

Artículo de Investigación

## Evaluación experimental de la respuesta térmica superficial de sistemas de conexión en circuitos monofásicos de baja tensión

*Experimental evaluation of the surface thermal response of connection systems in low-voltage single-phase circuits*

Rubén Darío Tirira Chulde<sup>1</sup>, Lenin Ramiro Merino Villegas<sup>1</sup>, Gregory Said Alarcon Cepeda<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior Universitario Sucre, Quito, Ecuador, 170128;

lmerino@tecnologicosucre.edu.ec; alarcon.cepedagregory@gmail.com

\*Correspondencia: dtirira@tecnologicosucre.edu.ec

**Citación:** Tirira, R.; Merino, L. & Alarcon, G., (2026). Evaluación experimental de la respuesta térmica superficial de sistemas de conexión en circuitos monofásicos de baja tensión. *Novasinerugia*. 9(2). 196-213.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.18.10>

Recibido: 28 mayo 2026

Aceptado: 24 junio 2026

Publicado: 08 julio 2026

Novasinerugia

ISSN: 2631-2654

**Resumen:** Este estudio evaluó experimentalmente la respuesta térmica superficial de sistemas de conexión empleados en circuitos monofásicos de baja tensión con cargas progresivas. Se analizaron conectores de palanca de dos vías y un empalme de derivación por torsión, instalados en un circuito de 127 V con conductor de cobre calibre 12 AWG. La temperatura superficial del punto de unión y del conductor adyacente se registró mediante termografía infrarroja durante 120 min por condición. El análisis consideró la evolución temporal de la temperatura, la elevación térmica respecto del estado inicial y la propagación superficial del calentamiento hacia el conductor. Los resultados evidenciaron respuestas térmicas diferenciadas aún bajo condiciones eléctricas equivalentes. Los conectores 221-682 y 221-412 presentaron las menores elevaciones térmicas y una propagación más contenida hacia el conductor. El P04-2P mostró una respuesta intermedia, mientras que el empalme de derivación alcanzó una condición intermedia alta. En contraste, el conector genérico registró la condición más crítica, con una temperatura final de 85,1 °C en la condición de mayor carga. Se concluye que la continuidad eléctrica inicial no garantiza un desempeño térmico equivalente entre métodos de unión; por ello, la evaluación debe considerar la temperatura máxima, la evolución temporal, la elevación térmica y la propagación hacia el conductor.

**Palabras clave:** Baja tensión, Calentamiento localizado, Conectores eléctricos, Elevación térmica, Empalme eléctrico, Calentamiento localizado, Termografía infrarroja.

**Abstract:** This study experimentally evaluated the surface thermal response of connection systems used in low-voltage single-phase circuits with progressive loads. Two-way lever connectors and a twisted branch splice were analyzed in a 127 V circuit using 12 AWG copper conductors. The surface temperatures of the connection point and the adjacent conductor were recorded using infrared thermography for 120 min under each condition. The analysis considered the temporal evolution of temperature, the thermal rise relative to the initial state, and the surface propagation of heat toward the conductor. The results showed differentiated thermal responses even under equivalent electrical conditions. The 221-682 and 221-412 connectors exhibited the lowest thermal rises and more limited heat propagation toward the conductor. The P04-2P showed an intermediate response, whereas the twisted branch splice reached an intermediate-high condition. In contrast, the generic connector exhibited the most critical behavior, reaching a final temperature of 85.1 °C under the highest load. It is concluded that initial electrical continuity does not guarantee equivalent thermal performance among connection methods; therefore, the evaluation should consider maximum temperature, temporal evolution, thermal rise, and heat propagation toward the conductor.

**Keywords:** Low voltage, Localized heating, Electrical connectors, Thermal rise, Electrical splice, Infrared thermography.



Copyright: 2026 derechos otorgados por los autores a Novasinerugia.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 1. Introducción

En las instalaciones eléctricas de baja tensión, la continuidad del circuito no depende únicamente de los conductores, sino también de las uniones empleadas para alimentar cargas, adaptar recorridos e integrar dispositivos de maniobra, control o protección. Estas uniones pueden ejecutarse mediante empalmes, terminales, bornes o conectores, según la sección del conductor, el nivel de tensión, la aplicación y las condiciones de montaje. Aunque la selección del conductor y de los dispositivos de protección se apoya en marcos técnicos normalizados, el desempeño operativo también depende de la calidad física del contacto eléctrico, de la compatibilidad entre conductor y sistema de unión, y de las condiciones de sujeción. En este contexto, normas como IEC 60998-2-2:2002 e IEC 60999-1:1999 establecen requisitos para dispositivos de conexión y unidades de apriete en circuitos de baja tensión, mientras que IEC 60228:2023 contextualiza la especificación de los conductores empleados en instalaciones eléctricas [1]–[3].

Los métodos de unión no establecen el contacto eléctrico de la misma forma. Los conectores de palanca incorporan un mecanismo de sujeción definido, mientras que el empalme depende de la preparación manual del conductor, la longitud efectiva de contacto, la presión generada por la torsión y el aislamiento posterior. Esta diferencia constructiva es relevante porque la presión de contacto, el área efectiva de conducción, el estado superficial de los conductores, la geometría de la unión y las propiedades de los materiales pueden modificar la resistencia local y, en consecuencia, la generación de calor por efecto Joule. Estudios recientes sobre contactos eléctricos y conectores han demostrado que el comportamiento térmico depende de la interacción entre variables eléctricas, térmicas y mecánicas, especialmente cuando la resistencia de contacto aumenta o la distribución de presión no es uniforme [4]–[8].

El calentamiento localizado en una unión eléctrica no siempre produce una falla inmediata, pero puede modificar la estabilidad térmica del conjunto y acelerar procesos de degradación. El aumento progresivo de la resistencia de contacto se asocia con pérdida de calidad del contacto, incremento de temperatura y reducción de vida útil del componente. En conectores de potencia, la resistencia eléctrica y la temperatura se han utilizado como indicadores de condición operativa, estimación de vida útil remanente y diagnóstico predictivo. Por ello, la evaluación de una unión no debe limitarse a su continuidad inicial, sino considerar su evolución térmica superficial durante operación sostenida [9]–[15].

La termografía infrarroja permite evaluar este comportamiento mediante la identificación de calentamientos superficiales sin intervenir directamente el circuito durante la operación. Su aplicación en equipos eléctricos ha sido documentada para inspección, diagnóstico y monitoreo de condición, siempre que se controlen factores como emisividad, distancia de medición, orientación de captura, carga aplicada y naturaleza superficial de la lectura térmica. Además, [16] y [17] respaldan la necesidad de controlar la emisividad y aplicar criterios adecuados en la inspección termográfica de equipos eléctricos y mecánicos. Sin embargo, la inspección termográfica no sustituye los ensayos normativos de certificación; por tanto, sus resultados deben interpretarse como evidencia comparativa de temperatura

superficial bajo condiciones controladas, no como validación universal del desempeño de un componente [16]–[21].

En este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar experimentalmente la respuesta térmica superficial de conectores de palanca y empalmes por torsión en un circuito monofásico de baja tensión. El análisis compara la evolución térmica de las uniones bajo condiciones controladas de operación, considerando la corriente circulante, el tiempo de funcionamiento y la propagación de temperatura hacia el conductor. Esta comparación se orienta a una brecha aplicada poco documentada: la evaluación directa, bajo una misma configuración de ensayo, de conectores comerciales, conectores sin certificación verificable y empalmes manuales empleados en circuitos de baja tensión. A partir de esta evaluación se establecen criterios comparativos para diferenciar comportamientos térmicos estables, intermedios y críticos, sin limitar el análisis a la temperatura máxima registrada ni asumir mediciones internas del contacto eléctrico.

## 2. Metodología

### 2.1. Configuración del circuito experimental

El ensayo se desarrolló en un módulo experimental de instalaciones eléctricas residenciales, diseñado para reproducir un circuito monofásico de baja tensión. La alimentación se tomó desde un tablero de distribución del laboratorio, con tensión nominal fase-neutro de 127 V y frecuencia de 60 Hz. El circuito se implementó con conductores de cobre calibre 12 AWG y cargas conectadas en paralelo, de modo que el incremento progresivo de demanda pudiera realizarse sin modificar la arquitectura principal del montaje. La distancia aproximada entre el punto de alimentación y la unión evaluada fue de 3 m, manteniéndose la misma disposición física durante las condiciones de ensayo. El sistema de unión evaluado se instaló entre la alimentación proveniente del tablero y el circuito de cargas, tanto en el conductor de fase como en el conductor neutro. En cada caso, una vía recibió el conductor de alimentación y la otra se conectó al conductor de salida hacia las cargas. Esta configuración permitió comparar conectores de palanca y empalmes bajo condiciones equivalentes de operación, conservando constante la arquitectura eléctrica del circuito activo fase-neutro.

Para precisar la disposición física del ensayo, la Figura 1 presenta el esquema general del montaje experimental empleado. La representación se limita al circuito activo fase-neutro utilizado para alimentar las uniones evaluadas y el banco de cargas, sin incorporar elementos ajenos a las variables analizadas. La unión bajo estudio se ubicó entre la alimentación proveniente del tablero y el banco de cargas, con puntos de referencia térmica en la propia unión, a 2 cm y a 10 cm aguas abajo sobre el conductor. Esta disposición permitió mantener una arquitectura común para todos los conectores y el empalme evaluado.

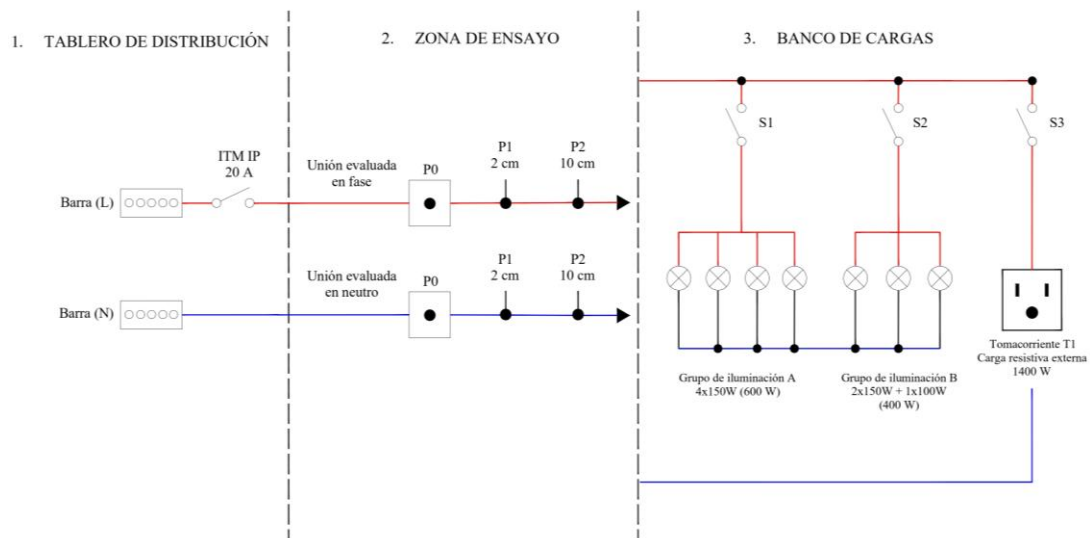


Figura 1. Esquema del montaje experimental monofásico empleado para la evaluación térmica de las uniones.

El esquema diferencia tres zonas funcionales del montaje: alimentación desde tablero, zona de ensayo y banco de cargas. En la zona de ensayo se ubicó la unión evaluada en fase y neutro, manteniendo los mismos puntos de medición superficial para cada condición experimental. El banco de cargas se conformó por grupos de iluminación y una carga resistiva externa de 1400 W. Esta última se conectó mediante tomacorriente y extensión, y se ubicó fuera del área inmediata de medición para reducir la influencia térmica directa del calefactor sobre las lecturas termográficas de la unión. Por tanto, la carga resistiva contribuyó al incremento de corriente del circuito, pero no actuó como fuente de calentamiento próxima al punto medido.

## 2.2. Uniones evaluadas

La comparación experimental consideró cuatro conectores de palanca de dos vías y un empalme de derivación por torsión de conductores. Los conectores fueron caracterizados mediante los parámetros técnicos disponibles, mientras que el empalme se trató como una condición experimental independiente, debido a que no corresponde a un componente comercial con valores nominales equivalentes de tensión, corriente, temperatura máxima, dimensiones o certificaciones declaradas. Para los conectores con documentación técnica disponible se emplearon fichas del fabricante o información comercial del producto; en el caso del conector genérico, los datos se consideraron únicamente descriptivos, por no contar con ficha técnica certificada ni documentación normativa verificable. Las características técnicas de los conectores evaluados se presentan en la Tabla 1. Para los modelos 221-682 y 221-412 se utilizaron fichas del fabricante [22], [23]; para los conectores P04-2P y genérico, los datos se consideraron a partir de la información comercial o rotulado del producto. El empalme de derivación por torsión se incluyó como referencia comparativa debido a su uso en instalaciones de baja tensión y a que su desempeño depende de la preparación del conductor, la longitud efectiva de contacto, la presión generada por la torsión, la uniformidad geométrica y el aislamiento aplicado.

Tabla 1. Características técnicas de los conectores evaluados.

Parámetro	221-682	221-412	P04-2P	Genérico
Puntos de conexión	2	2	2	2
Tecnología de conexión	Cage Clamp	Cage Clamp	Palanca	Palanca
Conductores admisibles	Rígido, semirrígido, flexible	Rígido, semirrígido, flexible	Rígido, trenzado, flexible	Rígido, trenzado, flexible
Sección admisible	0,5–6 mm <sup>2</sup>	0,14–4 mm <sup>2</sup>	0,2–4 mm <sup>2</sup>	0,5–4 mm <sup>2</sup>
Equivalencia AWG	20–10 AWG	24–12 AWG	24–12 AWG	20–12 AWG
Longitud de pelado	12–14 mm	11 mm	13 mm	14 mm
Tensión asignada	450 V	440 V	400 V	250 V
Corriente asignada	41 A	25 A	25 A	25 A
Temperatura máxima	105 °C	85 °C	95 °C	85 °C
Material de aislamiento	Polycarbonato	Polycarbonato	Polímero translúcido	Polímero translúcido
Inflamabilidad	UL 94 V-2	UL 94 V-2	UL 94 V-2	UL 94 HB
Dimensiones	16,0 × 10,1 × 21,1 mm	13,2 × 8,4 × 18,6 mm	13,5 × 8,5 × 19,0 mm	17,5 × 10,5 × 13,0 mm
Certificación declarada	ATEX, IECEX, RoHS	RoHS	CQC, RoHS, REACH	Sin certificación verificable

### 2.3. Condiciones de carga y operación

El circuito experimental se sometió a cuatro niveles de potencia instalada nominal, correspondientes a 600 W, 1400 W, 2000 W y 2400 W. Estos escalones se establecieron mediante la combinación de cargas de iluminación y una carga resistiva externa. El escalón de 600 W se obtuvo mediante el grupo de iluminación A, conformado por cuatro lámparas de 150 W. El escalón de 1400 W correspondió a un calefactor eléctrico utilizado como carga resistiva externa, operado en su nivel máximo de funcionamiento según el rotulado del equipo. El escalón de 2000 W se obtuvo mediante la conexión simultánea del grupo de

iluminación A y la carga resistiva externa. Finalmente, el escalón de 2400 W se alcanzó mediante la conexión conjunta del grupo de iluminación A, el grupo de iluminación B y la carga resistiva externa; el grupo de iluminación B estuvo conformado por dos lámparas de 150 W y una lámpara de 100 W. La potencia de cada condición se determinó a partir de la suma de las potencias nominales de las cargas conectadas, mientras que la condición eléctrica de operación se verificó mediante la medición de corriente en fase y neutro.

La carga resistiva externa se conectó mediante una extensión y se ubicó fuera de la zona inmediata de medición termográfica, con el fin de reducir la influencia térmica directa del calefactor sobre las lecturas realizadas en las uniones. Esta disposición permitió utilizar el calefactor como elemento de incremento de corriente del circuito, sin introducir una fuente de calor próxima al punto de medición. Cada condición de carga se aplicó durante 120 min continuos en un circuito monofásico de baja tensión con conductor de cobre calibre 12 AWG, manteniendo constantes la configuración del circuito, la disposición de las uniones y el intervalo de registro.

#### 2.4. *Variables medidas e instrumentación*

El seguimiento térmico se realizó con una cámara termográfica Fluke TiS20+ MAX 9 Hz, utilizada para registrar la temperatura superficial aparente en el punto de unión y en el conductor asociado. Para mantener condiciones de captura comparables, se empleó una emisividad de 0,95, una distancia de observación entre 0,50 m y 0,60 m, y una orientación próxima a la perpendicular respecto de la superficie evaluada. Estos parámetros fueron definidos considerando que la termografía infrarroja registra radiación superficial emitida por el objeto y no la temperatura interna del contacto eléctrico. De acuerdo con la ficha técnica del equipo, la cámara dispone de corrección de emisividad en pantalla y exactitud de  $\pm 2$  °C o  $\pm 2$  %, por lo que los resultados se interpretaron como mediciones superficiales comparativas [24].

Las variables térmicas consideradas fueron la temperatura del punto de unión, la temperatura del conductor a 2 cm y la temperatura del conductor a 10 cm. Esta selección permitió diferenciar el calentamiento localizado en la conexión respecto de la propagación térmica hacia el conductor. Como control eléctrico se midieron la corriente de fase y la corriente de neutro. Estas mediciones se realizaron mediante una pinza amperimétrica Fluke 323 True-RMS, empleada para confirmar la equivalencia eléctrica entre ensayos y no como variable principal de desempeño térmico. De forma complementaria, se utilizó un termómetro infrarrojo Fluke 62 MAX para comprobaciones puntuales de temperatura superficial durante el montaje; sin embargo, el registro térmico empleado en el análisis comparativo correspondió a la cámara termográfica.

#### 2.5. *Procedimiento experimental*

El procedimiento se desarrolló de forma secuencial para cada unión evaluada y para cada escalón de carga. Una vez instalado el sistema de conexión correspondiente, se verificó la continuidad del circuito y se aplicó el nivel de potencia definido para la condición de ensayo. Antes de energizar cada prueba se registró la temperatura inicial de la unión, utilizada posteriormente como referencia para calcular la elevación térmica. El registro

térmico y eléctrico inició en  $t = 0$  y continuó en intervalos de 10 min hasta completar 120 min de operación sostenida. Al finalizar cada ensayo, el circuito se desenergizó y el montaje permaneció en reposo durante 24 h antes de iniciar una nueva condición de prueba. Se realizó un ensayo por día, con el fin de reducir la influencia del calentamiento residual y mantener condiciones iniciales comparables. Antes de cada prueba se registró la temperatura ambiente y la temperatura inicial de la unión, verificando que ambas se mantuvieran en valores próximos al inicio de cada jornada experimental. La misma secuencia se aplicó a todos los conectores y al empalme de derivación por torsión, conservando los mismos intervalos de registro y duración de ensayo.

El empalme de derivación por torsión se preparó mediante un procedimiento controlado de laboratorio, ejecutado por la misma persona en todas las condiciones de ensayo. Los conductores fueron pelados, entrelazados mediante herramienta manual y aislados posteriormente, sin empleo de soldadura ni elemento conector adicional. Debido a la dependencia del método respecto de la ejecución manual, el empalme se consideró una condición experimental independiente y no un componente con parámetros nominales equivalentes a los conectores comerciales.

## 2.6. *Tratamiento y análisis de datos*

Los datos se organizaron según la unión evaluada, el escalón de carga y el tiempo de operación. El análisis se centró en la evolución térmica del punto de unión, la propagación de temperatura hacia el conductor y la comparación relativa entre métodos de conexión. La elevación térmica se calculó mediante la expresión  $\Delta T = T_{120} - T_0$ , donde  $T_{120}$  corresponde a la temperatura registrada al final del ensayo y  $T_0$  a la temperatura inicial de la misma condición. La tasa media de calentamiento se obtuvo como  $\Delta T/120$  min, por lo que se utilizó como indicador global del incremento térmico durante el periodo completo de operación y no como pendiente instantánea del proceso.

Para analizar la distribución espacial de temperatura se calcularon los gradientes entre el punto de unión y el conductor a 2 cm y 10 cm. Estos gradientes se determinaron como  $\Delta T_{\text{unión}-2 \text{ cm}} = T_{\text{unión}} - T_{2 \text{ cm}}$  y  $\Delta T_{\text{unión}-10 \text{ cm}} = T_{\text{unión}} - T_{10 \text{ cm}}$ , considerando los valores registrados al minuto 120 bajo la condición de mayor carga. Los indicadores obtenidos se interpretaron como variables comparativas de severidad térmica superficial, no como mediciones directas de flujo de calor ni de temperatura interna del contacto, en concordancia con el uso de termografía infrarroja como técnica de inspección superficial en sistemas eléctricos.

Cada condición experimental se ejecutó una sola vez, sin réplicas independientes por tipo de unión y escalón de carga; por esta razón, el análisis se planteó como una comparación experimental controlada entre sistemas de conexión bajo la configuración ensayada, sin estimación de dispersión estadística ni inferencia sobre reproducibilidad intermontaje. Aunque el análisis relaciona la condición eléctrica de operación con la respuesta térmica de las uniones, el estudio no incorporó mediciones directas de resistencia de contacto ni caída de tensión localizada en cada sistema de conexión. Por tanto, las diferencias térmicas observadas se interpretaron como evidencia comparativa indirecta del desempeño eléctrico local, no como una cuantificación directa de las pérdidas internas por contacto.

### 3. Resultados

#### 3.1. Verificación eléctrica de las condiciones de ensayo

Previamente al análisis térmico, se verificó la condición eléctrica de los ensayos mediante los registros de corriente en fase y neutro. Como se presenta en la Tabla 2, los niveles de corriente aumentaron de acuerdo con la potencia instalada, con valores aproximados de 4,7 A, 11,0 A, 15,8 A y 19,0 A para 600 W, 1400 W, 2000 W y 2400 W, respectivamente. Esta correspondencia confirmó que las uniones fueron evaluadas bajo niveles crecientes y comparables de exigencia eléctrica.

Tabla 2. Resumen eléctrico de las condiciones de ensayo.

Potencia instalada (W)	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)
600	4,7	4,7
1400	10,9–11,0	10,9–11,0
2000	15,7–15,8	15,7
2400	18,9–19,0	18,9

Como se observa en la Tabla 2, la corriente de fase y la corriente de neutro se mantuvieron en rangos equivalentes para cada escalón de carga. Los rangos indicados corresponden a variaciones observadas durante el registro experimental y al redondeo de lectura del instrumento; no representan escalones de carga distintos. En consecuencia, las diferencias de temperatura analizadas en las secciones siguientes se interpretan principalmente en función del comportamiento térmico superficial de cada sistema de conexión bajo condiciones eléctricas comparables.

#### 3.2. Indicadores térmicos del punto de unión

Una vez verificada la condición eléctrica de los ensayos, se evaluó la respuesta térmica del punto de unión para cada sistema de conexión. La Tabla 3 presenta la temperatura inicial, la temperatura registrada al minuto 120, la elevación térmica y la tasa media de calentamiento para los cuatro niveles de potencia instalada. Estos indicadores permiten comparar el calentamiento desarrollado durante operación sostenida sin limitar el análisis a la temperatura absoluta registrada al cierre de la prueba.

Tabla 3. Indicadores térmicos del punto de unión.

Unión evaluada	Potencia instalada (W)	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	Elevación térmica, $\Delta T$ (°C)	Tasa media (°C/min)
221-682	600	17,7	20,9	3,2	0,027
221-682	1400	17,9	23,4	5,5	0,046
221-682	2000	18,0	26,1	8,1	0,068
221-682	2400	18,1	28,1	10,0	0,083
221-412	600	17,9	22,6	4,7	0,039
221-412	1400	18,1	26,1	8,0	0,067
221-412	2000	18,3	28,9	10,6	0,088
221-412	2400	18,5	31,4	12,9	0,108
P04-2P	600	17,9	24,7	6,8	0,057
P04-2P	1400	18,2	29,6	11,4	0,095
P04-2P	2000	18,4	34,0	15,6	0,130
P04-2P	2400	18,6	37,6	19,0	0,158
Empalme	600	18,0	26,8	8,8	0,073
Empalme	1400	18,2	34,4	16,2	0,135
Empalme	2000	18,5	41,3	22,8	0,190
Empalme	2400	18,8	49,5	30,7	0,256
Genérico	600	18,2	37,0	18,8	0,157
Genérico	1400	18,5	48,6	30,1	0,251
Genérico	2000	18,8	66,1	47,3	0,394
Genérico	2400	19,0	85,1	66,1	0,551

Como se observa en la Tabla 3, los conectores 221-682 y 221-412 presentaron las menores elevaciones térmicas bajo 2400 W, con  $\Delta T = 10,0$  °C y  $\Delta T = 12,9$  °C, respectivamente. El P04-2P mostró una respuesta intermedia, con  $\Delta T = 19,0$  °C, mientras que el empalme de derivación alcanzó  $\Delta T = 30,7$  °C y se ubicó en una condición intermedia alta. En contraste, el conector genérico concentró la respuesta térmica más severa, con una temperatura final de 85,1 °C y  $\Delta T = 66,1$  °C. Este resultado no demuestra fusión del conductor ni del elemento metálico de contacto; sin embargo, sí evidencia una condición térmica crítica bajo las condiciones de operación aplicadas, especialmente porque la temperatura superficial final alcanzó prácticamente el valor máximo declarado para el componente. A partir de los indicadores de la Tabla 3, la Figura 2 organiza la elevación térmica del punto de unión según el sistema de conexión y la potencia instalada. Esta representación permite identificar la distribución relativa del calentamiento y comparar, en una sola lectura, la respuesta de las uniones evaluadas al minuto 120.

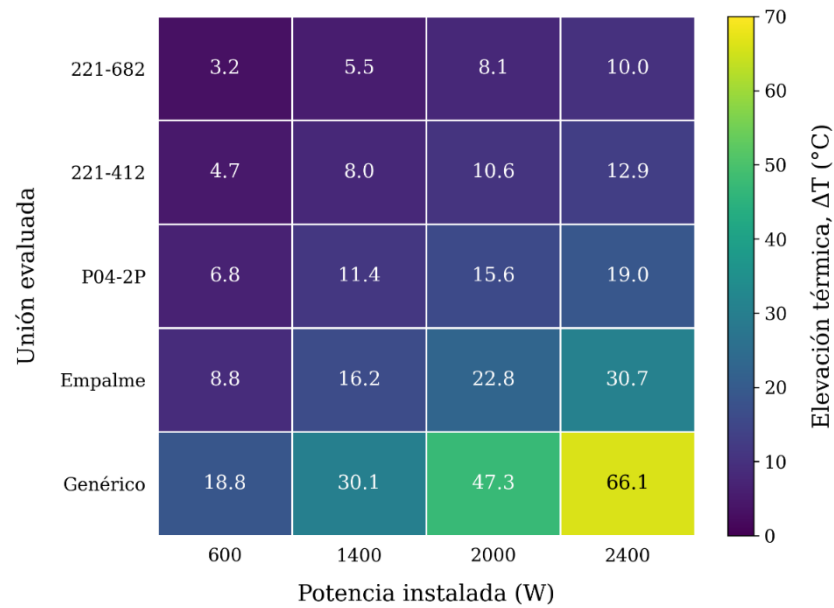


Figura 2. Mapa comparativo de elevación térmica del punto de unión al minuto 120.

La Figura 2 evidencia que la elevación térmica no se distribuyó de forma equivalente entre los sistemas de conexión. Los conectores 221-682 y 221-412 concentraron los menores valores de  $\Delta T$ , mientras que el P04-2P y el empalme de derivación ocuparon niveles progresivamente mayores. El conector genérico presentó la condición más severa, especialmente bajo 2000 W y 2400 W, lo que confirma que la diferencia entre sistemas no se limitó a una variación puntual, sino a una separación térmica consistente frente al incremento de carga.

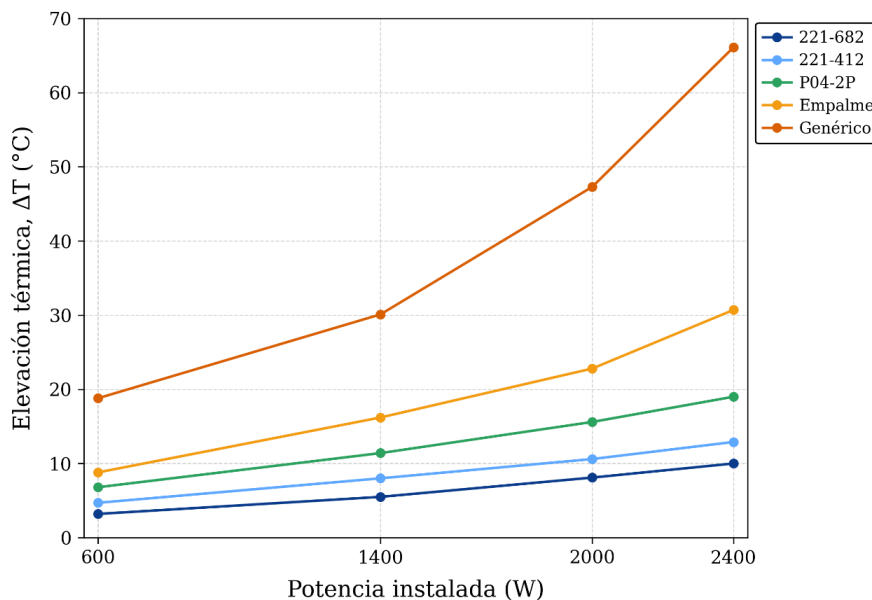


Figura 3. Elevación térmica del punto de unión en función de la potencia instalada.

La Figura 3 confirma que la sensibilidad térmica frente al incremento de potencia fue distinta para cada sistema evaluado. Los conectores 221-682 y 221-412 mantuvieron una pendiente térmica contenida, con elevaciones finales inferiores a 13 °C bajo 2400 W. El P04-

2P alcanzó una respuesta intermedia, mientras que el empalme de derivación mostró una mayor sensibilidad térmica frente al incremento de carga. La separación más marcada correspondió al conector genérico, cuya elevación térmica aumentó de forma más pronunciada y alcanzó  $\Delta T = 66,1$  °C bajo la condición de mayor exigencia.

### 3.3. Propagación térmica hacia el conductor

A partir de los registros al minuto 120, se analizó la distribución espacial de temperatura entre el punto de unión y el conductor bajo la condición de 2400 W. Este escalón corresponde al mayor nivel de exigencia eléctrica del ensayo y permite diferenciar con mayor claridad la concentración térmica en cada sistema de conexión. La Tabla 4 presenta la temperatura superficial del punto de unión, las temperaturas del conductor a 2 cm y 10 cm, y los gradientes calculados entre la unión y cada punto de medición. Estos gradientes se interpretan como diferencias térmicas espaciales entre la zona de conexión y el conductor adyacente, no como mediciones directas de flujo de calor. Esta precisión es necesaria porque el análisis busca comparar la concentración relativa de temperatura alrededor de cada sistema de unión, sin asumir una cuantificación directa de transferencia térmica.

Tabla 4. Gradientes térmicos entre el punto de unión y el conductor bajo la condición de 2400 W.

Unión evaluada	Temperatura de unión (°C)	Temperatura a 2 cm (°C)	Temperatura a 10 cm (°C)	Gradiente unión–2 cm (°C)	Gradiente unión–10 cm (°C)
221-682	28,1	23,6	21,8	4,5	6,3
221-412	31,4	26,0	23,2	5,4	8,2
P04-2P	37,6	28,7	25,4	8,9	12,2
Empalme	49,5	34,7	28,7	14,8	20,8
Genérico	85,1	52,7	39,9	32,4	45,2

Como se observa en la Tabla 4, los gradientes térmicos bajo 2400 W confirmaron la jerarquía identificada en el punto de unión. Los conectores 221-682 y 221-412 presentaron los menores gradientes unión–10 cm, con 6,3 °C y 8,2 °C, respectivamente; el P04-2P alcanzó 12,2 °C y el empalme de derivación aumentó a 20,8 °C. En contraste, el conector genérico registró el mayor gradiente espacial, con 45,2 °C entre la unión y el conductor a 10 cm. Esta diferencia indica una concentración térmica más severa alrededor del punto de conexión, sin que ello deba interpretarse como una medición directa de flujo de calor. En conjunto, la Tabla 4 y la Figura 4 muestran que los sistemas con mayor temperatura en la unión también presentaron mayor diferencia térmica respecto del conductor adyacente. Esta lectura espacial complementa el análisis de elevación térmica, porque permite verificar que la condición crítica del conector genérico no se limitó al punto de unión, sino que también se manifestó en una mayor propagación superficial de temperatura hacia el conductor.

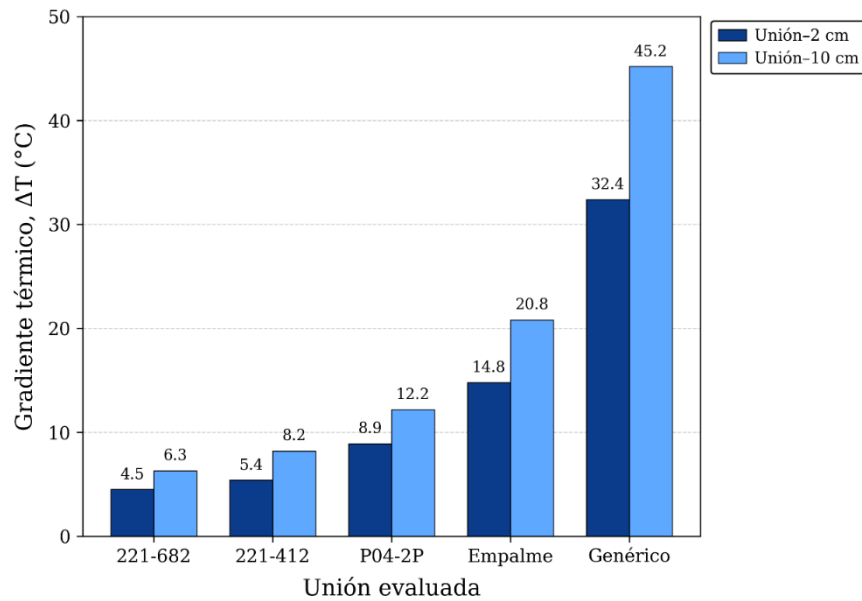


Figura 4. Gradientes térmicos entre el punto de unión y el conductor bajo la condición de 2400 W.

### 3.4. Comparación integral de desempeño térmico superficial

A partir de la elevación térmica del punto de unión, la tasa media de calentamiento y el gradiente térmico unión–10 cm, se estableció una comparación integral del desempeño térmico superficial bajo la condición de 2400 W. La clasificación se definió de forma relativa dentro del conjunto experimental, considerando simultáneamente la magnitud del calentamiento, la velocidad media de incremento térmico y la concentración espacial de temperatura hacia el conductor. Esta clasificación no corresponde a un criterio normativo de aceptación o rechazo, sino a una jerarquía comparativa bajo la condición de mayor exigencia eléctrica del ensayo.

Tabla 5. Comparación integral de desempeño térmico superficial bajo la condición de 2400 W.

Unión evaluada	Temperatura final (°C)	Elevación térmica, $\Delta T$ (°C)	Tasa media (°C/min)	Gradiente unión–10 cm (°C)
221-682	28,1	10,0	0,083	6,3
221-412	31,4	12,9	0,108	8,2
P04-2P	37,6	19,0	0,158	12,2
Empalme	49,5	30,7	0,256	20,8
Genérico	85,1	66,1	0,551	45,2

La Tabla 5 sintetiza el desempeño térmico superficial bajo 2400 W mediante tres indicadores complementarios. Los conectores 221-682 y 221-412 se ubicaron en la condición más estable del conjunto experimental, debido a sus menores elevaciones térmicas, tasas medias de calentamiento y gradientes hacia el conductor. El P04-2P presentó una respuesta intermedia, mientras que el empalme de derivación se ubicó en una condición intermedia alta. El conector genérico concentró la condición crítica, debido a que combinó la mayor temperatura final, la mayor elevación térmica, la mayor tasa media de calentamiento y el mayor gradiente espacial hacia el conductor.

### 3.5. Evolución temporal bajo la condición de mayor exigencia

Para complementar la comparación integral, se analizó la evolución temporal de la elevación térmica del punto de unión bajo la condición de 2400 W. Este nivel de carga corresponde al mayor escalón de potencia instalada y permite observar cómo se desarrolló el calentamiento durante los 120 min de operación sostenida. A diferencia de las comparaciones basadas únicamente en el valor final, la evolución temporal permite identificar si la separación entre sistemas apareció de forma progresiva o si se acentuó hacia el cierre del ensayo. La Figura 5 presenta la evolución de  $\Delta T(t)$  para cada sistema de conexión durante los 120 min de operación bajo 2400 W. Los registros temporales completos se organizaron en la base de datos experimental del estudio; en el cuerpo del manuscrito se presenta la evolución temporal de la condición de mayor exigencia para evitar redundancia tabular.

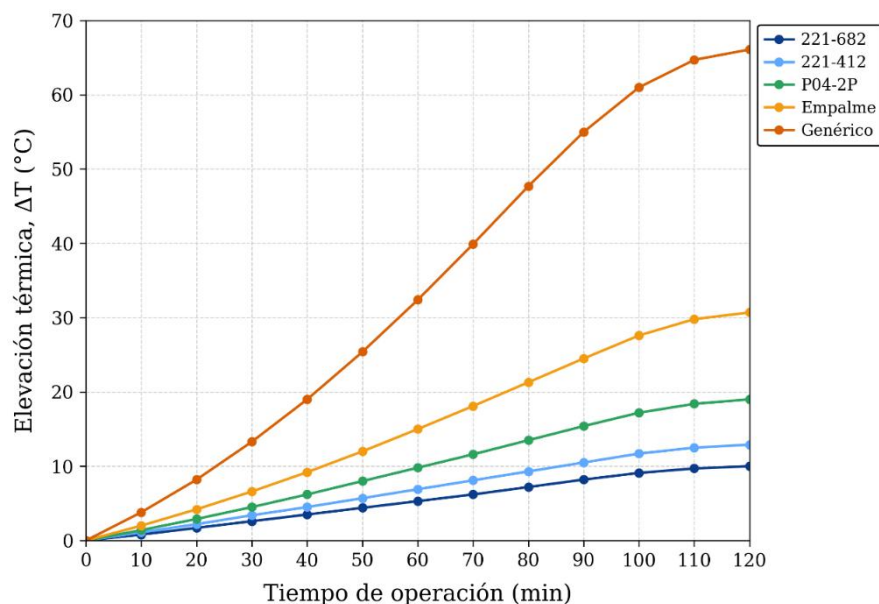


Figura 5. Evolución temporal de la elevación térmica del punto de unión bajo la condición de 2400 W.

La Figura 5 muestra que los conectores 221-682 y 221-412 mantuvieron trayectorias de bajo incremento durante los 120 min de operación, con elevaciones finales de 10,0 °C y 12,9 °C, respectivamente. El P04-2P alcanzó 19,0 °C y el empalme de derivación llegó a 30,7 °C, sin cambios abruptos entre intervalos de medición. En contraste, el conector genérico presentó la trayectoria más severa, con una elevación final de 66,1 °C y una temperatura superficial de 85,1 °C al minuto 120. Esta respuesta no demuestra fusión del conductor ni del elemento metálico de contacto, pero sí representa una condición térmica desfavorable para operación sostenida bajo las condiciones ensayadas, debido a que la temperatura final alcanzó prácticamente la temperatura máxima declarada para el componente aun cuando la corriente aproximada de 19 A se mantuvo por debajo de su corriente asignada declarada de 25 A.

#### 4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la respuesta térmica superficial de una unión en circuitos monofásicos de baja tensión no puede explicarse únicamente por la magnitud de la corriente circulante. Aunque los ensayos se realizaron bajo niveles de carga crecientes y eléctricamente comparables, las elevaciones térmicas fueron marcadamente distintas entre los sistemas de conexión evaluados. Esta diferencia indica que el calentamiento estuvo condicionado por la forma en que cada unión estableció el contacto eléctrico, la presión efectiva sobre el conductor, la geometría del área de contacto, la resistencia local y la capacidad del conjunto para disipar calor. No obstante, estos mecanismos deben interpretarse como explicación técnica probable, debido a que el estudio no incorporó mediciones directas de resistencia de contacto ni caída de tensión localizada.

Los conectores 221-682 y 221-412 mantuvieron el comportamiento térmico más estable del conjunto experimental, con menores elevaciones térmicas, menores tasas medias de calentamiento y gradientes espaciales más bajos hacia el conductor. La diferencia entre ambos modelos fue moderada, aunque el 221-682 presentó una respuesta más contenida bajo la condición de mayor exigencia. Esta diferencia puede relacionarse con su mayor sección admisible y corriente asignada declarada; sin embargo, no debe interpretarse como una certificación de desempeño, debido a que el ensayo no reproduce un procedimiento normativo completo de validación de conectores. Además, aunque el 221-412 posee una temperatura máxima declarada menor que la del 221-682, su temperatura superficial final bajo 2400 W fue de 31,4 °C, por lo que se mantuvo ampliamente por debajo de ese valor nominal en la configuración ensayada. En comparación, el P04-2P se ubicó en una condición intermedia, lo que sugiere una mayor concentración térmica relativa frente a los modelos WAGO evaluados.

El empalme de derivación presentó una respuesta térmica superior a la del P04-2P y se ubicó en una condición intermedia alta dentro del conjunto experimental. Este resultado debe interpretarse considerando que el empalme por torsión depende directamente de la ejecución manual de la unión, incluyendo la preparación del conductor, la longitud efectiva de contacto, la presión generada por la torsión, la uniformidad geométrica y el aislamiento aplicado. En consecuencia, el empalme evaluado no puede considerarse un componente con parámetros nominales equivalentes a los conectores comerciales, sino una condición de montaje cuyo desempeño térmico puede variar con la técnica de preparación. Bajo esta delimitación, los resultados respaldan la necesidad de evaluar este tipo de unión no solo por continuidad eléctrica inicial, sino por su evolución térmica bajo carga sostenida.

El conector genérico concentró la condición térmica más desfavorable del estudio. Bajo 2400 W, su trayectoria se separó de forma marcada del resto de sistemas y alcanzó una temperatura superficial final de 85,1 °C, con una elevación térmica de 66,1 °C. Esta condición ocurrió con una corriente aproximada de 19 A, inferior a la corriente asignada declarada de 25 A para el componente, y con una temperatura final prácticamente equivalente a su temperatura máxima declarada de 85 °C. Por tanto, el resultado no debe interpretarse como una condición de sobrecorriente respecto del valor declarado, sino como una respuesta térmica desfavorable bajo la configuración evaluada. Debido a que no se midió resistencia

de contacto, caída de tensión localizada ni condición interna del elemento conductor, las posibles causas del calentamiento deben tratarse como hipótesis y no como mecanismos demostrados. En ese sentido, el comportamiento observado resulta compatible con una condición de contacto desfavorable o con una limitada capacidad de disipación térmica, sin afirmar fusión, daño material ni falla interna no verificada por los datos.

La propagación térmica hacia el conductor confirmó que el calentamiento se concentró principalmente en la zona de unión y disminuyó hacia los puntos medidos a 2 cm y 10 cm. Este patrón fue más moderado en los conectores 221-682 y 221-412, más pronunciado en el P04-2P y en el empalme, y severo en el conector genérico. La lectura de estos gradientes debe mantenerse como comparación espacial de temperatura superficial, no como medición directa de flujo de calor, debido a las limitaciones propias de la termografía infrarroja y a la influencia de factores como emisividad, distancia, orientación de captura, carga aplicada y condición superficial del material. Aun con esta limitación, los gradientes aportaron evidencia complementaria para diferenciar un calentamiento localizado moderado de una concentración térmica severa con propagación apreciable hacia el conductor [24].

En términos prácticos, los resultados muestran que la continuidad eléctrica inicial no garantiza una respuesta térmica equivalente entre métodos de unión. Todos los sistemas permitieron la circulación de corriente durante el ensayo, pero no todos mantuvieron una evolución térmica compatible con operación sostenida bajo la demanda aplicada. Esta observación es relevante en instalaciones de baja tensión, donde una unión puede operar sin falla inmediata y, aun así, desarrollar calentamientos localizados capaces de acelerar el envejecimiento del aislamiento, modificar la presión de contacto o incrementar la resistencia local con el tiempo. Por ello, la evaluación de una unión no debe limitarse a verificar continuidad, ajuste mecánico inicial o ausencia de falla instantánea, sino considerar su comportamiento térmico bajo carga y su compatibilidad con la corriente de operación del circuito.

Los resultados deben interpretarse dentro del alcance experimental definido. La medición termográfica registró temperatura superficial aparente, no temperatura interna del punto de contacto. Además, el estudio evaluó una configuración específica de montaje, un calibre de conductor, una tensión de alimentación y un periodo de operación de 120 min por condición. Cada condición experimental se ejecutó una sola vez, sin réplicas independientes, por lo que los resultados no permiten estimar dispersión estadística ni reproducibilidad intermontaje. Estas condiciones permiten una comparación controlada entre sistemas de conexión, aunque no sustituyen ensayos de vida útil, ciclos térmicos repetidos ni mediciones directas de resistencia de contacto. Para fortalecer la validez externa de los hallazgos, futuras investigaciones deberían incorporar repeticiones por tipo de unión, análisis de dispersión entre montajes, envejecimiento térmico por operación prolongada, medición eléctrica directa del contacto y evaluación física posterior de los elementos sometidos a carga.

## 5. Conclusiones

La evaluación experimental mostró que los sistemas de conexión desarrollaron respuestas térmicas superficiales diferenciadas aun cuando fueron sometidos a condiciones eléctricas comparables. Las corrientes de fase y neutro se mantuvieron en rangos equivalentes para cada escalón de carga, por lo que las diferencias térmicas observadas reflejan el comportamiento relativo de cada método de unión dentro de la configuración ensayada. Este resultado confirma que la continuidad eléctrica inicial no es suficiente para valorar el desempeño operativo de una unión en circuitos monofásicos de baja tensión.

Los conectores 221-682 y 221-412 presentaron el comportamiento térmico más estable del conjunto experimental, con las menores elevaciones térmicas, tasas medias de calentamiento y gradientes hacia el conductor bajo 2400 W. El P04-2P se ubicó en una condición intermedia, mientras que el empalme de derivación presentó una condición intermedia alta. Esta diferencia muestra que el empalme evaluado, aunque funcional por continuidad eléctrica, fue más sensible al calentamiento superficial bajo operación sostenida que los conectores de mejor desempeño.

El conector genérico concentró la respuesta térmica más desfavorable. Bajo 2400 W alcanzó una temperatura superficial final de 85,1 °C y una elevación térmica de 66,1 °C, con una corriente aproximada de 19 A. Aunque esta corriente se mantuvo por debajo de la corriente asignada declarada de 25 A, la temperatura final alcanzó prácticamente la temperatura máxima declarada de 85 °C. Por tanto, su uso bajo condiciones semejantes requiere cautela técnica, no por exceder su corriente asignada, sino por la severidad térmica registrada dentro del rango de corriente declarado. Este resultado no demuestra fusión, daño interno ni falla material, pero sí evidencia una condición térmica desfavorable bajo la configuración evaluada.

La propagación térmica hacia el conductor mostró que el calentamiento se concentró principalmente en la zona de unión y disminuyó hacia los puntos medidos a 2 cm y 10 cm. Esta distribución respaldó la misma jerarquía observada en el punto de conexión, pero aportó una lectura adicional sobre la severidad espacial del calentamiento. En consecuencia, la evaluación de uniones eléctricas no debe limitarse a la temperatura máxima registrada, sino integrar la evolución temporal, la tasa media de calentamiento y los gradientes térmicos hacia el conductor.

El alcance del estudio queda limitado a una evaluación termográfica superficial, con conductor de cobre calibre 12 AWG, alimentación monofásica de 127 V, duración de 120 min por condición y ausencia de réplicas independientes. Además, no se midieron resistencia de contacto ni caída de tensión localizada. Por ello, los resultados deben entenderse como una comparación controlada entre sistemas de conexión bajo la configuración ensayada. Estudios posteriores deberían incorporar repeticiones por tipo de unión, ciclos térmicos sucesivos, mayor tiempo de operación, medición directa de resistencia de contacto y evaluación física posterior de conectores y empalmes.

## Contribuciones de los autores

Conceptualización, R.D.T.C.; metodología, R.D.T.C. y L.R.M.V.; validación, R.D.T.C., L.R.M.V. y G.S.A.C.; análisis formal, R.D.T.C.; investigación, R.D.T.C., L.R.M.V. y G.S.A.C.; recursos, R.D.T.C. y L.R.M.V.; curación de datos, R.D.T.C.; redacción—preparación del borrador original, R.D.T.C.; redacción—revisión y edición, R.D.T.C., L.R.M.V. y G.S.A.C.; visualización, R.D.T.C.; supervisión, L.R.M.V.; administración del proyecto, R.D.T.C. Todos los autores han leído, revisado y aprobado la versión final del manuscrito.

## Conflicto de Interés

Los autores manifiestan que no existe ningún tipo de conflicto de interés, ya sea, financiero, personal o académico, que pueda influir en los resultados y conclusiones de este estudio.

## Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial Generativa

Durante la preparación de este manuscrito se utilizó ChatGPT (OpenAI) como herramienta de inteligencia artificial generativa únicamente para apoyar tareas de revisión gramatical, ortográfica y verificación de formato. No se empleó para generar datos experimentales, realizar análisis, interpretar resultados ni elaborar conclusiones. La interpretación de los resultados, la discusión, las conclusiones y la versión final del manuscrito corresponden exclusivamente a los autores, quienes revisaron, verificaron y aprobaron el contenido final.

## Referencias

- [1] International Electrotechnical Commission, *IEC 60999-1:1999, Connecting devices—Electrical copper conductors—Safety requirements for screw-type and screwless-type clamping units—Part 1: General requirements and particular requirements for clamping units for conductors from 0.2 mm<sup>2</sup> up to 35 mm<sup>2</sup> (included)*. Geneva, Switzerland: IEC, 1999.
- [2] International Electrotechnical Commission, *IEC 60998-2-2:2002, Connecting devices for low-voltage circuits for household and similar purposes—Part 2-2: Particular requirements for connecting devices as separate entities with screwless-type clamping units*. Geneva, Switzerland: IEC, 2002.
- [3] International Electrotechnical Commission, *IEC 60228:2023, Conductors of insulated cables*. Geneva, Switzerland: IEC, 2023.
- [4] Y.-H. Li, F. Shen, y L.-L. Ke, "Multi-physics electrical contact analysis considering the electrical resistance and Joule heating," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 256, no. 111975, dic. 2022, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111975.
- [5] W. He, Y. Feng, S. Wu, y W. Wang, "Numerical study on thermal-electrical-mechanical coupling mechanism of electrical connectors considering contact resistance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 5, pp. 1699–1712, jul. 2023, doi: 10.1177/09544062231187733.
- [6] E. Fjeld, W. Rondeel, G. K. Sønsteby, F. W. Bekken, y T. R. Eriksen, "Contact resistance and temperature rise of cable connections in cable distribution cabinets," in *Proc. 2020 IEEE 66th Holm Conference on Electrical Contacts and Intensive Course (HLM)*, sep. 2020, pp. 110–114, doi: 10.1109/HLM49214.2020.9307905.
- [7] W. He, W. Wang, Z. Wang, Y. Feng, S. Wu, and K. Wu, "Simulation and experimental study on temperature rise characteristic of a piercing connector," *IEEE Trans. Compon., Packag. Manuf. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 512–521, mar. 2022, doi: 10.1109/TCPMT.2022.3153483.

- [8] J.-R. Riba, J. Martínez, M. Moreno-Eguilaz, y F. Capelli, "Characterizing the temperature dependence of the contact resistance in substation connectors," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 327, ago. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112732.
- [9] Á. Gómez-Pau, J.-R. Riba, y M. Moreno-Eguilaz, "Time series RUL estimation of medium voltage connectors to ease predictive maintenance plans," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 24, dic. 2020, doi: 10.3390/app10249041.
- [10] J. Martínez, J.-R. Riba y M. Moreno-Eguilaz, "State of health prediction of power connectors by analyzing the degradation trajectory of the electrical resistance," *Electronics*, vol. 10, no. 12, jun. 2021, doi: 10.3390/electronics10121409.
- [11] J.-R. Riba, Á. Gómez-Pau, J. Martínez, y M. Moreno-Eguilaz, "On-line remaining useful life estimation of power connectors focused on predictive maintenance," *Sensors*, vol. 21, no. 11, may. 2021, doi: 10.3390/s21113739.
- [12] J. Song, A. Shukla, y R. Probst, "Prediction of failure in time (FIT) of electrical connectors with short term tests," *Microelectronics Reliability*, vol. 138, p. 114684, nov. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114684.
- [13] K. Krüger y J. Song, "The influence of thermal cycling test parameters on the failure rate of electrical connectors," *Microelectronics Reliability*, vol. 138, p. 114633, nov. 2022, doi: 10.1016/j.microrel.2022.114633.
- [14] P. Kolmer, A. Shukla, y J. Song, "Methods of material and surface analysis for the evaluation of failure modes for electrical connectors," *Technologies*, vol. 10, no. 6, p. 124, nov. 2022, doi: 10.3390/technologies10060124.
- [15] S. Kyeong y M. G. Pecht, Eds., *Electrical Connectors: Design, Manufacture, Test, and Selection*. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, dic. 2020, doi: 10.1002/9781119679837.
- [16] ASTM International, *ASTM E1933-14(2022), Standard Practice for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://store.astm.org/standards/e1933>
- [17] ASTM International, *ASTM E1934-99a(2024), Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://store.astm.org/Standards/E1934.htm>
- [18] G. K. Balakrishnan *et al.*, "A review of infrared thermography for condition-based monitoring in electrical energy: Applications and recommendations," *Energies*, vol. 15, no. 16, ago. 2022, doi: 10.3390/en15166000.
- [19] E. K. Ukiwe, S. A. Adeshina, y J. Tsado, "Techniques of infrared thermography for condition monitoring of electrical power equipment," *Journal of Electrical Systems and Inf Technol*, vol. 10, no. 49, oct. 2023, doi: 10.1186/s43067-023-00115-z.
- [20] C. Xia *et al.*, "Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art," *High Voltage*, vol. 6, no. 3, pp. 387–407, nov. 2020, doi: 10.1049/hve2.12023.
- [21] P. J. Zarco-Periñán, F. J. Zarco-Soto, I. M. Zarco-Soto, y J. L. Martínez-Ramos, "Conducting thermographic inspections in electrical substations: A survey," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 20, oct. 2022, doi: 10.3390/app122010381.
- [22] WAGO GmbH & Co. KG, "Splicing connector with levers, item no. 221-412." [En línea]. Disponible en: <https://www.wago.com/global/installation-terminal-blocks-and-connectors/splicing-connector-with-levers/p/221-412>. Accedido: may. 4, 2026.
- [23] WAGO GmbH & Co. KG, "Splicing connector with levers, item no. 221-682." [En línea]. Disponible en: <https://www.wago.com/global/installation-terminal-blocks-and-connectors/splicing-connector-with-levers/p/221-682>. Accedido: may. 4, 2026.
- [24] Fluke Corporation, "Fluke TiS20+ / TiS20+ MAX thermal imagers: Technical data." [En línea]. Disponible en: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermal-cameras/tis20plus>. Accedido: may. 4, 2026.