



Dispositivo embarcado para la detección de zonas de desgaste de hilo conductor para las infraestructuras de Metro de Málaga

Rafael J. Luque¹, Pedro Reyes¹, Vid Bačić¹, Montserrat Simarro¹, Sergio Postigo¹, Juan J. Castillo¹

1Dpto. de Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos, Universidad de Málaga, rafaeljesuslqa@uma.es, pedrozuniga1798@uma.es, vidbacic@uma.es, msimarro@uma.es, spostigo@uma.es, juancas@uma.es

La motivación de este trabajo surge de la necesidad de obtener información acerca de infraestructuras ferroviarias y contribuir a la búsqueda de anomalías y puntos de desgaste críticos del hilo de contacto. Además, se pretende realizar un estudio en profundidad de cómo afectan los distintos parámetros claves de la instalación al desgaste.

Uno de los parámetros clave se corresponde con la localización de los soportes que sustenta el hilo de contacto, ya que con su modificación se puede homogeneizar el desgaste y reducir las irregularidades que puedan aparecer. Otro de los parámetros que afectan al desgaste es la aparición de arcos eléctricos en el contacto entre la catenaria y el pantógrafo. Por tanto, si se consigue localizar aquellos puntos donde la frecuencia e intensidad de arcos eléctricos es mayor, se puede focalizar los recursos en intentar reducir la aparición de estos en dichas zonas.

Con este objetivo, se ha fabricado un dispositivo sensorizado que se ha ubicado en la parte superior de las unidades ferroviarias del Metro de Málaga. Se ha diseñado para recolectar información detallada sobre el estado de las instalaciones, con especial enfoque en la interacción pantógrafo-catenaria. El dispositivo incorpora varios sensores avanzados: un sensor de arco para detectar la presencia de arcos eléctricos, una unidad IMU que permite el registro de aceleraciones de la unidad, un módulo GPS para geolocalización precisa y una cámara de alta definición que captura video de forma continua del estado actual de la catenaria. Gracias a una conexión remota, el dispositivo facilita la recolección y transmisión de datos de forma rápida y eficiente.

El dispositivo cuenta con un mini PC, que actúa como el núcleo principal del sistema, controlando tanto el dispositivo en general como el funcionamiento del software que permite la captura de videos y datos. Este ordenador recibe y graba la información obtenida por los sensores, permitiendo un control centralizado las funciones de captura. Para la recolección de datos, el dispositivo utiliza dos microcontroladores especializados. Uno de ellos está dedicado exclusivamente a la detección de arcos eléctricos. Dado que los arcos eléctricos tienen una duración muy breve, en el rango de milisegundos, es fundamental que el muestreo de este microcontrolador sea de alta frecuencia para captar estos eventos con precisión. Con el fin de asegurar la calidad de los datos y evitar posibles interferencias, este microcontrolador está dedicado exclusivamente a la tarea de monitorear los arcos eléctricos. El otro microcontrolador se emplea para la captura de datos de IMU y GPS

La implementación de este sistema sensorizado busca optimizar las tareas de mantenimiento en infraestructuras ferroviarias mediante la identificación proactiva de zonas críticas en la catenaria, agilizando el análisis del desgaste y las anomalías en el cable conductor. Con esta solución tecnológica se mejora la efectividad durante el mantenimiento y se incrementa la fiabilidad y seguridad del servicio ferroviario.

1. Introducción

Dentro de la Universidad de Málaga el grupo de Ingeniería Mecánica ha estado trabajando sobre la respuesta dinámica que caracteriza el contacto pantógrafo-catenaria en los últimos años [1]. Dentro de los tipos de catenaria que existen, comúnmente rígida y flexible, el grupo se ha centrado en el estudio de catenaria rígida. Entre los distintos parámetros que se han examinado se encuentra la velocidad de circulación de las unidades, la fuerza de contacto, la intensidad suministrada y la respuesta en frecuencia tanto del pantógrafo como de la catenaria. Todos estos parámetros se encuentran estrechamente relacionados con el desgaste que se produce en el hilo de contacto de la catenaria y en el frotador del pantógrafo.

Uno de los principales objetivos del grupo es desarrollar y validar un modelo que sea capaz de predecir el desgaste que se produce debido a la interacción pantógrafo-catenaria. La validación de dicho modelo se desea realizar mediante dos métodos, el primero mediante la evaluación de los parámetros de desgaste mediante un ensayo de desgaste tipo anillo a escala completa [2], donde se pueda introducir un pantógrafo real y recrear el comportamiento que tendría en una instalación definida. Actualmente el grupo de investigación se encuentra en proceso de fabricación de dicho banco de ensayo. El segundo método de validación es mediante la toma de datos de desgaste de forma periódica de una instalación real, en concreto el grupo usa como fuente de datos las instalaciones de Metro de Málaga. Teniendo esos valores de desgaste a lo largo del tiempo se puede comprobar como de fiable es el modelo respecto a la realidad.

Para poder realizar las distintas medidas de desgaste se han desarrollado distintos equipos de medida. En primer lugar, para poder realizar de forma adecuada las mediciones de desgaste, es necesario encontrar aquellas zonas de la instalación que tiene una tendencia a ser desgastadas. Para ello, atendiendo a conocimientos previos [3], es conocido por el sector que aquellas zonas donde se producen un mayor número de arcos eléctricos son zonas donde el desgaste ya es, o está en el camino de ser, un desgaste considerable de estudio.

Para ello, se ha desarrollado el dispositivo que se presenta en la Figura 1, el cual va embarcado en la parte superior de una de las unidades. Este cuenta con una serie de sensores que permiten la identificación de arcos eléctricos a lo largo de la instalación y la recogida de otros parámetros útiles para la realización del modelo de desgaste.

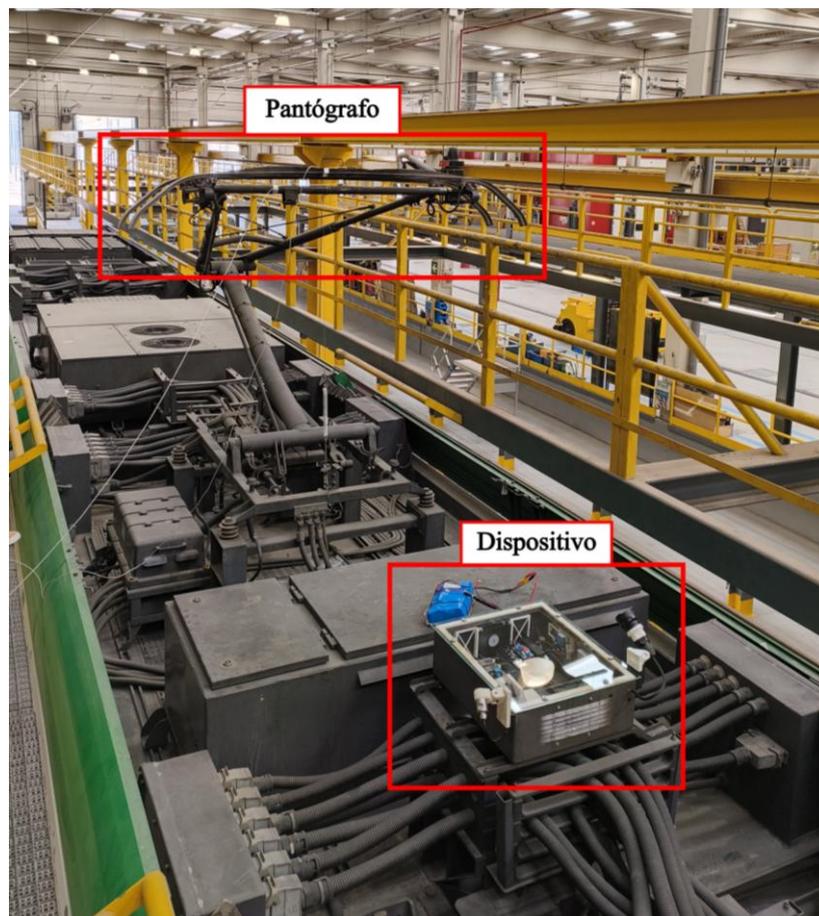


Figura 1: Dispositivo colocado en una unidad de Metro de Málaga

El aparato se puede controlar de forma remota por lo que no existe una conexión física entre él y el usuario que lo está empleando. Además, el dispositivo se usa durante el funcionamiento normal de las unidades, por lo que no interfiere en el desarrollo de la actividad empresarial de Metro de Málaga, lo que supone una gran ventaja. Otra ventaja es que con una sola pasada de la unidad a lo largo de la línea que se desea estudiar, se puede obtener el informe completo de la instalación, lo que permite evaluar grandes recorridos en un corto periodo de tiempo. Gracias a ello se puede repetir las mediciones a intervalos regulares y seguir la evolución del desgaste en los puntos de interés.

Por otro lado, si se detectan a tiempo estos puntos de desgaste, se puede actuar sobre ellos intentando modificar aquellos parámetros que se creen que puedan conllevar una reducción del desgaste. Junto con esto, los gestores de mantenimiento de instalaciones ferroviarias tienen a su disposición una herramienta muy útil, ya que, por regla general, la metodología que se ha estado empleando hasta ahora es una metodología de inspección visual a pie o mediante un carrito auxiliar, donde el operario tiene que recorrer toda la vía y anotar aquellos puntos en los que se detectan desgastes anómalos. Con el dispositivo que se presenta, de una sola pasada se tendría información de toda la infraestructura.

El dispositivo ha sido probado de forma exitosa en todas las líneas de Metro de Málaga (Figura 2) permitiendo tanto al grupo de investigación como a los gestores de la infraestructura obtener información valiosa acerca del estado de la catenaria y de las posibles zonas más conflictivas de desgaste. Esto ha permitido centrar los estudios de desgaste en unas zonas concretas y monitorizar dichas zonas de forma periódica y con nivel de detalle.



Figura 2: Líneas de Metro de Málaga

2. Materiales y métodos

El dispositivo desarrollado tiene como uno de sus principales objetivos la detección de arcos eléctricos producidos durante la interacción entre el pantógrafo y la catenaria en la instalación ferroviaria donde se incorpore. Para ello, se han empleado dos sistemas de detección complementarios que permiten tanto la identificación de estos eventos como su validación.

El primer sistema de detección está basado en un sensor de arco eléctrico que opera detectando la radiación ultravioleta emitida a frecuencias específicas características de los arcos generados en esta interacción. Este sensor proporciona una señal de salida variable en función de la intensidad del arco detectado. La señal es capturada y procesada por un microcontrolador, encargado de interpretar los datos provenientes del sensor. Cabe destacar que el sensor está calibrado conforme a las normativas aplicables, garantizando su sensibilidad y precisión en las condiciones de operación [4].

El segundo sistema empleado consiste en una cámara de alta definición orientada hacia el pantógrafo. Este dispositivo permite obtener un registro visual del fenómeno, lo que proporciona una segunda fuente de datos que cumple dos funciones principales: la identificación directa de los arcos eléctricos y la validación de las medidas proporcionadas por el sensor de arco. Esto último resulta esencial, ya que, debido a la naturaleza compleja de la interacción pantógrafo-catenaria, las señales generadas por el sensor pueden no representar de manera exacta la totalidad de los eventos ocurridos en la instalación. Como se observa en la Figura 3 el sistema permite la correcta grabación del pantógrafo en las dos alturas de trabajo tanto en catenaria rígida, como en catenaria flexible sin necesidad de realizar modificaciones.



(a) Captura de vídeo en tramo de superficie



(b) Captura de vídeo en tramo de túnel

Figura 3: Comparativa de la vista entre las dos altura de trabajo del pantógrafo

Además de los sistemas de detección de arcos y video, el dispositivo está equipado con un sensor IMU y un GPS. El sensor IMU permite registrar las aceleraciones y vibraciones que experimenta la unidad, lo que ayuda a comprender el contexto en el que se producen los arcos eléctricos. Por su parte, el GPS facilita la geolocalización de la unidad en las zonas fuera de túnel, con el objetivo de controlar la ubicación de la unidad y la línea en la que se encuentra trabajando.

Todos estos datos, tanto los captados por los sensores como los visuales, son gestionados por un conjunto de microprocesadores que, a su vez, están conectados a un ordenador central ubicado dentro del dispositivo. Este ordenador actúa como el núcleo de procesamiento, almacenando la información y coordinando la captura simultánea de video y datos en tiempo real.

Una de las prioridades en el diseño del sistema ha sido facilitar su conexión y desconexión sin necesidad de cableado físico. Por esta razón, se ha implementado una conexión inalámbrica entre el ordenador central del dispositivo y el equipo de monitoreo remoto. Esta característica permite realizar los ensayos de manera sencilla, sin requerir una conexión física, lo cual simplifica el montaje y desmontaje del dispositivo sobre la unidad de metro. La Figura 4 muestra un esquema al completo de los distintos elementos que incorpora el dispositivo y la conexión que se realiza entre el dispositivo y el usuario que desea realizar el ensayo.

La toma de datos se realiza a través de una interfaz gráfica en la que el usuario solo tiene que iniciar y terminar la grabación. Esta interfaz gráfica gestiona el sistema de captura de datos de todos los sensores de forma automática. Una vez finalizada la grabación, los datos se transmiten a una ubicación en la nube a la cual pueden acceder todos aquellos usuarios que previamente hayan sido autorizados.

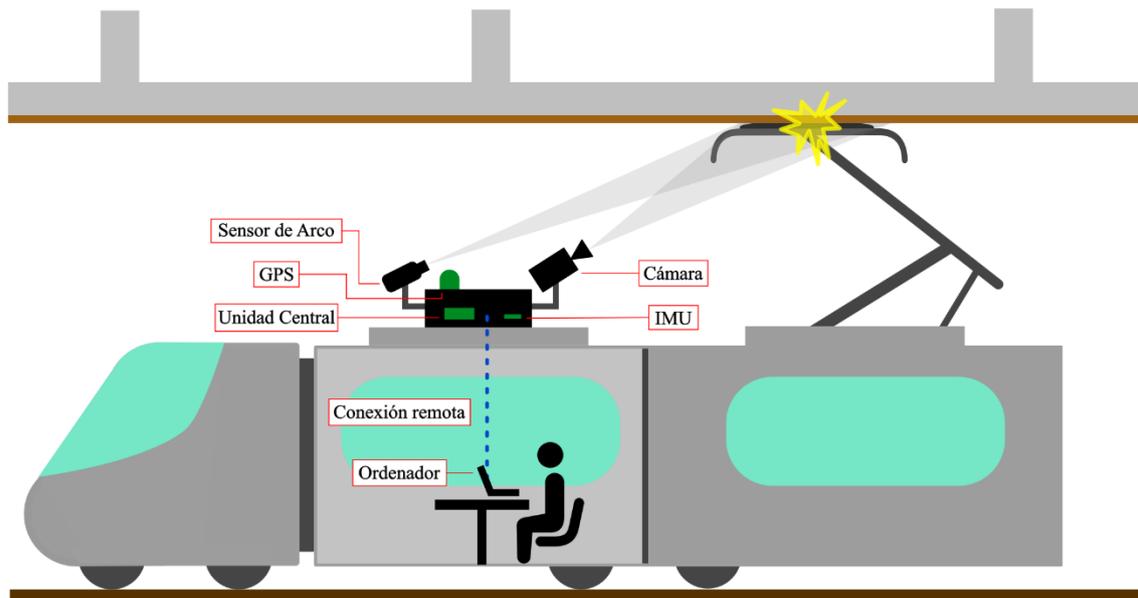


Figura 4: Esquema representativo con los distintos elementos del dispositivo

En cuanto a los aspectos mecánicos, el dispositivo está alojado en una caja metálica que incluye en su parte superior una vidriera, permitiendo una visualización del exterior como se observa en la Figura 5. Este diseño protege a la cámara, que se encuentra en el interior de la caja, frente a las adversidades meteorológicas, mientras que el sensor de arco eléctrico está ubicado externamente debido a la necesidad de no cubrir su lente, ya que cualquier material podría interferir en la correcta detección de la radiación ultravioleta.

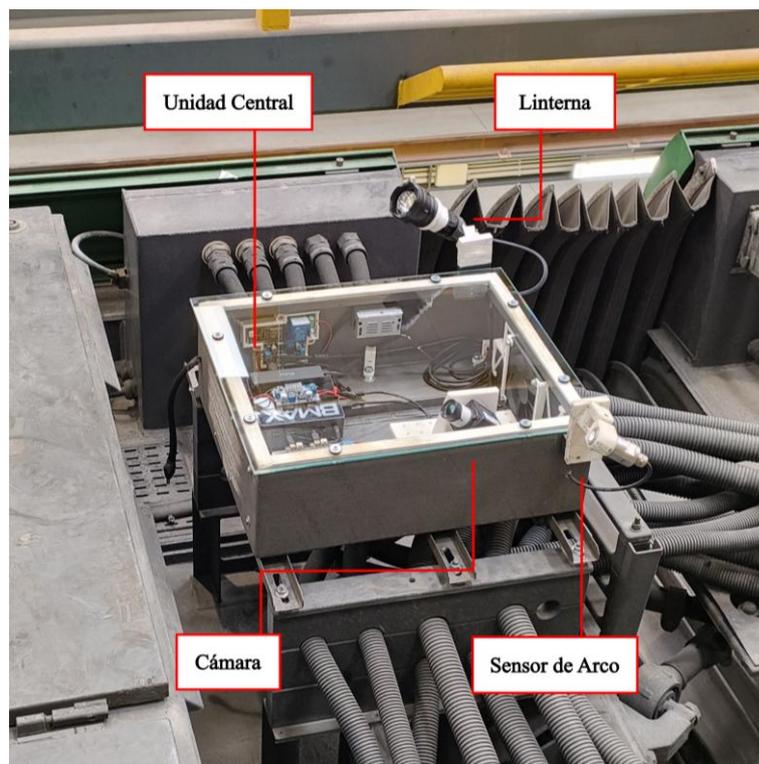


Figura 5: Detalle del dispositivo junto con los elementos principales

La estructura metálica proporciona hermetismo al dispositivo, haciéndolo resistente al agua, y cuenta con un sistema de ventilación compuesto por ventiladores y filtros. Estos ventiladores aseguran la evacuación del calor generado tanto por los dispositivos internos como por las altas temperaturas ambientales, especialmente en los meses de verano. Por su parte, los filtros previenen la entrada de polvo de grafito, un material conductor generado por el desgaste del pantógrafo, evitando así posibles fallos eléctricos dentro del sistema.

3. Resultados

Los datos más relevantes obtenidos hasta ahora han sido los proporcionados por los vídeos capturados por la cámara del dispositivo. Estos vídeos ofrecen una perspectiva detallada de la infraestructura y del entorno, permitiendo un análisis exhaustivo de la evolución de las instalaciones respecto a la cantidad e intensidad de los arcos eléctricos detectados (Figura 6).



Figura 6: Muestra de arco eléctrico capturado por la cámara

Para observar los resultados, se revisan manualmente todas las grabaciones y se clasifican los arcos eléctricos observados entre paradas. Se elabora un mapa de calor como el que aparece en la Figura 7 con una escala de colores: verde para las áreas sin arcos, amarillo para arcos de baja intensidad, y escalas crecientes de naranja y rojo para aquellos de mayor magnitud. Dicha escala se realiza comparando la totalidad de arcos obtenidos en video y clasificándolos. Junto con la escala se añade la marca de tiempo donde ocurre dicho arco para poder localizarlo correctamente en video. La información proporcionada por el video es suficientemente buena como para poder localizar la zona de aparición de los arcos detectados en la instalación real. Este sistema permite identificar rápidamente las zonas más afectadas y prioritarias para mantenimiento y su evolución respecto al tiempo.

	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
Ensayo 1		0:37	0:47
		0:45	
		1:01	
		1:12	
		1:27	
Ensayo 2		1:36	
		3:10	5:13
		3:53	5:15
Ensayo 3		4:05	5:18
		6:23	7:50
		6:28	
Ensayo 4		6:30-6:35	
		17:13	19:19
		17:48	19:23
		18:04	19:30-19:34
		18:09-18:17	19:53
		19:57	

Figura 7: Muestra de mapa de calor generado para localización de zonas conflictivas

Los vídeos ofrecen evidencia visual directa de los arcos eléctricos que se observan. Por el contrario, el sensor de arco parece limitado a detectar únicamente aquellos arcos de gran intensidad o que emiten la radiación de una forma directa al sensor. Este comportamiento puede explicar por qué no se reconocen arcos de menor intensidad o aquellos situados en los extremos del pantógrafo. Aunque el sensor ha registrado múltiples arcos, no ha logrado capturar todos los que han sido identificados visualmente, limitando su utilidad en ciertos escenarios.

En la Figura 8 se puede ver una de estas utilidades, que es examinar con detalle aquellos arcos que el sensor si ha sido capaz de detectar. Las unidades que proporciona el sensor son adimensionales y representan únicamente la intensidad de energía que emite. Gracias a la elevada frecuencia de muestreo, es posible identificar eventos en los que el arco eléctrico no se mantiene de forma continua en el tiempo, sino que, en intervalos extremadamente cortos, alcanza valores máximos y mínimos. Este fenómeno resulta imperceptible mediante la grabación.

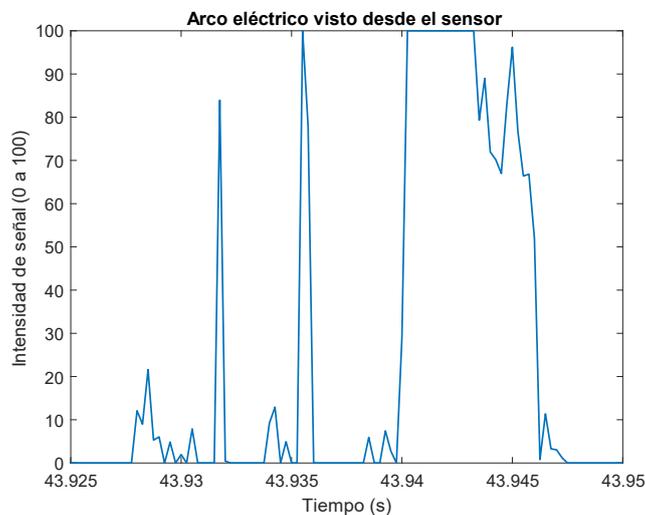


Figura 8: Arco eléctrico visto desde el sensor

Por otra parte, en la Figura 9 se pueden observar los datos en bruto de las aceleraciones que se obtienen por medio del sensor IMU. En la aceleración longitudinal se puede apreciar con detalle aquellos momentos en los que la unidad se encuentra esperando o en movimiento. Estos datos pueden ser procesados posteriormente con el fin de obtener parámetros característicos de la vía o encontrar particularidades que se puedan relacionar directamente con la aparición de arcos concretos, aunque por el momento no se ha estudiado esta correlación de datos.

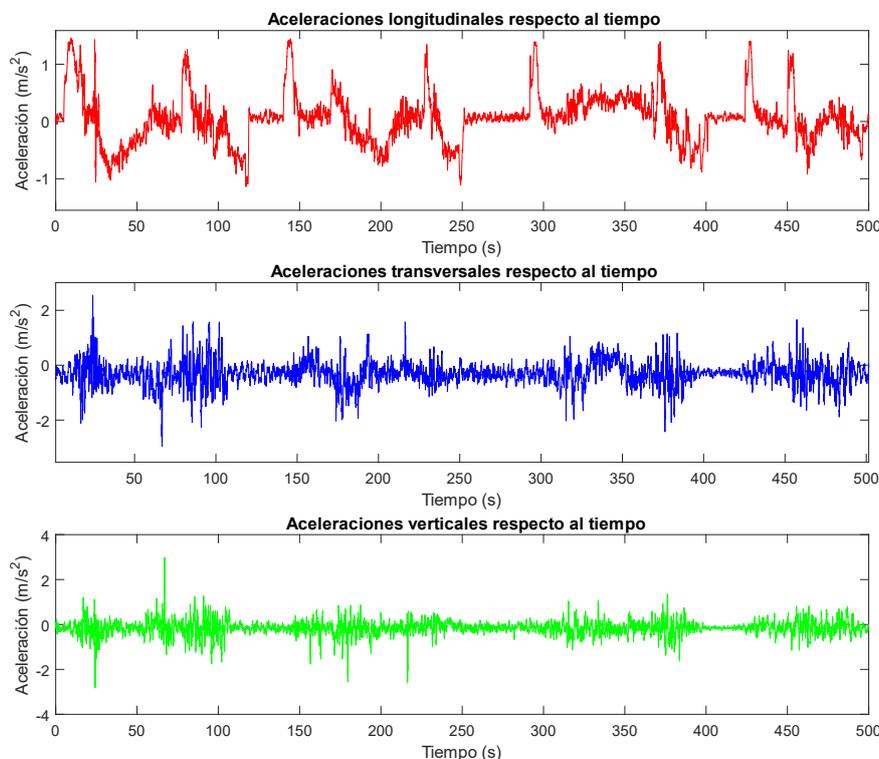


Figura 9: Representación de las aceleraciones registradas por IMU en los 3 ejes principales

4. Conclusión

Tras un año de análisis comparativo entre el primer y el último ensayo, se constata que, a pesar de cambiar hilo conductor en ciertas áreas y cambio de mesillas en los pantógrafos, los arcos eléctricos siguen apareciendo. En las zonas previamente afectadas, la cantidad de arcos eléctricos se mantiene alta, mientras que, en áreas sin incidencias, los arcos permanecen ausentes o aparecen en niveles bajos. La opinión que tiene el grupo de investigadores al respecto de este fenómeno, es que la aparición de arcos eléctricos no depende directamente del estado de desgaste de la mesillas y catenaria, sino que es debido a la configuración de soportes, seccionamientos y desvíos dentro de la propia instalación. Un cambio de disposición en estos elementos podría ayudar a reducir la aparición de este tipo de fenómenos, pero para afirmar dicha hipótesis es necesario continuar con la investigación en este aspecto e introducir dichos cambios en la instalación para comprobar los resultados.

La realización del mapa de calor ha resultado fundamental para localizar con precisión las áreas más conflictivas, permitiendo un enfoque más efectivo en las inspecciones y el mantenimiento de la infraestructura.

Además de los resultados obtenidos a partir de la observación directa, este estudio presenta un dispositivo innovador diseñado para optimizar los sistemas de mantenimiento en infraestructuras ferroviarias. Este dispositivo ofrece una solución eficaz para identificar con mayor rapidez las zonas de la infraestructura que presentan mayores signos de desgaste. Esta capacidad permite priorizar las intervenciones de mantenimiento, aumentando la eficiencia en la gestión de los recursos y reduciendo los tiempos de respuesta ante posibles fallos.

Una de las características más destacadas del sistema es su capacidad para recopilar, en una única pasada de una unidad ferroviaria, un registro visual completo del estado de la catenaria. Este registro incluye un video en alta definición que documenta de manera precisa tanto las condiciones del cable conductor como la aparición de arcos eléctricos a lo largo de la instalación. Esta información no solo facilita la identificación de áreas críticas, sino que también proporciona un soporte valioso para el análisis detallado y la toma de decisiones basada en datos objetivos y en tiempo real.

5. Agradecimientos

Los autores desean dar las gracias a METRO DE MALAGA S.A. por permitir el ensayo del dispositivo desarrollado y la realización de mediciones en sus instalaciones. En particular a todo el personal de la empresa que ha participado en esta actividad.

6. Referencias

- [1] M. Simarro, S. Postigo, J.A. Cabrera, J.J. Castillo, A procedure for validating rigid catenary models using evolutionary techniques. *Comput Struct.* 202;228,2019
- [2] Bucca, G.; Collina, A.; Tanzi, E. Experimental analysis of the influence of the electrical arc on the wear rate of contact strip and contact wire in a.c. system. In *Advances in Italian Mechanism Science*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2016.
- [3] T. Kziazzyk, E. Gavignet, P.-H. Cornuault, P. Baucour y D. Chamagne, “Review on Test Benches Studying Sliding Electrical Contact and Synthesis of Experimental Results”, *Energies*, vol. 16, n.º 3, p. 1294, 2023.
- [4] *Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de captación de corriente. Requisitos y validaciones de medidas de la interacción dinámica entre el pantógrafo y las líneas aéreas de contacto.*, UNE-EN 50317:2012, 2012.