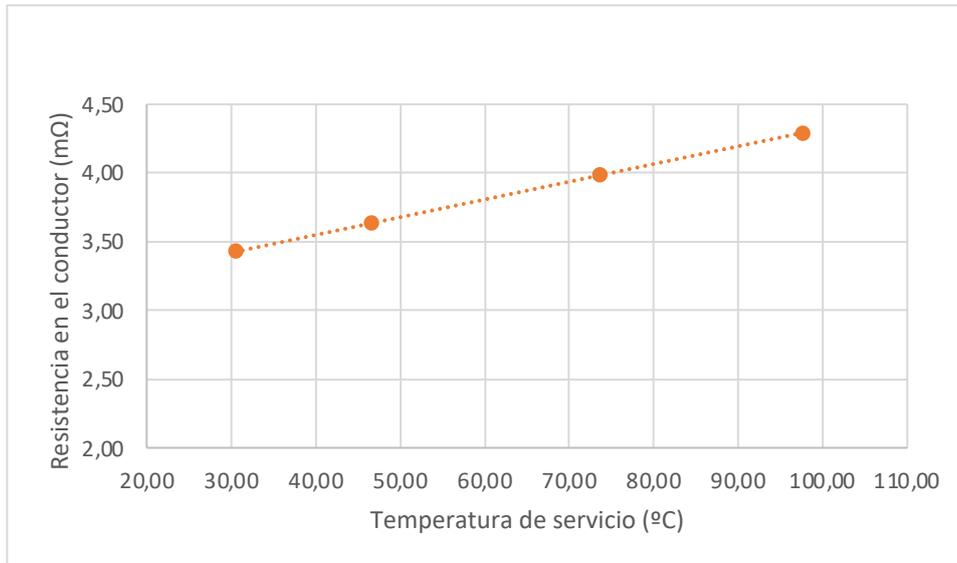
Tras observar los parámetros de los que depende la ecuación, podemos observar que la temperatura del conductor y la sección del conductor van a ser los principales parámetros que nos afectarán a la hora de realizar cálculos.

Para un cable con sección de  $1,5 \text{ mm}^2$  y basándonos en las temperaturas obtenidas en la tabla 4 para los valores de intensidad aportada, obtenemos la tabla 7 y la gráfica 3 con los valores de la resistencia:

Tabla 7 Resistencia del conductor para cable  $1,5 \text{ mm}^2$

Fuente: elaboración propia

Cable $1,5 \text{ mm}^2$			
Nº Ensayo	Temperatura( $^{\circ}C$ )	Resistencia Conductor ( $\Omega$ )	Resistencia Conductor (m $\Omega$ )
1	35,04	$3,49 \cdot 10^{-3}$	3,49
2	65,17	$3,87 \cdot 10^{-3}$	3,87
3	115,37	$4,51 \cdot 10^{-3}$	4,51
4	160,00	$5,08 \cdot 10^{-3}$	5,08



Gráfica 3 Relación entre temperatura de servicio y resistencia del conductor

Fuente: elaboración propia

Para este caso, podemos observar cómo conforme la temperatura de servicio aumenta también lo hace la resistencia, esto es debido a que a mayor temperatura mayor energía en los átomos y moléculas, lo que implica una mayor vibración entre ellos, dificultando el movimiento de electrones provocando una mayor resistencia.

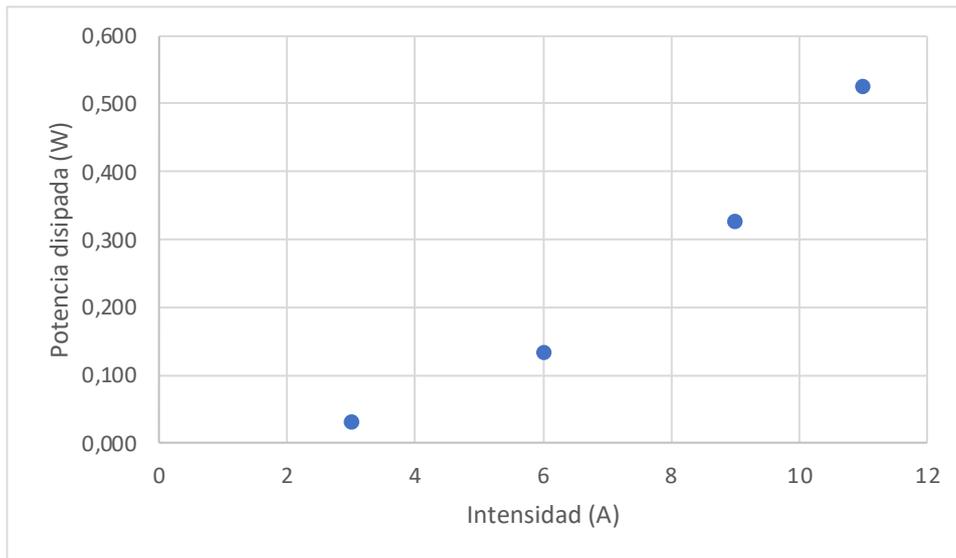
Por último, calcularemos en la tabla 8 la potencia disipada en la resistencia para nuestro cable de 1,5mm<sup>2</sup>, para ello, utilizaremos la fórmula  $P=I^2 \cdot R$  siendo R la resistencia del conductor más la resistencia de contacto que hemos calculado:

Tabla 8 Potencia disipada en la resistencia para cable 1,5mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Cable 1,5 mm <sup>2</sup>					
Nº Ensayo	Corriente (A)	Resistencia Total (mΩ)	P_inicial (W)	P_disipada (W)	ΔP (W)
1	3	3,52	660	0,032	659,97
2	6	3,90	1320	0,141	1319,86
3	9	4,55	1980	0,369	1979,63
4	11	5,11	2420	0,618	2419,38

En la gráfica 4 mostramos la relación entre la potencia disipada y la corriente:



Gráfica 4 Relación entre potencia disipada y corriente

Fuente: elaboración propia

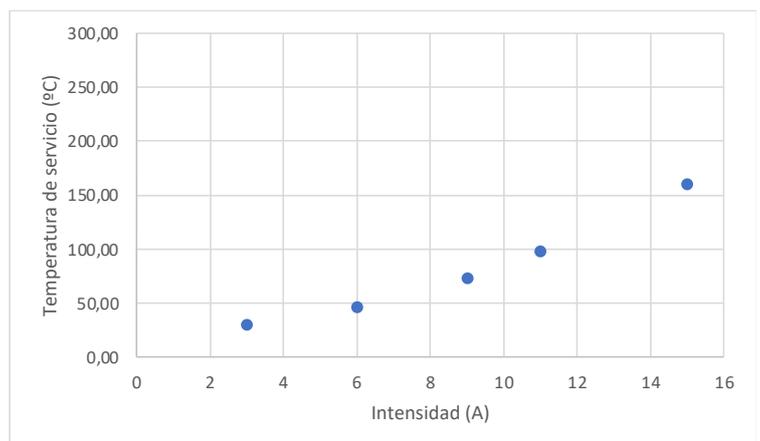
Tras realizar estos cálculos para un cable con sección de 1,5mm<sup>2</sup>, vamos a realizarlos también para cables con secciones de 2,5 mm<sup>2</sup>, 4mm<sup>2</sup> y 6 mm<sup>2</sup>. La resistencia de contacto se mantendrá constante ya que los pares de apriete no van a alterarse.

A continuación, vamos a mostrar la intensidad frente a la temperatura de servicio para las distintas secciones de cable:

Tabla 9 Intensidad frente a Temperatura. Cable 2,5mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Cable 2,5 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Corriente (A)	Temperatura(°C)
1	3	30,40
2	6	46,60
3	9	73,60
4	11	97,60
5	15	160,00



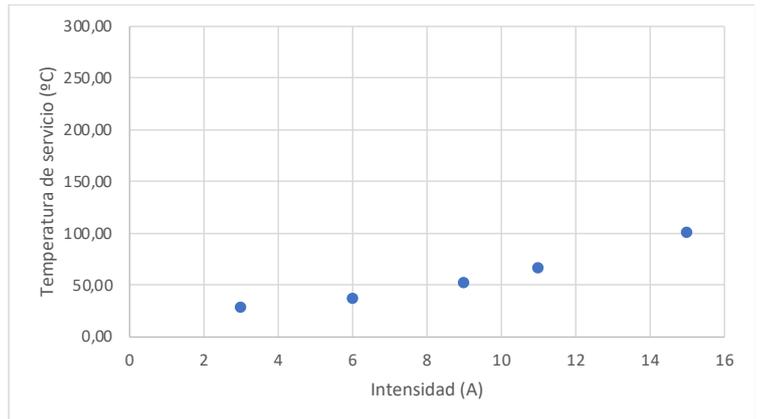
Gráfica 5 Intensidad frente a Temperatura. Cable 2,5 mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Tabla 10 Intensidad frente a Temperatura. Cable 4 mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Cable 4 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Corriente (A)	Temperatura(°C)
1	3	28,04
2	6	37,15
3	9	52,34
4	11	65,84
5	15	100,94



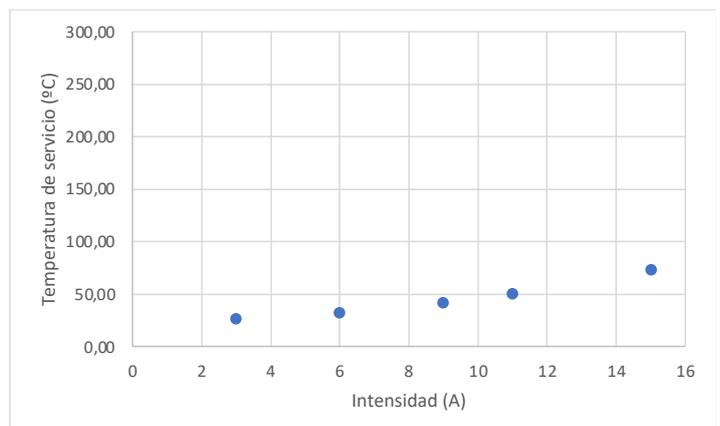
Gráfica 6 Intensidad frente a Temperatura. Cable 4 mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Tabla 11 Intensidad frente a Temperatura. Cable 6mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

Cable 6 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Corriente (A)	Temperatura(°C)
1	3	26,94
2	6	32,78
3	9	42,50
4	11	51,14
5	15	73,60



Gráfica 7 Intensidad frente a Temperatura. Cable 6 mm<sup>2</sup>

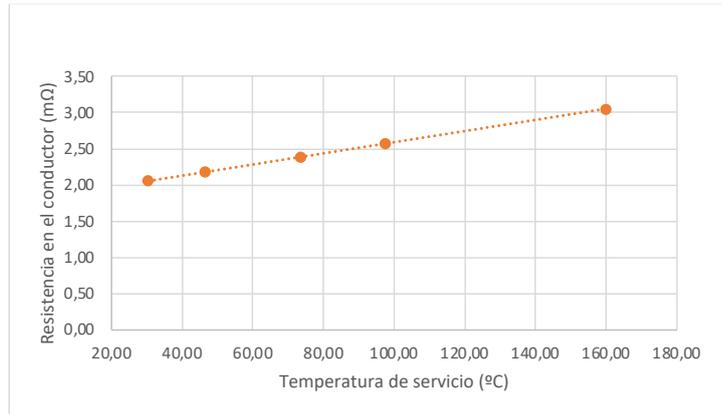
Fuente: elaboración propia

Aquí podemos ver como el cable de menor sección se ve perjudicado a mayores valores de intensidad, siendo las temperaturas mucho mayores en los valores límites. Esto es debido a que la sección de cable más pequeña tiene una resistencia relativamente mayor que una sección de cable más grande. Como resultado, cuando fluye la misma intensidad de corriente por ambos cables, la sección de cable más pequeña experimenta una mayor caída de tensión y genera más calor. Además, la sección de cable más pequeña tiene una superficie menor en comparación con la sección de cable más grande. Dado que la disipación de calor se produce principalmente a través de la superficie del cable, la sección de cable más pequeña tiene una capacidad reducida para disipar el calor generado.

A continuación, vamos a mostrar la resistencia del conductor frente a la temperatura de servicio para las distintas secciones de cable:

Tabla 12 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 2,5 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

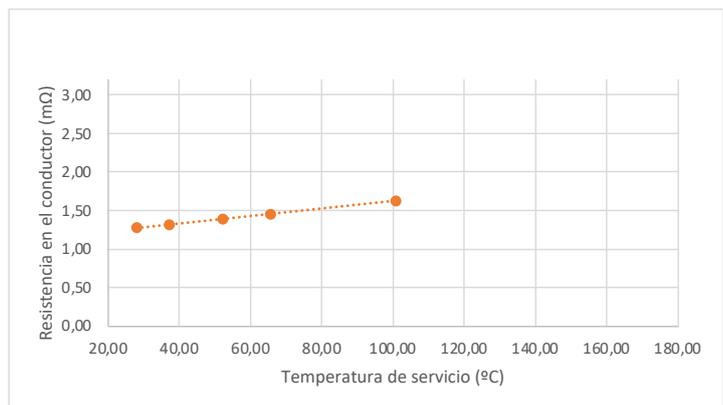
Cable 2,5 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Temperatura(°C)	Resistencia Conductor (mΩ)
1	30,40	2,06
2	46,60	2,18
3	73,60	2,39
4	97,60	2,57
5	160,00	3,05



Gráfica 8 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 2,5 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Tabla 13 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 4 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

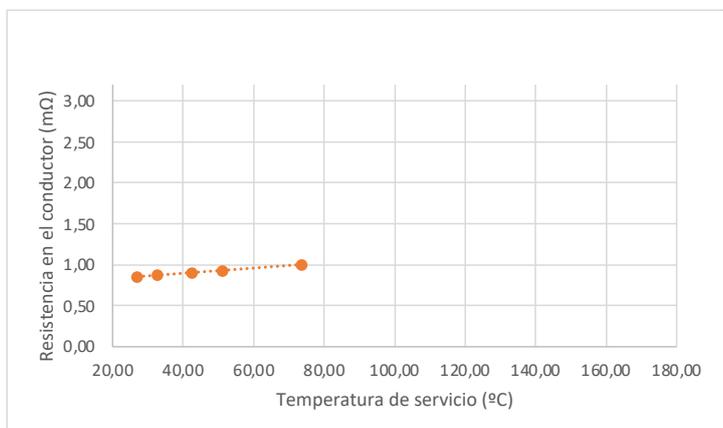
Cable 4 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Temperatura(°C)	Resistencia Conductor (mΩ)
1	28,04	1,27
2	37,15	1,32
3	52,34	1,39
4	65,84	1,46
5	100,94	1,62



Gráfica 9 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 4 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Tabla 14 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 6 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Cable 6 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	Temperatura(°C)	Resistencia Conductor (mΩ)
1	26,94	0,85
2	32,78	0,86
3	42,50	0,90
4	51,14	0,92
5	73,60	1,00



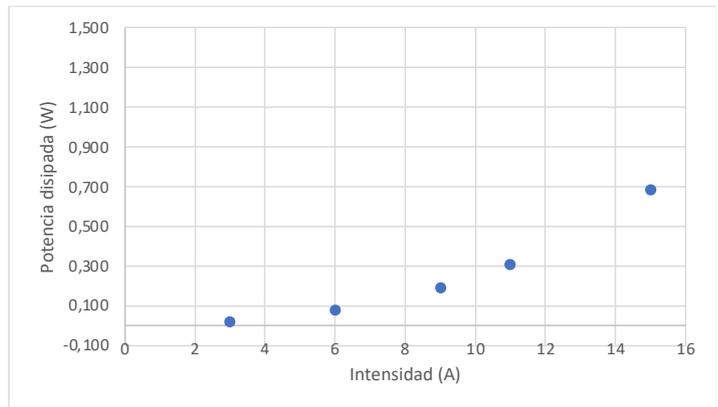
Gráfica 10 Temperatura de Servicio frente a Resistencia.  
Cable 6 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Para este caso, la resistencia es inversamente proporcional al área de la sección transversal del cable. Los cables más pequeños tienen un área de sección transversal menor, lo que se traduce en una mayor resistencia en comparación con los cables más grandes con un área de sección transversal mayor.

A continuación, vamos a mostrar la intensidad frente a la potencia disipada para las distintas secciones de cable:

Tabla 15 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 2,5 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

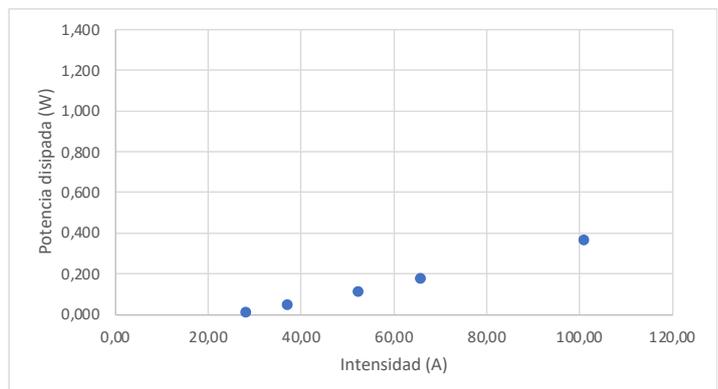
Cable 2,5 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	P_inicial	P_disipada
1	660	0,019
2	1320	0,079
3	1980	0,193
4	2420	0,311
5	3300	0,686



Gráfica 11 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 2,5 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Tabla 16 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 4 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

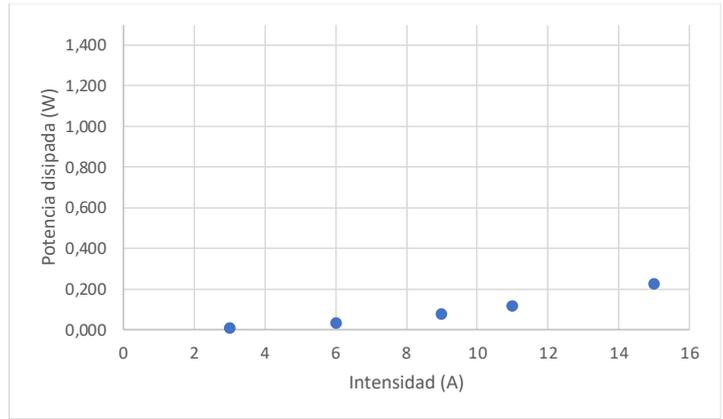
Cable 4 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	P_inicial	P_disipada
1	660	0,011
2	1320	0,047
3	1980	0,113
4	2420	0,176
5	3300	0,365



Gráfica 12 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 4 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Tabla 17 Intensidad frente a potencia disipada.  
Cable 6 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

Cable 6 mm <sup>2</sup>		
Nº Ensayo	P_inicial	P_disipada
1	660	0,008
2	1320	0,031
3	1980	0,073
4	2420	0,112
5	3300	0,224



Gráfica 13 Intensidad frente a potencia disipada. Cable 6 mm<sup>2</sup>  
Fuente: elaboración propia

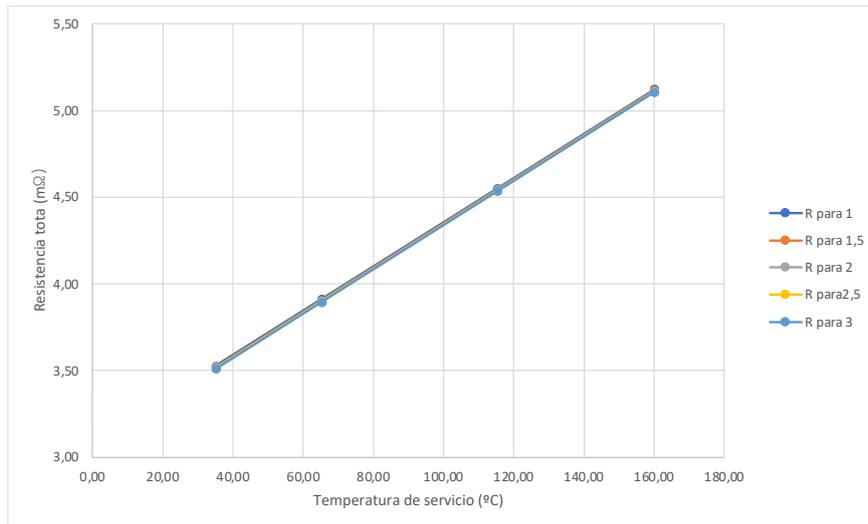
Una sección de cable más pequeña tiene una resistencia mayor que una sección de cable más grande debido a su menor sección transversal. Dado que la potencia es directamente proporcional a la resistencia, una sección de cable más pequeña con mayor resistencia disipa más potencia en forma de calor cuando circula por ella la misma intensidad de corriente. Esto se debe a que una mayor resistencia restringe el flujo de electrones, lo que provoca una mayor conversión de energía eléctrica en calor.

Por último, vamos a realizar un estudio en mayor detalle de cómo la temperatura influye en la resistencia de contacto. Para ello, vamos a utilizar un cable de 1,5mm<sup>2</sup> de sección y vamos a aumentar la corriente circulante. Para cada valor de intensidad, tomaremos distintas medidas, aumentando gradualmente el par de apriete de la unión para así ver como afecta este parámetro a la temperatura de servicio:

Tabla 18 Temperatura de servicio frente a Resistencia tota en un conductor de 1,5mm<sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

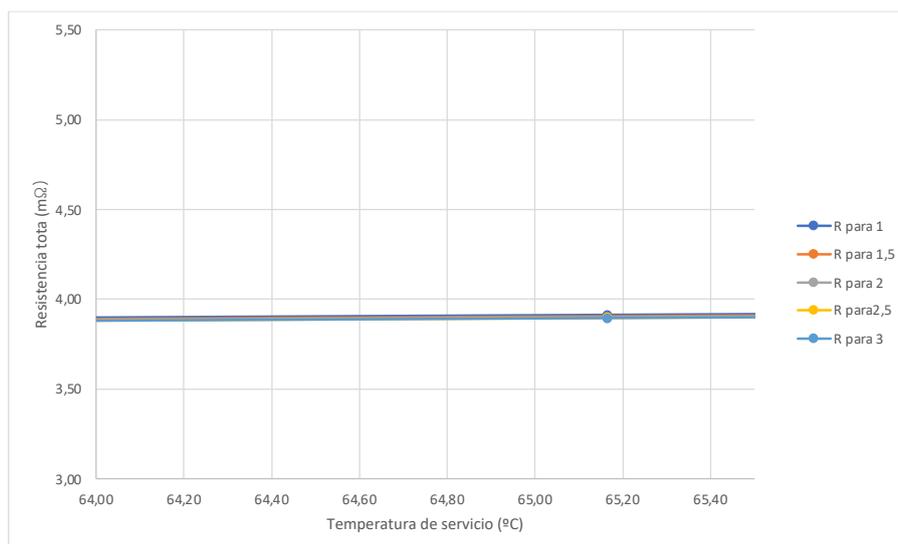
T (°C)	R para 1Nm	R para 1,5Nm	R para 2Nm	R para 2,5Nm	R para 3Nm
35,04	3,53	3,52	3,52	3,51	3,51
65,17	3,91	3,90	3,90	3,90	3,90
115,37	4,55	4,55	4,54	4,54	4,54
160,00	5,12	5,12	5,11	5,11	5,11



Gráfica 14 Temperatura de Servicio frente a Resistencia Total

Fuente: elaboración propia

Para este caso, la resistencia total es la suma de la resistencia de contacto y la resistencia del cable. Cuando aumentamos el par de apriete, éste afecta a la resistencia de contacto al alterar la calidad y la estanqueidad de las conexiones eléctricas. Un aumento del par de apriete suele dar lugar a un contacto mejor y más firme entre las superficies conductoras, lo que reduce la resistencia de contacto. Por el contrario, una disminución del par de apriete puede provocar una conexión más floja y una mayor resistencia de contacto. A continuación, en la Gráfica 15 puede verse en mayor detalle entre las curvas para un valor específico de temperatura, 65,17°C.



Gráfica 15 Ampliación de la gráfica 14

Fuente: elaboración propia

Si bien esta resistencia de contacto afecta a la temperatura, los valores de la resistencia de contacto (ver tabla 2) son del orden de  $0,01\text{m}\Omega$  por lo que su influencia para este modelo teórico es bastante limitada. Esto es debido a que, en este caso, en el modelo teórico se tuvieron en cuenta parámetros similares a los propuestos para el montaje experimental, con temperaturas controladas y con longitudes de cable reducidas. Sin embargo, si se tienen en cuenta longitudes de cable mayores y diversas circunstancias ambientales más como calentamiento en la sala o mala refrigeración, los resultados pueden verse alterados.

## 6.2. CONCLUSIONES

Tras haber realizado este estudio y haber planteado el experimento, puede hacerse evidente la importancia de controlar de forma precisa el par de apriete y asegurarse que éste cumple correctamente con las indicaciones del fabricante para la prevención de fallos eléctricos, como el sobrecalentamiento y los fallos por arco eléctrico. Un par de apriete inadecuado puede provocar un incremento de la temperatura y riesgos potenciales para todo el sistema eléctrico.

Además, los datos de las imágenes térmicas nos hubieran proporcionado información sobre la distribución de la temperatura en las uniones atornilladas. Deberían haberse identificado correctamente los puntos calientes, es decir, zonas de temperatura elevada, lo que pondría de manifiesto posibles problemas que podrían requerir una mayor atención en cuanto a la aplicación del par de apriete y la calidad de la conexión. Esto también nos ayudaría a identificar un rango de par óptimo para las uniones atornilladas, y comprobar así que éste coincide con lo indicado por el fabricante. En él, la temperatura se mantendría dentro de límites seguros. Este rango podría servir de guía para conseguir conexiones eléctricas fiables y eficientes en diversas aplicaciones.

Los resultados de la investigación podrían contribuir al desarrollo de directrices y mejores prácticas para el control del par en las instalaciones eléctricas. Estas directrices podrían ayudar a los profesionales a garantizar la correcta aplicación del par de apriete, utilizando herramientas que actualmente no son obligatorias por la normativa vigente, como destornilladores dinamométricos o dispositivos de detección de arco eléctrico para mejorar la seguridad eléctrica y optimizar el rendimiento y la longevidad de las conexiones eléctricas.

No obstante, gracias al modelo teórico elaborado, puede sentarse la base para realizar comparaciones con las medidas obtenidas y además utilizar las ecuaciones descritas para poder hacer predicciones.

### 6.3. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La primera gran limitación que tuvimos fue la demora del material ya que todo provenía de empresas externas que nos cedían de forma gratuita su material para fines académicos, esta fue una de las principales razones por las que no pudimos cumplir con los plazos estipulados para la realización del experimento junto con los problemas de recursos humanos que tuvimos, que incluyeron bajas de personal y la imposibilidad de montar el prototipo de ensayo. En caso de haber realizado el experimento, este se hubiera llevado a cabo en un entorno de laboratorio controlado utilizando un banco de pruebas simplificado. Es posible que las condiciones simuladas en el experimento no reproduzcan totalmente las situaciones reales que se dan en las instalaciones eléctricas, que pueden implicar simplificación de configuraciones y factores ambientales más complejos. Además, se asumieron algunas condiciones idealizadas, como superficies de contacto uniformes, un par de torsión perfectamente aplicado y una carga eléctrica constante. En la realidad, las variaciones en la rugosidad de la superficie, la aplicación de par y la carga eléctrica pueden afectar al rendimiento de las uniones atornilladas y son factores también a tener en cuenta.

El experimento podría haber estado sujeto a restricciones de tiempo, limitando la duración de la recogida y análisis de datos. Unas observaciones y un seguimiento a más largo plazo podrían proporcionar información adicional sobre el comportamiento y la estabilidad de las uniones atornilladas durante periodos prolongados. Además, el experimento se pretendía realizar en un entorno con niveles de temperatura y humedad controlados. Sin embargo, no se hubieran tenido plenamente en cuenta los factores externos, como las fluctuaciones de la temperatura ambiente, la humedad y las vibraciones, que pueden afectar al rendimiento de las uniones atornilladas.

Como líneas futuras de desarrollo, se pueden llevar a cabo tres opciones muy interesantes de estudio: la primera línea de desarrollo es continuar con el experimento y tomar más muestras en entornos más realistas, la segunda línea de desarrollo es estudiar el proceso con otro tipo de conexiones, como son los resortes de presión libre y como tercera línea de desarrollo más ambiciosa, podrían desarrollarse modelos y simulaciones computacionales.

Para llevar a cabo la primera línea futura de desarrollo, se seguiría con el experimento que quiere llevarse a cabo, en el que se pueden realizar estudios experimentales más amplios y completos, ampliando el tamaño de la muestra, considerando diferentes tipos de conexiones, materiales y condiciones ambientales. Esto puede proporcionar un conjunto de datos más sólido y aumentar la validez de los resultados de la investigación, además de llevar a cabo estudios de casos en instalaciones eléctricas reales para analizar el comportamiento de las uniones atornilladas en condiciones realistas. También se puede investigar la fiabilidad a largo plazo y los efectos del envejecimiento de las uniones atornilladas.

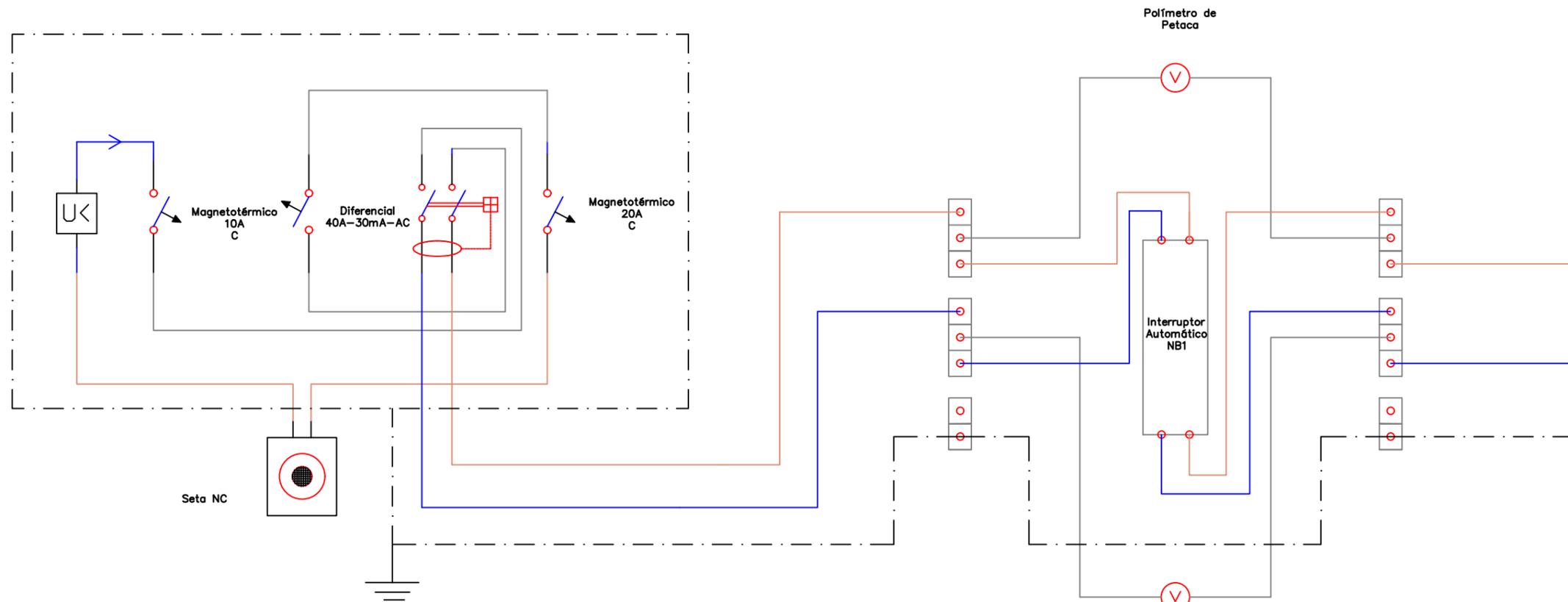
Esto puede implicar pruebas de envejecimiento acelerado, experimentos de carga cíclica y análisis de conexiones durante periodos prolongados para comprender los mecanismos de degradación y establecer estrategias de mantenimiento y sustitución.

Como segunda línea futura de desarrollo, una cuestión muy interesante para investigar es el impacto de la conexión por resorte de presión libre [31] ya que ésta no requiere de par de apriete por lo que es mucho más segura y fiable ya que nos asegura que perdura a lo largo del tiempo y no requiere de mantenimiento. Además, este tipo de conexiones pueden usarse en condiciones más adversas ya que el resorte determina la presión de contacto que pone el conductor en el carril y ésta se mantiene de forma constante a pesar de las vibraciones o los impactos, debido a que el resorte la compensa automáticamente.

La tercera línea futura de desarrollo que se podría llevar a cabo consistiría en desarrollar modelos y simulaciones computacionales para estudiar el comportamiento de las uniones atornilladas en diversas condiciones. Esto puede proporcionar información sobre los efectos de diferentes parámetros, como el par de apriete, las propiedades del material, la temperatura y los factores ambientales, en el rendimiento de la conexión, aunque debido a que se ha estudiado poco sobre el tema es bastante complicado realizar un modelo computacional del experimento sin tener disponible un alto volumen de datos.

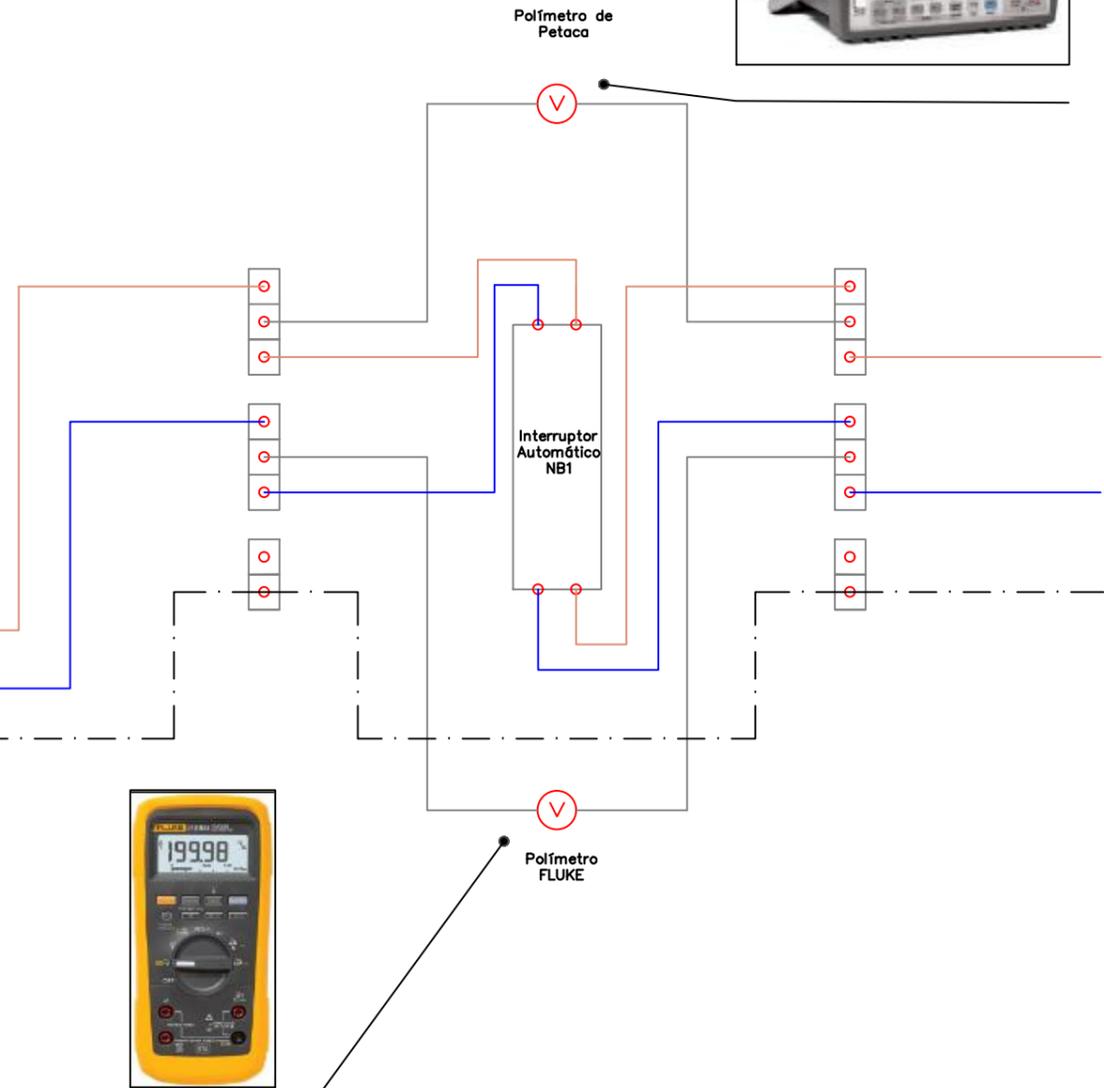
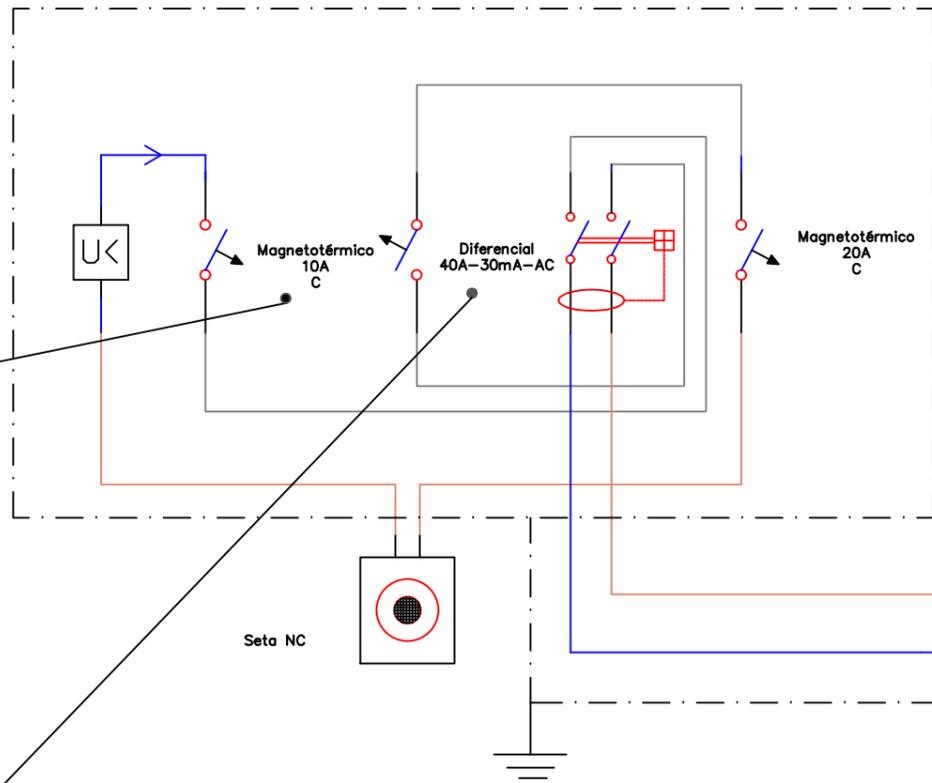
# ANEXOS

7



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Interrupor normalmente cerrado
	Magnetotérmico
	Diferencial
	Voltímetro
	Bornas de conexión Wago
	Conexión atornillada
	Aparato resistivo

	Trabajo Fin de Grado: Estudio termográfico del efecto de apriete sobre la temperatura en conexiones eléctricas		
	Universidad de Málaga Curso: 2022 / 2023		Autor: Daniel Alcaraz Mora
	Plano: Plano 1: Esquema unifilar	Hoja: 1 / 1	Escala: S/E



LEYENDA	
SIMBOLO	DESCRIPCIÓN
	Interruptor normalmente cerrado
	Magnetotérmico
	Diferencial
	Voltímetro
	Bornas de conexión Wago
	Conexión atornillada
	Aparato resistivo

	Trabajo Fin de Grado: Estudio termográfico del efecto de apriete sobre la temperatura en conexiones eléctricas		
	Universidad de Málaga Curso: 2022 / 2023		Autor: Daniel Alcaraz Mora
	Plano: Plano 1: Esquema unifilar	Hoja: 2/2	Escala: S/E



## Interruptor automático eBG

### 1. General

#### 1.1 Función

Protege los circuitos contra corrientes de cortocircuito, contra corrientes de sobrecarga, interruptor, aislamiento.

#### 1.2 Selección

Datos técnicos de la red en los puntos establecidos: los sistemas de puesta a tierra (TNS, TNC), la corriente de cortocircuito en el punto de instalación del disyuntor deberá ser siempre inferior al poder de corte de este dispositivo para una tensión de red normal.

Curva de disparo:

#### **Curva C (5-10In)**

protección para cargas resistivas e inductivas con baja corriente de irrupción.

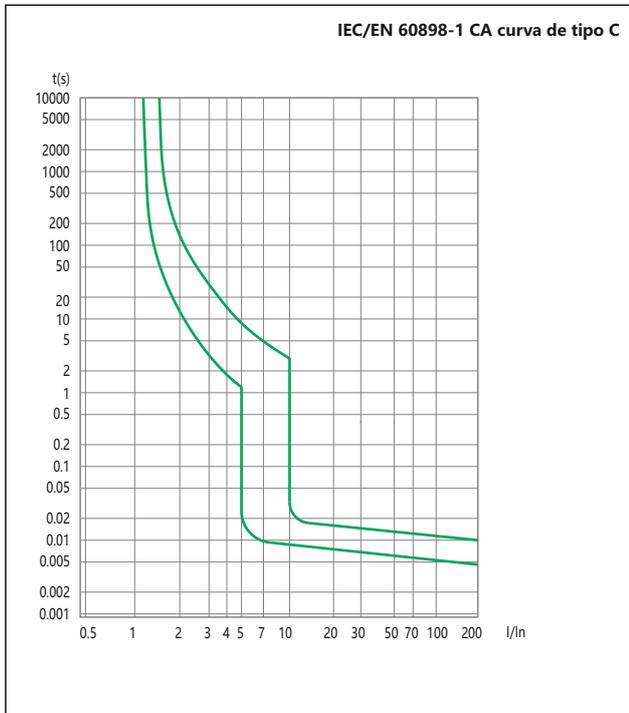
#### 1.3 Autorizaciones y certificados

Si desea obtener información más detallada al respecto, consulte la Tabla de Certificados de la última página.

## 2. Datos técnicos

### 2.1 Curvas

∅BG actúan reduciendo las corrientes altas para limitar al máximo la energía destructiva provocada por un cortocircuito.



2.2

	Estándar		IEC/EN 60898-1
Características eléctricas	Corriente nominal In	A	6, 10, 16, 20, 25, 32, 40
	Polos		2P
	Tensión nominal Ue	V	230/400~240/415
	Tensión de aislamiento Ui		500
	Frecuencia nominal	Hz	50/60
	Poder de corte nominal	kA	6
	Tensión nominal soportada al impulso (1,2/50) Uimp	V	4000
	Tensión de prueba dieléctrica a la frec. ind. durante 1 minuto		2
	Grado de contaminación		2
Característica de disparo termomagnético		C	
Características mecánicas	Vida eléctrica		4000
	Vida mecánica		10000
	Grado de protección		IP20
	Temperatura de referencia para ajustar el elemento térmico	°C	30
	Temperatura ambiente (con una media diaria ≤35°C)	°C	-5...+40
	Temperatura de almacenamiento	°C	-25...+70
Instalación	Tipos de terminales de conexión		Cable, Horquilla o Pin
	Tamaño de terminal de arriba a abajo para cable	mm <sup>2</sup>	1~25
		AWG	17~3
	Tamaño de terminal de arriba a abajo para peine de conexión	mm <sup>2</sup>	1~10
		AWG	17~7
	Par de apriete	N·m	2
		In-lbs.	18
Montaje		En riel DIN EN 60715 (35mm) a través de un dispositivo de enganche rápido	
Conexión		Entrada superior e inferior indistintamente	

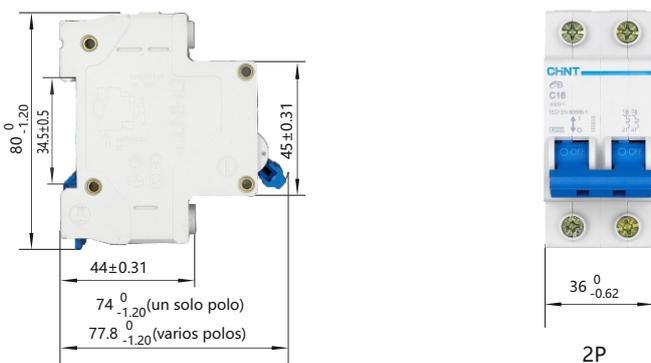
2.3 Corrección por temperatura

La corriente máxima permitida en un disyuntor depende de la temperatura ambiente del lugar donde se encuentre dicho Interruptor automático. La temperatura ambiente es la temperatura que hace en el interior de la caja o cuadro de distribución en el que se encuentren instalados los Interruptores automáticos.

**La temperatura de referencia es de 30°C**

Corriente nominal In (A)	Coeficiente de compensación de temperatura bajo diversas temperaturas de funcionamiento									
	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	55°C	60°C	
1~6	1.20	1.14	1.09	1.05	1.00	0.96	0.80	0.75	0.70	
10~32	1.18	1.12	1.08	1.04	1.00	0.96	0.92	0.88	0.84	
40~60	1.16	1.12	1.07	1.03	1.00	0.97	0.87	0.83	0.80	

3. Dimensiones generales y de montaje (mm)





**Sensibilidad de disparo**

30mA - protección adicional contra contactos directos.  
 300mA - protección contra contactos indirectos, así como  
 contra el riesgo de incendio.

**Tiempo de disparo**

**Retardo corto** SI

Garantiza cualquier disparo en al menos 10 ms.

## NL1 Interruptor diferencial

### 1. General

#### 1.1 Función

Controlar los circuitos eléctricos.  
 Proteger a las personas frente a los contactos indirectos y  
 ofrecer protección adicional frente a contactos directos.  
 Proteger las instalaciones contra el riesgo de incendio por  
 fallos de aislamiento.  
 Los disyuntores de corriente residual se emplean en  
 viviendas, así como en el sector terciario y la industria.

#### 1.2 Selección

**Clase SI**

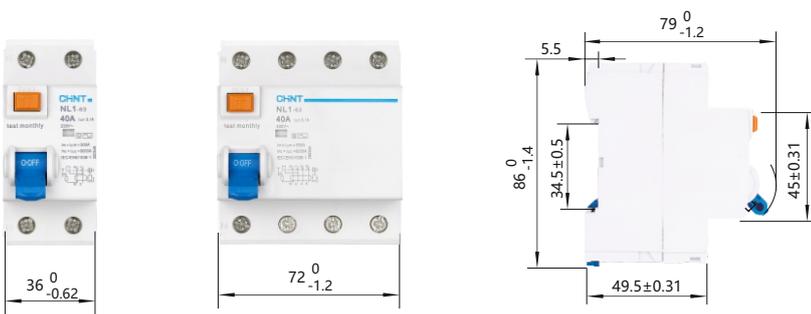
El disparo está garantizado no sólo para corrientes residuales  
 CA sinusoidales, sino también para corrientes residuales CC  
 pulsatorias, tanto si se aplican de manera repentina como si  
 van aumentando lentamente. Tipo SI con filtros contra un  
 disparo falso provocado por armónicos y corrientes  
 transitorias anómalas. Con el impacto de una corriente  
 transitoria anómala de 3000A y 8/20us este disyuntor  
 seguirá manteniéndose estable.



## 2. Datos técnicos

	Estándar		IEC/EN 61008-1
Características eléctricas	Tipo (forma de onda de derivación a tierra detectada)		A-SI
	Corriente nominal $I_n$	A	25, 40, 63, 80, 100
	Polos		2P, 4P
	Tensión nominal $U_e$	V	230/400~240/415
	Sensibilidad nominal $I_{\Delta n}$	A	0.03, 0.3
	Tensión de aislamiento $U_i$	V	500
	Poder nominal residual de conexión y corte $I_{\Delta m}$	A	500 ( $I_n=25A/40A$ ) 630 ( $I_n=63A$ )
	Corriente de cortocircuito $I_{nc}=I_{\Delta c}$	A	6000/10000
	Fusible SCPD (dispositivo de protección contra cortocircuitos)	A	 10000
	Tiempo de corte inferior $I_{\Delta n}$	s	10ms~300ms
	Frecuencia nominal	Hz	50/60
	Tensión nominal soportada al impulso (1.2/50) $U_{imp}$	V	6000
	Tensión de prueba dieléctrica a la frec. ind. durante 1 minuto	kV	2
Grado de contaminación		2	
Características mecánicas	Vida eléctrica		2000
	Vida mecánica		2000
	Indicador de corriente de pérdida		SI
	Grado de protección		IP20
	Temperatura ambiente (con una media diaria $\leq 35^\circ\text{C}$ )	$^\circ\text{C}$	-5...+40
	Temperatura de almacenamiento	$^\circ\text{C}$	-25...+70
Instalación	Tipos de terminales de conexión		Cable, Horquilla o Pin
	Tamaño de terminal de arriba a abajo para cable	$\text{mm}^2$	25/35
		AWG	18-3/18-2
	Tamaño de terminal de arriba a abajo para peine de conexión	$\text{mm}^2$	10/16
		AWG	18-8/18-5
	Par de apriete	N·m	2.5
		In·lbs.	22
Montaje	En riel DIN EN 60715 (35mm) a través de un dispositivo de enganche rápido		
Conexión	Entrada superior e inferior indistintamente		

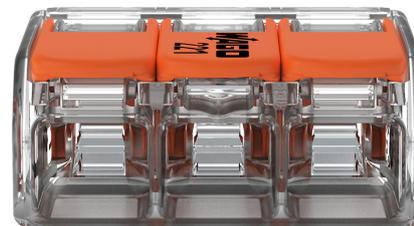
## 3. Dimensiones generales y de montaje (mm)



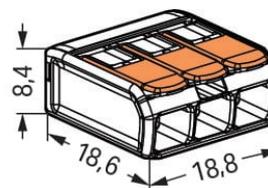
## Ficha de datos | Código: 221-413

Borna de conexión COMPACT; para cualquier tipo de conductor; máx. 4mm<sup>2</sup>; 3 conductores; con palancas de accionamiento; Carcasa transparente; Temperatura ambiente máxima 85°C (T85); 4,00 mm<sup>2</sup>; transparente

<https://www.wago.com/221-413>



Color:  transparente



Dimensiones en mm

### Your Benefits:

- Ease of use – pull the lever up, insert a conductor and push the lever back down
- Available as 2-, 3- and 5-wire connectors
- Easily terminate conductors from 0.14 to 4 mm<sup>2</sup>
- Connect solid, stranded and fine-stranded conductors
- Time savings for installers and device manufacturers
- Quickly install devices with higher levels of power consumption
- Safely install long cable runs with larger conductor cross sections
- Mounting carrier for installation conforms to standards
- Custom carriers are possible

## Notas

Información sobre seguridad en líneas de alimentación con toma de tierra

## Datos eléctricos

### Valores asignados según CEI/EN

Valores asignados según	EN 60664
Tensión nominal (II/2)	450 V
Tensión de choque asignada (II/2)	4 kV
Corriente asignada	32 A
Leyenda (valores asignados)	(III / 2) ± Protección contra sobretensión III / Grado de ensuciamiento 2

### Valores asignados según UL 1059

Certificaciones según	UL 486C
Tensión asignada UL (grupo de uso C)	600 V
Corriente asignada UL (grupo de uso C)	20 A

## Datos de conexión

Número total de puntos de conexión	3
Número total de potenciales	1

### Conexión 1

Tecnología de conexión	CAGE CLAMP®
Tipo de accionamiento	Palanca
Materiales de conductor conectable	Cobre
Sección nominal	4 mm <sup>2</sup> / 12 AWG
Conductor rígido	0,2 ... 4 mm <sup>2</sup> / 24 ... 12 AWG
Conductor semirrígido	0,2 ... 4 mm <sup>2</sup> / 24 ... 12 AWG
Conductor flexible	0,14 ... 4 mm <sup>2</sup> / 24 ... 12 AWG
Longitud de pelado	11 mm / 0.43 pulgadas
Dirección del cableado	Conexión lateral

## Datos geométricos

Anchura	18,8 mm / 0.74 pulgadas
Altura	8,6 mm / 0.327 pulgadas
Profundidad	18,8 mm / 0.732 pulgadas

## Datos de material

Nota sobre datos de material

[Information on material specifications can be found here](#)

Color	transparente
Material de aislamiento	Policarbonato (PC)
Clase de inflamabilidad según UL 94	V2
Carga de fuego	0,064 MJ
Color de actuador	naranja
Peso	2,5 g

## Requisitos medioambientales

Temperatura ambiente (funcionamiento)	+85 °C
Temperatura de servicio continuo	105 °C
Marca de temperatura según EN 60998	T85

**Datos comerciales**

eCl@ss 10.0	27-14-11-04
eCl@ss 9.0	27-14-11-04
ETIM 8.0	EC000446
ETIM 7.0	EC000446
PU (SPU)	500 (50) UDS
Tipo de embalaje	Box
País de origen	DE
GTIN	4050821808442
Número de arancel aduanero	8536901000

**Homologaciones / Certificados**

**General approvals**



Homologación	Norma	Nombre de certificado
CCA DEKRA Certification B.V.	EN 60998	NTR NL-7827
ENEC 05 DEKRA Certification B.V.	EN 60998	71-113253 REV.1
UL_Listed_64KA UL International Germany GmbH	UL 467	E201573
UL UL International Germany GmbH	UL 486C	E69654

**Declarations of conformity and manufacturer's declarations**

Homologación	Norma	Nombre de certificado
EU-Declaration of Conformity WAGO GmbH & Co. KG	-	-
UK-Declaration of Conformity WAGO GmbH & Co. KG	-	-

**Approvals for marine applications**



Homologación	Norma	Nombre de certificado
ABS American Bureau of Shipping	-	18-HG1755093-PDA
DNV GL Det Norske Veritas, Germanischer Lloyd	EN 60998	TAE000015T
LR Lloyds Register	EN 60998	LR22207029TA

**Descargas**

**Environmental Product Compliance**

Compliance Search

Environmental Product  
Compliance 221-413



Documentation

Bid Text

221-413	19.02.2019	xml 3.43 KB	
---------	------------	----------------	--

221-413	23.01.2019	docx 15.29 KB	
---------	------------	------------------	--

ausschreiben.de  
221-413

CAD/CAE-Data

CAD data

2D/3D Models 221-413

CAE data

EPLAN Data Portal  
221-413

ZUKEN Portal 221-413

1 Productos apropiados

1.1 Accesorios opcionales

1.1.1 Accesorios generales

1.1.1.1 Carcasa vacía



**Código: 207-4301**

Caja de derivación; Derivación; para cables con envoltura plástica; Serie 221; conectores hasta 4 mm<sup>2</sup> máx.; sin bornas de conexión; blanco

1.1.1.2 Moisture protection



**Código: 207-1331**

Gelbox; Derivación; para cables; con gel; Serie 221, 2x73; conectores hasta 4 mm<sup>2</sup> máx.; sin bornas de conexión; tamaño 1; gris



**Código: 207-1333**

Gelbox; Derivación; para cables; con gel; Serie 221, 2x73; conectores hasta 4 mm<sup>2</sup> máx.; sin bornas de conexión; tamaño 3; gris

1.1.2 Elemento de fijación

### 1.1.2.1 Accesorios de fijación



**Código: 221-513**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; c/tetones de anclaje p/mont. horizontal; blanco



**Código: 221-513/000-004**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; c/tetones de anclaje p/mont. horizontal; negro



**Código: 221-523**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; c/tetones de anclaje p/montaje vertical; blanco



**Código: 221-523/000-004**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; c/tetones de anclaje p/montaje vertical; negro



**Código: 221-503**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; para fijación por tornillo; blanco



**Código: 221-503/000-004**

Adaptador de fijación; para bornas de 3 conductores; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; para fijación por tornillo; negro



**Código: 221-500/000-006**

Adaptador de fijación; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; p/mont. sobre carril 35/mont.atornill.; azul



**Código: 221-500/000-053**

Adaptador de fijación; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; p/mont. sobre carril 35/mont.atornill.; gris oscuro-amarillo



**Código: 221-500**

Adaptador de fijación; Serie 221 - 4 mm<sup>2</sup>; p/mont. sobre carril 35/mont.atornill.; naranja

### 1.1.3 Puente

#### 1.1.3.1 Puente



**Código: 221-941/000-006**

Puente; con entrada del conductor; 2 polos; aislado; azul



**Código: 221-942/000-006**

Puente; con entrada del conductor; 2 polos; aislado; azul



**Código: 221-941**

Puente; con entrada del conductor; 2 polos; aislado; gris oscuro

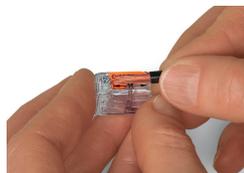


**Código: 221-942**

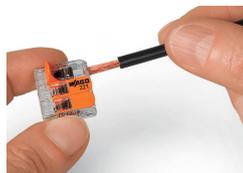
Puente; con entrada del conductor; 2 polos; aislado; gris oscuro

### Instrucciones de manejo

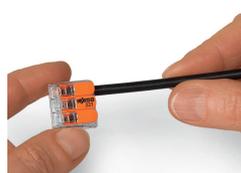
#### Conexión del conductor



Pele 11 mm el cable.

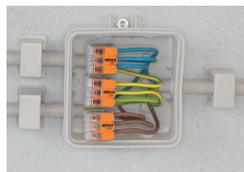


Conexión: levante la palanca para abrir el punto de conexión e inserte el conductor pelado.



Baje a continuación la palanca para cerrar el punto de conexión.

### Aplicación



Cableado de conductores flexibles en cajas de derivación.



Sistema de iluminación de baja tensión personalizado



Distribución de cableado de luz en aplique de techo



Conexión de lámpara en falso techo



Conectores COMPACT para todo tipo de conductores (4 mm<sup>2</sup>), serie 221



Bornas de conexión compactas y accionadas por palanca

Conexión sin herramientas de hasta cinco conductores flexibles pelados de 0,14 a 4 mm<sup>2</sup>, así como conductores rígidos y semirrígidos de 0,2 a 4 mm<sup>2</sup>.

Cómo funcionan:

Levante la palanca naranja para abrir el punto de conexión. Inserte el conductor y baje la palanca hasta que quede a ras con la carcasa de la borna.

Seguridad:

La posición de reposo especialmente diseñada de la palanca evita que el conductor conectado se suelte de forma fortuita. Certificaciones como ENEC o UL confirman su seguridad de aplicación con cualquier tipo de conductor (rígido, semirrígido, flexible).

# 320 Series True-rms Clamp Meters

Fluke rugged. Fluke precise. Fluke reliable.

The Fluke 323, 324 and 325 Clamp Meters are designed to perform in the toughest environments and provide noise-free, reliable results users can trust to confidently diagnose problems. True-rms measurements and optimized ergonomics make the 320 Series Clamp Meters the best general troubleshooting tools for commercial and residential electricians.

**New**



## Technical Data

### Measurement capability

- 400 A ac current measurement (ac and dc current; 325 only)
- 600 V ac and dc voltage measurement
- True-rms ac voltage and current for accurate measurements on non-linear signals
- Resistance measurement to up to 40 k $\Omega$  with continuity detection
- Temperature and capacitance measurement (324 and 325 only)
- Frequency measurement (325 only)

### Features

- Slim, ergonomic design
- Large, easy to read backlight display (324 and 325 only)
- CAT IV 300 V/CAT III 600 V safety rating
- Hold button
- Two-year warranty
- Soft carrying case

## Specifications

		<b>323</b>	<b>324</b>	<b>325</b>
<b>AC current</b>	Range	400.0 A	40.00 A/400.0 A	40.00 A/400.0 A
	Accuracy	2 % ± 5 digits (45 Hz to 65 Hz) 2.5 % ± 5 digits (65 Hz to 400 Hz)	1.5 % ± 5 digits (45 Hz to 400 Hz) Note: Add 2 % for position sensitivity	2 % ± 5 digits (45 Hz to 65 Hz) 2.5 % ± 5 digits (65 Hz to 400 Hz)
<b>DC current</b>	Range	—	—	40.00 A/400.0 A
	Accuracy	—	—	2 % ± 5 digits
<b>AC voltage</b>	Range	600.0 V	600.0 V	600.0 V
	Accuracy	1.5 % ± 5 digits	1.5 % ± 5 digits	1.5 % ± 5 digits
<b>DC voltage</b>	Range	600.0 V	600.0 V	600.0 V
	Accuracy	1.0 % ± 5 digits	1.0 % ± 5 digits	1.0 % ± 5 digits
<b>Resistance</b>	Range	400.0 Ω/4000 Ω	400.0 Ω/4000 Ω	400.0 Ω/4000 Ω/40.00 kΩ
	Accuracy	1 % ± 5 digits	1 % ± 5 digits	1 % ± 5 digits
<b>Continuity</b>		≤ 70 Ω	≤ 30 Ω	≤ 30 Ω
<b>Capacitance</b>		—	100.0 μF to 1000 μF	100.0 μF to 1000 μF
<b>Frequency</b>		—	—	5.0 Hz to 500.0 Hz
<b>AC response</b>		True-rms	True-rms	True-rms
<b>Backlight</b>		—	Yes	Yes
<b>Data hold</b>		Yes	Yes	Yes
<b>Contact temperature</b>		—	-10.0 °C to 400.0 °C (14.0 °F to 752.0 °F)	-10.0 °C to 400.0 °C (14.0 °F to 752.0 °F)
<b>Min/Max</b>		—	—	Yes
<b>Size</b>	H x W x D (mm)	207 x 75 x 34	207 x 75 x 34	207 x 75 x 34
	Max wire diameter	30 mm (600 MCM)	30 mm (600 MCM)	30 mm (600 MCM)
	Weight	265 g	208 g	283 g
<b>Category rating</b>		CAT III 600 V CAT IV 300 V	CAT III 600 V CAT IV 300 V	CAT III 600 V CAT IV 300 V
<b>Warranty</b>		Two-year	Two-year	Two-year

### Ordering information

**323** True-rms Clamp Meter

**324** True-rms Clamp Meter

**325** True-rms Clamp Meter

### Included with all models

Clamp meter, test leads, soft case, and users manual.

**Fluke.** *Keeping your world up and running.®*

#### Fluke Corporation

PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

#### Fluke Europe B.V.

PO Box 1186, 5602 BD  
Eindhoven, The Netherlands

#### For more information call:

In the U.S.A. (800) 443-5853 or  
Fax (425) 446-5116  
In Europe/M-East/Africa +31 (0) 40 2675 200 or  
Fax +31 (0) 40 2675 222  
In Canada (800)-36-FLUKE or  
Fax (905) 890-6866  
From other countries +1 (425) 446-5500 or  
Fax +1 (425) 446-5116  
Web access: <http://www.fluke.com>

©2012 Fluke Corporation.  
Specifications subject to change without notice.  
Printed in U.S.A. 5/2012 4217271A\_EN  
Pub\_ID: 11932-eng

**Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.**

# Fluke 83V and 87V True-rms Digital Multimeters Detailed Specifications

## For all detailed specifications:

Accuracy is given as  $\pm([\% \text{ of reading}] + [\text{number of least significant digits}])$  at 18 °C to 28 °C, with relative humidity up to 90 %, for a period of one year after calibration.

For Model 87 in the 4½-digit mode, multiply the number of least significant digits (counts) by 10. AC conversions are ac-coupled and valid from 3 % to 100 % of range. Model 87 is true-rms responding. AC crest factor can be up to 3 at full scale, 6 at half scale. For non-sinusoidal wave forms add  $-(2 \% \text{ Rdg} + 2 \% \text{ full scale})$  typical, for a crest factor up to 3.



### Fluke 87V ac voltage function specifications (true-rms)

Function	Range	Resolution	Accuracy					
			45 - 65 Hz	30 - 200 Hz	200 - 440 Hz	440 Hz - 1 kHz	1 - 5 kHz	5 - 20 kHz <sup>1</sup>
√ <sup>2,4</sup>	600.0 mV	0.1 mV	± (0.7 % + 4)	± (1.0 % + 4)	± (1.0 % + 4)	± (1.0 % + 4)	± (2.0 % + 4)	± (2.0 % + 20)
	6.000 V	0.001 V	± (0.7 % + 2)				± (2.0 % + 4) <sup>3</sup>	unspecified
	60.00 V	0.01 V						
	600.0 V	0.1 V						
	1000 V	1 V				unspecified	unspecified	
	Using low pass filter		± (0.7 % + 2)	± (1.0 % + 4)	+ 1 % + 4 - 6 % - 4 <sup>5</sup>	unspecified	unspecified	unspecified

<sup>1</sup> Below 10 % of range, add 6 counts.

<sup>2</sup> The Fluke 87V is a true-rms responding meter. When the input leads are shorted together in the ac functions, the meter may display a residual reading between 1 and 30 counts. A 30-count residual reading will cause only a 2-digit change for readings over 3 % of range. Using REL to offset this reading may produce a much larger constant error in later measurements.

<sup>3</sup> Frequency range: 1 kHz to 2.5 kHz.

<sup>4</sup> A residual reading of up to 13 digits with leads shorted, will not affect stated accuracy above 3 % of range.

<sup>5</sup> Specification increases from -1 % at 200 Hz to -6 % at 440 Hz when filter is in use.

### Fluke 83V ac voltage function specifications (average responding rms indicating)

Function	Range	Resolution	Accuracy		
			50 Hz - 60 Hz	30 Hz - 1 kHz	1 kHz - 5 kHz
√ <sup>1</sup>	600.0 mV	0.1 mV	± (0.5 % + 4)	± (1.0 % + 4)	± (2.0 % + 4)
	6.000 V	0.001 V	± (0.5 % + 2)	± (1.0 % + 4)	± (2.0 % + 4)
	60.00 V	0.01 V	± (0.5 % + 2)	± (1.0 % + 4)	± (2.0 % + 4)
	600.0 V	0.1 V	± (0.5 % + 2)	± (1.0 % + 4)	± (2.0 % + 4) <sup>2</sup>
	1000 V	1 V	± (0.5 % + 2)	± (1.0 % + 4)	unspecified

<sup>1</sup> Below a reading of 200 counts, add 10 counts

<sup>2</sup> Frequency range: 1 kHz to 2.5 kHz

# Fluke 83V and 87V Detailed Specifications cont.

## DC voltage, resistance, and conductance function specifications

Function	Range	Resolution	Accuracy	
			Fluke 83V	Fluke 87V
$\overline{V}$	6.000 V	0.001 V	$\pm (0.1 \% + 1)$	$\pm (0.05 \% + 1)$
	60.00 V	0.01 V	$\pm (0.1 \% + 1)$	$\pm (0.05 \% + 1)$
	600.0 V	0.1 V	$\pm (0.1 \% + 1)$	$\pm (0.05 \% + 1)$
	1000 V	1 V	$\pm (0.1 \% + 1)$	$\pm (0.05 \% + 1)$
$\overline{mV}$	600.0 mV	0.1 mV	$\pm (0.3 \% + 1)$	$\pm (0.1 \% + 1)$
$\Omega$	600.0 $\Omega$	0.1 $\Omega$	$\pm (0.4 \% + 2)^1$	$\pm (0.2 \% + 2)^1$
	6.000 k $\Omega$	0.001 k $\Omega$	$\pm (0.4 \% + 1)$	$\pm (0.2 \% + 1)$
	60.00 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$	$\pm (0.4 \% + 1)$	$\pm (0.2 \% + 1)$
	600.0 k $\Omega$	0.1 k $\Omega$	$\pm (0.7 \% + 1)$	$\pm (0.6 \% + 1)$
	6.000 M $\Omega$	0.001 M $\Omega$	$\pm (0.7 \% + 1)$	$\pm (0.6 \% + 1)$
	50.00 M $\Omega$	0.01 M $\Omega$	$\pm (1.0 \% + 3)^2$	$\pm (1.0 \% + 3)^2$
nS	50.00 M $\Omega$	0.01 M $\Omega$	$\pm (1.0 \% + 3)^2$	$\pm (1.0 \% + 3)^2$
	60.00 nS	0.01 nS	$\pm (1.0 \% + 10)^1$	$\pm (1.0 \% + 10)^1$

<sup>1</sup> When using the REL  $\Delta$  function to compensate for offsets

<sup>2</sup> Add 0.5 % of reading when measuring above 30 M $\Omega$  in the 50 M $\Omega$  range and 20 counts below 33 nS in the 60 nS range

## Temperature specifications (87V only)

Temperature	Resolution	Accuracy <sup>1, 2</sup>
-200 °C to +1090 °C	0.1 °C	1 % + 10
-328 °F to +1994 °F	0.1 °F	1 % + 18

<sup>1</sup> Does not include error of the thermocouple probe.

<sup>2</sup> Accuracy specification assumes ambient temperature stable to  $\pm 1$  °C. For ambient temperature changes of  $\pm 5$  °C, rated accuracy applies after 1 hour.

## Current function specifications

Function	Range	Resolution	Accuracy		Burden Voltage (typical)
			Model 83 <sup>1</sup>	Model 87 <sup>2, 3</sup>	
mA A~ (45 Hz to 2 kHz)	60.00 mA	0.01 mA	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	1.8 mV/mA
	400.0 mA <sup>6</sup>	0.1 mA	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	1.8 mV/mA
	6.000 A	0.001 A	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	0.03 V/A
	10.00 A <sup>4</sup>	0.01 A	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	0.03 V/A
mA A $\overline{\overline{\phantom{A}}}$	60.00 mA	0.01 mA	$\pm (0.4 \% + 4)$	$\pm (0.2 \% + 4)$	1.8 mV/mA
	400.0 mA <sup>6</sup>	0.1 mA	$\pm (0.4 \% + 2)$	$\pm (0.2 \% + 2)$	1.8 mV/mA
	6.000 A	0.001 A	$\pm (0.4 \% + 4)$	$\pm (0.2 \% + 4)$	0.03 V/A
	10.00 A <sup>4</sup>	0.01 A	$\pm (0.4 \% + 2)$	$\pm (0.2 \% + 2)$	0.03 V/A
$\mu$ A~ (45 Hz to 2 kHz)	600.0 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	100 $\mu$ V/ $\mu$ A
	6000 $\mu$ A	1 $\mu$ A	$\pm (1.2 \% + 2)^5$	$\pm (1.0 \% + 2)$	100 $\mu$ V/ $\mu$ A
$\mu$ A $\overline{\overline{\phantom{\mu A}}}$	600.0 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A	$\pm (0.4 \% + 4)$	$\pm (0.2 \% + 4)$	100 $\mu$ V/ $\mu$ A
	6000 $\mu$ A	1 $\mu$ A	$\pm (0.4 \% + 2)$	$\pm (0.2 \% + 2)$	100 $\mu$ V/ $\mu$ A

<sup>1</sup> AC conversion for Model 83 is ac coupled and calibrated to the rms value of a sine wave input.

<sup>2</sup> AC conversions for Model 87 are ac coupled, true rms responding, and valid from 3 % to 100 % of range.

<sup>3</sup> Model 87 is a true rms responding meter. When the input leads are shorted together in the ac functions, the Meter may display a residual reading between 1 and 30 counts. A 30 count residual reading will cause only a 2 digit change for readings over 3 % of range. Using REL to offset this reading may produce a much larger constant error in later measurements.

<sup>4</sup>  $\Delta$  10 A continuous up to 35 °C; < 20 minutes on, 5 minutes off at 35 °C to 55 °C. 20 A for 30 seconds maximum; > 10 A unspecified.

<sup>5</sup> Below a reading of 200 counts, add 10 counts.

<sup>6</sup> 400 mA continuous; 600 mA for 18 hours maximum.

## Capacitance and diode function specifications

Function	Range	Resolution	Accuracy
$\overline{C}$	10.00 nF	0.01 nF	$\pm (1 \% + 2)^1$
	100.0 nF	0.1 nF	$\pm (1 \% + 2)^1$
	1.000 $\mu$ F	0.001 $\mu$ F	$\pm (1 \% + 2)$
	10.00 $\mu$ F	0.01 $\mu$ F	$\pm (1 \% + 2)$
	100.0 $\mu$ F	0.1 $\mu$ F	$\pm (1 \% + 2)$
	9999 $\mu$ F	1 $\mu$ F	$\pm (1 \% + 2)$
$\overline{D}$	3.000 V	0.001 V	$\pm (2 \% + 1)$

<sup>1</sup> With a film capacitor or better, using Relative mode to zero residual.

### Frequency counter specifications

Function	Range	Resolution	Accuracy
Frequency (0.5 Hz to 200 kHz, pulse width > 2 μs)	199.99	0.01 Hz	± (0.005 % + 1)
	1999.9	0.1 Hz	± (0.005 % + 1)
	19.999 kHz	0.001 kHz	± (0.005 % + 1)
	199.99 kHz	0.01 kHz	± (0.005 % + 1)
	> 200 kHz	0.1 kHz	unspecified

### Frequency counter sensitivity and trigger levels

Input Range <sup>1</sup>	Minimum Sensitivity (RMS Sine wave)		Approximate Trigger Level (DC Voltage Function)
	5 Hz - 20 kHz	0.5 Hz - 200 kHz	
600 mV dc	70 mV (to 400 Hz)	70 mV (to 400 Hz)	40 mV
600 mV ac	150 mV	150 mV	–
6 V	0.3 V	0.7 V	1.7 V
60 V	3 V	7 V (≤ 140 kHz)	4 V
600 V	30 V	70 V (≤ 14.0 kHz)	40 V
1000 V	100 V	700 V (≤ 1.4 kHz)	100 V
Duty Cycle Range	Accuracy		
0.0 to 99.9 %	Within ± (0.2 % per kHz + 0.1 %) for risetimes < 1 μs		

<sup>1</sup> Maximum input for specified accuracy = 10X Range or 1000 V.

### Electrical characteristics of the terminals

Function	Overload Protection <sup>1</sup>	Input Impedance (nominal)	Common Mode Rejection Ratio (1 kΩ unbalance)	Normal Mode Rejection						
$\bar{V}$	1000 V rms	10 MΩ < 100 pF	> 120 dB at dc, 50 Hz or 60 Hz	> 60 dB at 50 Hz or 60 Hz						
$\overline{mV}$	1000 V rms	10 MΩ < 100 pF	> 120 dB at dc, 50 Hz or 60 Hz	> 60 dB at 50 Hz or 60 Hz						
$\bar{V}$	1000 V rms	10 MΩ < 100 pF (ac-coupled)	> 60 dB, dc to 60 Hz	Full Scale Voltage			Typical Short Circuit Current			
				To 6.0 MΩ	50 MΩ or 60 nS	600 Ω	6 k	60 k	600 k	6 MΩ
Ω	1000 V rms	< 7.9 V dc	< 4.1 V dc	< 4.5 V dc	1 mA	100 μA	10 μA	1 μA	1 μA	0.5 μA
$\rightarrow$	1000 V rms	< 7.9 V dc	3.000 V dc			0.6 mA typical				

<sup>1</sup> 10<sup>6</sup> V Hz maximum

### MIN MAX recording specifications

Model	Nominal Response	Accuracy
83V	100 ms to 80 %	Specified accuracy ± 12 counts for changes > 200 ms in duration (± 40 counts in ac with beeper on)
87V	100 ms to 80 % (dc functions)	Specified accuracy ± 12 counts for changes > 200 ms in duration > 25 % of range
	120 ms to 80 % (ac functions)	Specified accuracy ± 40 counts for changes > 350 ms and inputs
	250 μs (peak) (Model 87 only) <sup>1</sup>	Specified accuracy ± 100 counts for changes > 250 μs in duration (add ± 100 counts for readings over 6000 counts) (add ± 100 counts for readings in Low Pass mode)

<sup>1</sup> For repetitive peaks: 1 ms for single events.

## Fluke 83V and 87V General Specifications

**Maximum voltage between any terminal and earth ground:** 1000 V rms

**Fuse protection for mA or  $\mu$ A inputs:** 44/100 A, 1000 V FAST Fuse

**Fuse protection for A input:** 11 A, 1000 V FAST Fuse

**Display:**

Digital: 6000 counts updates 4/sec; (Model 87V also has 19,999 counts in high-resolution mode)

Analog: 33 segments, updates 40/sec.

Frequency: 19,999 counts, updates 3/sec at > 10 Hz

**Temperature:** Operating: -20 °C to +55 °C; Storage: -40 °C to +60 °C

**Altitude:**

Operating: 2000 m

Storage: 10,000 m

**Temperature coefficient:** 0.05 x (specified accuracy)/ °C (< 18 °C or > 28 °C)

**Electromagnetic compatibility:** In an RF field of 3 V/m total accuracy = specified accuracy

**Relative humidity:** 0 % to 90 % (0 °C to 35 °C); 0 % to 70 % (35 °C to 55 °C)

**Battery type:** 9 V zinc, NEDA 1604 or 6F22 or 006P

**Battery life:** 400 hours typical with alkaline (with backlight off)

**Vibration:** Per MIL-PRF-28800 for a Class 2 instrument

**Shock:** 1 Meter drop per IEC 61010-1:2001

**Size (HxWxL):** 1.25 in x 3.41 in x 7.35 in (3.1 cm x 8.6 cm x 18.6 cm)

**Size with holster and flex-stand:** 2.06 in x 3.86 in x 7.93 in (5.2 cm x 9.8 cm x 20.1 cm)

**Weight:** 12.5 oz (355 g)

**Weight with holster and flex-stand:** 22.0 oz (624 g)

**Safety:** Complies with ANSI/ISA S82.01-2004, CSA 22.2 No. 1010.1:2004 to 1000 V Overvoltage Category III, IEC 664 to 600 V Overvoltage Category IV. UL listed to UL3111-1. Licensed by TÜV to EN61010-1.

**Fluke.** *Keeping your world  
up and running.*

**Fluke Corporation**

PO Box 9090, Everett, WA USA 98206

**Fluke Europe B.V.**

PO Box 1186, 5602 BD  
Eindhoven, The Netherlands

**For more information call:**

In the U.S.A. (800) 443-5853 or

Fax (425) 446-5116

In Europe/M-East/Africa (31 40) 2 675 200 or

Fax (31 40) 2 675 222

In Canada (800)-36-FLUKE or

Fax (905) 890-6866

From other countries +1 (425) 446-5500 or

Fax +1 (425) 446-5116

Web access: <http://www.fluke.com/>

# FLIR T540 24° + 14° & 42°

**P/N: 79306-0201**

**Copyright**

© 2019, FLIR Systems, Inc.

All rights reserved worldwide. Names and marks appearing herein are either registered trademarks or trademarks of FLIR Systems and/or its subsidiaries. All other trademarks, trade names or company names referenced herein are used for identification only and are the property of their respective owners.

**Document identity**

Publ. No.: 79306-0201

Commit: 55335

Language:

Modified: 2019-02-07

Formatted: 2019-02-11

**Website**

<http://www.flir.com>

**Customer support**

<http://support.flir.com>

**Disclaimer**

Specifications subject to change without further notice. Camera models and accessories subject to regional market considerations. License procedures may apply. Products described herein may be subject to US Export Regulations. Please refer to [exportquestions@flir.com](mailto:exportquestions@flir.com) with any questions.



<b>Imaging and optical data</b>	
Infrared resolution	464 × 348 pixels
UltraMax (super-resolution) <sup>1</sup>	In FLIR Tools
NETD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &lt;30 mK, 42° @ +30°C (+86°F)</li> <li>• &lt;40 mK, 24° @ +30°C (+86°F)</li> <li>• &lt;50 mK, 14° @ +30°C (+86°F)</li> </ul>
Field of view	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 42° × 32°</li> <li>• 24° × 18°</li> <li>• 14° × 10°</li> </ul>
Minimum focus distance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.15 m (0.49 ft.), 42°</li> <li>• 0.15 m (0.49 ft.), 24°</li> <li>• 1.0 m (3.28 ft.), 14°</li> <li>• Macro mode 71 μm as option to 24°</li> </ul>
Minimum focus distance with MSX	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.65 m (2.13 ft.), 42°</li> <li>• 0.5 m (1.64 ft.), 24°</li> <li>• 1.0 m (3.28 ft.), 14°</li> </ul>
Focal length	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 mm (0.39 in.), 42°</li> <li>• 17 mm (0.67 in.), 24°</li> <li>• 29 mm (1.41 in.), 14°</li> </ul>
Spatial resolution (IFOV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.66 mrad/pixel, 42°</li> <li>• 0.90 mrad/pixel, 24°</li> <li>• 0.52 mrad/pixel, 14°</li> </ul>
Available extra lenses	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6° (service calibration required)</li> </ul>
Lens identification	Automatic
f number	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.1, 42°</li> <li>• 1.3, 24°</li> <li>• 1.5, 14°</li> </ul>
Image frequency	30 Hz

1. Not supported when using macro.

P/N: 79306-0201

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

Imaging and optical data		
Focus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Continuous LDM</li> <li>• One-shot LDM</li> <li>• One-shot contrast</li> <li>• Manual</li> </ul>	
Field of view match	Yes	
Digital zoom	1–6× continuous	
Detector data		
Focal plane array/spectral range	Uncooled microbolometer/7.5–14 μm	
Detector pitch	17 μm	
Image presentation		
Resolution	640 × 480 pixels (VGA)	
Surface brightness (cd/m <sup>2</sup> )	400	
Screen size	4 in.	
Viewing angle	80°	
Color depth (bits)	24	
Aspect ratio	4:3	
Auto-rotation	Yes	
Touchscreen	Optically bonded PCAP	
Display technology	IPS	
Cover glass material	Dragontrail®	
Programmable buttons	2	
Viewfinder	No	
Image adjustment	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatic</li> <li>• Automatic maximum</li> <li>• Automatic minimum</li> <li>• Manual</li> </ul>	
Image presentation modes		
Infrared image	Yes	
Visual image	Yes	
MSX	Yes	
Picture in picture	Resizable and movable	
Gallery	Yes	
Measurement		
Camera temperature range	Object temperature range	Accuracy — for ambient temperature +15 to +35°C (+59 to +95°F)
–20 to +120°C (–4 to +248°F)	–20 to +100°C (–4 to +212°F)	±2°C (±3.6°F)
	+100 to +120°C (+212 to +248°F)	±2%
0 to +650°C (+32 to +1202°F)	0 to +100°C (+32 to +212°F)	±2°C (±3.6°F)
	+100 to +650°C (+212 to +1202°F)	±2%
+300 to +1500°C (+572 to +2732°F)	+300 to +1500°C (+572 to +2732°F)	±2%

P/N: 79306-0201

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

<b>Measurement analysis</b>	
Spotmeter	3 in live mode
Area	3 in live mode
Automatic hot/cold detection	Automatic maximum/minimum markers within area
Measurement presets	<ul style="list-style-type: none"> <li>No measurements</li> <li>Center spot</li> <li>Hot spot</li> <li>Cold spot</li> <li>User preset 1</li> <li>User preset 2</li> </ul>
Difference temperature	Yes
Reference temperature	Yes
Emissivity correction	Yes, variable from 0.01 to 1.0 or selected from materials list
Measurement corrections	Yes
External optics/windows correction	Yes
Screening	0.5°C (0.9°F) accuracy at 37°C (98.6°F) with reference
<b>Alarm</b>	
Color alarm (isotherm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Above</li> <li>Below</li> <li>Interval</li> <li>Condensation (moisture/humidity/dewpoint)</li> <li>Insulation</li> </ul>
Measurement function alarm	Audible/visual alarms (above/below) on any selected measurement function
<b>Set-up</b>	
Color palettes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Iron</li> <li>Gray</li> <li>Rainbow</li> <li>Arctic</li> <li>Lava</li> <li>Rainbow HC</li> </ul>
Setup commands	Local adaptation of units, language, date, and time formats
Languages	21
<b>Service functions</b>	
Camera software update	Use PC software FLIR Tools
<b>Storage of images</b>	
Storage media	Removable memory: SD card
Time lapse (Periodic image storage)	10 seconds to 24 hours (infrared)
Remote control operation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Using FLIR Tools (using USB cable)</li> <li>FLIR Tools Mobile (over Wi-Fi)</li> </ul>
Image file format	Standard JPEG, measurement data included. Infrared-only mode
<b>Image annotations</b>	
Voice	60 seconds with built-in microphone and speaker (and via Bluetooth) on still images and video
Text	Text from predefined list or soft keyboard on touchscreen



# FLIR T540 24° + 14° & 42°

P/N: 79306-0201

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

<b>Image annotations</b>	
Visual image annotation	Yes
Image sketch	Yes: on infrared only
Sketch	From touchscreen
METERLiNK	Wireless connection (Bluetooth) to: FLIR meters with METERLiNK
Area measurement information	Yes
GPS	Location data automatically added to every still image and first frame in video from built-in GPS
<b>Video recording in camera</b>	
Radiometric infrared-video recording	RTRR (.csq)
Non-radiometric infrared-video recording	H.264 to memory card
Visual video recording	H.264 to memory card
<b>Video streaming</b>	
Radiometric infrared-video streaming (compressed)	Over UVC
Non-radiometric video streaming (compressed: IR, MSX, visual, Picture in Picture)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• H.264 (AVC) over RTSP (Wi-Fi)</li> <li>• MPEG4 over RTSP (Wi-Fi)</li> <li>• MJPEG over UVC and RTSP (Wi-Fi)</li> </ul>
Visual video streaming	Yes
<b>Digital camera</b>	
Resolution	5 MP with LED light
Focus	Fixed
Field of view	53° x 41°
Video lamp	Built-in LED light
<b>Laser pointer</b>	
Laser alignment	Position is automatically displayed on the infrared image
Laser distance meter	Activated by dedicated button
Laser	Class 2, 0.05–40 m (0.16–131 ft.) ±1% of measured distance
<b>Data communication interfaces</b>	
Interfaces	USB 2.0, Bluetooth, Wi-Fi, DisplayPort
METERLiNK/Bluetooth	Communication with headset and external sensors
Wi-Fi	Peer to peer (ad hoc) or infrastructure (network)
Audio	Microphone and speaker for voice annotation of images
USB	USB Type-C: data transfer/video/power
USB standard	USB 2.0 High Speed
Video out	DisplayPort
Video connector type	DisplayPort over USB Type-C



# FLIR T540 24° + 14° & 42°

P/N: 79306-0201

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

<b>Radio</b>	
Operating frequency	Bluetooth + EDR/LE: 2402–2480 MHz WLAN 2.4 GHz: 2412–2462 MHz WLAN 5 GHz: 5150–5350 MHz (DFS: only slave mode) Note that frequency band 5150–5350 MHz is for indoor use only, see national regulations.
RF output (EIRP)	Bluetooth + EDR/LE: < 10 dBm WLAN: < 17 dBm
Antenna	Integrated PIFA antenna (gain: maximum 1.4 dBi)
<b>Power system</b>	
Battery type	Rechargeable Li-ion battery
Battery voltage	3.6 V
Battery operating time	> 4 hours at 25°C (68°F) with typical use
Charging system	In camera (AC adapter or 12 V from a vehicle) or two-bay charger
Charging time (using two-bay charger)	3.5 h to 90% capacity, on-screen indicator
Charging temperature	0°C to +45°C (+32°F to +113°F), except for the Korean market: +10°C to +45°C (+50°F to +113°F)
External power operation	AC adapter 90–260 V AC (50/60 Hz) or 12 V from a vehicle (cable with standard plug, optional)
Power management	Automatic shut-down and sleep mode
<b>Environmental data</b>	
Operating temperature range	–15 to +50°C (5–122°F)
Storage temperature range	–40 to +70°C (–40 to 158°F)
Humidity (operating and storage)	IEC 60068-2-30/24 hours, 95% relative humidity, 25–40°C (77–104°F)/2 cycles
EMC	<ul style="list-style-type: none"> <li>ETSI EN 301 489-1 (radio)</li> <li>ETSI EN 301 489-17</li> <li>EN 61000-6-2 (immunity)</li> <li>EN 61000-6-3 (emission)</li> <li>FCC 47 CFR Part 15 Class B (emission)</li> </ul>
Radio spectrum	<ul style="list-style-type: none"> <li>ETSI EN 300 228</li> <li>FCC Part 15.249</li> <li>RSS-247 Issue 2</li> </ul>
Encapsulation	IP 54 (IEC 60529)
Shock	25g (IEC 60068-2-27)
Vibration	2g (IEC 60068-2-6)
Safety	EN/UL/CSA/PSE 60950-1
<b>Physical data</b>	
Weight (including battery)	1.3 kg (2.9 lb.)
Size (L × W × H)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lens vertical: 140 × 201.3 × 84.1 mm (5.5 × 7.9 × 3.3 in.)</li> <li>Lens horizontal: 140 × 201.3 × 167.3 mm (5.5 × 7.9 × 6.6 in.)</li> </ul>
Battery weight	195 g (6.89 oz.)
Battery size (L × W × H)	59 × 66 × 94 mm (2.3 × 2.6 × 3.7 in.)
Tripod mounting	UNC ¼"-20

P/N: 79306-0201

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

Physical data	
Housing material	PCABS with TPE, magnesium
Color	Black
Warranty and service	
Warranty	<a href="http://www.flir.com/warranty/">http://www.flir.com/warranty/</a>
Shipping information	
Packaging, type	Cardboard box
Packaging, contents	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accessory box I:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Power supply for battery charger</li> <li>◦ Power supply, 15 W/3 A</li> <li>◦ Printed documentation</li> <li>◦ SD card (8 GB)</li> <li>◦ USB 2.0 A to USB Type-C cable</li> <li>◦ USB Type-C to HDMI and PD adapter</li> <li>◦ USB Type-C to USB Type-C cable (USB 2.0 standard)</li> </ul> </li> <li>• Accessory box II:               <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Lens cap strap</li> <li>◦ Lens cleaning cloth</li> <li>◦ Neck strap</li> </ul> </li> <li>• Battery (2 ea)</li> <li>• Battery charger</li> <li>• Extra lens, 14°</li> <li>• Extra lens, 42°</li> <li>• Hard transport case</li> <li>• Infrared camera with lens</li> <li>• Lens cap, front</li> <li>• Lens cap, front and rear (only for extra lenses)</li> </ul>
Packaging, weight	6.4 kg (14.1 lb.)
Packaging, size	500 × 190 × 370 mm (19.7 × 7.5 × 14.6 in.)
EAN-13	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sweden: 7332558013014</li> <li>• Estonia: 4743254003309</li> </ul>
UPC-12	845188014704
Country of origin	Sweden and/or Estonia

### Supplies and accessories:

- T130337ACC; Calibration target
- T199588; Lens 14° + case
- T199589; Lens 24° + case
- T199590; Lens 42° + case
- T300095; Lens 6° with case
- T911630ACC; Power supply for camera, 15 W/3 A
- T911631ACC; USB 2.0 A to USB Type-C cable, 0.9 m
- T911633ACC; Power supply for battery charger
- T911705ACC; USB Type-C to USB Type-C cable (USB 2.0 standard), 1.0 m
- T911706ACC; Car adapter 12 V
- T911845ACC; USB Type-C to HDMI and PD adapter
- T911846ACC; USB 2.0 A to USB Type-C with Power supply
- T199300ACC; Battery
- T199610; Battery charger
- T199601; Hand strap and neck strap
- T199347ACC; Hard transport case
- T199609; Option, Macro mode 71/103 µm for 24°
- T300030; Option, No radio
- T198495; Pouch



## FLIR T540 24° + 14° & 42°

---

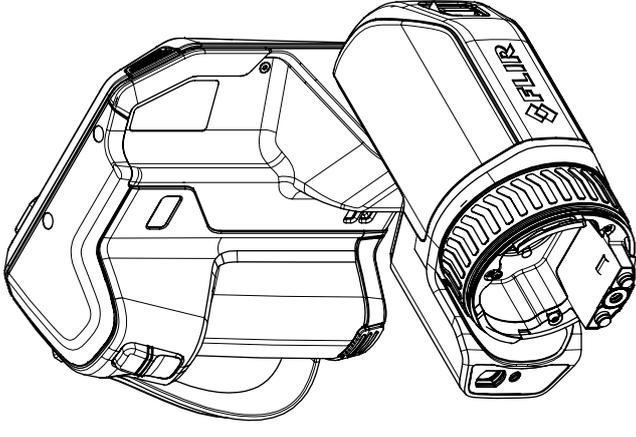
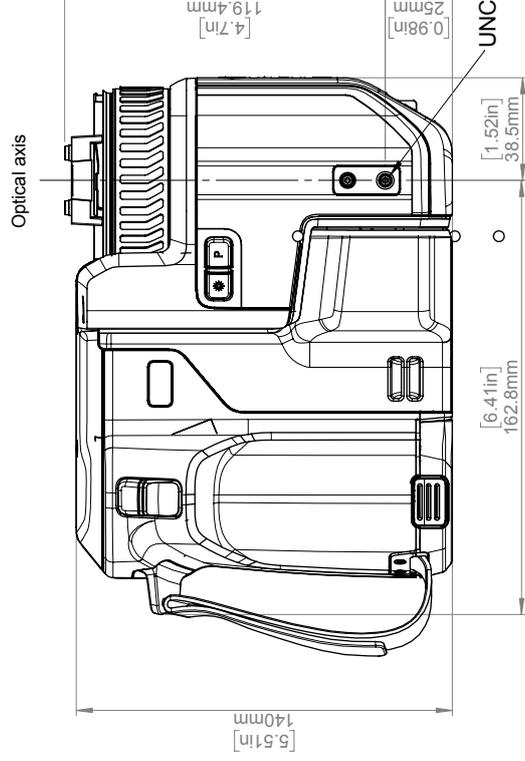
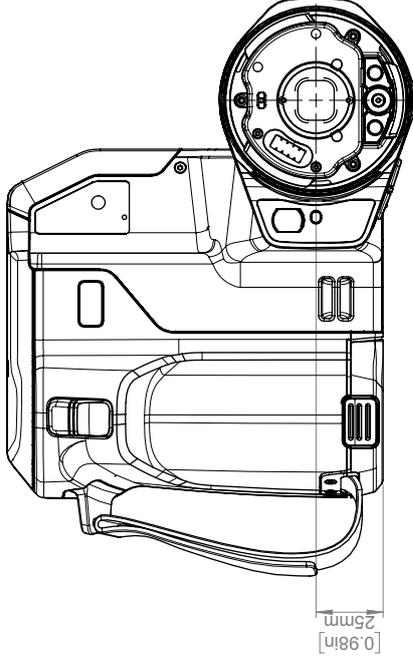
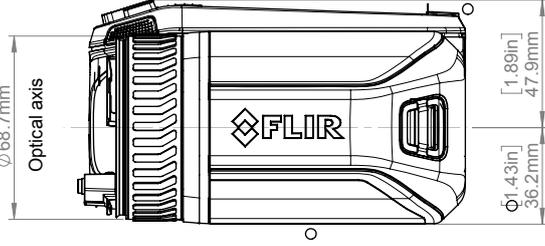
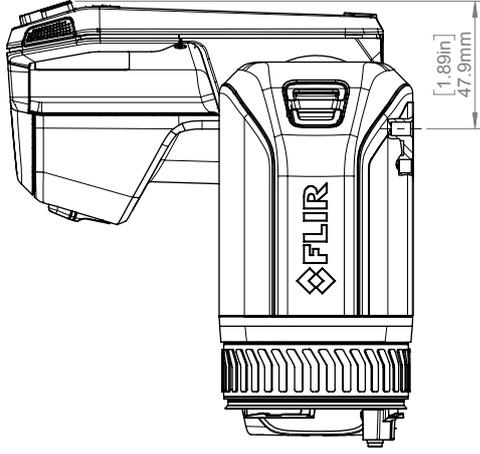
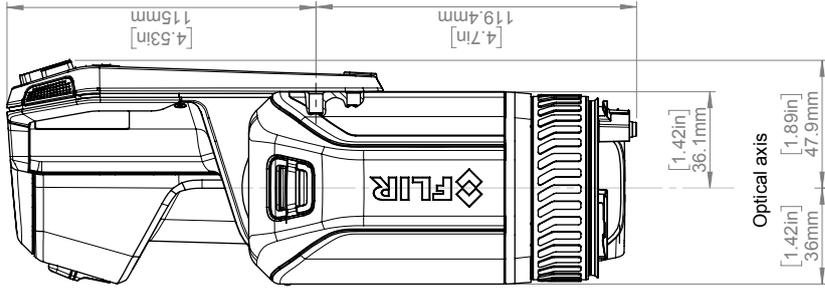
**P/N: 79306-0201**

© 2019, FLIR Systems, Inc.

#79306-0201; r. 55335;

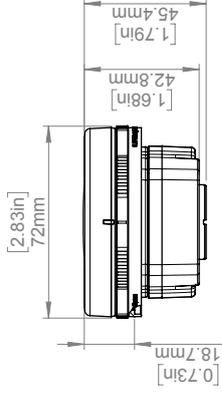
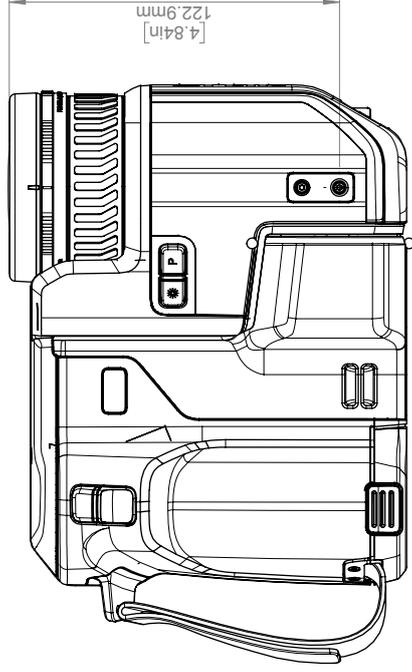
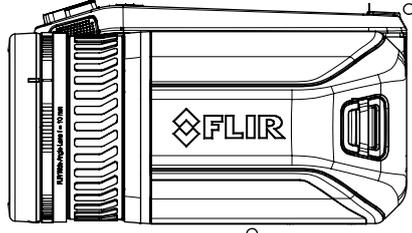
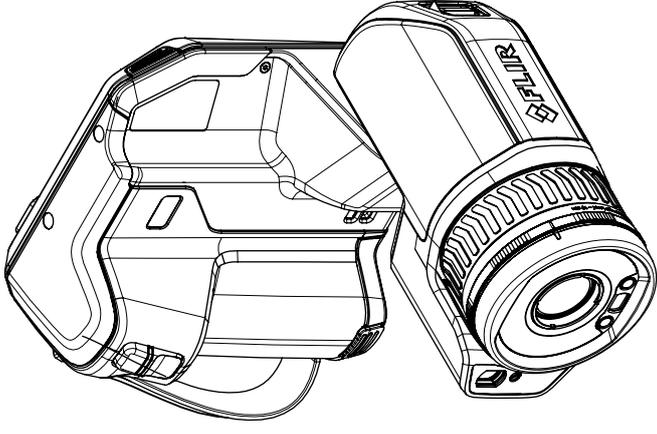
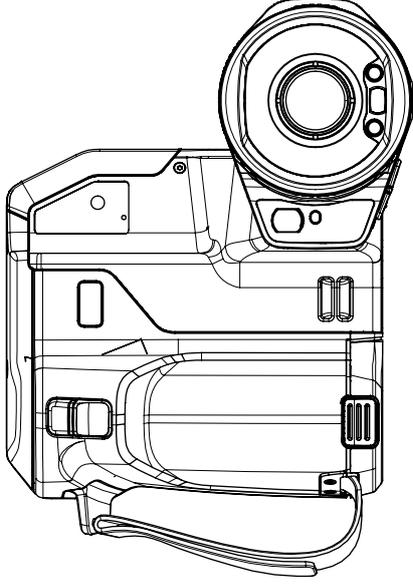
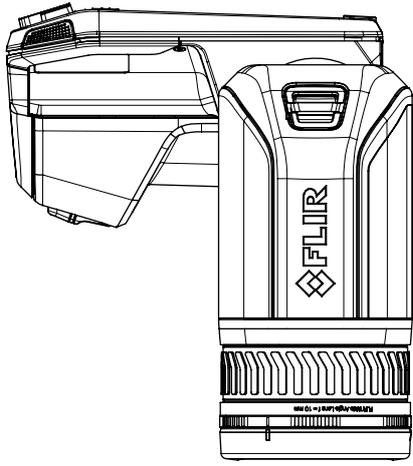
- T197771ACC; Bluetooth Headset
- T198583; FLIR Tools+ (download card incl. license key)
- T198696; FLIR ResearchIR Max 4 (hardware sec. dev.)
- T199013; FLIR ResearchIR Max 4 (printed license key)
- T199043; FLIR ResearchIR Max 4 Upgrade (printed license key)
- INST-EW-0155; Extended Warranty 1 Year for A3xxf, T540, T600/bx, T610
- INST-EWGM-0165; Premium Service Package for T540, T600/bx, T610
- INST-GM-0150; General Maintenance Package for T540, T6xx

# Camera housing



Modified	2017-02-17	Check	-	Drawn by	R&D Instruments	Size	A3	FLIR	
Denomination						Scale	1:2	Sheet	1(3)
						Drawing No.	T129991	Rev	A
Basic dimensions FLIR T5xx									

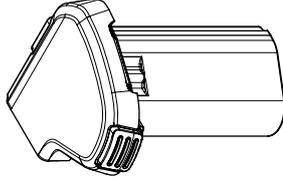
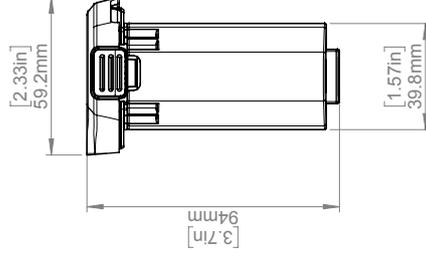
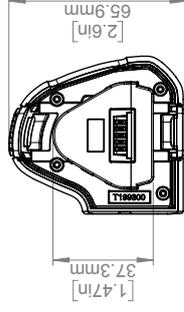
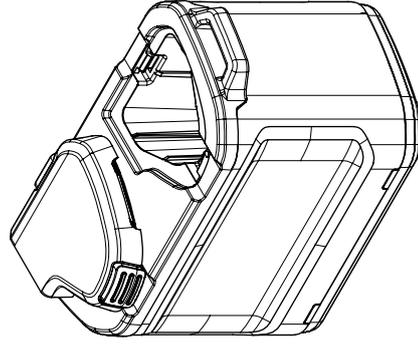
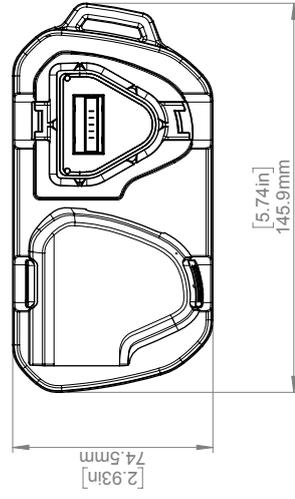
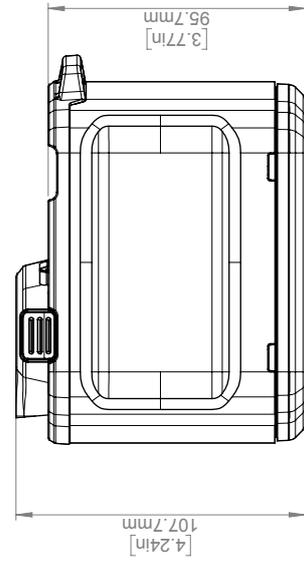
Camera with Lens IR f=10mm (42°)  
 Camera with Lens IR f=17mm (24°)  
 Camera with Lens IR f=29mm (14°)



For additional dimensions see page 1

Modified 2017-02-17	Check	Drawn by R&D Instruments	FLIR
Denomination		Size A3	Sheet 2(3)
Basic dimensions FLIR T5xx			Rev A
Drawing No. T129991			

# Battery Charger



Modified	2017-02-17	Check	-	Drawn by	R&D Instruments
Denomination	Basic dimensions FLIR T5xx				
Size	A3				
Scale	1:5				
Sheet	3(3)				
Rev	T129991				





February 2, 2019 Täby, Sweden

AQ320246

**CE Declaration of Conformity – EU Declaration of Conformity**

Product: FLIR T5XX-, T8XX- and GF7X-series  
Name and address of the manufacturer:  
FLIR Systems AB  
PO Box 7376  
SE-187 15 Täby, Sweden

This declaration of conformity is issued under the sole responsibility of the manufacturer.  
The object of the declaration: FLIR T5XX-, T8XX- and GF7X-series (Product Model Name FLIR-T8210).  
The object of the declaration described above is in conformity with the relevant Union harmonisation legislation:

**Directives:**

Directive	2012/19/EU	Waste electrical and electric equipment
Directive	2014/53/EU	Radio Equipment Directive (RED)
Directive	1999/519/EC	Limitation of exposure to electromagnetic fields (SAR)
Directive	2011/65/EU	RoHS and 2015/830/EU

**Standards:**

EMC Radio:	ETSI EN 301 489-1 + -17	EMC for radio, broadband data transmission
Emission:	EN 61000-6-3/A1:2011	EMC – Generic standards
Immunity:	EN 61000-6-2:2005	Electromagnetic Compability Generic
	EN 301489-1:2016 v2.1.0	ERM – EMC for radio equipment
	EN 301489-17:2012 v2.2.1	ERM – EMC Wideband data
Laser:	EN 60825-1	Safety of laser products
Radio:	ETSI EN 300 328 v2.1.1	Harmonized EN covering essential requirements of the R&TTE Directive
	ETSI EN 301 893 v.2.1.1	5GHz WLAN
	EN 303 413 v1.1.0	Radio Spectrum Efficiency (gps)
SAR:	EN 50566:2013/AC:2014	Handheld and body mounted wireless
Safety:	EN 62209-02:2010	Handheld and body mounted wireless
	IEC 60950-1:2005+A1:2009+A2:2013 EN 60950-1:2006+A11:2009+AC:2011+A12:2011	Information technology equipment
RoHS:	EN 50581:2012	Technical documentation

**FLIR Systems AB**  
Quality Assurance

Lea Dabiri  
Quality Manager

# REFERENCIAS

- [1] «NFPA report - Home Electrical Fires». Accedido 30 de noviembre de 2022.  
<https://www.nfpa.org/News-and-Research/Data-research-and-tools/Electrical/Electrical>.
- [2] O EZ, M. (n.d.). Application manual Arc fault detection devices AFDD.
- [3] Gurrea, Alfonso Baigorri. «40 ficha técnica de prevención», s. f., 6.
- [4] National Electrical Code, SC 22-4-8 / TIA Log #1617 § (2022).
- [5] DIN VDE 0100-420:2019-10 (2019).
- [6] AMD 2 (BS7671:2018+A2:2022).
- [7] Admin. «The History of Thermography». *Lisa's Thermography and Wellness* (blog), 19 de junio de 2018. <https://lisasthermographyandwellness.com/the-history-of-thermography/>.
- [8] E. Francis. J. Ring. «History of Thermology and Thermography: Pioneers and Progress». *Medical imaging Research Unit, Faculty of Advanced Technology University of Glamorgan. Pontypridd CF37 1DL United Kingdom*, Book of Proceedings - Appendix 1 of Thermology international 22/3 (2012)
- [9] Bagavathiappan, S., B.B. Lahiri, T. Saravanan, John Philip, y T. Jayakumar. «Infrared Thermography for Condition Monitoring – A Review». *Infrared Physics & Technology* 60 (septiembre de 2013): 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>.
- [10] Jadin, Mohd Shawal, y Soib Taib. «Recent Progress in Diagnosing the Reliability of Electrical Equipment by Using Infrared Thermography». *Infrared Physics & Technology* 55, n.º 4 (julio de 2012): 236-45. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>.
- [11] Ali, Hanafy. «MRI Medical Image Denoising by Fundamental Filters», 2018.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.72427>.
- [12] Fenercom, «Guia de la Termografia Infrarroja Aplicaciones en Ahorro y Eficiencia Energetica», 2011. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2011/11/Guia-de-la-Termografia-Infrarroja-Aplicaciones-en-Ahorro-y-Eficiencia-Energetica-fenercom-2011.pdf>
- [13] Hui, Zou, y Huang Fuzhen. «An intelligent fault diagnosis method for electrical equipment using infrared images». En *2015 34th Chinese Control Conference (CCC)*, 6372-76. Hangzhou, China: IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260642>.
- [14] D.Sc. Marek FIDALI, SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, DEPARTMENT OF FUNDAMENTALS OF MACHINERY DESIGN. «Thermographic Criteria of Evaluation of Technical Condition of Machinery and Equipment», s. f.
- [15] Schneider Electric. «Dispositivo de detección de fallos de arco Acti9 iC40N ARC», 30 de septiembre de 2021.
- [16] «Arco eléctrico». En *Wikipedia, la enciclopedia libre*, 10 de agosto de 2022.  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Arco\\_el%C3%A9ctrico&oldid=145294222](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Arco_el%C3%A9ctrico&oldid=145294222).

- [17] Ministerio de industria, comercio y turismo. «GUÍA TÉCNICA DE APLICACIÓN: PROTECCIONES. PROTECCIÓN CONTRA LOS CONTACTOS DIRECTOS E INDIRECTOS», junio de 2019.
- [18] shino, R. «Detection of a faulty power distribution apparatus by using thermal images». En *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, 2:1332-37. New York, NY, USA: IEEE, 2002.  
<https://doi.org/10.1109/PESW.2002.985233>.
- [19] IEEE Standards Association. (2004). IEEE Standard 112-2004: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE.
- [20] Patrick, D. R., & Fardo, S. W. (2013). *Electricity and electronics fundamentals* (2nd ed.). Delmar Cengage Learning.
- [21] Nilsson, J. W., & Riedel, S. A. (2016). *Electric Circuits* (10th ed.). Pearson Education.
- [22] Wang, F., Zhao, Y., Liu, X., & Chen, Z. (2016). Contact resistance characteristic research of electrical connector under different temperatures. *Measurement*, 92, 256-263.  
doi:10.1016/j.measurement.2016.06.015
- [23] Borsi, H., & Santini, S. (2018). *Electrical contacts: fundamentals, applications and technology* (1st ed.). CRC Press.
- [24] Skjeltop, A. T. (1986). The electrical resistivity of metals and alloys. In *Proceedings of 1986 IEEE International Conference on Electrical Insulation* (pp. 107-114). IEEE.
- [25] Ministerio de ciencia y tecnología. (2003). ANEXO II: Cálculos de caídas de tensión (Guías Técnicas de aplicación del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión).
- [26] Ministerio de ciencia y tecnología. (2003). ITC-BT-07, Redes subterráneas para distribución en baja tensión (Guías Técnicas de aplicación del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión).
- [27] Ministerio de ciencia y tecnología. (2009). ITC-BT-19, Instalaciones interiores o receptoras, prescripciones generales (Guías Técnicas de aplicación del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión).
- [28] Safarova, Veronika, Lubos Hes, y Jiri Militky. «An Approach to Electrical Resistance Measurement Eliminating Contact Resistance Problem». En *2014 International Conference on Applied Electronics*, 259-62. Pilsen, Czech Republic: IEEE, 2014.  
<https://doi.org/10.1109/AE.2014.7011715>.
- [29] (s. f.). Ficha técnica interrupto automático serie NB1. <https://www.chint.eu/es/material-electrico/aparamenta-modular/interruptores-automaticos-magnetotermicos/serie-nb1>

- [30] Electric power connection for substations. (2009). Recuperado de <https://www.powerandcables.com/wp-content/uploads/2016/12/ANSI-NEMA-CC-1-2009-Electric-Power-For-Substations.pdf>
- [31] WAGO Spain. «Tecnología de conexión por resorte de presión libre de mantenimiento para aplicaciones marítimas y en alta mar». Accedido 6 de junio de 2023. <https://www.wago.com/es/marine-offshore-solutions/maintenance-free-spring-pressure-connection-technology>.