



Caracterización experimental de las cargas térmicas en los bajos de trenes metropolitanos

Mariano Lázaro¹, Daniel Alvear¹

¹ Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos, Universidad de Cantabria, lazarom@unican.es, alveard@unican.es

Los sistemas de transporte ferroviario subterráneo son esenciales en las grandes urbes por su capacidad para transportar un elevado volumen de pasajeros de forma rápida y continua. Sin embargo, las condiciones intensivas de explotación, el tipo de materiales en los bajos de los trenes y la acumulación de partículas durante el funcionamiento plantean desafíos significativos en cuanto a seguridad y eficiencia. En este contexto, surge la necesidad de estudiar los factores que pueden mejorar la confiabilidad y durabilidad de los componentes situados bajo el bastidor de los trenes, especialmente en los sistemas de frenado y otros equipos críticos.

El estudio se centró en evaluar los escenarios y factores de riesgo específicos de los trenes metropolitanos, tomando como caso de estudio un sistema de Metro. La investigación incluyó una revisión detallada del equipamiento presente en los bajos de los trenes, con el fin de identificar y analizar los puntos críticos donde las condiciones de operación, altas temperaturas y acumulación de grasas y partículas pueden influir negativamente en el rendimiento de los componentes.

Entre los elementos más destacados se identificaron las pastillas del sistema de frenado por disco, sometidas a un elevado desgaste y fricción, y que presentan características térmicas que requieren una atención particular. Mediante ensayos en laboratorio y mediciones in situ bajo condiciones operativas, se caracterizó su comportamiento térmico y su capacidad de resistencia a temperaturas elevadas. Esta evaluación permitió obtener datos precisos sobre la interacción de las pastillas con el entorno operativo, así como posibles puntos de fatiga bajo condiciones de demanda elevada.

Los resultados sugieren la importancia de incorporar medidas que optimicen el diseño de los componentes en los bajos de los trenes y que respondan adecuadamente a las condiciones de operación real. La implementación de materiales y estructuras que reduzcan el impacto del calor y minimicen la acumulación de partículas podría aumentar la durabilidad y rendimiento de los sistemas críticos. Asimismo, este enfoque se plantea como una metodología para futuras investigaciones, con el fin de mejorar la confiabilidad en el sector ferroviario subterráneo.

En conclusión, la investigación y evaluación de componentes de alto riesgo proporciona un marco para desarrollar soluciones de ingeniería que eleven la seguridad y confiabilidad de los sistemas ferroviarios subterráneos. La caracterización detallada de los puntos críticos en los bajos de los trenes permite avanzar en la creación de diseños robustos y eficientes que respondan a las necesidades operativas de estos sistemas de transporte, contribuyendo a su optimización en términos de eficiencia y seguridad.

1. Introducción

La seguridad contra incendios en sistemas de transporte ferroviario subterráneo constituye un pilar esencial en la gestión de riesgos, dada la alta densidad de pasajeros, los desafíos en evacuación y las limitaciones para el acceso operativo en emergencias. Estos factores hacen que los vehículos ferroviarios metropolitanos requieran sistemas avanzados de protección, capaces de abordar tanto la prevención como la mitigación de incendios en sus componentes críticos.

En estudios previos realizados en sistemas como el BART de San Francisco [1] y el Metro de Múnich [2], se han documentado riesgos asociados a los equipos bajo bastidor, principalmente por la acumulación de partículas inflamables y la generación de chispas. A nivel internacional, se han implementado diversas estrategias, como recubrimientos ignífugos, sistemas de monitoreo térmico y soluciones de supresión activa de incendios, que han demostrado ser efectivas en la reducción de incidentes. Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías sigue siendo limitada por factores como los costos, la adaptación a distintas normativas y las especificidades de cada sistema ferroviario.

Por otro lado, existen diferentes referencias sobre el uso de técnicas de análisis termográfico y calorimetría para realizar la caracterización del comportamiento al fuego de un producto y analizar la posterior propagación de llama o comportamiento a mayor escala mediante modelos en diferentes escenarios como, por ejemplo, la propagación en cables [3], sistemas de compartimentación [4], sector ferroviario [5], etc. Adicionalmente, estudios como el de Panier et al. [6] o Kim et al. [7], investigaron el efecto de los puntos calientes en sistemas de freno de discos en condiciones extremas, y han servido de base para otros estudios dedicados a estudiar la vida útil de los mismos por fatiga [8]. Estas investigaciones han sentado las bases para diseñar enfoques integrales que combinen medidas preventivas y correctivas.

En el estudio se llevó a cabo una campaña experimental que incluyó mediciones in situ y ensayos en laboratorio para identificar los puntos críticos combustibles en los bajos de trenes metropolitanos, con un enfoque particular en los vehículos de la serie 3000 de CAF. Este análisis, sustentado en técnicas avanzadas de medición térmica, permite establecer parámetros para el diseño de sistemas de protección contra incendios más eficientes y adaptados a las condiciones específicas de operación de estos trenes, buscándose no solo aportar al entendimiento del comportamiento térmico de los elementos bajo bastidor, sino también contribuir al desarrollo de soluciones prácticas que fortalezcan la seguridad en el transporte ferroviario subterráneo.

2. Metodología

El presente estudio utilizó un enfoque metodológico estructurado en cinco fases clave, integrando técnicas experimentales y analíticas para evaluar el riesgo de combustión en los bajos de trenes metropolitanos.

En esta primera etapa se realizó una revisión exhaustiva de la literatura técnica y científica relacionada con incendios en sistemas ferroviarios subterráneos para, a partir de esta información, definir los objetivos del estudio e identificar los componentes bajo bastidor como las áreas de mayor vulnerabilidad debido a la acumulación de grasa, partículas y altas temperaturas operativas. Los trenes de la serie 3000 fueron seleccionados como caso de estudio por sus características técnicas y su representatividad en flotas metropolitanas.

Con los resultados del estudio previo, se realizaron pruebas de laboratorio en materiales representativos de los equipos bajo bastidor para caracterizar sus propiedades térmicas y su respuesta al fuego. Se empleó el equipo Cono Calorimétrico para medir parámetros clave, incluyendo la velocidad de cesión de calor (HRR), el tiempo de ignición y el comportamiento de llama. Estos ensayos fueron realizados bajo flujos de calor predefinidos (35 y 50 kW/m²) para simular escenarios extremos. Los materiales analizados incluyeron pastillas de freno, cables conductores y componentes del sistema neumático.

Como siguiente paso, se emplearon cámaras termográficas de alta resolución (ThermaCAM SC640) para mapear la distribución térmica en los bajos de los vehículos. Este análisis permitió identificar concentraciones de calor en tiempo real, considerando la emisividad de los materiales y las condiciones ambientales. Los termogramas obtenidos fueron procesados para generar mapas térmicos que visualizaron los puntos críticos de ignición potencial.

Estas mediciones se contrastaron con las realizadas in situ bajo condiciones de operación real. Para ello se instalaron sensores de temperatura tipo K con doble aislamiento de fibra de vidrio, capaces de registrar temperaturas de hasta 800 °C con una tolerancia de $\pm 1,5$ °C. Los sensores fueron colocados estratégicamente en los elementos críticos, como pastillas de freno, reductores de tracción y motores eléctricos, siguiendo un diseño experimental para obtener datos térmicos durante la operación normal. Estas mediciones se llevaron a cabo en la Línea 3 del Metro de Madrid durante trayectos definidos para evaluar variaciones térmicas en condiciones dinámicas.

Finalmente, se realizó un análisis específico del componente que se consideró más crítico al ser el que alcanza mayores temperaturas y sufre acumulación de partículas y suciedad durante el uso, es decir el sistema de frenado. En este caso, se empleó un bogie situado en un banco de pruebas para llevar al sistema de frenado a condiciones críticas de frenado, midiéndose las temperaturas alcanzadas con la cámara termográfica y con los termopares tipo K instalados en el sistema de frenado.

3. Análisis de elementos combustibles en bajos del vehículo

3.1. Estudio de las fuentes de ignición en bajos del vehículo

Para el estudio de las posibles fuentes de ignición o de los puntos calientes presentes en los bajos de los trenes metropolitanos se partió del análisis de los equipos, elementos y componentes presentes bajo bastidor en coches de Metro pertenecientes a las series de última generación, para conocer el funcionamiento de los mismos y de esta forma poder identificar aquellos que, tomando en cuenta el tipo de materiales presentes, las condiciones de operación y la acumulación de grasas y partículas, podrían llegar a ser un punto caliente y/o contribuir a provocar una ignición. El estudio se enfocó en los coches pertenecientes a la serie 3000, para a partir de estos datos poder extrapolar los resultados al resto de las series. La serie 3000 perteneciente a CAF, es una adaptación de la serie 8000 a gálibo estrecho, y en la Figura 1 se puede observar un resumen de su distribución de equipos bajo bastidor.

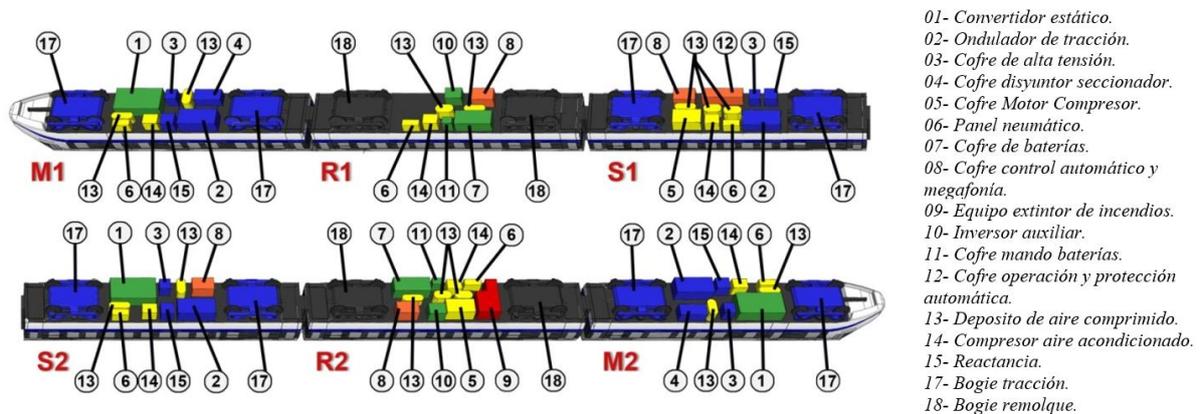


Figura 1: Distribución de los elementos comprendidos bajo bastidor en tren de la serie 3000.

A partir del análisis de los equipos y elementos comprendidos bajo bastidor (Figura 1), se pudo identificar como elementos más complejos aquellos vinculados al sistema de tracción comprendidos en los coches motor (M) y motor intermedio (S). Entre estos, los coches motor (M), al encontrarse en los extremos del tren, presentan condiciones propensas a la acumulación de grasas y partículas en sus elementos, lo cual, en condiciones de operación podría contribuir a provocar una ignición, y por lo tanto se enfocó el análisis en estos coches, y en particular en los elementos comprendidos en los bogies, ya que el resto de equipos se encuentran en cofre estanco. Los elementos comprendidos en los bogies de mayor complejidad son: Motor eléctrico de tracción, Reductor de tracción, los componentes de Sistema de frenado por disco y Sistema de limpieza de Ruedas.

Con todo ello, se planteó como de mayor interés la recogida de muestras de los materiales que componen los elementos de mayor riesgo presentes en estos para la realización posteriormente de los ensayos de velocidad de cesión de calor a pequeña escala para el posterior estudio de propagación de llama en bajos del vehículo.



Figura 2: Ejemplos de elementos seleccionados para la recogida de muestras para los ensayos de velocidad de cesión de calor a pequeña escala.

3.2. Estudio de elementos combustibles en bajos del vehículo

Los ensayos de pequeña escala se realizaron mediante el equipo de calorimetría Cono Calorimétrico [9], el cual se compone de un quemador que irradia a la muestra de ensayo (100mm. x 100mm.) con un flujo de calor máximo de 100 kW/m². La forma tronco-cónica del quemador proporciona la principal ventaja de este equipo, ya que somete a la muestra estudiada a una exposición uniforme. La emisividad del quemador es 0.99 y el producto emisividad x factor de forma es 0.73 [10], por lo que el flujo de calor por radiación que se alcanza en la muestra es:

$$q_e'' = 0.73\sigma(T_h^4 - T_o^4)$$

donde T_h la temperatura del quemador y T_o la temperatura ambiente (en °K).

Como se indicó previamente, para estos ensayos se seleccionaron muestras de los principales elementos comprendidos en el área previamente identificada como de mayor riesgo (Bogies de tracción). Las cuales (ver Figura 2) estuvieron compuestas por: Cable Prysmian Afumex (conducción de tensión), Manquitos flexibles de conducción de aire comprimido, Tubos flexibles de conducción y protección de las conexiones de datos, Pastillas de freno del sistema de freno neumático de disco y Zapatas de limpieza de las ruedas.

3.2.1. Cable Prysmian Afumex

Cable Prysmian Afumex DA 3000 F 95 III B2R con diámetro promedio de 20 mm. Para los ensayos se emplearon 3 probetas de 5 cables cada una y se ensayaron a un flujo de calor de 25, 40, 50, 60 y 75 kW/m², mostrándose a continuación los resultados del ensayo a un flujo de 50 kW/m² que es el flujo más estándar. En la Figura 3 se muestra la curva de resultados de velocidad de cesión de calor, HRR, pudiéndose observar que se alcanza la ignición de la muestra a los 85 s llegándose un valor de pico de velocidad de cesión de calor superior a los 120 kW/m². Una vez alcanzado el valor de pico, se produce el decaimiento en el proceso de combustión, y el tiempo de llama sostenida se prolongó durante unos 3493 s, finalizando con posterioridad a que se produjera el valor de pico a los 1942 s.

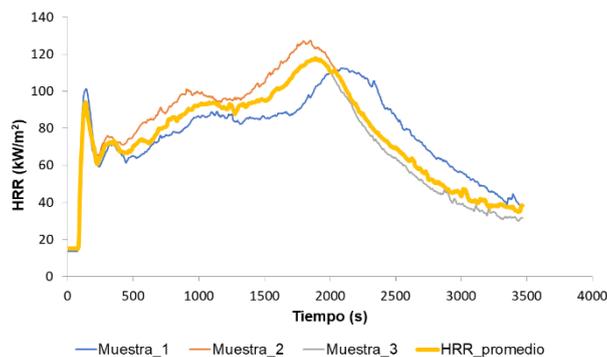


Figura 3: Curvas de velocidad de cesión de calor para las muestras de Cable Prysmian Afumex.

3.2.2. Tubo Flexible de Protección de Cables

Tubo flexible de protección de cables con diámetro promedio de 34 mm. Para los ensayos se emplearon 3 probetas de 3 conductos cada una, y se ensayaron a un flujo de calor de 25, 40, 50, 60 y 75 kW/m², mostrándose a continuación los resultados del ensayo a un flujo de 50 kW/m² que es el flujo más estándar. En la Figura 4 se muestra la curva de resultados de HRR, alcanzándose la ignición de la muestra a los 23 s y subiendo hasta un valor de pico de velocidad de cesión de calor superior a los 534 kW/m². Una vez alcanzado el valor de pico, se produce el decaimiento en el proceso de combustión. El tiempo de llama sostenida se prolongó durante unos 530 s, finalizando con posterioridad a que se produjera el valor de pico a los 247 s.

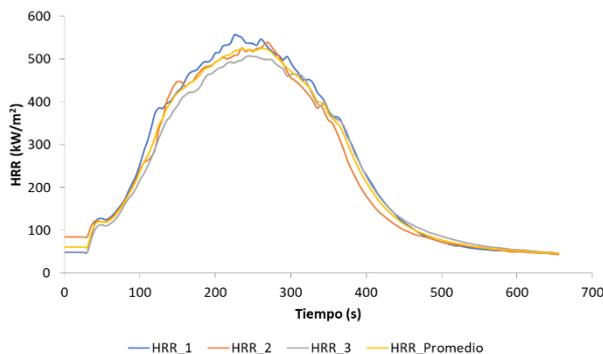


Figura 4: Curvas de velocidad de cesión de calor para las muestras del Tubo Flexible de Protección de Cables.

3.2.3. Manguitos Metálicos

Manguitos Metálicos con diámetro promedio de 22 mm. Para los ensayos se empleó 1 probeta de 5 conductos, y se ensayó a un flujo de calor de 35 kW/m². Se puede observar en la Figura 5 como, se alcanza la ignición de la muestra a los 303 s lográndose un valor de pico de velocidad de cesión de calor superior a los 328 kW/m², y siguiendo un proceso de decaimiento en el proceso de combustión. El tiempo de llama sostenida se prolongó durante unos 1268 s, finalizando con posterioridad a que se produjera el valor de pico a los 490 s.

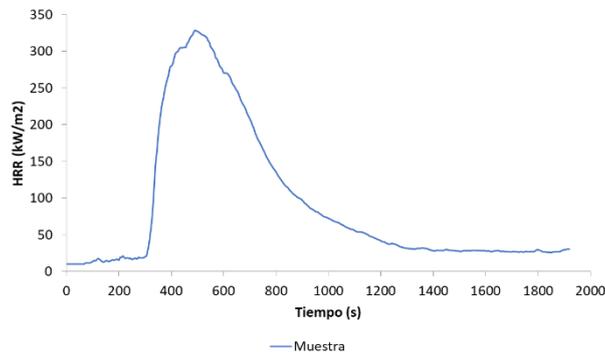


Figura 5: Curvas de velocidad de cesión de calor para las muestras de Manguitos Metálicos.

3.2.4. Pastillas de freno

Las pastillas de freno se ensayaron a un flujo de calor de 25 y 35 kW/m², colocándose termopares tanto en la cara expuesta como no expuesta de la muestra para monitorizar la temperatura durante el ensayo. En la Figura 6 (izq.) se observan los resultados para el ensayo a un flujo de 35 kW/m², pudiéndose observar cómo se alcanza la ignición de la muestra a los 588 s alcanzándose un valor de pico de velocidad de cesión de calor superior a los 211 kW/m². El tiempo de llama sostenida se prolongó durante unos 2294 s, finalizando con posterioridad a que se produjera el valor de pico a los 650 s. En la Figura 6 (dcha) se muestra el comportamiento térmico de la muestra analizada a nivel de superficie medido con los termopares situados en las caras expuesta (superior) y no expuesta (inferior). Como se puede comprobar, en la superficie superior (superficie con flujo incidente) el material entra en ignición a temperaturas superiores a los 350 °C mientras que a nivel de superficie inferior se alcanzan valores de temperatura por conducción 200 °C menores. Adicionalmente, es necesario destacar que la máxima temperatura en la cara expuesta supero los 800 °C y en la cara no expuesta los 500 °C.

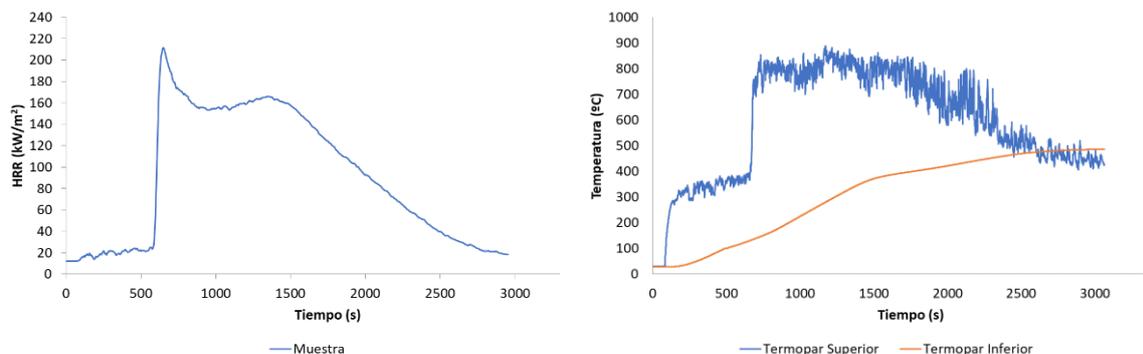


Figura 6: Curvas de velocidad de cesión de calor (izquierda) y temperaturas en las caras (dcha) para las muestras de Pastillas de freno.

3.2.5. Zapata de limpieza

Para los ensayos de la zapata de limpieza se emplearon 3 probeta de 1 muestra a un flujo de 25, 35 y 50 kW/m² (Figura 7), colocándose termopares tanto en la cara expuesta como en la no expuesta de la muestra. Para el flujo de calor de 50 kW/m², se alcanza la ignición de la muestra a los 238 s, que se corresponde con una temperatura en la cara expuesta de 387 °C y en la cara no expuesta de 212 °C, alcanzándose un valor de pico de velocidad de cesión de calor superior a los 133 kW/m². El tiempo de llama sostenida se prolongó durante unos 4823 s, finalizando con posterioridad a que se produjera el valor de pico a los 310 s, y la máxima temperatura en la cara expuesta supero los 650 °C y en la cara no expuesta los 400 °C.

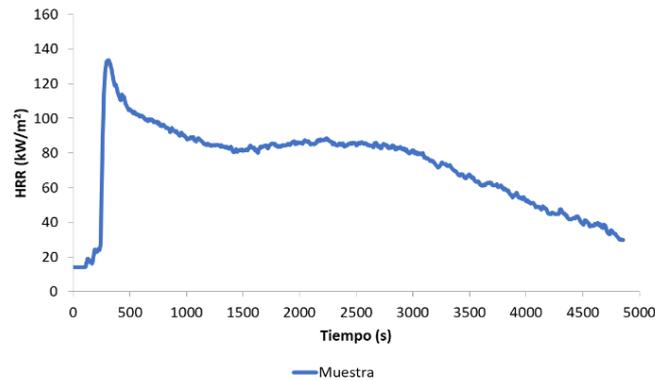


Figura 7: Curvas de velocidad de cesión de calor para las muestras de Zapata de limpieza.

A partir de los resultados obtenidos tanto de las pastillas de freno como de las zapatas de limpieza, se pudo identificar como más crítico las pastillas de freno, ya que estas entran en ignición a temperaturas inferiores que las zapatas de limpieza.

4. Estudio de elementos mediante termografía infrarroja

Con el objetivo de disponer de un mapa de distribución de temperaturas en los bajos del coche que permita corroborar los puntos calientes y de mayor riesgo identificados previamente, se realizó un análisis termográfico de los equipos y elementos bajo bastidor del coche motor justo después de llegar a cocheras tras el servicio en línea. Las técnicas termográficas se basan en la transferencia de calor por radiación del objeto a analizar, la cual depende básicamente de dos factores: la temperatura de la superficie y la emisividad del material. Además, es importante tener en cuenta la predominación de dos tipos de radiaciones, la radiación proveniente del objeto ($\epsilon\sigma T_{obj}^4$) y la radiación proveniente del entorno, por reflexión en el objeto [$(1 - \epsilon) \cdot \sigma T_{refl}^4$] [11-13].

A partir de la potencia de emisividad total de un cuerpo negro, la cual se obtiene mediante la ley de Stefan-Boltzmann, y la relación de los valores de irradiación total, irradiación absorbida y transmitida por una superficie, se obtiene la ecuación de la potencia total de radiación recibida para el cálculo de los valores en las mediciones termográficas, la cual está dada por la siguiente ecuación.

$$W_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm}$$

Donde, W_{obj} es la potencia de radiación del objeto, W_{tot} es la potencia total de radiación, W_{refl} es la potencia de radiación reflejada de las fuentes externas, W_{atm} es la potencia de radiación atmosférica, y τ es la transmitancia. Pudiéndose despejar de la ecuación anterior los datos térmicos del objeto estudiado [14,15]. Por lo tanto, para obtener el valor de temperatura real del objeto es necesario contar con los valores de la Tabla 1, que fueron medidos en los talleres ferroviarios previo a las mediciones completas, y los valores de emisividad tabulados de los diferentes materiales [15,16] que se recogen en la Tabla 2.

Tabla 1: Parámetros medidos en los fosos de mantenimiento.

Serie 3000	
Temperatura ambiente ($T_{amb.}$)	27.4 °C
Humedad relativa (HR)	67 %
Temperatura aparente reflejada ($T_{refl.}$)	32.2 °C

Tabla 2: Principales valores de emisividades tabuladas [15,16].

Elemento	Material	Emisividad
Rueda	Aleación de acero de alta resistencia	0.35
Disco de frenos	Hierro fundido pulido	0.21
Cofres	Pintura anticorrosiva	0.93
Zapata de limpieza	Material compuesto (componentes metálicos, minerales y abrasivos)	0.96
Pastillas de frenos	Material compuesto (componentes metálicos, minerales y abrasivos)	0.96
Elemento enganche automático	Acero inoxidable, tipo 301	0.63
Analizador kilométrico. Material 1	Aluminio gris claro mate	0.97
Reactancia	Acero inoxidable, resistido	0.85
Interruptor de alta	Acero laminado en frío	0.75

4.1. Análisis de resultados

La toma de datos termográficos correspondientes a la serie 3000 fueron realizados en el depósito de Villaverde de Metro de Madrid, siguiendo el desplazamiento que se muestra en la Figura 8 para el análisis de los equipos y elementos comprendidos en los mismos [17-19].

Nótese que los valores de temperatura en los equipos y elementos situados bajo los coches analizados no se corresponderán en este caso con los valores reales en condiciones de explotación. Esto se debió al tiempo que invierten los trenes una vez que terminan el recorrido de servicio hasta que llegan a cocheras, lo cual provoca un cierto grado de enfriamiento en todos los equipos. En el estudio se supuso que dicho enfriamiento fue gradual y constante en todos los equipos, con lo que se puede analizar un mapa comparativo de gradientes térmicos entre los diferentes equipos, permitiéndose detectar los puntos y zonas donde se concentran los valores máximos de temperatura.

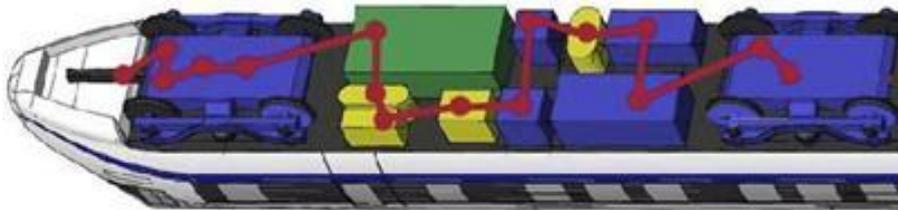


Figura 8: Dirección de la toma de datos en equipos para el cálculo de la emisividad de los materiales.

A partir de los datos obtenidos mediante el postprocesamiento de los termogramas [14-16], se realizó un análisis de las temperaturas, partiendo de los valores de las temperaturas medias y máximas de los elementos analizados, donde los valores máximos de temperatura se obtuvieron en los elementos componentes de los bogies, motor de tracción, reductor de tracción y la conexión entre estos. En la Tabla 3 se muestran los resultados de temperatura media y máxima en todos los elementos.

Tabla 3: Valores obtenidos en el análisis térmico.

Componente	T _{med.}	T _{max.}	Componente	T _{med.}	T _{max.}
Elemento Enganche automático	27.8	28.9	Reactancia	29.6	33.2
Disco de frenos	28.9	34.1	Depósito de aire comprimido	29.2	31.5
Reductor de tracción	48.4	50.6	Disyuntor	30.1	36.3
Bogie. Material 1	56.1	63.1	Interruptor de tensión	29.0	33.8
Pastillas de freno	31.2	33.9	Bogie. Material 2	53.2	65.2
Convertidor estático	36.1	39.8	Conexión en Bogie	49.5	56.2
Depósito de aire comprimido	30.7	32.4	Enganche fijo M-R	29.0	29.5
Panel neumático	30.0	31.0	Soporte pastillas de freno	30.4	35.2
Compresor aire acondicionado	24.0	27.9	Eje remolque	28.8	30.8
Cofre de alta	29.7	30.8	Cofre de aparatos	30.6	31.8

En la Figura 9 se representa el mapa térmico de los bajos, con la distribución de temperaturas media de los equipos, observándose lo ya reflejado en la tabla anterior y que es que ambos bogies son los que alcanzan unos mayores valores de temperatura.

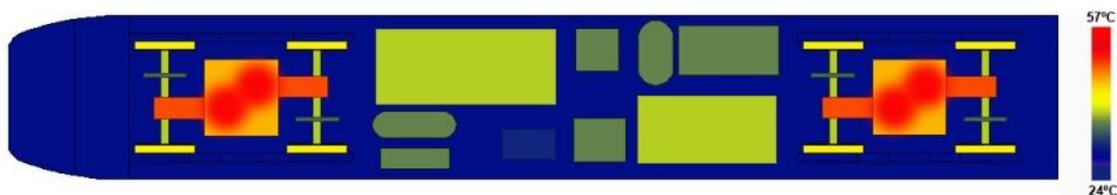


Figura 9: Distribución de los valores de temperatura media de una unidad de la serie 3000.

Al realizarse las mediciones en un coche estacionado justo después de llegar a cocheras tras el servicio en línea, en los elementos componentes del sistema de frenado por disco no se obtuvieron valores significativos de temperatura, por lo cual se procedió en una siguiente fase a la realización de un estudio para la comprobación de las temperaturas del coche bajo condiciones de explotación, instalando sensores de temperatura en diferentes elementos bajo bastidor siguiendo la distribución obtenida en el mapa térmico, y realizando un análisis específico del sistema de frenado en un banco de bogie de pruebas.

5. Estudio del comportamiento térmico en condiciones de servicio

Como se indicó previamente, a continuación, se procedió a la comprobación y análisis del comportamiento térmico de los equipos y componentes bajo bastidor de un coche motor (M1) durante las condiciones de servicio en línea. Las mediciones se realizaron por contacto, empleando termopares de fase sólida, y confrontando los resultados con los obtenidos en la primera campaña de toma de datos termográficos. De esta forma se pudo corroborar los valores de temperaturas en los puntos críticos de los coches motor, donde se presentan los mayores valores de temperatura.

Para la realización de las mediciones térmicas se emplearon termopares de tipo K con aislamiento doble de fibra de vidrio, que permiten soportar de forma continua temperaturas de 800 °C. Las mediciones realizadas con estos sensores disponen de una tolerancia de $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ más $\pm 0.004 \cdot |t|$. Estos sensores de temperatura se instalaron siguiendo la distribución que se describe en la Figura 10, mostrándose a modo de ejemplo su colocación en el soporte de las pastillas de freno por disco en la Figura 11.

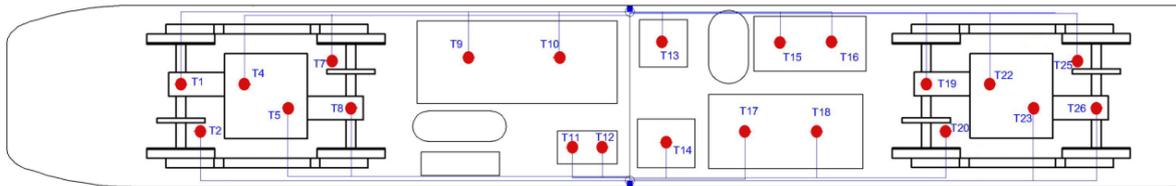


Figura 10: Disposición de los cables de termopares, coche M1 serie 3000.

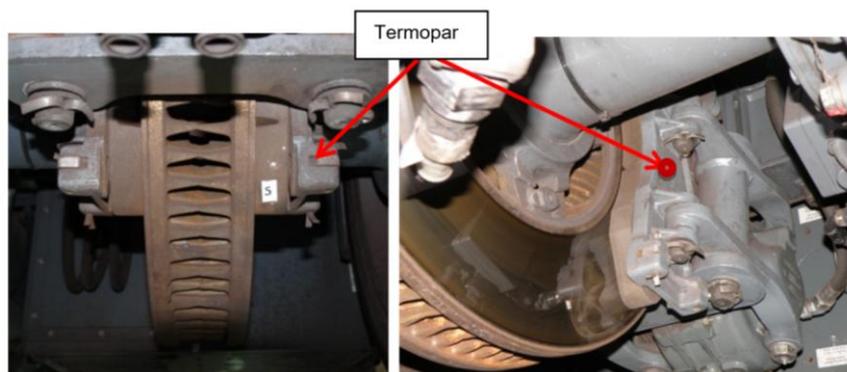


Figura 11: Disposición de los cables termopar en el soporte de las pastillas de freno por discos.

5.1. Análisis de resultados

El estudio del comportamiento térmico de los equipos bajo condiciones normales de explotación se realizó mediante la circulación del vehículo de la Serie 3000 por la línea 3 de Metro de Madrid en todo su trayecto, realizando los recorridos Villaverde alto - Moncloa (33 min) y Moncloa - Villaverde alto (30 min).

Como se muestra en la Figura 12, los equipos tractivos (reductor de tracción, motor de tracción y soporte de pastillas de freno) presentan un calentamiento superficial progresivo hasta alcanzar temperaturas superiores a los 45 °C para el trayecto de explotación realizado Villaverde alto - Moncloa de 33 min de duración aproximadamente. En el segundo trayecto (Moncloa - Villaverde alto) estos elementos mantienen un régimen estacionario de temperaturas, con un leve incremento en los valores de las mismas en el motor y reductor de tracción, los cuales no superan los 50 °C.

Los cofres y equipos comprendidos bajo bastidor, no presentan valores significativos de temperatura, ya que el comportamiento térmico superficial de los mismos es prácticamente constante una vez superado los 990 s alcanzando valores cercanos a los 27 °C. En el caso de los soportes de las pastillas de frenos se evidencia en el segundo trayecto una disminución en los valores de temperatura superficial de los mismos ya que estos se ven afectados por el enfriamiento producido por el impacto del flujo de aire (en este trayecto el coche de estudio se encuentra a la cabeza del tren y recibe el impacto del flujo de aire de forma directa).

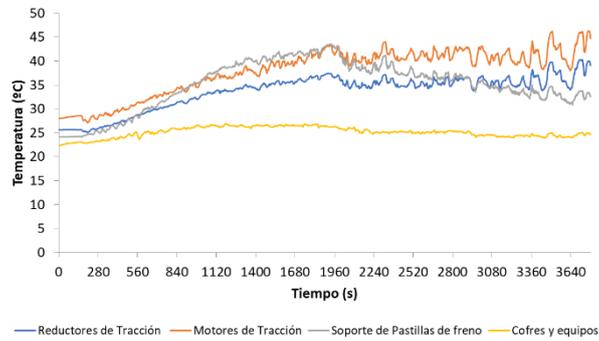


Figura 12: Comportamiento térmico promedio de equipos bajo bastidor en Línea 3.

El enfriamiento de los soportes de las pastillas de freno en el segundo trayecto, producido por el flujo de aire que influye sobre los mismos, se evidencia en la Figura 13, donde se puede apreciar que los soportes que se encuentran apantallados por el propio bogie presentan un enfriamiento mucho menor que los que reciben el impacto del flujo de aire de manera directa. Este enfriamiento, aunque en menor grado, se puede apreciar en el resto de los elementos comprendidos en los bajos del coche.

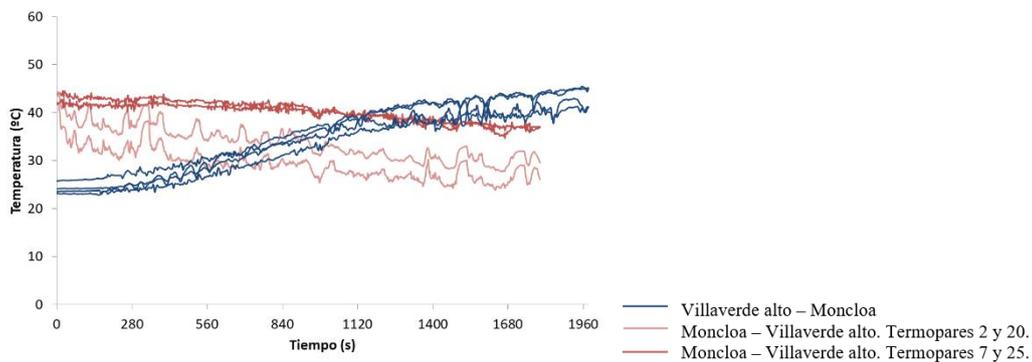


Figura 13: Comportamiento térmico en soporte de pastillas de freno en los trayectos.

Finalmente, en la Figura 14 se puede apreciar como los motores de tracción eléctrica pertenecientes al segundo bogie (situados a la cola del coche) que poseen un menor grado de flujo de aire incidente, prácticamente no se ven afectados.

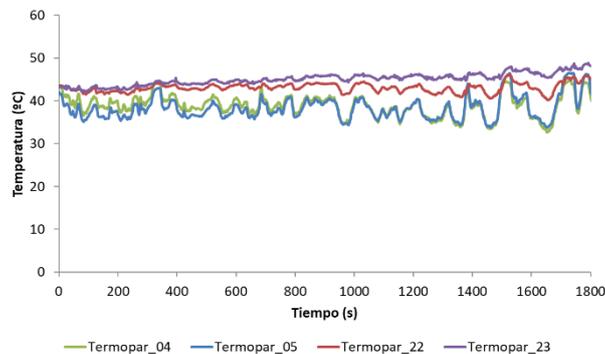


Figura 14: Comportamiento térmico de los motores de tracción. Trayecto Moncloa - Villaverde Alto.

Finalmente, en la Figura 15 se muestran las curvas comparativas de resultados entre las mediciones realizadas mediante termografía infrarroja a los equipos y elementos comprendidos en los bajos del tren en cocheras, y los valores de temperatura obtenidos mediante las mediciones realizadas en Línea, mediante el empleo de sensores de temperatura por contacto, donde se corrobora el comportamiento térmico de los equipos.

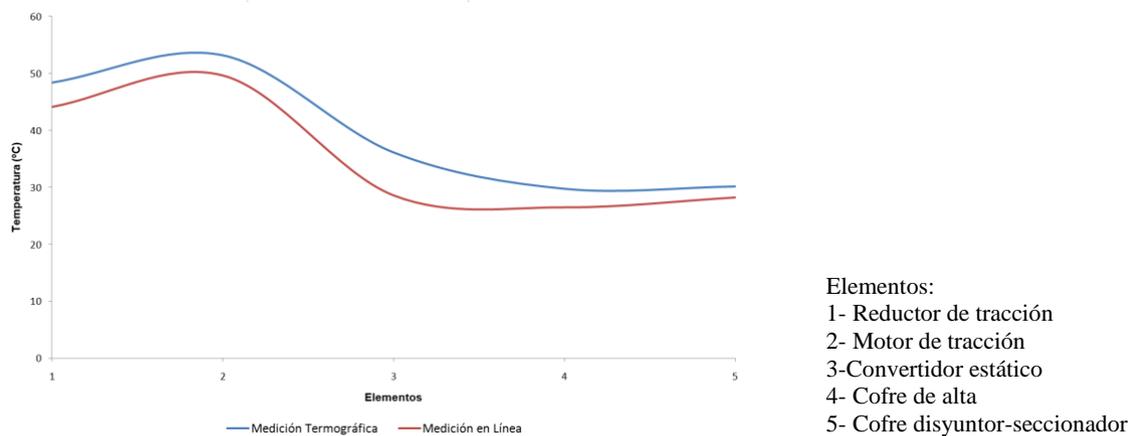


Figura 15: Comparativa de resultados termográficos y de termopares.

Estos resultados permiten corroborar los obtenidos en el estudio previo mediante termografía infrarroja, identificándose como las zonas más críticas térmicamente las correspondientes con las pastillas de freno.

6. Ensayos a escala real del elemento crítico.

Dada la dificultad de realizar un análisis de las pastillas de freno en condiciones normales de explotación debido a las medidas de seguridad de los vehículos para la instalación de sensores que pudiesen afectar el funcionamiento del coche, se procedió a realizar un estudio in situ de las pastillas de freno en un banco de pruebas para bogies disponible en las instalaciones de Metro de Madrid, concretamente en un banco de pruebas donde se realizan análisis y diagnósticos de los bogies y elementos componentes mediante la simulación de condiciones extremas de explotación.

Las mediciones en el banco de pruebas se llevaron a cabo en condiciones de bloqueo de frenos, manteniendo el régimen de trabajo del bogie a 1500 rpm cercano a las condiciones extremas de explotación (1800 rpm). Se llevaron los valores térmicos de las pastillas lo más próximo posible a los valores de ignición del material (>350°C) manteniendo un rango de seguridad superior a 50 °C.

Las mediciones se realizaron mediante el empleo de tanto sensores de temperatura por contacto (termopares tipo K) como termografía infrarroja. El análisis del comportamiento térmico de las pastillas mediante el empleo de termografía infrarroja, se realizó utilizando una cámara ThermoCam SC640 (Figura15), la cual dispone de un rango espectral de 7.5 a 13 μm y detector de tipo Microbolómetro sin enfriamiento, de matriz de plano focal (FPA) de 640 x 480, con una precisión de +/- 2 °C. El rango de temperaturas empleado fue de 0 - 500 °C, y empleando los parámetros que se muestran en la Tabla 4.



Figura 16: Vista de las mediciones en el banco de pruebas para bogies.

Tabla 4: Parámetros previos medidos en el área de ensayo.

	Zona de ensayos
Temperatura ambiente ($T_{amb.}$)	23.4 °C
Humedad relativa (HR)	45 %
Temperatura aparente reflejada ($T_{refl.}$)	22.3 °C
Emisividad del material	0.96

Para la medición de la temperatura de las pastillas de freno mediante sensores por contacto (termopares de fase sólida tipo K con aislamiento doble de fibra de vidrio, que pueden medir en continuo temperaturas de 800 °C y disponen de una tolerancia de ± 1.5 °C más $\pm 0.004 \cdot |t|$), se realizó la instalación de 8 termopares siguiendo la configuración que se muestra en la Figura 16.

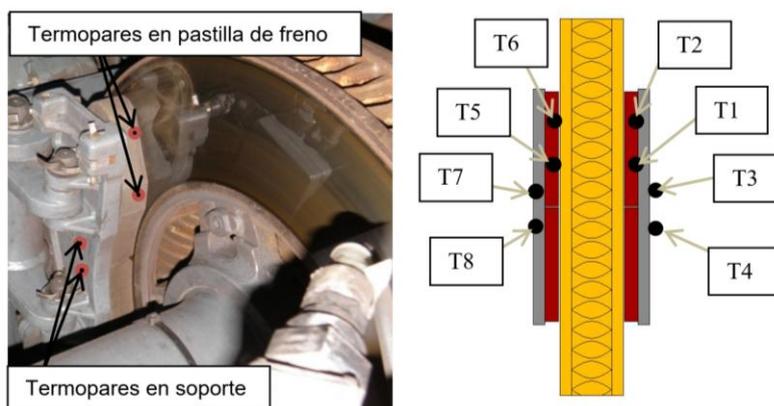


Figura 17: Distribución de termopares.

A continuación, se muestran los valores de temperaturas obtenidos a través de los termopares instalados en las pastillas de freno y en los soportes de las mismas.

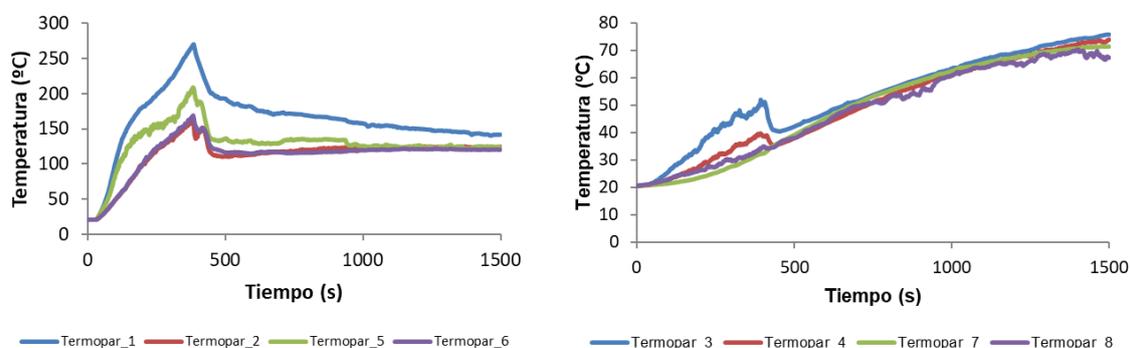


Figura 18: Comportamiento térmico en superficie lateral de las pastillas de freno (Izquierda), en superficie de los soportes (Derecha).

Las pastillas de frenos se accionaron durante 6 min aproximadamente hasta alcanzar valores de temperatura cercanos a los 300 °C, donde se liberó el sistema de frenado y al no encontrarse en explotación las pastillas comenzó el proceso de enfriamiento disipando el calor mediante el disco de frenos y los soportes de las pastillas. Lo contrario ocurre en los soportes de las pastillas de freno, donde el calentamiento es progresivo y continua una vez se detiene el proceso de frenado. Esto ocurre mediante la conducción de calor entre los materiales (aproximadamente 200 °C de gradiente) donde en el proceso de enfriamiento de las pastillas, el calor se disipa a través de los soportes hasta que se consigue el equilibrio térmico.

En la Figura 18 se muestra la configuración empleada para el análisis termográfico. A partir de los valores obtenidos se evidencia el comportamiento térmico de los diferentes elementos en el sistema de frenado por disco, corroborándose los valores obtenidos mediante termopares. En la Figura 19 se muestra la secuencia del comportamiento térmico de los elementos.

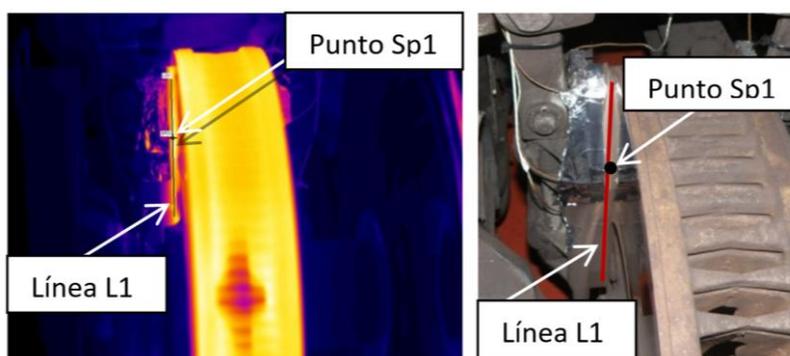


Figura 19: Configuración para el análisis termográfico.

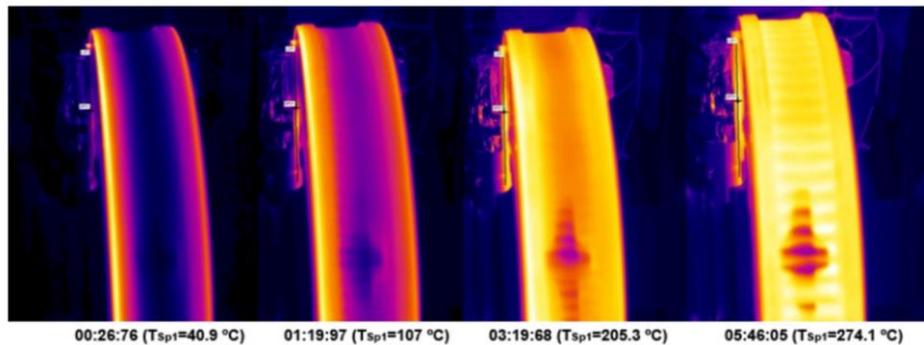


Figura 20: Secuencia del comportamiento térmico de los elementos en el sistema de freno por disco.

A partir de los datos obtenidos mediante las dos mediciones, valores de temperatura obtenidos en el ensayo mediante los termopares y obtenidos mediante el análisis termográfico, en la Figura 20 se presenta una comparativa de los resultados.

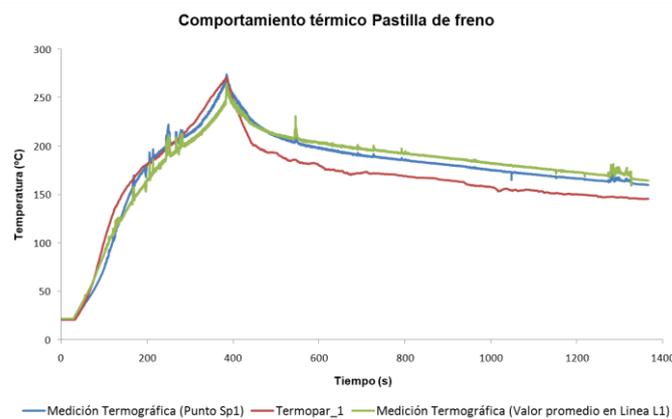


Figura 21: Comparativa de resultados termográficos y de termopares.

Se puede observar que se obtienen curvas similares de comportamiento térmico tanto para las pastillas de freno como para el soporte empleando ambas mediciones, con una pequeña variación en el caso de los termopares instalados en las pastillas de freno en dependencia de la posición de los mismos, ya que los mayores valores de las temperaturas se encuentran en la superficie de contacto de las pastillas de freno y en dicha zona no se pueden colocar directamente los termopares.

7. Conclusiones.

El estudio realizado sobre los puntos críticos combustibles en los bajos de los trenes metropolitanos permitió identificar, analizar y caracterizar los principales elementos que representan riesgos significativos en términos de ignición y propagación de incendios. Los resultados obtenidos proporcionan un marco técnico-científico que respalda la necesidad de implementar estrategias específicas de prevención y mitigación para mejorar la seguridad contra incendios en sistemas ferroviarios subterráneos.

En primer lugar, los datos experimentales destacaron a las pastillas de freno del sistema de frenado por disco como los elementos más críticos, debido a su propensión a alcanzar temperaturas cercanas a los valores de ignición en cortos períodos de tiempo. Los ensayos de calorimetría y las mediciones in situ revelaron gradientes térmicos significativos entre los materiales en contacto y sus estructuras de soporte. Mediante los ensayos de velocidad de calor a pequeña escala se determinó un gradiente térmico de 250 °C entre la superficie superior e inferior cuando el material está a punto de entrar en ignición y en los realizados en el banco de pruebas un gradiente de 238 °C entre la pastilla y el soporte una vez se deja de accionar el freno.

A partir de estos datos y analizando los obtenidos en los soportes en los ensayos en Línea, donde estos alcanzan un valor máximo de temperatura de 45.2 °C, se obtiene un valor estimado de temperatura en las pastillas del orden de 300 °C, lo que resalta la importancia de diseñar sistemas de enfriamiento o aislamiento térmico para estos componentes.

Además, las técnicas de termografía infrarroja demostraron ser herramientas eficaces para mapear la distribución de temperaturas en los bajos de los vehículos. Los mapas térmicos generados identificaron puntos calientes recurrentes en zonas específicas, como motores de tracción y reductores. Estos hallazgos corroboran la relevancia de integrar sistemas de monitoreo continuo que permitan la detección temprana de condiciones anómalas.

El análisis comparativo entre las diferentes metodologías empleadas (calorimetría, termografía y sensores de contacto) validó la consistencia de los resultados obtenidos, subrayando la importancia de combinar técnicas experimentales para lograr un entendimiento integral de los riesgos térmicos. Esta aproximación interdisciplinaria sienta las bases para el desarrollo de sistemas de protección contra incendios más eficientes, adaptados a las condiciones operativas reales de los trenes metropolitanos, y a poder plantear implementar sistemas de disipación de calor basados en soluciones novedosas como, por ejemplo, agua nebulizada.

8. Referencias

- [1] Braun, E., “Fire Hazard Evaluation of BART Vehicles”, *Center for Fire Research, Institute for Applied Technology, National Bureau of Standards, NBSIR 78-1 421, Final report* (1978)
- [2] Kainz, C., “Fire detection and fire fighting system in Munich Metro”, *ZEVrail*, **134**, 260 (2010)
- [3] Alonso, A., Lázaro, D., Lázaro, M., Alvear, D., “Numerical Prediction of Cables Fire Behaviour Using Non-Metallic Components in Cone Calorimeter”, *Combustion Science and Technology* **195**, 1509-1525, (2023)
- [4] Lázaro, D., Puente, E., Lázaro, M., Lázaro, P.G., Peña, J., “Thermal modelling of gypsum plasterboard assemblies exposed to standard fire tests”, *Fire and Materials*, **40**, 568–585 (2016)
- [5] Capote, J.A., Jimenez, J.A., Alvear, D., Alvarez, J., Abreu, O., Lázaro, M., “Assessment of fire behaviour of high-speed trains’ interior materials: small-scale and full-scale fire tests”, *Fire and Materials*, **38**, 725–743 (2014)
- [6] Panier, S., Dufrenoy, P., Weichert, D., “An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes”, *Wear*, **256**, Issues 7–8, 764-773, (2004)
- [7] Kim, J.G., Goo, B.C., Yoon, S.C., Kwon, S.T., “Thermographic Investigation of Hot Spots in Railway Brake Discs”, *Key Engineering Materials*, vol. 385–387, 669–672, (2008)
- [8] Wu, S.C., Zhang, S.Q., Xu, Z.W., “Thermal crack growth-based fatigue life prediction due to braking for a high-speed railway brake disc”, *International Journal of Fatigue*, **87**, 359-369, (2016)
- [9] ISO 5660-1:2015. Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).
- [10] Janssens, M., “Fundamental Thermophysical Characteristics of Wood and their role in enclosure fire growth”, Ph. D. Thesis, GENT University, Belgica, 1991.
- [11] Scopatz, S., Mazzetta, J. A., Sgheiza, J. E.; and Medina, M. A.; “Comparison of Emissivity Evaluation Methods for Infrared Sources”; *Infrared Imaging Systems*; Gerald C. Holst, Edition, Proceedings, Vol. 7300 (2009)
- [12] Cuthbertson, G.M., “Thermal Imaging”, The General Electric Co, GEC Review, Vol 2, Issue 1, 21-31, (1986)
- [13] Rahman, A.A., Fernandez, J., Tinaut, F.V., Castro, F., “Thermographic Study of Energetic Installations”, *Applied Thermal Engineering*, **25**, Issue 2-3, 183-190, (2005)
- [14] “ThermaCAMs B640-P640-SC640 – User Guide”; Flir Systems, Publicación No 155868, Rev. a236, 2007.
- [15] ISO/TC 135 / SC 8 N006; “Standard Guide of Nondestructive Testing with Infrared Thermography”; 2007.
- [16] ASTM E1934 - 99a, “Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography”, 2018.
- [17] Ahuja, N., Barkan, C., “Machine Vision for Railroad Equipment Undercarriage Inspection Using Multi-Spectral Imaging”; Final Report for High-Speed Rail IDEA Project 49. (2007)
- [18] Bzymek, A., Czupryński, A., Fidali, M., Jamrozik, W., Timofiejczuk, A., “Methods of Image Processing in Vision System for Assessing Welded Joins Quality”, 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Pages 27-38, Krakow – Poland, (2008)
- [19] Edwards, J.R., Hart, J.M., Todorovic, S., Barkan, C.P.L., Ahuja, N., Chua, Z., Kocher, N., Zeman, J., “Development of Machine Vision Technology for Railcar Safety Appliance Inspection”; Proceedings of the International Heavy Haul Conference Specialist Technical Session - High Tech in Heavy Haul, pp. 745-752, Kiruna, Sweden, (2007)