

Anexos trenes auscultadores

PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA ADQUISICIÓN DE 39 TRENES PARA LAS LÍNEAS
L1, L2, L3 y L4

Índice

Anexos trenes auscultadores	1
ANEXO: SISTEMA DE INSPECCIÓN Y MEDICIÓN DE LA CATENARIA FERROVIARIA	7
1 Objeto	7
2 Alcance	7
2.1 Suministro de los equipos embarcados	7
2.2 Suministro de aplicación servidora y aplicaciones cliente	8
2.3 Instalación y puesta en marcha de todo el sistema	10
2.4 Otros servicios y suministros específicos contemplados en el alcance del contrato	10
2.4.1 Documentación técnica y certificaciones	10
2.4.2 Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro Barcelona	11
2.4.3 Sesiones de formación	11
3 Condiciones específicas del suministro e instalación	12
3.1 Transversales a todo el proceso	12
4 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas	13
4.1 Equipos de medición	13
4.1.1 Cámara de vídeo de alta resolución	13
4.1.2 Detector de arcos voltaicos	14
4.1.3 Cámara termográfica	14
4.1.4 Acelerómetros	15
4.1.5 Localización precisa	15
4.1.6 Subsistema de comunicaciones embarcado	16
4.1.7 Unidad de procesamiento	17
4.1.8 Subsistema de fijación mecánica	18
4.2 Aplicación servidora y aplicaciones cliente	19
4.2.1 Concepto y arquitectura	19
4.2.2 Requisitos funcionales de alto nivel de la aplicación servidora y la aplicación cliente	21
4.2.3 Gestión de las alarmas	21
4.2.4 Elaboración de informes y descarga de datos:	22
4.2.5 Gestión básica de usuarios y roles	23
4.2.6 Desde la aplicación servidora del sistema se podrá:	23

4.2.7	Funcionalidades relativas a las mediciones mínimas del sistema:	25
5	Instalación de los equipos en los trenes	25
5.1	Aspectos esenciales	25
5.2	Instalación de los equipos	25
5.1.1	Ubicación y conectividad	25
5.1.2	Alimentación	26
5.1.3	Cableado	26
5.3	Pruebas y validación	26
6	Documentación específica	26
7	Condiciones específicas de entrega	29
8	Condiciones específicas de la garantía	30
	ANEXO: SENSORES PARA EL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DEL CARRIL	31
1	Objeto	31
2	Contexto	31
3	Requisitos funcionales y especificaciones técnicas	32
3.1	Unidad central registradora de datos (datalogger)	32
3.2	Sensores acelerómetros para medir las aceleraciones perpendiculares, transversales y longitudinales.	33
3.3	Licencia para acceder a los datos registrados por los sensores	34
4	Otros servicios y suministros específicos contemplados en el alcance del contrato	35
4.1	Documentación técnica y certificaciones	35
4.2	Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro Barcelona	35
4.3	Sesiones de formación	35
5	Condiciones específicas de la garantía	36
	ANEXO: SISTEMA DE MEDICIÓN DE GÁLBO DE TÚNEL	37
1	Objeto	37
2	Propósito	37
3	Alcance	38

3.1	Suministro de los equipos embarcados	39
3.2	Suministro de aplicación servidora y aplicaciones cliente	40
3.3	Instalación y puesta en marcha de todo el sistema	41
3.4	Mantenimiento preventivo y actualizaciones de software durante la garantía	41
3.5	Otras actividades y servicios específicos contemplados en el alcance del contrato	42
3.5.1	Documentación técnica y certificaciones	42
3.5.2	Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro de Barcelona	43
3.5.3	Sesiones de formación	43
4	Condiciones específicas del suministro	43
4.1	Requisitos transversales	43
5	Requisitos funcionales y especificaciones técnicas del sistema	45
5.1	Requisitos funcionales de la operación del sistema en campo	45
5.2	Requisitos funcionales para la operación del sistema desde la oficina	47
5.3	Especificaciones técnicas de los equipos embarcados	49
5.3.1	Subsistema de medición de distancias (LIDAR)	49
5.3.2	Subsistema de cámara termográfica	50
5.3.3	Subsistema de videocámara	51
5.3.4	Subsistema de localización	52
5.3.5	Subsistema de comunicaciones embarcado	53
5.3.6	Subsistema de unidad de procesamiento embarcado	53
5.3.7	Base de fijación mecánica	54
5.4	Especificaciones de la aplicación servidora	56
5.4.1	Concepto y arquitectura	56
5.4.2	Requisitos funcionales de alto nivel de la aplicación servidora y la aplicación cliente	57
5.4.3	Gestión de las alarmas	58
5.4.4	Elaboración de informes y descarga de datos:	59
5.4.5	Gestión básica de usuarios y roles	60
5.4.6	Aplicación servidora: análisis offline	60
5.4.7	Aplicación servidora: API para el intercambio de datos "machine to machine"	60
6	Instalación de los equipos embarcados	61
6.1	Instalación de los equipos	61
6.1.1	Ubicación, alimentación y cableado	61

7 Documentación específica	62
8 Condiciones específicas de entrega	65
9 Condiciones específicas de la garantía	66
ANEXO: DISPOSITIVO DE AUSCULTACIÓN GEOMÉTRICA EMBARCADO	68
1 Alcance	68
2 Variables medidas	68
3 Normativas y resoluciones de las mediciones	69
4 Descripción de los dispositivos embarcados	70
4.1 Dispositivos de percepción	71
4.1.1 Sistema de visión con luz estructurada	71
4.1.2 Sistema de apagado automático del láser	72
4.1.3 Medición inercial	73
4.1.4 Módulo de adquisición y procesamiento de datos	73
4.1.5 Cámara de visión azimutal	74
4.2 Instalación de los equipos en el tren	74
4.2.1 Cableado	74
4.2.2 Odometría	75
4.2.3 Requisitos de montaje y anclaje de los dispositivos	75
4.2.4 Acceso a los datos y comunicación con la plataforma de monitorización de metro DAVANA	75
5 Instalación de los equipos embarcados	76
5.1 Pruebas y validación del equipo instalado	76
5.2 Pruebas y validación del equipo instalado	76
6 Condiciones específicas de la garantía	77
6.1 Otras obligaciones específicas del adjudicatario	77
ANEXO: SONÓMETRO EMBARCADO	78
1 Objeto	78
2 Alcance	79
3 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas	79

3.1 Sensores de audio	79
3.2 Interfaz entre el sensor de audio y el equipo Digital Train de Smart Motors embarcado en el tren	80
4 Instalación del sensor de audio en los trenes	81
4.1 Instalación de los sensores de audio	81
4.2 Pruebas y validación	81
5 Documentación específica	82
ANEXO: TERMÓMETRO DE CARRIL EMBARCADO	83
1 Objeto	83
2 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas	83
2.1 Unidad de termómetro de carril para embarcar en los trenes	83
2.2 Kits de anclaje	84
3 Pruebas y validación	85
4 Documentación específica	85

ANEXO: SISTEMA DE INSPECCIÓN Y MEDICIÓN DE LA CATENARIA FERROVIARIA**1 Objeto**

El objeto de este pliego es el suministro, instalación y puesta en servicio de un sistema embarcado en el tren para la inspección y medición de la catenaria ferroviaria, con capacidad para detectar puntos calientes, chispas, arcos y golpes y medir varios parámetros de la catenaria a velocidad comercial. El sistema generará mapas digitales detallados de la catenaria, incluyendo información sobre su geometría (*zigzag/staggering* y altura) y la medición continua de su temperatura. Los mapas incluirán también la caracterización de aspectos básicos de la interacción del pantógrafo con la catenaria, mediante el registro continuo de las variaciones de altura (aceleraciones), la detección y localización de impactos y de la generación de chispas y arcos voltaicos y, finalmente, el seguimiento continuo del punto de contacto de la catenaria sobre la banda de contacto del pantógrafo. Más allá del registro continuo, el sistema analizará en tiempo real todos estos datos con el objetivo de detectar anomalías que puedan afectar a la seguridad y el funcionamiento óptimo de la catenaria o los pantógrafos de los trenes, generando alarmas que se enviarán de forma automática a los perfiles de mantenimiento designados. El equipo embarcado sincronizará todos los datos según una referencia de posicionamiento externa (fuera del alcance del contrato).

El sistema embarcado se complementará con una solución informática (servidor) que centralizará todos los datos y alarmas registrados, y permitirá a los usuarios visualizarlos y analizarlos en detalle mediante un conjunto de clientes (preferentemente web). Asimismo, permitirá a los usuarios parametrizar el comportamiento del sistema (por ej., ajuste de alarmas), descargar datos, etc. Los datos y alarmas podrán ser accesibles mediante una API (interfaz de programación de aplicaciones) u otros mecanismos de integración de datos.

La medición continua de los parámetros definidos permitirá mejorar las actividades de mantenimiento y su planificación, incrementando su eficiencia y eficacia con el objetivo de mejorar la disponibilidad y el comportamiento del sistema catenaria–pantógrafo. Por otra parte, la gestión de las alarmas permitirá prevenir afectaciones por presencia de chispas o golpes, o de valores excesivos de temperatura, entre otros, que provocan graves daños a los pantógrafos o la catenaria, y que eventualmente pueden requerir la interrupción del servicio de metro con tiempos de resolución muy considerables.

2 Alcance

El alcance de este pliego es el suministro, instalación y puesta en servicio de un sistema embarcado en trenes para la inspección y medición de la catenaria, que incluye el equipamiento y las actividades que se enumeran a continuación.

2.1 Suministro de los equipos embarcados

1. Deberá suministrarse un equipo completo de medición de catenaria, adecuado para ser instalado a bordo de un tren del Metro de Barcelona y para efectuar las inspecciones de catenaria rígida. Este equipo embarcado deberá incluir todos los componentes necesarios para llevar a cabo las labores de medición e inspección de la catenaria rígida, tal y como se detalla en el presente pliego

técnico. Los equipos se dotarán de todos los sensores necesarios —incluidas cámaras de alta resolución, cámaras termográficas y acelerómetros— para obtener datos precisos sobre el estado de la catenaria y de la interacción pantógrafo-catenaria. La sensórica se complementará con *hardware* y *software* embarcados que le permitirán sincronizar y procesar los datos a efectos de generar alarmas y grabar los datos de forma continua en el sistema de almacenamiento local. En particular, deberá incluirse un sistema de grabación continua de vídeo para las diferentes cámaras necesarias (cámaras termográficas, cámaras de interacción pantógrafo-catenaria, etc.).

2. El equipo embarcado monitorizará el funcionamiento de los distintos componentes que lo integran y reportará su estado en tiempo real, además de notificar mediante alarmas las pérdidas de funcionalidad de cualquiera de sus componentes.
3. Tanto para el envío de las alarmas en tiempo real como para la descarga de los datos locales (medidas, vídeos, etc.) hacia el sistema central, el equipo embarcado deberá ser compatible con el sistema de comunicaciones descrito en el apartado 3.5 (Trenes auscultadores). Deberá disponer también de interfaz Ethernet y wifi para utilizar dichos canales en el momento en que estén disponibles.
4. El suministro incluirá todo el cableado de alimentación, control y comunicaciones necesario, tanto entre los propios equipos integrantes del sistema (p. ej., equipo de control y sensores) como con el tren (acometidas de alimentación) y para la interconexión con otros equipos embarcados, tales como el PC Digital Train, que puede proporcionar la posición y velocidad del tren cada 2 segundos (interfaz física Ethernet, API socket TCP) o, en general, con otros sistemas existentes. No se podrá utilizar el sistema de posicionamiento GPS, puesto que la red del Metro de Barcelona es mayoritariamente subterránea.
5. Soportes y elementos mecánicos: Se incluirán todos los soportes y elementos mecánicos necesarios para la instalación segura y firme de los equipos de medición en el tren. Estos elementos deberán diseñarse específicamente para cada equipo y punto de instalación, asegurando la compatibilidad con las estructuras existentes del tren sin comprometer su integridad. A fin de minimizar las interfaces mecánicas con el material móvil para la sujeción de cada elemento, todos ellos deberán fijarse sobre un soporte rígido rectangular con aislamiento eléctrico (pintura o material aislante), que, a su vez, se fijará en cuatro o seis puntos extremos en los perfiles corridos y encastrados longitudinalmente en ambos lados del techo del tren, que ya contempla la fijación de elementos en el techo (HVAC, etc.). Esto minimiza la necesidad de mecanizar fijaciones *ad hoc* sobre el tren y, a la vez, permite al proveedor disponer de los elementos sin restricciones específicas. Únicamente es necesario garantizar que los equipos instalados no superen la cota de gálibo que se detallará en la primera fase de planificación y proyecto, descrita en este mismo pliego. Durante esa fase se proporcionarán planos de detalle, cálculos estructurales y especificaciones técnicas de todos los componentes. La base y las fijaciones están incluidas en el alcance de este suministro.

2.2 Suministro de aplicación servidora y aplicaciones cliente

1. Aplicación servidora y aplicaciones cliente: La aplicación servidora corresponde a una aplicación centralizada (servidor propio o en la nube), que gestionará el procesamiento *a posteriori* de los mapas térmicos y de localización de chispas que no puedan ser procesados por el equipo local y que requieran potencia computacional o tiempo de procesamiento adicionales para la detección

de incidencias más específicas. Por otra parte, también hará falta un conjunto de aplicaciones cliente para los diferentes casos de uso del personal de mantenimiento que gestione las alarmas y efectúe el análisis en detalle de los resultados del aplicativo (a modo SCADA). En este sentido, mantendrá el histórico de resultados, inhibiciones de alarmas y falsos positivos y todas las demás configuraciones. Las aplicaciones cliente se adecuarán a las interfaces de usuario según el caso de uso y criterios de usabilidad, por ejemplo, para el análisis resultados en oficina (SCADA, etc.), mediante múltiples pantallas cuando sea necesario. Todas estas interfaces estarán dentro del alcance del suministro.

2. La aplicación servidora, ya sea en la nube o en un PC físico, incluirá todas las licencias del *software* complementario que requiera (p. ej., sistema operativo, bases de datos, *software* de soporte específico, etc.), debidamente dimensionadas para los volúmenes de datos y la actividad nominal del sistema.
3. En caso de que la aplicación servidora no pueda ejecutarse en un servidor en la nube, el suministro incluirá un PC con todo el *hardware* necesario y el *software* instalado y configurado, así como las pantallas necesarias para la correcta operación y gestión del sistema central. En caso de que el sistema pueda instalarse en la nube, mientras la aplicación no se instale en los servidores en la nube de FMB, el alcance del contrato incluye el mantenimiento, la gestión y el servicio IaaS o PaaS que requiera la aplicación servidora durante un plazo máximo de 3 años, coincidiendo con el período de garantía. En este último caso, cuando deba realizarse la portabilidad a los servidores de FMB, el alcance del contrato de suministro incluirá la instalación de todo el *software* y la transferencia de datos en dichos servidores.
4. En los casos en que las aplicaciones cliente no puedan ser aplicaciones web, o cuando la versión web presente carencias de usabilidad (por ej., por visualización de datos, por el hecho de requerir más de una pantalla, etc.) el alcance el suministro incluirá dos PC totalmente equipados con el *software* y las pantallas necesarias para su uso.
5. API de acceso de datos y de integración con otros sistemas de información de FMB: El sistema dispondrá de una API (interfaz de programación de aplicaciones) servidora que permita acceder tanto a los registros de las alarmas detectadas como al conjunto de los datos almacenados. Sin embargo, en caso de producirse una nueva alarma, el sistema deberá enviar una notificación a un conjunto limitado de *endpoints* mediante un servicio web REST, usando el método POST, con toda la información relativa a la alarma generada. También deberá soportar la notificación de las alarmas a través de un *broker* MQTT, mediante el cual publicará toda la información relativa a la alarma generada. En ambos casos, si la alarma lleva adjunta una secuencia de vídeo, se enviará la URL en la que dicha secuencia sea accesible. Estas API posibilitarán la integración específica con la plataforma de monitorización de activos DAVANA de Smart Motors, utilizada en el Metro de Barcelona, así como con el telemando de energía de FMB (AVEVA), atendido 24 horas al día, 365 días al año, por operadores. Los detalles se presentarán en la primera fase de planificación y proyecto. Quedan fuera del alcance las modificaciones requeridas sobre DAVANA y el telemando de energía.
6. También queda fuera del alcance del contrato la configuración de los equipos intermedios de la red de FMB necesarios para el funcionamiento de la aplicación servidora y de los equipos cliente, tanto si son equipos físicos como en la nube. Durante la primera fase se concretarán estas

necesidades de integración en la red de acuerdo con la solución concreta planteada por el adjudicatario.

2.3 Instalación y puesta en marcha de todo el sistema

1. El alcance del contrato incluye la instalación de los equipos a bordo de los trenes designados, garantizando una integración segura y eficiente con los sistemas existentes. También se extenderán los cableados entre equipos para las canalizaciones oportunas. La instalación también contemplará todo el *software*, tanto para servidores en la nube como para PC físicos. De igual modo, se incluirá el *software* necesario para las aplicaciones cliente y los equipos que estas puedan requerir.
2. Forma parte del alcance del contrato la configuración y calibración de cada equipo, con las pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento y el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos. Una vez superadas todas las pruebas, los equipos estarán listos para su operación habitual. Esta puesta en marcha cubrirá la configuración y parametrización de la aplicación servidora y el ajuste y configuración de las aplicaciones cliente, tal y como se detalla en el siguiente capítulo (“Fases del proyecto”).
3. En el inicio de la fase de puesta en servicio y hasta que se cumplan los requisitos que evidencien la fiabilidad y estabilidad del sistema, culminando con la aceptación formal del sistema, el adjudicatario deberá establecer un servicio de soporte a la operación del sistema conforme a los niveles de servicio (SLA o Service Level Agreements) detallados en la descripción de la fase de puesta en servicio y aceptación formal del sistema.

2.4 Otros servicios y suministros específicos contemplados en el alcance del contrato

2.4.1 Documentación técnica y certificaciones

Queda dentro del alcance del contrato la entrega de la documentación que se describe a continuación y que se completa en el capítulo específico de “Documentación” de este mismo documento.

1. Se entregará un conjunto completo de documentación técnica que incluirá lo siguiente:
 - Manuales de usuario e instalación: documentos detallados que describen el funcionamiento de cada equipo y los procedimientos de instalación, configuración y mantenimiento.
 - Planos de instalación: dibujos técnicos a escala que muestran la ubicación exacta de cada componente y las conexiones eléctricas y mecánicas.
 - Listados de materiales: especificaciones detalladas de todos los materiales utilizados en la fabricación de equipos y sistemas de sujeción.
 - Planos de detalle, especificaciones técnicas de todos los componentes mecánicos, las bases y las fijaciones de los dispositivos en el tren. Estudio mecánico del conjunto ensamblado en la base que quedará instalada en el techo del tren.
 - Certificados de conformidad: documentación que acredite que los equipos cumplen con las normas y los estándares de calidad y seguridad aplicables al sector ferroviario.
 - Certificados de compatibilidad electromagnética (EMC): documentos que garanticen que los equipos no generan interferencias electromagnéticas que puedan afectar a otros sistemas del tren.

- Certificados de vibraciones y choques: documentos que demuestran que los equipos pueden soportar las vibraciones y los choques típicos del servicio ferroviario.

Esta documentación es imprescindible para que el fabricante del tren autorice la instalación de los equipos y confirme que no afectarán al funcionamiento de los sistemas originales del tren.

2. Se entregará también una documentación técnica del *software* que contendrá lo siguiente:

- Descripción de alto nivel de la arquitectura del *software* con identificación de los principales bloques funcionales y una breve explicación de las atribuciones funcionales y las principales interfaces internas (entre bloques/componentes) y externas (sistemas de información externos). También deberá incluir una breve explicación de las tecnologías subyacentes sobre las que se han implementado los distintos componentes.
 - En relación con los algoritmos y modelos de datos que efectivamente realicen las funciones de detección y diagnóstico de anomalías, el adjudicatario deberá describir, sin entrar en ningún detalle que comprometa la propiedad intelectual, qué entradas de información se requieren (tipo de dato, muestreo, etc.), cuáles son sus salidas y qué tipo de procesamiento se aplica, definido a muy alto nivel (p. ej., heurístico, estadístico, analítico, aprendizaje automático). En cuanto al aprendizaje automático o *machine learning*, el adjudicatario deberá especificar si es supervisado o no supervisado e indicar si, en el caso del Metro de Barcelona, ha sido necesario crear nuevos conjuntos de datos para el entrenamiento o validación de los modelos. El conocimiento básico y de alto nivel de esta información permite a Metro de Barcelona valorar el impacto sobre el sistema de cambios futuros en la infraestructura (por ejemplo, en la catenaria).
 - El adjudicatario mantendrá un registro de cambios (*changelog*) en el que se indicará el módulo afectado, el tipo de cambio —categorizado según su alcance (corrección, mejora, nueva funcionalidad, eliminación de prestación, seguridad, etc.)—, una breve descripción, la fecha de implementación y la versión en la que el cambio ha entrado en producción. Este registro también se aplicará sobre los módulos de detección y diagnóstico.
3. Se entregarán las licencias y los números de serie siguientes:
- Se entregarán las licencias y los números de serie de todos los programas que requiera el sistema para prestar las funciones mencionadas, tanto para los equipos embarcados como para las aplicaciones informáticas.

2.4.2 Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro Barcelona

En caso de que para la aplicación de Metro de Barcelona se hayan creado nuevos conjuntos de datos o *datasets* (etiquetados o no) —ya sea para el entrenamiento, la validación o el testado del sistema—, queda también dentro del alcance del contrato su entrega a Metro de Barcelona.

2.4.3 Sesiones de formación

El alcance del contrato incluye la impartición de formación para la operación del sistema y la realización del mantenimiento de primer nivel, en caso de que estos equipos no se correspondan con los utilizados por FMB en otros trenes auscultadores en servicio. Los puntos enumerados a continuación se completan en el capítulo de “Formación” presente en este mismo documento.

1. El adjudicatario también deberá preparar el Plan de Formación para los usuarios del sistema, que deberá contener todos los aspectos necesarios para la operación y parametrización del sistema, así como las acciones de mantenimiento de primer nivel (*troubleshooting*).
2. El Plan de Formación contendrá la planificación de las sesiones necesarias y los materiales y contenidos de la formación.
3. El Plan de Formación deberá impartirse en seis ocasiones, dos en turnos de mañana, dos en turnos de tarde y dos en turnos de noche, a las que asistirán personal de Energía, Sistemas de Estación y Mantenimiento de Vía. El proveedor grabará en vídeo (y audio) las sesiones definidas en el Plan de Formación, para su posterior consulta o reproducción.

3 Condiciones específicas del suministro e instalación

3.1 Transversales a todo el proceso

1. El presente pliego de condiciones técnicas describe a nivel funcional la totalidad del sistema embarcado en el tren para la inspección y medición de la catenaria ferroviaria solicitado, siendo el licitador quien deba proponer la mejor implementación técnica que se ajuste a dichos requisitos funcionales. Sin embargo, en aquellos puntos en que se ha considerado necesario, se describen las especificaciones técnicas concretas que deberán implementarse.
2. Es obligatorio el cumplimiento de todos los puntos de este pliego, por lo que se desestimarán las propuestas que no los cumplan estrictamente.
3. El conjunto de aspectos del suministro debe satisfacerse como un proyecto llaves en mano; es decir, incluyendo el suministro, la instalación y la puesta en servicio, conforme a las condiciones específicas de Metro Barcelona.
4. El sistema debe estar diseñado para poder prestar servicio durante un período mínimo de 20 años.
5. El sistema deberá disponer de autodetección (autodiagnóstico) del mal funcionamiento de sus componentes clave (subsistemas embarcados o aplicación servidora) y generar las alertas necesarias, con una determinación clara del nivel de operatividad total o parcial.
6. La fabricación de todos los componentes del sistema embarcado en el tren para la inspección y medición de la catenaria ferroviaria deberá llevarse a cabo con arreglo a las normativas de calidad, medio ambiente y seguridad más exigentes.
7. De forma general, cada uno de los subsistemas deberá ajustarse al estado de la cuestión y a las normativas actuales, con el objetivo de conseguir un rendimiento del trabajo, una fiabilidad y una disponibilidad óptimos. Deberá ser asimilable a otros sistemas existentes en el mercado con resultados probados en otras administraciones, alejándose de prototipos o soluciones *ex profeso*.
8. El coste de mantenimiento deberá ser lo más bajo posible. Por esta razón, los equipos empleados no podrán contemplar calibraciones u otras acciones de ajuste o mantenimiento complejas imprescindibles que requieran personal de mantenimiento especializado con frecuencia superior a los 6 meses, suponiendo un uso diario.
9. La sostenibilidad ambiental es un requisito fundamental para Ferrocarril Metropolità de Barcelona S.A., por lo que en el diseño e implementación deberán aplicarse los estándares más

avanzados en este ámbito en cuanto a los materiales empleados y a la huella de carbono. Por consiguiente, el peso y el consumo energético deberán ser tan bajos como sea posible con el fin de disminuir el consumo eléctrico.

10. El adjudicatario deberá coordinarse con Metro de Barcelona para efectuar los trabajos de instalación en los trenes y deberá adaptarse a los días y horas disponibles. Asimismo, participará en las reuniones de seguimiento acordadas en la fase de proyecto y ejecución.
11. Todos los datos, informes y resultados generados serán propiedad de Ferrocarril Metropolità de Barcelona (FMB). En caso de que el adjudicatario quiera utilizar los datos extraídos del sistema embarcado en el tren para la inspección y medición de la catenaria ferroviaria para cualquier aplicación que no sea la mejora y el ajuste de los algoritmos particulares de FMB, deberá solicitar autorización formal y por escrito a FMB.
12. Todos los resultados, características, y configuraciones derivados del proyecto, así como los datos proporcionados por Ferrocarril Metropolità de Barcelona, serán estrictamente confidenciales y no podrán emplearse para ningún fin, comercial o técnico, sin autorización formal y por escrito de FMB.

4 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas

4.1 Equipos de medición

4.1.1 Cámara de vídeo de alta resolución

La función de la videocámara de alta resolución es proporcionar un flujo de vídeo continuo de una resolución no inferior a FHD (1920 x1080) y 30 FPS de la zona de interacción pantógrafo-catenaria. Estas imágenes servirán para aportar contexto a los eventos detectados por los demás sistemas de captación embarcados, que se acompañarán de breves secuencias de vídeo de los segundos inmediatamente anteriores y posteriores a los eventos en cuestión, facilitando así su análisis, junto con la demás información de contexto (p. ej., localización, velocidad, etc.). Se procesarán por algoritmos de visión artificial para la caracterización del contacto entre la banda del pantógrafo y el hilo de contacto de la catenaria, que detectarán los puntos que queden fuera de los límites predefinidos y podrán generar un mapa continuo (por punto kilométrico) del punto de contacto respecto al centro del pantógrafo.

- Características:
 - Alta resolución para un detallado análisis de imágenes.
 - Alta velocidad de captura para detectar eventos rápidos.
 - Sensibilidad a la luz visible e infrarroja para operaciones en diversas condiciones de iluminación.
 - Iluminación: podrá incluir un sistema de iluminación auxiliar para garantizar una calidad de imagen óptima en condiciones de baja luminosidad o en el interior de los túneles. En caso de ser necesario dicho sistema, deberá ser eficiente y de tipo LED.
- Ubicación e instalación:

- La videocámara de alta resolución se ubicará en el techo del tren, en un punto estratégico que garantice una visibilidad óptima tanto de la catenaria como del pantógrafo. La instalación deberá realizarse minimizando las modificaciones estructurales del tren y priorizando la seguridad y la fiabilidad del sistema, tal y como se describe en el punto “Subsistema de fijación mecánica”.
- No existe un límite en cuanto al número de cámaras que requiera la solución del adjudicatario para cumplir con la implementación funcional descrita.

4.1.2 Detector de arcos voltaicos

La función de este sensor es detectar la presencia de arcos voltaicos en el pantógrafo.

- Características:
 - Capacidad de detectar arcos eléctricos con una duración de entre 5 y 500 ms a velocidades del tren de hasta 90 km/h.
- Ubicación e instalación:
 - El sensor se instalará en el pantógrafo, cerca de la zona de captación eléctrica en la que se produzcan los arcos voltaicos.

4.1.3 Cámara termográfica

La función de la cámara termográfica es proporcionar un flujo de vídeo de la imagen termográfica de la zona de interacción pantógrafo-catenaria, tanto del hilo de contacto como de los elementos que tienen algún tipo de interfaz en la catenaria, como la unión de los cables de alimentadores, los puentes de la catenaria, etc. Este flujo generará un mapa térmico de la temperatura de la catenaria a lo largo de la línea y vía por la que circula el tren. La cámara generará imágenes térmicas en tiempo real a partir de la radiación infrarroja inducida por la temperatura, y un algoritmo específico para la detección de zonas con temperaturas anómalas procesará dichas imágenes. El sistema permitirá establecer umbrales para temperaturas consideradas anómalamente elevadas, que pueden ser indicativas de las siguientes incidencias:

- Contacto deficiente pantógrafo-catenaria: genera arcos eléctricos y eleva la temperatura local.
- Anomalías en el hilo de contacto: provocan un aumento de la resistencia eléctrica y, por tanto, de la temperatura.
- Defectos en elementos de la catenaria: conexiones, aisladores, materiales de soporte, etc.
- Características:
 - Frecuencia de actualización de imagen termográfica capaz de visualizar las temperaturas de la catenaria en circulación comercial hasta 90 kilómetros por hora.
 - Rango mínimo de medición de 40 °C a 500 °C.
 - El sistema permitirá la sincronización de las imágenes térmicas con las imágenes de la cámara visible para una correcta correlación de datos y combinación de las imágenes.
- Ubicación e instalación:

- La cámara termográfica se ubicará sobre el techo del tren, en un punto estratégico que garantice una visibilidad óptima tanto de la catenaria como del pantógrafo a medida que el tren avanza. La instalación deberá realizarse minimizando las modificaciones estructurales del tren y priorizando la seguridad y la fiabilidad del sistema, tal y como se describe en el punto “Subsistema de fijación mecánica”.

4.1.4 Acelerómetros

La función de los acelerómetros es obtener información detallada sobre las vibraciones y los choques experimentados por el pantógrafo durante su funcionamiento. Los acelerómetros medirán la aceleración en el punto de instalación. Los datos obtenidos se transmitirán al sistema de monitorización central, donde serán procesados y analizados.

- Características:
 - El muestreo será superior o igual a 100 muestras por segundo, para tener un sobremuestreo suficiente que permita caracterizar la catenaria a 20 muestras por segundo.
 - Detección de vibraciones excesivas: indicativas de problemas mecánicos o dinámicos del pantógrafo o la catenaria.
 - Monitorización del estado de la catenaria: las vibraciones pueden ser indicativas de irregularidades en la catenaria, como zonas con desniveles o defectos.
 - Análisis de la dinámica del pantógrafo: permite estudiar el comportamiento del pantógrafo a lo largo del recorrido de la línea.
 - El sistema deberá permitir la sincronización de los datos de los acelerómetros con otros datos del sistema, como las imágenes de la cámara y los datos de la cámara termográfica y la combinación de imágenes.
 - Asimismo, el sistema deberá permitir el procesamiento de la señal con el filtrado y análisis de las señales de aceleración para la detección de eventos relevantes, como choques o vibraciones excesivas.
- Ubicación e instalación:
 - Se instalarán al menos dos acelerómetros en una ubicación estratégica del pantógrafo para una monitorización precisa sin interferir con el normal funcionamiento del pantógrafo. Por ejemplo, en la lámina de carbono del pantógrafo. Los sensores estarán diseñados para ser no intrusivos; es decir, no dificultarán el reemplazo de las láminas de carbono ni afectarán a la compatibilidad electromagnética (EMC), la aerodinámica o el comportamiento dinámico del pantógrafo.

4.1.5 Localización precisa

Para localizar la información captada por los diferentes sensores en el punto kilométrico de la línea, se pueden adoptar varias soluciones:

1. Un codificador (u odómetro) para la medición de distancias relativas, con la precisión suficiente y deriva mínima, que permita actualizar la posición de los datos registrados (distancias y temperatura).

2. En caso de que sea necesario un codificador, en la fase de proyecto se concretará si puede aprovecharse alguno de los codificadores existentes, siempre que dispongan de canales libres y que la resolución que proporcionen (< 100 pulsos por revolución), sea la adecuada para la aplicación de monitorización. En caso contrario, el adjudicatario deberá aportar e instalar el codificador, una vez aprobado por el fabricante del material rodante.
3. Los trenes disponen del Digital Train (un ordenador industrial embarcado), que actualiza la posición y velocidad del tren cada 2 segundos.
4. En caso de que el sistema de medición de distancias se complemente con un conjunto de referencias fijas (p. ej., tags, balizas, referencias ópticas QR, RFID, etc.) que permitan corregir la deriva y determinar de forma absoluta la posición del tren, dichas referencias fijas deberán ser las mínimas imprescindibles para cada línea y su coste y mantenimiento deberán ser muy bajos. En caso de que el sistema detecte la carencia de uno de estos elementos, deberá reportarlo, facilitando así su mantenimiento.

Si el adjudicatario propone otra solución, esta no podrá estar basada en GPS, dado que el sistema de posicionamiento global (GPS) no se puede utilizar debido a que la red de Metro de Barcelona es mayoritariamente subterránea.

- Características:
 - El subsistema de localización deberá permitir ubicar los datos recogidos por todos los sistemas y, en particular, las incidencias con una precisión de menos de 10 m.
 - El adjudicatario implementará los algoritmos necesarios para obtener la localización, combinando los datos de sensores con los de medidas de referencia de los que disponga *a priori*.

4.1.6 Subsistema de comunicaciones embarcado

Las comunicaciones de los equipos se integrarán en el router FW/VPN/4G/WIFI descrito en el apartado 3.5 (“Trenes auscultadores”), que permite realizar las funciones de envío y recepción necesarias para la realización de las funciones nominales de monitorización del gálibo y la temperatura.

Dichas funciones incluyen, entre otras:

- Envío en tiempo real de las alertas correspondientes a los defectos detectados, dirigidas al registro de la aplicación servidora o a los destinatarios predefinidos.
 - Descarga a demanda del servidor central/cliente de los datos de los diferentes sensores.
 - Envío en tiempo real de los datos relativos a la supervisión del estado del equipo que se registren remotamente en la aplicación servidora.
 - Envío en tiempo real de las alertas correspondientes a las incidencias sobre el mal funcionamiento de los equipos embarcados, dirigidas al registro de la aplicación servidora o a los destinatarios predefinidos.
 - Actualización remota de los parámetros del sistema embarcado (inhibición de alarmas, ajustes de sensibilidad de los algoritmos), recepción de pedidos remotos, o incluso para las actualizaciones del *software* embarcado, facilitando el telemantenimiento del propio equipo.
- Características:

- El equipo permitirá las comunicaciones inalámbricas wifi, lo cual posibilitará, en las zonas de la red en las que Metro de Barcelona haya habilitado la cobertura wifi, realizar las funciones enumeradas en el punto anterior. Adicionalmente, permitirá subir a la aplicación servidora la totalidad de los datos correspondientes a alguna de las inspecciones disponibles en el dispositivo de almacenamiento local, ya sea porque haya sido escogida remotamente por un usuario de la aplicación cliente o porque se haya programado su descarga temporalmente desde la aplicación servidora.
- El equipo dispondrá de un puerto Ethernet adicional para poder conectar localmente equipos de configuración, parametrización y actualización del *software*. Este puerto también podrá utilizarse como canal principal de comunicaciones del sistema si se conecta a un equipo embarcado de comunicaciones (fuera del alcance de este contrato).
- Los costes de los servicios de comunicaciones 4G/5G, tanto durante la fase de instalación y pruebas como durante la puesta en servicio y los 3 años de garantía, forman parte del alcance de este contrato de suministro y, por tanto, irán a cargo del adjudicatario.
- En caso de pérdida puntual de la cobertura, el sistema será capaz de retransmitir los mensajes que no hayan podido ser enviados.

4.1.7 Unidad de procesamiento

Los datos obtenidos por el sistema —como las imágenes de la videocámara de alta resolución, el flujo de imágenes termográficas, el muestreo continuo de las aceleraciones y las marcas de tiempo de los eventos— serán procesados y sincronizados con una referencia del punto kilométrico.

El sistema podrá obtener una referencia de la posición y velocidad del tren proporcionada por el equipo Digital Train, que actualiza los datos cada 2 segundos a partir de la información obtenida del odómetro del tren, o por medios adicionales (tales como codificadores, como se describe más adelante). Todos estos datos sincronizados y georreferenciados en el punto kilométrico se almacenarán en el equipo embarcado en un disco local de estado sólido con capacidad suficiente para 15 días para las imágenes de los vídeos y 30 días para el resto de los datos.

La unidad de procesamiento embarcada procesará de forma genérica todo este conjunto de datos y generará alarmas cuando los valores cumplan un conjunto de condiciones, como superar los umbrales preestablecidos de forma absoluta o superar los valores de referencia específicos para cada punto del trazado de la catenaria. El envío de alarmas también estará sujeto a la posibilidad de establecer zonas de exclusión (silenciadas) permanentes o temporales, para silenciar falsos positivos que puedan ser causados por circunstancias temporales o por singularidades del trazado, parametrizables desde las aplicaciones cliente. Cuando se cumplan las condiciones para generar una alarma, el sistema registrará los valores que han motivado la activación de la alarma, así como los valores de referencia que se han excedido, acompañándola de información adicional de contexto, como el punto kilométrico, la velocidad y una breve secuencia de vídeo de los instantes previos y posteriores que permita al usuario su evaluación de forma conveniente.

Concretamente, las principales alarmas que deberá generar el sistema son las siguientes:

- Detección de arcos voltaicos y chispas.

- Valores de temperatura del hilo de contacto, o de otros elementos dentro del rango de visión de la cámara termográfica, fuera de los rangos previstos, tanto por exceso como por defecto.
- Impactos o variaciones repentinas de los valores de los acelerómetros instalados en el pantógrafo, indicadores de potenciales problemas de fijación de la catenaria.
- Contacto del hilo fuera de la banda de captación del pantógrafo.
- Geometría de la catenaria, altura o zigzag fuera de umbrales absolutos o con valores alejados de los parámetros de referencia del punto kilométrico (activación por *geofencing*) en el que circula el tren.

Todas estas alarmas se enviarán al servidor de la aplicación, que a su vez generará los avisos pertinentes a los usuarios que tenga predefinidos.

4.1.8 Subsistema de fijación mecánica

Este subsistema lo componen la base rectangular donde se fijarán los componentes del sistema (salvo los acelerómetros) y los demás elementos necesarios para la sujeción de los componentes en la placa, así como aquellos necesarios para fijar la propia placa en el techo del tren. Este subsistema deberá diseñarse para que confiera la sujeción y rigidez suficientes para garantizar su integridad en las condiciones de operación del material rodante, asegurando que no se desprendan y caigan a la vía.

- Características:
 - El conjunto deberá estar dentro de los límites del gálibo estático del tren.
 - La integración de todos los elementos debe respetar las condiciones de gálibo estático de los trenes en los que se instala.
 - Con el fin de minimizar el total de mecanizados específicos en el techo del tren, el conjunto de los equipos deberá fijarse sobre una base que, a su vez, se fijará en la parte superior del tren mediante un conjunto mínimo de anclajes, aprovechando los perfiles empotrados longitudinalmente en los dos laterales del techo del tren y diseñados específicamente para la fijación de elementos en el techo. Este planteamiento permitirá retirar de forma más ágil el equipo, si es necesario por razones de mantenimiento del material rodante.
 - El estudio de detalle para la ubicación de los equipos y su posición relativa a los bogies, necesario para los cálculos de la geometría de la catenaria, etc., se determinará en la primera fase del proyecto.
 - El peso del conjunto de la base y los subsistemas que integre no podrá superar los 100 kg.
 - El conjunto de los elementos embarcados en el tren deberá cumplir los siguientes requisitos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI):
 - Protección: IP65/IEC 60529 (NEMA-4).
 - Temperatura de operación: de -10 °C a 65 °C.
 - Humedad del 10 % al 95 % a 25 °C sin condensación.
 - Vibración y choque: IEC 60068-2-27 (choque mecánico): 50 G, 6 ms, 3 ejes.
 - IEC 60068-2-26 (vibración sinusoidal): 3G, 11-200 Hz, 3 ejes.
 - EMC: EN 61326-1:2013 industrial.

- Equipos integrados de comunicaciones o control conformes a la norma EN-50155, con aislamiento entrada-salida superior a 2000 VAC; filtros de entrada conformes a la norma EN 55032, clase B; EMI o interferencias electromagnéticas (emisiones no deseadas) conformes a la norma EN 50121-3-2 (Compatibilidad electromagnética para material rodante) y EMS o inmunidad electromagnética según la misma norma.
- *A priori* hay que considerar que el subsistema central de procesamiento de datos y el módulo de comunicaciones también se ubicarán en la base, en la parte superior del motor MB2 en una ubicación estratégica que les permita realizar su función sin interferir en ningún elemento del tren y minimizando las modificaciones estructurales del tren, con el fin de priorizar la seguridad y la fiabilidad del sistema.
- Sin embargo, en la fase de proyecto se estudiarán las opciones de instalar estos dos equipos en el interior del tren, preferiblemente, si las dimensiones del equipo lo permiten, en el armario BT1 técnico, compartiendo espacio con el PC industrial del sistema Digital Train, para facilitar la conexión Ethernet, el acceso y el mantenimiento, en función de las dimensiones de la caja.
- En fase de proyecto, el adjudicatario aportará la documentación técnica pertinente que demuestre que los sistemas embarcados permanecerán solidarios en la base donde se encuentren fijados, garantizando que no se desprenderán hacia la vía en las condiciones de operación y circulación nominales del equipo. En este sentido, llevará a cabo los estudios mecánicos de integridad estructural (por elementos finitos) teniendo en cuenta las fijaciones diseñadas para las masas de los elementos en las condiciones nominales de desplazamiento del tren. El estudio integrará la valoración de la fatiga y las vibraciones, y se enumerarán los criterios de diseño y los factores de seguridad empleados.

4.2 Aplicación servidora y aplicaciones cliente

4.2.1 Concepto y arquitectura

1. La aplicación servidora se basará en una arquitectura centralizada que, por una parte, implemente las funciones para atender a los clientes del sistema que dispongan de la interfaz hombre-máquina (HMI) y, por otra, implemente las funciones de la capa de datos: la centralización histórica de todos los datos de los equipos embarcados, su posprocesamiento para análisis más exigentes desde el punto de vista computacional y no sujetos a tiempo real y, finalmente, la gestión del ciclo de vida de las alarmas.
2. Se prefiere que tanto la aplicación servidora y sus componentes como la aplicación cliente se implementen sobre tecnologías abiertas y escalables.
3. La interfaz de usuario de la aplicación cliente se acomodará a las necesidades de los casos de uso definidos por el mantenedor de energía (catenaria), que son básicamente los siguientes:
 - Gestión del estado de las incidencias activas: el usuario debe poder visualizar y consultar toda la información de contexto de las alarmas activas que puedan requerir una intervención correctiva con cierta urgencia. Dentro de este grupo de funcionalidades, la

interfaz debe permitir al usuario silenciar alarmas por zonas y vías para evitar el exceso de falsos positivos derivados de situaciones de contexto controladas *a priori*.

- Planificación de las intervenciones: monitorizar el estado general de la catenaria de ambas líneas de forma que se puedan identificar de forma rápida las zonas en las que los valores se encuentren más comprometidos (sin estar necesariamente fuera de los límites y, por tanto, sin alarmas activas) para priorizar las intervenciones preventivas.
 - Análisis de la evolución y tendencias del estado de la catenaria: funciones analíticas que, sobre los históricos de datos, permitan determinar la evolución de los distintos parámetros medidos. Por ejemplo, visualizar de forma agregada la distribución del contacto sobre la banda del pantógrafo, comparar los mapas de vibraciones de la catenaria (entre distintos pases), etc. En este caso de uso, se contemplará la consulta de los posibles informes que pueda generar la aplicación.
 - Monitorización del estado de los equipos: consulta de los registros de las alarmas de fallo y los indicadores de disponibilidad históricos.
 - Ajustes y parametrizaciones de las alarmas. la interfaz debe permitir ajustar y acomodar la sensibilidad y los umbrales de las alarmas en los diferentes puntos kilométricos, por vía, etc.
4. La aplicación cliente priorizará la usabilidad y conveniencia para los distintos casos de uso enumerados, pudiendo extender las ventanas de visualización a más de un monitor, si resulta necesario, para el análisis simultáneo de las imágenes de las diferentes cámaras conjuntamente con las mediciones de los acelerómetros.
 5. La aplicación cliente debe poder ser multisitio; es decir, debe poder ser utilizada simultáneamente por varios usuarios.
 6. Se prefiere que la capa cliente se implemente con acceso web, como web cliente, de forma que no sea necesaria la instalación de ninguna aplicación ejecutable sobre los dispositivos remotos utilizados por los usuarios. También se prefiere que sea adaptativa, de forma que la visualización y la interacción puedan ajustarse automáticamente al dispositivo de navegación utilizado por el usuario, ya sea en ordenador, tableta o teléfono móvil. Sin embargo, no son requisitos imperativos.
 7. La capa de gestión de datos se implementará sobre una base de datos de tecnología abierta, preferiblemente relacional (SQL o Structured Query Language) y, si es necesario, complementada por otra no relacional para los datos no estructurados. El gestor suministrado de la base de datos realizará periódicamente las tareas (*jobs*) de copia de seguridad y compactación de los registros.
 8. La información generada por el sistema sobre los defectos detectados (históricos), los distintos tipos de informes generados y las imágenes deberá poder exportarse a formatos de archivos abiertos (por ejemplo: CSV, PNG, JSON) para su procesamiento en otras plataformas.

4.2.2 Requisitos funcionales de alto nivel de la aplicación servidora y la aplicación cliente

1. Estas aplicaciones deben almacenar los datos históricos de los defectos detectados, incluyendo las imágenes discretas en las que se hayan detectado los defectos, pudiendo almacenar hasta 10.000 por línea.
2. Deben tener la capacidad de almacenar todos los datos sincronizados (vídeos de las cámaras, datos de los sensores y resultados del análisis en tiempo real) correspondientes a 500 semivuelts. En este sentido, el sistema deberá permitir que el usuario determine las secuencias que no deban borrarse, a modo de referencia o histórico relevante.
3. El conjunto de la aplicación servidora y la aplicación cliente deben permitir la reproducción continua de las secuencias de datos almacenados, de modo que el usuario pueda visualizar simultáneamente y desde la oficina la evolución de las imágenes de vídeo y de los registros de los sensores acelerómetros.
4. El sistema debe proporcionar una interfaz gráfica que ofrezca una visión general del estado de la vía y de la ubicación de los defectos, con accesos directos a las imágenes correspondientes a cada uno de ellos a fin de facilitar al usuario el contraste del diagnóstico.
5. Debe grabar de forma continua la información del estado de funcionamiento y disponibilidad de los propios equipos de campo y del propio servidor, con el fin de determinar la disponibilidad operativa para iniciar las inspecciones en campo o un nuevo análisis en la aplicación servidora.
6. Debe ofrecer una visión sinóptica del estado de funcionamiento de los principales componentes del sistema, destacando los eventos que hayan podido ocurrir en los equipos durante el proceso de captación/análisis de las imágenes en campo.
7. El sistema debe permitir consultar los informes periódicos o de alarma generados (descritos en otro punto).
8. Estas aplicaciones deben permitir configurar los roles y las listas de usuarios asociadas a la distribución de informes (por correo electrónico).

4.2.3 Gestión de las alarmas

1. Debe ser posible el acceso a los históricos de los registros y alarmas, con la posibilidad de establecer filtros sobre los atributos guardados para facilitar la búsqueda. Para el caso de las alarmas, estas aplicaciones permitirán al usuario conmutar su estado y establecer comentarios, en su caso.
2. El sistema debe integrar diferentes niveles de severidad de alarma (por ejemplo: leve, moderado y crítico) en función de umbrales específicos establecidos para cada uno de los defectos.
3. Las alarmas dispondrán de al menos dos estados en cuanto a la aceptación por parte del usuario: pendientes de reconocimiento y ya reconocidas. Cuando se detone una nueva alarma, aparecerá en estado “pendiente de reconocimiento”. Mediante la interfaz gráfica, el usuario podrá conmutar su estado a reconocida (o a la inversa). Al cambiar el estado de la alarma a “reconocida”, el usuario podrá añadir un breve comentario que complemente el diagnóstico. Todos estos cambios generarán un registro trazable (fecha y usuario) en la base de datos.

4. Las alarmas dispondrán de al menos dos estados en cuanto a su notificación a los destinatarios: no silenciadas o silenciadas. Las aplicaciones deben permitir la conmutación de los estados por tipos de alarma, zona, etc.
5. Las alarmas podrán generarse automáticamente por el sistema —lo habitual— o por el usuario. En el caso en que el sistema no haya diagnosticado los defectos, pero efectivamente haya un problema (es decir, en caso de falso negativo), el usuario debe poder delimitar el defecto en la imagen y detallar las propiedades características de ese tipo de defecto. También debe poder asignarle el nivel de alarma que convenga y forzar su envío a los destinatarios.
6. En el caso de alarmas generadas automáticamente por el sistema, el usuario debe poder anularlas (pasar a “sin alarma”) o cambiar su severidad (por ejemplo: Alerta \Leftrightarrow Crítica), para corregir los falsos positivos. Todos estos cambios generarán un registro trazable (fecha y usuario) en la base de datos.
7. El sistema debe permitir establecer los umbrales de alarma por cada tipo de defecto, además de ajustar los parámetros de configuración y sensibilidad del algoritmo de detección de cada defecto.
8. El usuario deberá poder silenciar las alarmas, a pesar de que estas se sigan registrando en la base de datos, por tipo de defecto y para zonas concretas de cada carril para cada línea. También debe poder hacerlo para defectos específicos y concretos, de modo que, en caso de que no se hayan reparado, evite generar reportes de alarma repetidos sobre el mismo defecto.
9. Debe permitir aplicar zonas de exclusión en las que no se registre ningún defecto en la base de datos ni se genere alarma alguna (p. ej., zonas de cambios, etc.) para cada línea. También deberá permitir seleccionar los algoritmos de detección que deben aplicarse por defecto en cada línea.
10. El sistema deberá permitir también la gestión y visualización de las alarmas asociadas al estado de funcionamiento y disponibilidad del propio sistema, tanto de los subsistemas del equipo de campo como de la aplicación servidora.

4.2.4 Elaboración de informes y descarga de datos:

1. El *software* deberá permitir la generación de informes resumen sobre los defectos identificados por línea y por período de tiempo, que presenten los datos agrupados por defecto y ordenados según diferentes criterios (punto kilométrico, fecha, de mayor a menor número de ocurrencias, etc.). Incluirá también una valoración de la calidad de los datos por tipología de defecto, mostrando métricas tales como la precisión, la sensibilidad (*recall*), etc.
2. Generará un informe resumen de la disponibilidad y productividad del propio equipo a partir de la información de autodiagnóstico registrada, incluyendo también el listado de las alarmas de los subsistemas.
3. En caso de detección de una alarma sobre el mal funcionamiento de un componente del propio sistema, la aplicación generará un informe de la alarma en el que se presentará toda la información contextual necesaria. Estos informes se dirigirán automáticamente por correo electrónico a una lista de usuarios configurable (que podrá ser diferente de la lista de alarmas de tren).
4. Los informes se almacenarán en un registro que permitirá su búsqueda mediante filtros, así como la visualización y descarga del informe seleccionado.

5. En los registros históricos de datos, la aplicación permitirá al usuario descargar los datos en crudo (CSV, JSON) de todos los campos y los atributos de datos disponibles sobre el filtro aplicado (rango de fechas, trenes, etc.).

4.2.5 Gestión básica de usuarios y roles

1. Los usuarios tendrán que identificarse para acceder a la aplicación.
2. Se podrán crear usuarios de la aplicación y asignarles uno o más roles. También podrán darse de baja usuarios.
3. En términos generales, habrá tres roles principales para interactuar con la aplicación, que podrían ser similares o asimilables a los siguientes:
4. Rol Básico: Permite realizar todas las funciones nominales de operación, excepto las propias de configuración y ajuste sobre el comportamiento del sistema, tales como el establecimiento de umbrales de alarma, la parametrización de los informes, la definición de listas de distribución, etc.
5. Rol Maestro: Permite realizar las mismas funciones que el rol básico y, adicionalmente, configurar los parámetros de la aplicación, tales como los umbrales de alarmas, la parametrización de informes, la inhibición de defectos, la creación de zonas de exclusión, listas de distribución y nuevos usuarios, y la asignación de roles.
6. Rol Mantenimiento del sistema: Se podrá asignar este rol, si procede, en la implementación de la solución del adjudicatario. Permite configurar aspectos de bajo nivel del sistema, sobre los módulos sensores, las comunicaciones, etc.

4.2.6 Desde la aplicación servidora del sistema se podrá:

1. Revisar en detalle cualquier punto de las imágenes grabadas, tanto de vídeo como termográficas, con o sin supervisión de ambas, así como los registros de las aceleraciones en los tres ejes, desplazándose de forma continua o asistida para saltar directamente a los defectos detectados. La navegación sincronizará las imágenes de las cámaras y acelerómetros y con los puntos kilométricos de la línea.
2. Disponer de diferentes tipos de visualización de los defectos en forma de tabla descriptiva y sinópticos visuales de la ubicación de los puntos a lo largo de la catenaria. Los diferentes modos de visualización deberán poder filtrarse por diferentes criterios, tales como tipología de defecto, criticidad, intervalo temporal de las capturas, etc.
3. Añadir información por parte del usuario para indicar si los defectos detectados automáticamente son falsos positivos o verdaderos positivos, de modo que queden registrados en la base de datos.
4. Complementar la información de los defectos con metadatos adicionales sobre la captura mediante un texto descriptivo (fruto de la inspección hecha por los operarios en campo) e, idealmente, adjuntar imágenes complementarias de detalle de otras fuentes. Y otro texto descriptivo diferenciado sobre las medidas correctivas aplicadas, idealmente también con la posibilidad de adjuntar imágenes del correctivo.

5. Delimitar manualmente, sobre las imágenes, la ocurrencia de falsos negativos; es decir, fallos reales no detectados por los algoritmos, pero visibles en las imágenes. Se podrán categorizar manualmente de acuerdo con los parámetros tipificados para cada defecto y añadir texto descriptivo a modo de metadatos adicionales. Se podrá escoger que se genere la alerta correspondiente con el objetivo de que los destinatarios predefinidos de las alertas la reciban para poder reaccionar.
6. Introducir, también manualmente, otros defectos no visibles en las imágenes grabadas, por haber sido detectados y corregidos por los equipos de inspección humana previamente a la grabación de la última videoinspección. Se podrán categorizar manualmente de acuerdo con los parámetros tipificados para cada defecto y añadir los metadatos adicionales habituales: texto descriptivo de los defectos, texto descriptivo de la eventual tarea correctiva, ambos preferiblemente con la posibilidad de adjuntar imágenes de otras fuentes.
7. Exportar con facilidad los falsos negativos notificados para generar nuevos conjuntos de datos que permitan al adjudicatario mejorar los algoritmos desplegados en el Metro de Barcelona, ya sea en el servidor central o en el equipo embarcado, de acuerdo con la tipología del defecto detectado para cada equipo.
8. Delimitar zonas de exclusión en las que no se apliquen los algoritmos de detección. También podrá hacerse para defectos concretos, ya sean falsos o verdaderos positivos, para evitar la duplicidad de alertas tanto en las notificaciones en campo como en las generadas por el proceso de la aplicación servidora.
9. Ajustar algunos parámetros de la muestra, tales como la ubicación (línea, vía, PK) a efectos de corregir errores en el establecimiento de las condiciones iniciales por el operario de campo, o por falta de alguna información de detalle.
10. Implementar un gestor del ciclo de vida de las alertas asociadas a los distintos tipos de defectos, en sus distintos estados: activas, reconocidas, no reconocidas, silenciadas y desactivadas.
11. Filtrar las alarmas por su estado, criticidad, tipología y período temporal de ocurrencia. En la visualización de tabla se podrán ver la ubicación y el detalle de los metadatos añadidos.
12. Reconocer las alertas, silenciarlas o desactivarlas. Los cambios de estado se trazarán a nivel de usuario y en el instante en que se produzcan, brindando al usuario la opción de añadir un texto breve explicativo.
13. Implementar un conjunto de informes que permitan totalizar las alarmas de cada tipo, de forma agregada para todas las líneas o para líneas seleccionadas, intervalos temporales, etc.
14. En relación con la calidad de los datos, la aplicación servidora elaborará un conjunto de informes simples que, con las métricas habituales de precisión (*precision*), exactitud (*accuracy*) y sensibilidad (*recall*) muestren los resultados de forma agregada y desagregada para todos los tipos de defectos de los catálogos, tanto del equipo embarcado como del procesamiento en la aplicación servidora.
15. La aplicación servidora también mantendrá un histórico de los eventos y las alarmas propias del equipo de inspección de catenaria, ya sea por la notificación automática enviada por el propio equipo como por la entrada manual efectuada por el operador, con el fin de disponer de un registro de la fiabilidad y disponibilidad del equipo.

16. Sin embargo, la aplicación servidora, cuando el equipo embarcado disponga de conectividad inalámbrica, registrará la monitorización de los parámetros y estados básicos de funcionamiento del equipo a efectos de disponer de un registro simple de actividad. La aplicación servidora podrá elaborar reportes simples con la información de estado y de actividad del equipo, para poder valorar la productividad, la fiabilidad y los eventos y fallos del equipo en un período determinado.

4.2.7 Funcionalidades relativas a las mediciones mínimas del sistema:

1. Detección de arcos mediante la cámara termográfica y el análisis de las imágenes de la videocámara.
2. Geometría de la catenaria: monitorización del zigzag y la altura de la catenaria para asegurarse de que se encuentra dentro de los parámetros aceptables. Monitorización de la coordenada Y (zigzag) y la coordenada Z (altura) del hilo conductor respecto a la vía. La posición de referencia del hilo conductor será relativa al centro de la vía para el eje horizontal y relativa al plano de rodaje para el eje vertical. Análisis de las imágenes de la videocámara para detectar desviaciones de la geometría.
3. Comportamiento dinámico: monitorización de la interacción dinámica entre el pantógrafo y la catenaria para identificar irregularidades. Análisis de los datos de los acelerómetros y las imágenes de la videocámara para detectar comportamientos anormales.
4. Impactos anormales en el pantógrafo: detección de choques o impactos en el pantógrafo que puedan ser indicadores de potenciales problemas. Análisis de los datos de los acelerómetros para la identificación de patrones de impacto anormales.
5. Establecimiento de umbrales por cada parámetro por zonas en cada línea (*geofencing*).
6. Mapas de temperatura a lo largo de la línea.
7. Reproducción de la imagen de vídeo a lo largo de la línea
8. Reproducción de la imagen de la cámara termográfica a lo largo de la línea.

5 Instalación de los equipos en los trenes

5.1 Aspectos esenciales

5.2 Instalación de los equipos

5.1.1 Ubicación y conectividad

Las cámaras y los acelerómetros se ubicarán en el techo del coche que utilice un motor MB2 en una ubicación estratégica que les permita realizar su función sin interferir en ningún elemento del tren y minimizando las modificaciones estructurales del tren, priorizando la seguridad y fiabilidad del sistema. El equipo de procesamiento se instalará en un armario interno del coche MB2, compartiendo espacio

con el PC industrial del sistema Digital Train. La conexión entre el sensor y el PC industrial se realizará mediante cable Ethernet.

5.1.2 Alimentación

La alimentación de los sensores se obtendrá del armario PD2 del mismo coche. Para ello, se instalará un térmico adicional y se etiquetará adecuadamente el circuito. A continuación, se conectará el circuito a un convertor de tensión, que reducirá los 72 VDC proporcionados por el tren a una tensión de salida compatible con el rango de alimentación de los sensores de audio. Este convertor se instalará adyacente al sensor de audio.

5.1.3 Cableado

- Tipo de cable: se utilizarán cables que cumplan los estándares ferroviarios más exigentes, como la norma EN45455, garantizando así una alta resistencia al fuego y a otros factores ambientales típicos del entorno ferroviario.
- Separación y apantallamiento: los cableados de alimentación, control y comunicaciones se separarán físicamente y se apantallarán para evitar interferencias electromagnéticas.
- Instalación: los cables se conducirán a través de canalizaciones específicas y se anclarán adecuadamente para evitar movimientos y tensiones que puedan dañarlos.
- Protección: los cables estarán protegidos contra vibraciones y otros factores mecánicos que puedan dañarlos durante el funcionamiento del tren.

5.3 Pruebas y validación

Se realizará un conjunto de pruebas para validar la captura de datos y todas las funcionalidades especificadas en este documento técnico. El proveedor entregará un informe detallado de todas las pruebas realizadas.

6 Documentación específica

1. El adjudicatario deberá entregar la siguiente documentación en las fases que se indican a continuación:
 - Memoria descriptiva de cada uno de los componentes clave de la solución; es decir, del equipo embarcado (con todos sus subsistemas), la aplicación servidora, la aplicación de campo y la API. En cada caso, desde una perspectiva de ingeniería de sistemas y con un planteamiento de arriba abajo (*top-down*), se describirán los principales bloques, explicando las especificaciones funcionales y no funcionales (métricas de resolución, rendimiento, latencia, etc.) y las especificaciones técnicas. También se explicarán las principales interfaces entre los bloques y se describirá su tipología (lógicas, eléctricas, mecánicas) y los principales intercambios de información entre ellas. Se detallará la ubicación de las funcionalidades (*function allocation*) de forma clara. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición

previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]

- Para el equipo embarcado: diagrama de despiece o explosión que describa gráficamente el conjunto de los componentes desde el punto de vista mecánico, muestre el ensamblaje y ajuste de todas las partes, así como los tamaños de los componentes y los mecanismos y características de los elementos de sujeción. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Para el equipo embarcado: diagrama esquemático del conexionado eléctrico de los elementos. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Para el equipo embarcado: estudio mecánico de los soportes y fijaciones que garantice la integridad mecánica del conjunto embarcado, basado en un análisis de los elementos finitos, la fatiga de los materiales, etc. [Se entregará en la fase de proyecto como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Para equipos informáticos embarcados, servidor y dispositivos móviles (aplicación de campo): requisitos de los distintos componentes del *hardware* y el sistema operativo para la ejecución de los respectivos programas. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Para los equipos informáticos y de comunicaciones: informe técnico sobre las medidas, configuraciones y parámetros aplicados en su implementación, en relación con el cumplimiento de los requisitos de ciberseguridad. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Para los equipos informáticos embarcados y el servidor: manuales de instalación y configuración del *software*, etc., de modo que, en caso de tener que reemplazar uno de estos componentes, se puedan restituir y utilizar de nuevo. [Se entregará antes de finalizar la puesta en servicio.]
- Fichas con las características de los materiales y componentes instalados. [Se entregará antes de finalizar la puesta en servicio].
- Descripción de alto nivel de la arquitectura del *software* con identificación de los principales bloques funcionales y una breve explicación de las atribuciones funcionales y las principales interfaces internas (entre bloques/componentes) y externas (sistemas de información externos). También deberá incluir una breve explicación de las tecnologías subyacentes sobre las que se han implementado los distintos componentes. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Descripción de los modelos/algoritmos de detección y diagnóstico —sin entrar en detalles que comprometan la propiedad intelectual—, las entradas de información, las salidas y los tipos de procesamiento aplicados (p. ej. heurístico, estadístico, analítico, aprendizaje automático). En el caso del aprendizaje automático (*machine learning*), se deberá identificar

si es supervisado o no supervisado. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]

- Registro de cambios (*changelog*) en el que se indicará el módulo afectado, el tipo de cambio —categorizado según su alcance (corrección, mejora, nueva funcionalidad, eliminación de prestación, seguridad, etc.)—, una breve descripción, la fecha de implementación y la versión en la que el cambio ha entrado en producción. Este registro también se aplicará sobre los módulos de detección y diagnóstico. [Se irá manteniendo desde la fase de producción y hasta el final de la garantía.]
- Conjuntos de datos (*datasets*) creados específicamente para el proyecto de Metro de Barcelona, ya sean para entrenar a los algoritmos o para validar su rendimiento. [Se entregarán al final de la fase de instalación y pruebas, y se actualizarán si se enriquecen durante la fase de puesta en servicio o garantía].
- Manuales de usuario de todos los equipos y aplicaciones. Aparte de la descripción de las funcionalidades, expondrán los pasos para los diferentes casos de uso de cada contexto (operarios en campo, usuarios en oficina), enfocados a la operación y uso del sistema en su conjunto. Particularmente, incluirán capítulos específicos en los que se detallarán los diferentes algoritmos de detección y los parámetros configurables por parte del usuario. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Manuales de mantenimiento de todos los equipos (tanto preventivo como correctivo), incluyendo una guía para la resolución de los problemas más habituales y de seguimiento de averías. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Manuales para la inspección y calibración de los equipos que incorpore los protocolos de referencia. En caso de que, para la calibración el sistema, sea necesario algún tipo de herramienta o patrón de referencia, el adjudicatario deberá suministrarlos por duplicado. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Plan de Formación y contenidos de formación y pruebas que se utilizarán en las acciones formativas que se llevarán a cabo durante la fase de puesta en servicio. Los contenidos irán dirigidos específicamente a la operación del sistema y al mantenimiento de primeros niveles de los equipos embarcados y del sistema informático. Una de las sesiones de formación se grabará en audio y vídeo para su posterior uso. [Se entregarán durante la fase de puesta en servicio.]
- Manual de la API de intercambio de información que describa los parámetros e incluya ejemplos concretos de cada caso. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Plan de Pruebas que incluya el detalle de los protocolos (SAT, FAT) y un plan de puesta en servicio. Todos ellos deberán consensuarse con FMB. [Se entregarán antes de finalizar la fase de ejecución.]
- Resultados de los protocolos de pruebas FAT. [Se entregarán en la fase de ejecución, previamente al inicio de la fase de instalación y pruebas.]

- Resultados de los protocolos de pruebas SAT. [Se entregarán en la fase de instalación y pruebas, previamente al inicio de la fase de puesta en servicio.]
 - Certificados de garantía y conformidad y del marcado CE. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Calibraciones iniciales y certificaciones de los equipos, si aplican. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
2. La entrega de la documentación en los plazos definidos será una condición indispensable (pero no suficiente) para avanzar formalmente, y a todos los efectos de certificaciones y pagos, a la siguiente fase del proyecto.
 3. Durante todo el plazo del suministro, incluido también el período de garantía, cualquier modificación que se lleve a cabo sobre los equipos y que difiera de lo que recoja la documentación ya entregada, en todo lo relativo al alcance de este contrato (excluyendo posibles mejoras o nuevas funcionalidades futuras), requerirá la actualización de dicha documentación y estará vinculada a la finalización del período de garantía.
 4. Toda la documentación del sistema (manuales de usuario y mantenimiento, documentos descriptivos, etc.) se entregará en catalán, salvo los documentos de especificaciones técnicas, planos, certificaciones y fichas técnicas de los componentes, que podrán ser en catalán o en inglés para ahorrar traducciones juradas de documentos técnicos.

7 Condiciones específicas de entrega

1. De acuerdo con las fases definidas en el apartado “Condiciones generales”, la fase de puesta en servicio, que culmina con la aceptación formal del sistema, no podrá finalizar más tarde de 18 meses después de la adjudicación del contrato. Por lo tanto, deberá haberse superado todas las pruebas (SAT, FAT), sin fallos críticos pendientes de resolver, entregado toda la documentación, realizado la formación y demostrado la realización de detección y diagnóstico (sin exceso de falsas alarmas ni falsos negativos) antes de dicho plazo.
2. En caso de que la aplicación cliente requiera un ordenador *workstation* o más de una pantalla para la visualización por parte de los usuarios, estos equipos se entregarán en Santa Eulàlia al equipo de mantenimiento de catenaria. Las condiciones de entrega o transferencia de la aplicación servidora, en función de si es un equipo distinto del *workstation* o un servidor privado en la nube, se determinarán durante la fase de ejecución, para que esté disponible en la siguiente fase de pruebas.
3. Los componentes se entregarán debidamente embalados e identificados para su almacenamiento y posterior recuperación en el momento de su instalación.
4. En la puesta en servicio deberán suministrarse todos los elementos necesarios para la operación y mantenimiento del equipo:
 - Licencias de uso de todo el *software* y aplicaciones suministradas.
5. El adjudicatario será el responsable de la ejecución de todas las fases del suministro previas al inicio de la garantía. Por consiguiente, deberá aportar los medios humanos y técnicos para la realización de pruebas, instalaciones, ajustes de los algoritmos, formación, puesta en servicio, etc.

6. Durante el período de garantía, el adjudicatario mantendrá sin coste todas las aplicaciones del *software* (servidor, cliente de oficina, cliente de campo, API, algoritmos de detección) y aplicará todas las actualizaciones y correcciones disponibles sin coste alguno. Asimismo, velará por la aplicación de los parches de seguridad que corrijan las vulnerabilidades (CVE o Common Vulnerabilities and Exposures) que puedan afectar a los distintos módulos de *software*.
7. En caso de que la aplicación servidora, incluidos todos los componentes necesarios tanto para el procesamiento centralizado como para las bases de datos, cliente de oficina y API, esté alojada en un servidor en la nube, el adjudicatario deberá administrar y garantizar la disponibilidad del sistema sin coste adicional para FMB durante todo el período de garantía.

8 Condiciones específicas de la garantía

1. La garantía tendrá una duración de 3 años y se iniciará en la fecha en que se formalice la aceptación del sistema, con la que se da por concluida la fase de puesta en servicio. Durante la garantía el adjudicatario llevará a cabo las acciones básicas de mantenimiento preventivo de los equipos y actualizaciones básicas del *software* sin repercutir ningún coste adicional ni suscripciones a Metro de Barcelona. Estas acciones básicas incluirán las acciones técnicas que requieran la intervención de personal especializado, tanto sobre los equipos de medición como sobre el *software* (ajustes de algoritmos, aplicación cliente, aplicación servidora). Quedarán excluidas las actividades correctivas que se deriven de mal uso del equipo o de accidentes fortuitos que puedan dañar alguno de sus componentes.
2. Quedarán fuera del alcance del suministro todas las actuaciones correctivas que estén inducidas por un mal uso del sistema o por daños fortuitos ocasionados sobre los equipos por elementos ajenos al propio sistema suministrado por el adjudicatario.

ANEXO: SENSORES PARA EL SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DEL CARRIL

1 Objeto

El objeto de este pliego es el suministro de un conjunto de sensores acelerómetros y de unidades centrales de registro para la medición de las aceleraciones verticales, laterales y longitudinales experimentadas por el material rodante en la prestación del servicio comercial con pasajeros.

Se deberán suministrar para cada unidad de tren:

- Una (1) unidad para el registro y envío de los datos a la nube. Deberá incluir también el soporte correspondiente (plancha metálica) para su sujeción al bogie/coche.
- Cuatro (4) sensores acelerómetros, de los que 18 se destinarán a medir las aceleraciones verticales, longitudinales y transversales en los 3 trenes que se equiparán con las 3 unidades de registro incluidas en este contrato. 12 sensores se destinarán a la medición de las aceleraciones laterales y longitudinales de los equipos ya en servicio en Ferrocarril Metropolità de Barcelona, complementando las mediciones que actualmente ya realizan de aceleraciones verticales. Las 2 unidades restantes se destinarán a repuestos por averías de los sensores de medición de aceleraciones laterales y longitudinales.
- Los sensores deberán suministrarse con los cables de conexión con la longitud adecuada a su instalación. También deberán suministrarse las fijaciones necesarias para sujetarlos aprovechando los tornillos de la tapa de grasa de los ejes que se instrumenten y, en el caso de los sensores para la medición de las aceleraciones laterales, una fijación adicional para — opcionalmente— trasladarlos desde la caja de grasa a una ubicación en el bogie.

2 Contexto

En un sistema de transporte ferroviario metropolitano, la interfaz definida por el contacto rueda–carril es determinante en múltiples aspectos del servicio, empezando por la seguridad en la circulación de los convoyes, que afecta a los parámetros clave de capacidad y rendimiento del propio sistema, así como al confort de los propios viajeros y, no menos importante, a los vecinos cercanos al trazado del metro debido a las vibraciones transmitidas por la circulación a las viviendas de la superficie.

Asumiendo unas condiciones adecuadas de la banda de rodadura de las ruedas (dentro de las tolerancias normativas), la instalación de sensores acelerómetros en la caja de grasa en uno de los ejes del bogie de un tren de servicio posibilita, mediante el análisis de las aceleraciones perpendiculares al plano de vías, la detección de irregularidades y patologías en la cabeza del carril (funciones de auscultación). Sin embargo, gracias a la medición de las aceleraciones laterales, permite analizar la dinámica del movimiento del tren, en particular, el movimiento de lazo, el paso por curva, etc. Todos estos datos son valiosos para el establecimiento de modelos y algoritmos que contribuyen a mejorar la gestión del mantenimiento de vía y tren llevada a cabo por el operador. Análogamente, la medición instantánea de las aceleraciones longitudinales en el sentido de la marcha del tren permite caracterizar la incidencia de otras patologías, como el desgaste ondulatorio.

En este sentido, en 2019, Ferrocarril Metropolità de Barcelona S.A. empezó a equipar los trenes de su flota comercial con un sistema de auscultación embarcado que registra las aceleraciones perpendiculares al plano de vías mediante cuatro sensores acelerómetros SKF CMSS 2200R-10

distribuidos a ambos lados de un mismo eje. Las mediciones son captadas por una unidad Mutilog IMx-Rail que, tras su procesamiento, transmite los datos a la plataforma de digitalización de activos de DAVANA. Sobre esta plataforma se han desarrollado un conjunto de modelos de datos que, a partir de las mediciones captadas por los sensores, contribuyen a la toma de decisiones del personal de mantenimiento de vías y material móvil.

Es imprescindible que los datos sean compatibles con el sistema ya existente para evitar tener que desarrollar de nuevo de las interfaces de integración existentes y funcionales con la plataforma de digitalización de activos DAVANA.

3 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas

3.1 Unidad central registradora de datos (datalogger)

- Equipo diseñado para el montaje en bogies ferroviarios para la digitalización de señales captadas por sensores analógicos, tales como acelerómetros, termómetros, micrófonos, giróscopos, etc. De esta forma, el equipo permite monitorizar cualquier componente del bogie, como cajas de grasa, motores de tracción, cajas reductoras, etc.
- Debe disponer de 16 entradas analógicas, con ± 25 V de margen dinámico. Impedancia > 100 k Ω (kiloohmios). El DAC (convertor digital-analógico) debe poder reproducir cada canal por lo menos a 100 kHz, con una resolución de 24 bits. Con 120 dB de margen dinámico; es decir, admitiendo 24 dB de ruido interno sobre los 144 dB teóricos resultantes de los 24 bits.
- Las entradas analógicas deben poder suministrar alimentación para los sensores mediante valores tipificados de corriente constante (4 mA, 2,23 mA). Esta alimentación debe poder habilitarse de forma individual para cada entrada analógica. Se utiliza en particular para sensores de corriente constante, tales como acelerómetros que utilizan piezoeléctricos (con transistor FET o similar). Estas fuentes de corriente deben disponer de protección contra cortocircuitos.
- En caso de estar configurado en modo de lazo de corriente (con las fuentes de corriente por canal habilitadas) el sistema debe detectar el defecto del sensor o del cable.
- En caso de conexión de sensores de bucle de corriente entre 4 mA y 20 mA y, por tanto, sin la alimentación de corriente interna habilitada, se podrán añadir resistencias de conversión a tensión.
- Debe permitir la conexión de sensores de temperatura analógicos PT1000 en configuración de 2 hilos.
- El equipo debe disponer de 4 entradas digitales, hasta 24 V. Debe permitir la conexión de sensores con pulsos en niveles de tensión desde TTL hasta 24 VDC (habitual en sensores digitales tipo PNP).
- También debe permitir conectar sensores digitales de dos y tres hilos, en particular, de tacómetros ferroviarios.

- Debe poder suministrar alimentación a 24 VDC hasta 30 mA para la alimentación de los sensores digitales, en este caso por un cable separado. Esta fuente de alimentación debe disponer de protección contra cortocircuitos.
- El equipo debe disponer de un puerto de comunicaciones 485, compatible con el firmware, para poder conectar otros dispositivos. Debe disponer de un puerto de alimentación para los sensores 485 conectados.
- El equipo debe disponer de tres salidas digitales de 24 VDC, ya sean de relé o de colector/drenador abierto.
- El equipo debe disponer de conectividad mediante el router FW/VPN/4G/WIFI descrito en el apartado 3.5 ("Trenes") para el envío de datos a una nube intermedia en la que los usuarios accedan a los datos mediante una API preestablecida.
- El equipo debe permitir la incorporación de interfaces de red wifi y Ethernet. En estos casos el equipo debe implementar el protocolo Modbus TCP.
- Cualquiera de las interfaces de comunicaciones (telefonía móvil, Ethernet o wifi) debe ser compatible con los protocolos DNS y NTP (sincronización horaria).
- El equipo debe permitir comunicaciones Bluetooth para la monitorización y parametrización del propio equipo.
- El equipo debe disponer de los certificados CE para las normas de compatibilidad electromagnética EN61000-6-4 y EN61000-6-2 y cumplir con el estándar de diseño EN55000 para aplicaciones ferroviarias.
- Suministro del soporte (placa metálica o similar) y atornillado necesario para la fijación de cada unidad al bogie o debajo de la caja del tren.

3.2 Sensores acelerómetros para medir las aceleraciones perpendiculares, transversales y longitudinales.

- Se suministrarán e instalarán cuatro sensores para la medición de las aceleraciones perpendiculares al plano de vías (verticales) medidas en cada uno de los dos lados del eje instrumentado. Los sensores deben instalarse en la inmediata proximidad de la caja de grasa, para evitar los filtros de las suspensiones y caracterizar de forma fiel las aceleraciones verticales ocasionadas en el contacto rueda-carril. Estas aceleraciones permiten caracterizar patologías como la corrugación, alteraciones en la vía, golpes (en el paso por bridas), etc. Se instalarán dos sensores en cada lado, a modo de redundancia.
- Los sensores verticales deben poder alimentarse directamente desde la propia unidad de central registradora (por ejemplo, a través de las fuentes de corriente), minimizando así el cableado necesario.
- Los sensores deben tener la sensibilidad adecuada para la posición 10 mV/g. Deberán tener un ancho de banda mínimo de 5 kHz.



- Se suministrarán e instalarán dos acelerómetros para la medición de las aceleraciones laterales. Uno de ellos se ubicará en el centro del bogie y el otro en el extremo del marco del bogie.
- Estos sensores deben poder alimentarse directamente desde la propia unidad de central registradora (por ejemplo, a través de las fuentes de corriente), minimizando así el cableado necesario.
- Los sensores deben tener la sensibilidad adecuada para la posición 100 mV/g, diferente del caso del anterior, dado que el margen dinámico se ve reducido debido a los efectos de las suspensiones y la casuística del movimiento lateral.
- Se suministrará e instalará un sensor giroscopio de un eje para la medición de la rotación sobre el eje perpendicular al plano de vías; es decir, para la medición instantánea del giro e, indirectamente, para la medición de la curvatura. El sensor debe tener un rango máximo de $\pm 100^\circ/\text{s}$ y mantener un buen nivel de sensibilidad.
- El sensor se instalará en la parte central del cuerpo del vagón.
- Se suministrarán e instalarán tres sensores acelerómetros para medir las aceleraciones verticales, laterales y longitudinales registradas en el centro del coche para estimar las condiciones de confort de los pasajeros.
- Los sensores verticales deben poder alimentarse directamente desde la propia unidad de central registradora (por ejemplo, a través de las fuentes de corriente), minimizando así el cableado necesario.
- Los sensores deben tener una sensibilidad de 100 mV/g, adecuada para su posición.

3.3 Licencia para acceder a los datos registrados por los sensores

- El contrato debe integrar la licencia y los servicios de comunicación para acceder a los datos de los sensores suministrados.

4 Otros servicios y suministros específicos contemplados en el alcance del contrato

4.1 Documentación técnica y certificaciones

Forma parte del alcance del contrato la entrega de la documentación que se describe a continuación. Se entregará un conjunto completo de documentación técnica, que incluirá:

- Manuales de usuario e instalación: documentos detallados que describen el funcionamiento de cada equipo y los procedimientos de instalación, configuración y mantenimiento.
- Planos de instalación: dibujos técnicos a escala que muestran la ubicación exacta de cada componente y las conexiones eléctricas y mecánicas.
- Listados de materiales: especificaciones detalladas de todos los materiales utilizados en la fabricación de equipos y sistemas de sujeción.
- Planos de detalle, especificaciones técnicas de todos los componentes mecánicos, las bases y las fijaciones de los dispositivos en el tren. Estudio mecánico del conjunto ensamblado en la base que quedará instalada en el techo del tren.
- Certificados de conformidad: documentación que acredite que los equipos cumplen con las normas y los estándares de calidad y seguridad aplicables al sector ferroviario.
- Certificados de compatibilidad electromagnética (EMC): documentos que garantizan que los equipos no generan interferencias electromagnéticas que puedan afectar a otros sistemas del tren.
- Certificados de vibraciones y choques: documentos que demuestran que los equipos pueden soportar las vibraciones y los choques típicos del servicio ferroviario.
- Se entregarán las licencias y los números de serie de todos los programas que requiera el sistema para prestar las funciones mencionadas, tanto para los equipos embarcados como para las aplicaciones informáticas.

4.2 Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro Barcelona

En caso de que para la aplicación de Metro de Barcelona se hayan creado nuevos conjuntos de datos o *datasets* (etiquetados o no) —ya sea para el entrenamiento, la validación o el testeo del sistema—, queda también dentro del alcance del contrato su entrega a Metro de Barcelona.

4.3 Sesiones de formación

El alcance del contrato incluye la impartición de formación para la operación del sistema y la realización del mantenimiento de primer nivel, en caso de que estos equipos no se correspondan con los utilizados por FMB en otros trenes auscultadores en servicio. Los puntos enumerados a continuación se completan en el capítulo de “Formación” presente en este mismo documento.

4. El adjudicatario también deberá preparar el Plan de Formación para los usuarios del sistema, que deberá contener todos los aspectos necesarios para la operación y parametrización del sistema, así como las acciones de mantenimiento de primer nivel (*troubleshooting*).

5. El Plan de Formación contendrá la planificación de las sesiones necesarias y los materiales y contenidos de la formación.

5 Condiciones específicas de la garantía

3. La garantía tendrá una duración de 3 años y se iniciará en la fecha en que se formalice la aceptación del sistema, con la que se da por concluida la fase de puesta en servicio. Durante la garantía el adjudicatario llevará a cabo las acciones básicas de mantenimiento preventivo de los equipos y actualizaciones básicas del *software* sin repercutir ningún coste adicional ni suscripciones a Metro de Barcelona. Estas acciones básicas incluirán las acciones técnicas que requieran la intervención de personal especializado, tanto sobre los equipos de medición como sobre el *software* (ajustes de algoritmos, aplicación cliente, aplicación servidora). Quedarán excluidas las actividades correctivas que se deriven de mal uso del equipo o de accidentes fortuitos que puedan dañar alguno de sus componentes.
4. Quedarán fuera del alcance del suministro todas las actuaciones correctivas que estén inducidas por un mal uso del sistema o por daños fortuitos ocasionados sobre los equipos por elementos ajenos al propio sistema suministrado por el adjudicatario.

ANEXO: SISTEMA DE MEDICIÓN DE GÁLIBO DE TÚNEL

1 Objeto

Este pliego tiene por objeto el suministro, instalación y puesta en servicio de un sistema embarcado de medición de gálibo de túnel que deberá instalarse en uno de los trenes de la red de Ferrocarril Metropolità de Barcelona. El sistema, mediante tecnología LIDAR y un escaneo de 360°, generará un mapa digital detallado del túnel, que permitirá detectar con precisión y en tiempo real cualquier desviación respecto al gálibo preestablecido en cada punto kilométrico o la presencia de obstáculos con el desplazamiento del tren en servicio a la velocidad comercial. Asimismo, integrará una cámara térmica que permitirá detectar valores anómalos de temperatura en la sección del túnel. Ambos sistemas se complementarán con una videocámara que ofrecerá imágenes del contexto del túnel sobre los defectos detectados por la tecnología LIDAR o la cámara térmica.

En caso de detección de alarma por gálibo fuera de los umbrales de referencia o por temperatura del túnel anómala, el sistema generará automáticamente un informe de alarma con la descripción del defecto detectado, complementado con las imágenes del contexto del túnel de la zona afectada, lo cual facilitará y agilizará la evaluación que deberá realizar el operador para activar, si procede, los procedimientos establecidos para prevenir una invasión de gálibo y evitar posibles daños derivados en el propio tren y en la infraestructura. Los mapas de puntos y de los gradientes térmicos que se generen también se podrán consultar en la consola de operación del sistema, de acuerdo con los requisitos de persistencia que se definan.

El sistema embarcado se complementará con una solución informática (servidor) que centralizará todos los datos y alarmas registrados, y permitirá a los usuarios visualizarlos y analizarlos en detalle mediante un conjunto de clientes (preferentemente web). Asimismo, permitirá a los usuarios parametrizar el comportamiento del sistema (por ej., ajuste de alarmas), descargar datos, etc. Los datos y alarmas podrán ser accesibles mediante una API (interfaz de programación de aplicaciones) u otros mecanismos de integración de datos.

El objetivo del sistema es la detección precoz de los puntos kilométricos donde el gálibo existente se encuentre por debajo de unos determinados umbrales para evitar posibles interferencias con el paso de trenes. El equipo también mide puntos fríos y calientes de la infraestructura para la identificación de filtraciones de agua en la bóveda superior del túnel (así como en hastiales y en vía), anticipando potenciales causantes de futuros problemas de gálibo en el túnel.

2 Propósito

La supervisión del gálibo existente entre la envolvente dinámica de los trenes y la infraestructura ferroviaria es esencial para garantizar la seguridad del tráfico ferroviario. El desplazamiento de objetos e instalaciones normalmente presentes en el túnel fuera de su posición nominal puede conllevar una invasión del gálibo que resulte en daños significativos en los trenes y en la propia infraestructura, llegando a poner en riesgo la seguridad de los pasajeros.

En este sentido, los casos más habituales en el conjunto de la red de Ferrocarril Metropolità de Barcelona son el descolgado de los cables y de otras instalaciones que concurren longitudinalmente en los laterales del túnel, soportadas por bandejas y con los respectivos elementos de fijación. También pueden ser

frecuentes el desplazamiento de señales y otros elementos de soporte a la explotación, tales como señales luminosas con la posición de agujas, o, en casos menos frecuentes y en líneas automáticas, el desplazamiento de placas que circunstancialmente puedan delimitar la velocidad u otras condiciones específicas. Entre estos causantes genéricos cabe considerar también el descolgado de la catenaria por la potencial invasión del gálibo.

Para poder responder operativamente, así como desde el ámbito del mantenimiento, ante toda esta casuística diversa de situaciones de invasión más o menos críticas del gálibo, se requiere un sistema automatizado (LIDAR) que mida continuamente la distancia entre el tren y el perímetro inmediato que lo rodea para detectar aquellos puntos que se encuentren a una distancia inferior al umbral definido por la envolvente dinámica del tren y, por tanto, supongan un cierto riesgo de interferencia con la circulación de trenes.

Más allá de la función reactiva expuesta —la medición continuada de la distancia del perímetro que rodea el tren— y la capacidad de determinar con precisión suficiente la posición absoluta del tren y, por tanto, garantizar la repetibilidad de las mediciones dentro de unos límites razonables de tolerancia, el sistema permitirá detectar los cambios entre la medición instantánea de distancia y un perfil de referencia, al compartir una misma referencia de posición. Así, preventivamente, posibilitará la detección de cambios de elementos en el túnel que pudieran derivarse en una futura invasión del gálibo. Por este motivo, también es imprescindible que el sistema cuente con videocámaras que registren continuamente el estado del túnel, ofreciendo una información de contexto muy valiosa tanto para las alertas de invasión de gálibo como para las notificaciones de cambios en zonas del túnel respecto al perfil de referencia.

Finalmente, también con un enfoque preventivo para anticiparse a problemas futuros de invasión de gálibo, dado que uno de los precursores más comunes del descolgado de instalaciones es la degradación de las fijaciones que las sujetan a causa del efecto corrosivo de las filtraciones de agua —que encuentran en los orificios de los tornillos un paso más conveniente—, se requiere que el sistema incorpore una cámara termográfica que, mediante la medición continua de la temperatura del perímetro de la infraestructura, pueda detectar los puntos calientes y fríos (estos últimos a menudo indicativos de una filtración de agua). De esta forma, pueden anticiparse acciones correctivas sobre los potenciales precursores de degradaciones futuras sobre las fijaciones y, por tanto, prevenir uno de los casos comunes de descolgado de instalaciones.

El sistema de monitorización propuesto permitirá complementar las acciones de mantenimiento actual —objetivándolas e incrementando su frecuencia de inspección—, lo que se traducirá en una mejora de la eficacia y eficiencia del mantenimiento, una reducción del riesgo de incidentes y, finalmente, un incremento de la disponibilidad de la infraestructura e instalaciones de túnel para la prestación del servicio, reduciendo los tiempos de inactividad inducidos por estos incidentes.

3 Alcance

El alcance de esta licitación incluye el suministro, instalación y puesta en servicio de los equipos que se enumeran a continuación y de las actividades expuestas:

3.1 Suministro de los equipos embarcados

1. Subsistema mecánico. Conjunto de base metálica, fijaciones y elementos de soporte que anclarán mecánicamente el resto de los subsistemas embarcados en la base del techo de la parte frontal del testero, proporcionando la sujeción y rigidez suficientes para garantizar su integridad en las condiciones de operación del material rodante, asegurando que no se desprendan y caigan a la vía. El conjunto deberá estar dentro de los límites del gálibo estático del tren.
2. Subsistema de localización. Este subsistema estimará la posición absoluta del tren con la precisión suficiente para el cumplimiento de las especificaciones técnicas y requisitos funcionales del pliego, de modo que puedan detectarse y localizarse con repetibilidad los mismos defectos de gálibo y temperatura en inspecciones consecutivas. Ello permitirá, por un lado, que el sistema no repita un mismo defecto una vez notificado (o, en todo caso, en función de los parámetros de notificación sobre alertas preexistentes), evitando así un exceso de eventos repetidos que requieran la atención improductiva del usuario receptor de las notificaciones o en la propia aplicación cliente de gestión. Por otra parte, también permitirá implementar, con suficiente solvencia, el requisito funcional de alertar sobre los cambios que puedan haberse detectado en cuanto a las distancias o temperaturas respecto a un perfil de referencia, advirtiendo de posibles alteraciones (aunque no todas sean críticas en relación con el gálibo), filtraciones o puntos calientes, etc., que merezcan la atención del personal de mantenimiento para preparar las acciones de mantenimiento correctivo o preventivo que procedan. A pesar de que no se limitan las opciones tecnológicas para llevarlo a cabo (*software*, *hardware*, etc.), hay que tener presente que no podrán basarse en tecnología GPS, por la condición subterránea del grueso de las líneas de la red de Ferrocarril Metropolità de Barcelona.
3. Subsistema de medición de distancias (LIDAR). Sistema optoelectrónico que efectuará la medición, de forma rotativa o simultánea, de las distancias en todo el perímetro de 360º desde su posición relativa al tren hasta todos los elementos que lo rodeen, ya sea la propia infraestructura, los elementos de las instalaciones, la catenaria, la vía, etc. Cuando las distancias estén por debajo del límite del gálibo dinámico del tren, se generará una notificación alertando del defecto, acompañada de imágenes del contexto del túnel. Se ubicará en el límite frontal de la parte central de la base para que el perfil del material rodante no obstaculice las mediciones. Podrá quedar en una posición ligeramente oblicua, que deberá corregirse en el procesamiento de las muestras.
4. Subsistema de cámara termográfica. Cámara termográfica que registrará de forma continua la temperatura sobre los distintos píxeles que conformen el campo de visión frontal correspondiente al plano perpendicular en la dirección (en cualquiera de los dos sentidos) de la marcha del tren. El campo de visión encuadrará la parte superior y los laterales (hastiales) del túnel y, en la parte inferior, la vía. En función de diferentes secciones del túnel, delimitadas por puntos kilométricos (por ejemplo, en el viaducto, en los pasos por estación, etc.) en los que pueda haber variaciones significativas de las temperaturas registradas por la cámara, se podrán definir umbrales específicos de temperatura sobre un conjunto de superficies poligonales simples donde se determinen los valores de temperatura mínima y máxima. Cuando las medidas excedan de dichos umbrales, se generará una notificación alertando del defecto, acompañada de una breve secuencia de vídeo con el contexto de la zona, así como de la secuencia de vídeo térmica.
5. Subsistema de videocámara. Cámara que grabará de forma continua una secuencia de vídeo sobre el campo de visión frontal correspondiente al plano perpendicular en la dirección (en cualquiera de los dos sentidos) de la marcha del tren. El campo de visión encuadrará la parte superior y los laterales

(hastiales) del túnel y, en la parte inferior, la vía. Deberá ser razonablemente consistente con el campo de visión del subsistema de la cámara térmica y con la nube de puntos del LIDAR (si bien, en este caso, con posprocesamiento adicional por la oblicuidad), dado que la función principal de la cámara es proporcionar secuencias de vídeo o imágenes con el contexto de la zona del punto en el que los otros dos sistemas detecten los defectos. En función de la parametrización y configuración de la persistencia, las secuencias de vídeo podrán consultarse para servir de apoyo en otros casos de uso, a modo de “Google Street View” para el túnel. La cámara deberá disponer de un sistema de iluminación que permita capturar las imágenes con un nivel de resolución y nitidez razonables para el caso de uso previsto.

6. Módulo de comunicaciones embarcado. Subsistema que permite reportar en pseudo-tiempo real al servidor de la aplicación centralizada las alertas correspondientes a las incidencias detectadas por los equipos embarcados. También permitirá transmitir las secuencias de imágenes necesarias (así como la totalidad de la inspección) para que pueda realizarse un análisis más profundo en la aplicación centralizada.
7. Subsistema de procesamiento embarcado. Unidad embarcada que realiza las funciones de detección de los defectos de gálibo y de temperatura en pseudo-tiempo real. Esta unidad gestionará los demás periféricos que puedan existir, como, por ejemplo: la corrección inercial y la sincronización temporal de los eventos resultantes del procesamiento del LIDAR o del procesamiento de la cámara térmica con la videocámara.

3.2 Suministro de aplicación servidora y aplicaciones cliente

1. Aplicación servidora. La aplicación servidora (con servidor propio o en la nube), servirá al caso de uso de los técnicos de mantenimiento de infraestructura para la gestión del ciclo de vida de las alertas detectadas correspondientes a los defectos de gálibo y de temperatura de la infraestructura. Facilitará la evaluación y análisis de los defectos mostrando sus características, acompañadas de secuencias de vídeo o imágenes del contexto del defecto. Realizará las funciones afines a las de un SCADA (sistema de supervisión, control y adquisición de datos) manteniendo el histórico de todos los defectos detectados, complementados con el *feedback* resultante de la evaluación del usuario sobre la exactitud de la detección (verdaderos positivos y falsos positivos) y con textos explicativos del defecto y las posibles medidas aplicadas. También permitirá gestionar los niveles de activación/silenciamiento de las alertas, guardar perfiles de configuración y ajustes de las alertas, etc. La aplicación cliente se adecuará a las interfaces de usuario que mejor faciliten la evaluación de toda la información mediante múltiples pantallas, en su caso. Todas estas interfaces estarán dentro del alcance del suministro.
2. La aplicación servidora, ya sea en la nube o en un PC físico, incluirá todas las licencias del *software* complementario que requiera (p. ej., sistema operativo, bases de datos, *software* de soporte específico, etc.), debidamente dimensionadas para los volúmenes de datos y la actividad nominal del sistema.
3. En caso de que la aplicación servidora no pueda ejecutarse en un servidor en la nube, el suministro incluirá un PC con todo el *hardware* necesario y el *software* instalado y configurado, así como las pantallas necesarias para la correcta operación y gestión del sistema central. En caso de que el sistema pueda instalarse en la nube, mientras la aplicación no se instale en los servidores en la nube

de FMB, el alcance del contrato incluye el mantenimiento, la gestión y el servicio IaaS o PaaS que requiera la aplicación servidora durante un plazo máximo de 3 años, coincidiendo con el período de garantía. En este último caso, cuando deba realizarse la portabilidad a los servidores de FMB, el alcance del contrato de suministro incluirá la instalación de todo el *software* y la transferencia de datos en dichos servidores.

4. Aplicación cliente. En los casos en que las aplicaciones cliente no puedan ser aplicaciones web, o cuando la versión web presente carencias de usabilidad (p. ej., por visualización de datos, por el hecho de requerir más de una pantalla, etc.) el alcance el suministro incluirá dos PC totalmente equipados con el *software* y las pantallas necesarias para su uso.
5. API de acceso de datos. El sistema dispondrá de una API que permita acceder a los estados de las incidencias detectadas a la vez que forzar una nueva notificación (mediante un *webhook* o un mecanismo similar) a un servicio web de tipo REST con método POST ante cualquier nueva detección. La API también permitirá acceder a los datos persistidos en el equipo embarcado, ya sea el continuo de gálibos medidos, la nube de puntos, las imágenes termográficas u otros datos en crudo.

3.3 Instalación y puesta en marcha de todo el sistema

1. El alcance del contrato incluye la instalación de los equipos a bordo de los trenes designados, garantizando una integración segura y eficiente con los sistemas existentes. También se extenderán los cableados entre equipos para las canalizaciones oportunas. La instalación también contemplará todo el *software*, tanto para servidores en la nube como para PC físicos. De igual modo, se incluirá el *software* necesario para las aplicaciones cliente y los equipos que estas puedan requerir.
2. Forma parte del alcance del contrato la configuración y calibración de cada equipo, con las pruebas necesarias para verificar su correcto funcionamiento y el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos. Una vez superadas todas las pruebas, los equipos estarán listos para su operación habitual. Esta puesta en marcha cubrirá la configuración y parametrización de la aplicación servidora y el ajuste y configuración de las aplicaciones cliente, tal y como se detalla en el siguiente capítulo (“Fases del proyecto”).
3. En el inicio de la fase de puesta en servicio y hasta que se cumplan los requisitos que evidencien la fiabilidad y estabilidad del sistema, culminando con la aceptación formal del sistema, el adjudicatario deberá establecer un servicio de soporte a la operación del sistema conforme a los niveles de servicio (SLA o Service Level Agreements).
4. También queda fuera del alcance del contrato la configuración de los equipos intermedios de la red de FMB necesarios para el funcionamiento de la aplicación servidora, así como para los equipos cliente, tanto si son equipos físicos como en la nube.

3.4 Mantenimiento preventivo y actualizaciones de *software* durante la garantía

1. Durante el período de garantía, establecido en 36 meses a partir de la aceptación formal, y con el fin de preservar la funcionalidad del sistema, el alcance de la licitación incluirá las acciones básicas de mantenimiento preventivo de los equipos y las actualizaciones básicas del *software* por parte del adjudicatario sin repercutir ningún coste adicional ni suscripciones a Metro de Barcelona. Estas acciones y actualizaciones incluirán la realización de las acciones técnicas que requieran la

intervención de personal especializado, tanto sobre los equipos de medición como sobre el conjunto del *software* (ajustes de algoritmos, aplicación cliente y aplicación servidora).

2. Quedarán fuera del alcance del suministro todas las actuaciones correctivas que estén inducidas por un mal uso del sistema o por daños fortuitos ocasionados sobre los equipos por elementos ajenos al propio sistema suministrado por el adjudicatario.

3.5 Otras actividades y servicios específicos contemplados en el alcance del contrato

3.5.1 Documentación técnica y certificaciones

El alcance de la licitación incluye la entrega de la documentación que se describe a continuación. Se entregará un conjunto completo de documentación técnica que incluirá lo siguiente:

- Manuales de usuario e instalación: documentos detallados que describen el funcionamiento de cada equipo y los procedimientos de instalación, configuración y mantenimiento.
- Planos de instalación: dibujos técnicos a escala que muestran la ubicación exacta de cada componente y las conexiones eléctricas y mecánicas.
- Listados de materiales: especificaciones detalladas de todos los materiales utilizados en la fabricación de equipos y sistemas de sujeción.
- Planos de detalle, especificaciones técnicas de todos los componentes mecánicos, las bases y las fijaciones de los dispositivos en el tren. Estudios mecánicos del conjunto ensamblado en la base que quedará instalada en el techo del tren.
- Certificados de conformidad: documentación que acredite que los equipos cumplen con las normas y los estándares de calidad y seguridad aplicables al sector ferroviario.
- Certificados de compatibilidad electromagnética (EMC): documentos que garantizan que los equipos no generan interferencias electromagnéticas que puedan afectar a otros sistemas del tren.
- Certificados de vibraciones y choques: documentos que demuestran que los equipos pueden soportar las vibraciones y los choques típicos del servicio ferroviario.

Esta documentación es imprescindible para que el fabricante del tren autorice la instalación de los equipos y confirme que no afectarán al funcionamiento de los sistemas originales del tren.

1. Se entregará también una documentación técnica del *software* que contendrá lo siguiente:
 - Descripción de alto nivel de la arquitectura del *software* con identificación de los principales bloques funcionales y una breve explicación de las atribuciones funcionales y las principales interfaces internas (entre bloques/componentes) y externas (sistemas de información externos). También deberá incluir una breve explicación de las tecnologías subyacentes sobre las que se han implementado los distintos componentes.
 - En relación con los algoritmos y modelos de datos que efectivamente realicen las funciones de detección y diagnóstico de anomalías, el adjudicatario deberá describir, sin entrar en ningún detalle que comprometa la propiedad intelectual, qué entradas de información se requieren (tipo de dato, muestreo, etc.), cuáles son sus salidas y qué tipo de procesamiento se aplica, definido a muy alto nivel (p. ej., heurístico, estadístico, analítico, aprendizaje automático). En cuanto al aprendizaje automático o *machine learning*, el adjudicatario deberá especificar si es

supervisado o no supervisado e indicar si, en el caso del Metro de Barcelona, ha sido necesario crear nuevos conjuntos de datos para el entrenamiento o validación de los modelos. El conocimiento básico y de alto nivel de esta información permite a Metro de Barcelona valorar el impacto sobre el sistema de cambios futuros en la infraestructura.

- El adjudicatario mantendrá un registro de cambios (*changelog*) en el que se indicará el módulo afectado, el tipo de cambio —categorizado según su alcance (corrección, mejora, nueva funcionalidad, eliminación de prestación, seguridad, etc.)—, una breve descripción, la fecha de implementación y la versión en la que el cambio ha entrado en producción. Este registro también se aplicará sobre los módulos de detección y diagnóstico.
2. Se entregarán las licencias y los números de serie siguientes:
- Se entregarán las licencias y los números de serie de todos los programas que requiera el sistema para prestar las funciones mencionadas, tanto para los equipos embarcados como para las aplicaciones informáticas.

3.5.2 Conjuntos de datos específicos para el caso de uso de Metro de Barcelona

En caso de que para la aplicación de Metro de Barcelona se hayan creado nuevos conjuntos de datos o *datasets* (etiquetados o no) —ya sea para el entrenamiento, la validación o el testado del sistema—, queda también dentro del alcance del contrato su entrega a Metro de Barcelona.

3.5.3 Sesiones de formación

El alcance del contrato incluye la impartición de formación para la operación del sistema y la realización del mantenimiento de primer nivel, en caso de que estos equipos no se correspondan con los utilizados por FMB en otros trenes auscultadores en servicio. Se contemplan los puntos enumerados a continuación:

1. El adjudicatario también deberá preparar el Plan de Formación para los usuarios del sistema, que deberá contener todos los aspectos necesarios para la operación y parametrización del sistema, así como las acciones de mantenimiento de primer nivel (*troubleshooting*).
2. El Plan de Formación contendrá la planificación de las sesiones necesarias y los materiales y contenidos de la formación.
3. El Plan de Formación deberá impartirse en seis ocasiones, dos por cada turno de servicio (mañana, tarde y noche), a las que asistirán el personal de los departamentos de Mantenimiento de Vía, Material Rodante y Energía. El proveedor grabará en vídeo (y audio) las sesiones definidas en el Plan de Formación, para su posterior consulta o reproducción.

4 Condiciones específicas del suministro

4.1 Requisitos transversales

1. El presente documento describe a nivel funcional la totalidad del sistema de monitorización del gálibo que se solicita, siendo el licitador quien deba proponer la mejor implementación técnica que se ajuste a los requisitos funcionales mencionados anteriormente. Sin embargo, en aquellos puntos

en que se ha considerado necesario, se describen las especificaciones técnicas concretas que deberán implementarse.

2. Es obligatorio el cumplimiento de todos los puntos de este documento, por lo que se desestimarán las propuestas que no los cumplan estrictamente.
3. El conjunto de aspectos del suministro debe satisfacerse como un proyecto llaves en mano; es decir, incluyendo el suministro, la instalación y la puesta en servicio, conforme a las condiciones específicas de Metro Barcelona.
4. El sistema debe estar diseñado para poder prestar servicio durante un período mínimo de 15 años.
5. El sistema deberá disponer de autodiagnóstico para detectar el mal funcionamiento de sus componentes clave (subsistemas embarcados o aplicación servidora) y generar las alertas necesarias, con una determinación clara del nivel de operatividad total o parcial.
6. La fabricación de todos los componentes del sistema embarcados en el tren deberá llevarse a cabo cumpliendo las normativas de calidad, medio ambiente y seguridad más exigentes.
7. De forma general, cada uno de los subsistemas deberá ajustarse al estado de la cuestión y a las normativas actuales, con el objetivo de conseguir un rendimiento del trabajo, una fiabilidad y una disponibilidad óptimos. Deberá ser asimilable a otros sistemas existentes en el mercado con resultados probados en otras administraciones, alejándose de prototipos o soluciones *ex profeso*.
8. La seguridad, tanto para el personal de mantenimiento y operación como para el entorno, deberá ser una prioridad. Para ello, el conjunto del sistema deberá estar diseñado para alcanzar los máximos niveles de seguridad y cumplir con los estándares y normas más exigentes.
9. El coste de mantenimiento deberá ser lo más bajo posible. Por este motivo, el sistema deberá haber sido concebido e implementado para que no sean imprescindibles calibraciones u otras acciones de ajuste o mantenimiento complejas que requieran personal de mantenimiento especializado con una frecuencia superior a los 6 meses, suponiendo un uso diario y continuado del sistema.
10. La sostenibilidad ambiental es un requisito fundamental para Ferrocarril Metropolità de Barcelona S.A., por lo que en la producción deberán aplicarse los estándares más avanzados en este ámbito, en cuanto a los materiales empleados y a la huella de carbono. Por consiguiente, el peso y el consumo energético deberán ser tan bajos como sea posible con el fin de disminuir el consumo eléctrico.
11. Todos los datos, informes y resultados generados serán propiedad de Ferrocarril Metropolità de Barcelona (FMB). En caso de que el adjudicatario quiera utilizar los datos extraídos de las detecciones efectuadas por el sistema, para cualquier aplicación que no consista en la mejora y ajuste de los algoritmos particulares de FMB, deberá solicitar autorización formal y por escrito a FMB.
12. Todos los resultados, características, y configuraciones derivados del proyecto, así como los datos proporcionados por Ferrocarril Metropolità de Barcelona, serán estrictamente confidenciales y no podrán emplearse para ningún fin, comercial o técnico, sin autorización formal y por escrito de FMB.

5 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas del sistema

5.1 Requisitos funcionales de la operación del sistema en campo

1. La totalidad de los equipos que efectivamente midan y procesen el gálibo y la temperatura se ubicará en la base de soporte, diseñada por el adjudicatario para adaptarse al exterior de la parte superior frontal del coche testero de los trenes a una velocidad máxima de 80 km/h. No podrá haber equipos en el interior del tren, salvo los equipos magnetotérmicos y el paso mínimo de cables.
2. Nominalmente, el sistema deberá monitorizar todas las condiciones de forma continuada mientras el tren en el que esté instalado circule por la red de Metro de Barcelona, ya sea durante las horas de servicio comercial (hasta cerca de las 20 h en día laborable) o fuera del horario de servicio por otros motivos (pruebas, formación, etc.).
3. Básicamente, las funciones de monitorización realizadas por el equipo embarcado contemplan:
 - Cálculo de la posición precisa del tren a partir de los datos de la odometría y de referencias absolutas que corrijan el error de deriva. Medición de la velocidad instantánea (útil para determinar la resolución del LIDAR, cálculo más preciso de la envolvente dinámica del tren, etc.).
 - Captación y grabación de todas las medidas del gálibo, asignándoles una referencia de posicionamiento a cada una de ellas. Por un lado, el subsistema de procesamiento embarcado utilizará estas medidas para el cálculo de la distancia con la envolvente dinámica del tren y, por otro, corregirá las distorsiones que puedan resultar de la oblicuidad de la posición del sensor LIDAR. Además, corregirá los movimientos inerciales del tren y tendrá en cuenta el efecto de la velocidad para generar una nube de puntos que “reconstruya” la infraestructura que rodea al tren.
 - Detección en “tiempo real” de los defectos de gálibo correspondientes a las mediciones de distancia relativas a la envolvente dinámica del tren que estén por debajo de los umbrales definidos. El sistema podrá determinar distintos umbrales para diferentes secciones del trazado. También deberá poder adaptarlos a las condiciones de circulación (velocidad, etc.).
 - Detección en “tiempo real” de los cambios significativos detectados entre la nube de puntos que reconstruye el entorno del tren en pseudo-tiempo real y un patrón de nube de puntos de referencia. Esto permitirá detectar zonas que hayan experimentado cambios, incluso aunque no interfieran con el gálibo. El sistema podrá determinar distintos umbrales para diferentes secciones del trazado.
 - Grabación continua de las mediciones de temperatura sobre el campo de visión frontal de la cámara térmica.
 - Detección en tiempo real de los defectos de temperatura correspondientes a aquellas medidas que excedan los umbrales de temperatura máxima y mínima. Estos umbrales se particularizarán para distintas secciones del trazado, delimitadas por puntos kilométricos, en las que se determinarán un conjunto acotado de formas poligonales cerradas (superior, laterales e inferior) con límites extremos de temperatura para cada una.

- Generación automática de alertas en el momento en que el equipo embarcado detecte cualquiera de los defectos que esté monitorizando (gálibo, temperatura), siempre que las alertas estén habilitadas, teniendo en cuenta el conjunto de reglas de exclusión que hayan podido definirse por zonas de vía, inhibiendo defectos localizados que hayan sido categorizados como falsos positivos, así como alarmas ya identificadas, para evitar el exceso de repetición de alertas, etc.
 - La notificación de la alerta se enviará al servidor central y a un conjunto predefinido de destinatarios, con una descripción de las características del defecto (tipo, medidas, criticidad y ubicación) que se complementará con imágenes o una breve secuencia de vídeo que facilite un contraste rápido a los destinatarios de la advertencia. La notificación se transmitirá instantáneamente a través del subsistema de comunicaciones.
 - Las alertas describirán el tipo de defecto, su ubicación y la categorización de la criticidad, junto con una imagen en la que esté destacado el defecto.
 - Autodiagnóstico continuo de los equipos embarcados a fin de garantizar que las funciones esenciales de monitorización se estén realizando correctamente. En caso de incidencia sobre los equipos, el sistema generará una alerta que se notificará instantáneamente a los destinatarios y se registrará en el servidor central.
 - La supervisión en tiempo real del estado de los equipos y los resultados del autodiagnóstico deberán ser visibles en la aplicación de usuario.
4. La inspección podrá realizarse en cualquiera de las vías transitables de la línea, tanto en las dos vías principales como en las vías de maniobras, diagonales y zonas de estacionamiento. También podrá realizarse en las vías de talleres.
 5. El sistema embarcado guardará una copia local de los defectos detectados en las últimas inspecciones para que, en caso de que se den problemas de comunicaciones, estos defectos puedan ser reenviados de nuevo cuando se recuperen las comunicaciones o, sencillamente, puedan ser descargados a demanda desde la aplicación central.
 6. El sistema embarcado guardará localmente una copia de una inspección diaria más la integral de la que esté efectuando en ese momento. En la fase de proyecto se determinará el número máximo de inspecciones completas que puedan almacenarse para que los requerimientos de disco sean razonables. En cualquier caso, el sistema deberá gestionar automáticamente las normas de persistencia que se definan desde la aplicación servidora (p. ej., guardar la inspección de los últimos 3 días y una correspondiente a las últimas 3 semanas).
 7. El sistema embarcado no enviará de forma continua los datos registrados por los tres sensores (LIDAR y cámaras). No obstante, se podrá programar temporalmente para que en determinadas condiciones de cobertura (disponibilidad de wifi) y de servicio (por ejemplo, tren estacionado) el sistema embarcado transmita una inspección completa a la aplicación servidora.

5.2 *Requisitos funcionales para la operación del sistema desde la oficina*

1. La aplicación servidora dará servicio a la aplicación cliente utilizada por los usuarios de mantenimiento de vías.
2. La aplicación servidora mantendrá el registro histórico y la trazabilidad de todos los defectos detectados, así como de las incidencias de disponibilidad de los equipos embarcados.
3. La aplicación servidora podrá realizar análisis más profundos en modo offline sobre los datos de detalle que tenga disponibles sobre inspecciones efectuadas por el equipo embarcado. El análisis buscará todos los defectos que se hayan seleccionado del catálogo completo de defectos, entre los que se incorporen los mismos que los detectados en tiempo real en campo y otros adicionales que requieran un análisis computacional más exigente. Todas estas acciones serán parametrizables en cuanto a la frecuencia y selección de los defectos que detectar, así como los ajustes de sensibilidad de cada uno de ellos.
4. Por cada defecto detectado, la aplicación servidora generará una alerta —siempre que estas estén habilitadas—, teniendo en cuenta el conjunto de reglas de exclusión que hayan podido definirse por zonas de vía, inhibiendo defectos localizados que hayan sido categorizados como falsos positivos, además de alarmas ya identificadas, para evitar el exceso de repetición de alertas, etc.
5. Las alertas describirán el tipo de defecto, su ubicación y la categorización de la criticidad, junto con una imagen en la que esté destacado el defecto.
6. La aplicación cliente dará soporte al caso de uso de la gestión en oficina, permitiéndole:
 - Revisar el detalle de cualquier localización en la nube de puntos o de las imágenes disponibles (de vídeo o térmicas), desplazándose de forma continua o con asistencia para ir saltando directamente a los defectos previamente detectados.
 - Disponer de diferentes tipos de visualización de los defectos en forma de tabla descriptiva y sinópticos visuales de la ubicación de los puntos a lo largo de la vía. Los diferentes modos de visualización deberán poder filtrarse por varios criterios, tales como tipología de defecto, criticidad, intervalo temporal de las capturas, etc.
 - Determinar si los defectos detectados automáticamente, fruto de la evaluación realizada por el usuario, son falsos positivos o verdaderos positivos, de modo que queden registrados en la base de datos.
 - Complementar la información de los defectos con metadatos adicionales sobre la captura mediante un texto descriptivo (fruto de la inspección realizada por los operarios en campo) e, idealmente, adjuntar imágenes complementarias de detalle de otras fuentes. Y otro texto descriptivo diferenciado sobre las medidas correctivas aplicadas, idealmente también con la posibilidad de adjuntar imágenes del correctivo.
 - Definir manualmente la ocurrencia de falsos negativos; es decir, fallos reales no detectados por los algoritmos pero apreciables en las inspecciones disponibles. Se podrán categorizar manualmente de acuerdo con los parámetros tipificados para cada defecto y añadir texto descriptivo a modo de metadatos adicionales. Se podrá escoger que se genere la alerta correspondiente con el objetivo de que los destinatarios predefinidos de las alertas la reciban para poder reaccionar.

- Introducir, también manualmente, otros defectos no apreciables en los datos de las inspecciones disponibles, cuando hayan sido detectados y corregidos por los equipos de inspección humana previamente a la grabación de la última inspección efectuada. Se podrán categorizar manualmente de acuerdo con los parámetros tipificados para cada defecto y añadir los metadatos adicionales habituales: texto descriptivo del defecto, texto explicativo de la eventual tarea correctiva, ambos preferiblemente con la posibilidad de adjuntar imágenes de otras fuentes.
- Los falsos negativos notificados podrán ser fácilmente exportados para generar nuevos conjuntos de datos que permitan al adjudicatario mejorar los algoritmos desplegados en Metro de Barcelona, ya sea en el servidor central o en el equipo embarcado, de acuerdo con la tipología del defecto detectado por cada equipo.
- Delimitar zonas de exclusión (*geofencing*) en las que no se apliquen los algoritmos de detección. También podrá hacerse para defectos concretos, ya sean falsos o verdaderos positivos, para evitar la duplicidad de alertas tanto en las notificaciones en campo como en las generadas por el proceso de la aplicación servidora.
- Ajustar algunos parámetros de la muestra, tales como la ubicación (línea, vía, PK) con el fin de corregir errores en el establecimiento de las condiciones iniciales por el operario de campo, o por falta de alguna información de detalle.
- Implementar un gestor del ciclo de vida de las alertas asociadas a los distintos tipos de defectos, en sus distintos estados: activas, reconocidas, no reconocidas, silenciadas y desactivadas.
 - Esto permitirá visualizarlas y filtrarlas por su estado, criticidad y tipología y período temporal de ocurrencia. En la visualización de tabla se podrán ver la ubicación y el detalle de los metadatos añadidos.
 - También permitirá reconocer las alertas, silenciarlas o desactivarlas. Los cambios de estado se trazarán a nivel de usuario y en el instante en que se produzcan, ofreciendo al usuario la opción de añadir un breve texto explicativo.
 - Implementar un conjunto de informes que permitan totalizar las alarmas de cada tipo, de forma agregada para todas las líneas o para líneas seleccionadas, intervalos temporales, etc.
- En relación con la calidad de los datos, la aplicación servidora elaborará un conjunto de informes simples que, con las métricas habituales de precisión (*precision*), exactitud (*accuracy*) y sensibilidad (*recall*)¹ muestren los resultados de forma agregada y desagregada para todos los tipos de defectos de los catálogos, tanto del equipo embarcado como del procesamiento en la aplicación servidora.
- La aplicación servidora también mantendrá un histórico de los eventos y las alarmas propias del estado de disponibilidad de los equipos embarcados, ya sea por la notificación automática enviada por el propio equipo como por la entrada manual efectuada por el operador, con el fin de disponer de un registro de la fiabilidad y disponibilidad del equipo.

¹ Precision = True Positives / (True Positives + False Positives), Recall = True Positives / (True Positives + False Negatives), Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)

- Sin embargo, la aplicación servidora, cuando el equipo embarcado disponga de conectividad inalámbrica, registrará la monitorización de los parámetros y estados básicos de funcionamiento del equipo con el fin de disponer de un registro simple de actividad. La aplicación servidora podrá elaborar informes simples con la información de estado y de actividad del equipo, para poder valorar la productividad, la fiabilidad y los eventos y fallos del equipo en un período determinado.

5.3 Especificaciones técnicas de los equipos embarcados

5.3.1 Subsistema de medición de distancias (LIDAR)

La función del LIDAR es efectuar una medición continua de la distancia de la infraestructura y los elementos del entorno del tren (paredes, túnel, andenes, cables, señales, etc.). Estas mediciones permiten a la unidad de procesamiento embarcada, junto con otros datos de circulación instantánea y de la infraestructura, determinar si se respetan los requerimientos de gálibo parametrizados para cada sección del túnel. Esencialmente, deberá calcular la distancia entre la envolvente dinámica del tren y las mediciones devueltas por el LIDAR. La envolvente dinámica del tren se determina a partir de un modelo (proporcionado por Metro de Barcelona), que parte de una representación poligonal simple del perfil del tren que se modifica de acuerdo con las condiciones de circulación instantáneas (velocidad, peralte, radio de curvatura, acordes verticales, etc.). El perfil de referencia se corresponde con una representación poligonal del perfil del tren que combina distintas situaciones degradadas y de carga, de forma que representa el peor caso posible.

Características del subsistema LIDAR:

1. El sistema de medición de distancias (LIDAR) deberá cumplir o mejorar las siguientes especificaciones técnicas para dar respuesta a los requisitos funcionales del proyecto:
 - Resolución horizontal (pitch) mínima de 20 cm a 80 km/h, medida como separación horizontal entre dos puntos que correspondan a la misma referencia angular de dos secciones consecutivas. Una sección define el perfil completo de 360º en torno al equipo de medición. En un LIDAR rotatorio se corresponderá al tiempo requerido para realizar una revolución completa, mientras que en un LIDAR de estado sólido se corresponderá con el tiempo necesario para capturar y procesar las muestras de todos los puntos.
 - Distancia entre dos muestras consecutivas inferior a 5 cm a 80 km/h, medida en el peor caso; es decir, en los extremos más distantes de la misma sección, teniendo en cuenta la posición oblicua del equipo para evitar la sombra del propio tren. Para el cálculo de la medida se tomará como referencia la sección de túnel único con dos vías en paralelo al mismo nivel.
 - Precisión de la medición de cada distancia individual inferior a 1 cm. Es decir, la distancia de cada uno de los puntos medidos por el LIDAR deberá tener un error máximo inferior a 1 cm.
 - Distancia mínima de medición inferior a 300 mm, para detectar la catenaria en los casos de gálibo más exigentes.
 - Distancia máxima de medición superior a 30 m, necesaria en talleres o espacios de estacionamiento.

- Láser de clase 1 según la norma UNE EN 60825-1/A2, seguro incluso con visión directa sin protección.
 - En el caso de los LIDAR rotatorios, los parámetros “número de puntos por vuelta” (resolución angular) y “velocidad de revolución”, que están sujetos a un compromiso para determinar la capacidad de procesamiento del LIDAR (en megapuntos por segundo), deberán ser ajustables.
 - Deberá cumplir los requerimientos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI) detallados en las especificaciones técnicas del subsistema mecánico.
2. El equipo LIDAR deberá garantizar altos niveles de disponibilidad, de modo que, en régimen de funcionamiento nominal (equivalente a una media de 19 horas diarias de circulación), no requiera la intervención de personal especializado de mantenimiento más de dos veces al año (es decir, una vez cada 6 meses). El tiempo medio entre fallos (MTBF) deberá ser superior a las 9000 horas de trabajo.

5.3.2 Subsistema de cámara termográfica

La función de la cámara termográfica es proporcionar un flujo de vídeo de la imagen termográfica de la infraestructura y generar un mapa térmico de la temperatura del túnel a lo largo de la línea y vía por la que circula el tren. La cámara generará imágenes térmicas en tiempo real a partir de la radiación infrarroja inducida por la temperatura, y un algoritmo específico para la detección de zonas con temperaturas anómalas procesará dichas imágenes. El sistema permitirá establecer umbrales para temperaturas consideradas anómalamente elevadas, que pueden ser indicativas de las siguientes incidencias:

1. La cámara termográfica deberá cumplir o mejorar las siguientes especificaciones técnicas para dar respuesta a los requisitos funcionales del proyecto:
 - Resolución mínima de vídeo: 640x480 píxeles.
 - Frecuencia de captura mínima: 25 fps.
 - Precisión de las mediciones de temperatura: +/- 4 °C.
 - Generación de flujo de vídeo “radiométrico”; es decir, integrando las mediciones de temperatura de cada píxel con la imagen termográfica en falso color. El vídeo radiométrico tendrá una resolución mínima de 464x348 en la misma frecuencia de captura (mínimo 25 fps).
 - La lente se concretará en la fase de proyecto, de forma que el campo de visión frontal de la cámara termográfica encaje con el campo de visión de la videocámara. Deberá garantizarse que no se producirá condensación en la lente o en el interior de la cámara.
 - Deberá cumplir los requerimientos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI) detallados en las especificaciones técnicas del subsistema mecánico.
 - Deberá permitir visualizar las imágenes en *streaming* y en tiempo real, con la interfaz de comunicaciones adecuada (wifi, Ethernet), utilizando los protocolos RTSP, ONVIF, WebRTC o SRT.
 - Dispondrá de un mecanismo de sincronización de las imágenes con la detección de los eventos externos (esta prestación puede requerir la asistencia del sistema de procesamiento embarcado)

2. El equipo deberá garantizar unos altos niveles de disponibilidad, equivalentes a una media de 19 horas diarias de circulación, de forma que en el régimen de funcionamiento nominal no requiera la intervención de personal especializado de mantenimiento más de dos veces al año (es decir, una vez cada 6 meses). El tiempo medio entre fallos (MTBF) deberá ser superior a las 30.000 horas de trabajo.

5.3.3 Subsistema de videocámara

La función de la videocámara de alta resolución es proporcionar un flujo de vídeo continuo de la zona frontal del tren medida por el LIDAR y la cámara termográfica. Estas imágenes servirán para aportar contexto a los eventos detectados por los demás sistemas de captación embarcados, que se acompañarán de breves secuencias de vídeo de los segundos inmediatamente anteriores y posteriores a los eventos en cuestión, facilitando así su análisis, junto con la demás información de contexto (p. ej., localización, velocidad, etc.).

Características:

1. La videocámara deberá cumplir o mejorar las siguientes especificaciones técnicas para dar respuesta a los requisitos funcionales del proyecto:
 - Resolución mínima de vídeo: 5 megapíxeles (2K).
 - Frecuencia de captura mínima: 30 fps.
 - En condiciones de iluminación adecuadas, deberá poder grabar el vídeo en color (RGB, YUYV, etc.). En condiciones de baja iluminación podrá hacerlo en blanco y negro (solo la luminancia).
 - La lente se concretará en la fase de proyecto, de forma que el campo de visión frontal de la videocámara encaje con el campo de visión de la cámara termográfica. Deberá garantizarse que no se producirá condensación en la lente o en el interior de la cámara.
 - Deberá cumplir los requerimientos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI) detallados en las especificaciones técnicas del subsistema mecánico.
 - Deberá permitir visualizar las imágenes en *streaming* y en tiempo real, con la interfaz de comunicaciones adecuada (wifi, Ethernet), utilizando los protocolos RTSP, ONVIF, WebRTC o SRT.
2. El sistema de vídeo incorporará, en caso necesario, un sistema de iluminación que le permita capturar las imágenes de vídeo. En caso de que el sistema de iluminación esté dentro del espectro visible, no podrá deslumbrar a los usuarios del metro o al personal de mantenimiento. En caso de que esté en el espectro no visible (IR) deberá garantizarse la seguridad óptica de las personas y no podrá interferir con las demás funciones del sistema (LIDAR, cámara termográfica).
3. El equipo deberá garantizar unos altos niveles de disponibilidad, equivalentes a una media de 19 horas diarias de circulación, de forma que en el régimen de funcionamiento nominal no requiera la intervención de personal especializado de mantenimiento más de dos veces al año (es decir, una vez cada 6 meses). El tiempo medio entre fallos (MTBF) deberá ser superior a las 30.000 horas de trabajo.

5.3.4 Subsistema de localización

1. La red de metro de la ciudad de Barcelona es mayoritariamente subterránea y, por tanto, la localización no se puede realizar mediante sistemas basados en tecnologías de posicionamiento satélite, como GPS.
2. Empleará un odómetro para determinar la velocidad instantánea y las distancias relativas a puntos de posicionamiento absoluto, con el fin de registrar con precisión suficiente (coherente con el paso o pitch del escaneado del subsistema LIDAR) las distancias al entorno y la temperatura, de manera que sea posible localizar los defectos de gálibo y cambios en el entorno respecto al patrón de puntos de referencia. El suministro e instalación del odómetro con los correspondientes cables queda incluido en el alcance del contrato, si bien en la fase de proyecto se valorará la posibilidad de utilizar algunos de los codificadores disponibles en el tren, siempre que estos cumplan los requisitos de resolución mínima y dispongan de canales libres para la conexión. En este caso, el suministro e instalación del cableado requerido irá a cargo del adjudicatario.
3. El sistema de localización podrá contar, según lo precise la solución del adjudicatario, con un sistema complementario de sensores inerciales para corregir los movimientos de lazo, paso por curva, etc., que afecten a la posición relativa de los equipos de medición en relación con el entorno. En caso de que se empleen estas unidades de medición inerciales, los datos en crudo que generen tendrán que poder estar disponibles para otros usos, mediante petición *ad hoc* a través de la API de transferencia de datos. Durante la fase de proyecto se concretará el diezmo y las dimensiones mínimas necesarias de dichas unidades.
4. El sistema de localización podrá contar, si así lo requiere la propuesta del adjudicatario, con un conjunto de referencias externas adicionales que determinen de forma absoluta su posición en el trazado, de modo que pueda corregirse el error de deriva del odómetro. En caso de que se trate de referencias físicas que haya que añadir adicionalmente (p. ej., tags RFID, referencias ópticas QR, etc.) y que no utilicen referencias existentes del propio túnel (señales o cambios procesados por la cámara), estas referencias externas deberán ser las mínimas imprescindibles para cada línea. En caso de que el sistema detecte la falta de uno de estos elementos, deberá notificarlo, facilitando así su mantenimiento.
5. Los trenes disponen de un sistema informático embarcado (Digital Train de Smart Motors) que cada 2 segundos proporciona la posición del tren basada en el codificador empleado por el material rodante para el cálculo de la distancia y velocidad y, por tanto, sujeto a la incertidumbre de este dato. No discierne los itinerarios o el paso por agujas, por lo que en algunos puntos puede tener imprecisiones no aceptables para la aplicación. El equipo Digital Train puede integrarse con otras soluciones embarcadas.
6. El subsistema de localización deberá permitir ubicar los datos recogidos por todos los sistemas y, en particular, las incidencias con una precisión de menos de 5 m. El adjudicatario implementará los algoritmos necesarios para obtener la localización, combinando los datos de sensores con los de medidas de referencia de los que disponga *a priori*.
7. Deberá cumplir los requerimientos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI) establecidos en las especificaciones del subsistema mecánico.

5.3.5 Subsistema de comunicaciones embarcado

1. El equipo se integrará con el rúter FW/VPN/4G/WIFI descrito en el apartado 3.5 (“Trenes auscultadores”), que permite realizar las funciones de envío y recepción necesarias para la realización de las funciones nominales de monitorización del gálibo y la temperatura. Dichas funciones incluyen, entre otras:
 - Envío en tiempo real de las alertas correspondientes a los defectos detectados, con los datos de contexto necesarios, dirigidas al registro de la aplicación servidora o a los destinatarios predefinidos.
 - Envío en tiempo real de los datos relativos a la supervisión del estado del equipo que se registren remotamente en la aplicación servidora.
 - Envío en tiempo real de las alertas correspondientes a las incidencias sobre el mal funcionamiento de los equipos embarcados, dirigidas al registro de la aplicación servidora o a los destinatarios predefinidos.
 - Actualización remota de los parámetros del sistema embarcado (inhibición de alarmas, ajustes de sensibilidad de los algoritmos), recepción de pedidos remotos, o incluso para las actualizaciones del *software* embarcado, facilitando el telemantenimiento del propio equipo.
2. El equipo permitirá las comunicaciones inalámbricas wifi en las zonas de la red en las que Metro de Barcelona haya habilitado la cobertura wifi, lo cual permitirá realizar las funciones enumeradas en el punto anterior. Adicionalmente, permitirá subir a la aplicación servidora la totalidad de los datos correspondientes a alguna de las inspecciones disponibles en el dispositivo de almacenamiento local, ya sea porque haya sido seleccionada remotamente por un usuario de la aplicación cliente o porque se haya programado su descarga temporalmente desde la aplicación servidora.
3. El equipo dispondrá de un puerto Ethernet adicional para poder conectar localmente equipos de configuración, parametrización y actualización del *software*. Este puerto también podrá utilizarse como canal principal de comunicaciones del sistema si se conecta a un equipo embarcado de comunicaciones (fuera del alcance de este contrato).
4. En caso de pérdida puntual de la cobertura, el sistema será capaz de retransmitir los mensajes que no hayan podido ser enviados.
5. Deberá cumplir los requerimientos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI) detallados en las especificaciones técnicas del subsistema mecánico.

5.3.6 Subsistema de unidad de procesamiento embarcado

1. La unidad de procesamiento embarcada se encargará de sincronizar las muestras capturadas por todos los sensores (LIDAR, cámara termográfica y la videocámara), asignándoles una misma referencia temporal y la posición precisa con la que se corresponden de acuerdo con la información del subsistema de localización. También les asociará la velocidad instantánea.
2. Por lo que respecta a la posición, el sistema realizará las correcciones necesarias de acuerdo con las condiciones de cada captura. Así, por ejemplo, si el LIDAR está ubicado de forma oblicua sobre el frontal del tren, habrá muestras anticipadas y otras atrasadas en relación con la posición del tren en función del ángulo (0-360º) de cada una de ellas. El sistema de

procesamiento embarcado deberá realizar las correcciones oportunas para referenciar correctamente la nube de puntos en la posición del testero del tren.

3. También se encargará de realizar el cálculo de la envolvente dinámica del tren a partir del perfil de referencia y las condiciones del trazado (peralte, radio, acordes, etc.) y de la velocidad del tren. Empleará este cálculo para determinar las distancias respecto a la infraestructura (mediciones corregidas del LIDAR), comparándolas con los umbrales de referencia específicos de cada sección del trazado para detonar, en su caso, la alerta. Generará un resultado gráfico que represente la sección de vía medida por el LIDAR (normalmente el túnel), mostrando la envolvente dinámica calculada y destacando las distancias entre ambas que hayan provocado la alarma.
4. Las demás funcionalidades relativas a la medición de cambios relevantes en objetos de un volumen mínimo que no afecten al gálibo de seguridad del tren con relación a su desplazamiento (desapariciones/apariciones, etc.), no deberán ser efectuadas obligatoriamente por la unidad embarcada y podrán ser ejecutadas por la aplicación servidora.
5. El equipo también se encargará de procesar los resultados radiométricos de la cámara termográfica, sincronizándolos con la posición del tren y contrastando los valores de temperatura con los umbrales definidos para cada una de las zonas del túnel y las secciones correspondientes.
6. Cuando se detecte un defecto, la unidad de procesamiento embarcada compilará toda la información de la alerta propiamente dicha, adjuntando las características del defecto, la ubicación, la referencia temporal y la secuencia de vídeo desde los instantes anteriores hasta los posteriores (+/- 3 o 4 segundos). Todos estos datos serán los que se registrarán en la aplicación servidora para su consulta posterior y se enviarán automáticamente por correo electrónico (y si es posible mediante notificación *push*) a una lista de usuarios configurable con una latencia acotada.
7. Este equipo dispondrá de capacidad de almacenamiento local para guardar las alarmas (junto con su contexto) que no hayan podido ser enviadas en caso de pérdida de comunicaciones. Se mantendrán las últimas 200 alarmas detectadas.
8. El equipo también se encargará de almacenar localmente la información integral (todos los datos en crudo del LIDAR, videocámara y cámara termográfica, junto con la referencia de localización y velocidad) de los trayectos (semivueltas) sobre la base de una programación predefinida (por ejemplo, una vez al día en el primer y en el último viaje). Deberá poder almacenar un mínimo de 30 semivueltas.
9. El equipo deberá garantizar unos altos niveles de disponibilidad, equivalentes a una media de 19 horas diarias de circulación, de forma que en el régimen de funcionamiento nominal no requiera la intervención de personal especializado de mantenimiento más de dos veces al año (es decir, una vez cada 6 meses). El tiempo medio entre fallos (MTBF) deberá ser superior a las 30.000 horas de trabajo.

5.3.7 Base de fijación mecánica

Este subsistema lo compone la base rectangular donde se fijarán los componentes del sistema y los demás elementos necesarios para la sujeción de los componentes en la placa, así como aquellos necesarios para fijar la propia placa en el techo del tren. Este subsistema deberá diseñarse para que

confiera la sujeción y rigidez suficientes para garantizar su integridad en las condiciones de operación del material rodante, asegurando que no se desprendan y caigan a la vía.

Características:

1. La integración de todos los elementos debe respetar las condiciones de galibo estático de los trenes de la serie S9000 (véase anexo 4).
2. Con el objetivo de minimizar el total de mecanizados específicos en el techo del tren, el conjunto de los equipos deberá fijarse sobre una base que, a su vez, se fijará en la parte superior del tren mediante un conjunto mínimo de anclajes, aprovechando los elementos de fijación disponibles siempre que sea posible. Este planteamiento permitirá retirar de forma más ágil el equipo, si es necesario por razones de mantenimiento del material rodante.
3. Los equipos deberán ubicarse en la puerta frontal del techo del tren. No podrán fijarse en el enganche u otras zonas del testero, dado que el enganche debe estar disponible para situaciones de explotación degradadas (remolcadas). Tampoco podrán ubicarse en otras partes delanteras del frontal, dado que la práctica totalidad de este actúa como salida de emergencia para los casos de evacuación espontánea.
4. El peso del conjunto de la base y los subsistemas que integre no podrá superar los 125 kg.
5. El conjunto de los elementos embarcados deberá cumplir los siguientes requisitos de protección del entorno (*housing* y EMC/EMI):
 - Protección: IP65/IEC 60529 (NEMA-4)
 - Temperatura de operación: de -10 °C a 65 °C.
 - Humedad del 10 % al 95 % a 25 °C sin condensación.
 - Vibración y choque: IEC 60068-2-27 (choque mecánico): 50 G, 6 ms, 3 ejes
 - IEC 60068-2-26 (vibración sinusoidal): 3G, 11-200 Hz, 3 ejes
 - EMC: EN 61326-1:2013 industrial
 - Equipos integrados de comunicaciones o control conformes a la norma EN-50155, con aislamiento entrada-salida superior a 2,000 VAC; filtros de entrada conformes a la norma EN 55032, clase B; EMI o interferencias electromagnéticas (emisiones no deseadas) conformes a la norma EN 50121-3-2 (Compatibilidad electromagnética para material rodante) y EMS o inmunidad electromagnética según la misma norma.
6. *A priori*, hay que considerar que el subsistema central de procesamiento de datos y el módulo de comunicaciones, también se ubicarán en esta base, en la parte superior. Sin embargo, en la fase de proyecto se explorará la opción de instalar estos dos equipos en el interior del coche (en algún espacio vacío de armario técnico) para facilitar su acceso y mantenimiento, en función de las dimensiones de la caja que los contenga. No puede garantizarse que los espacios disponibles sean suficientes para los equipos en cuestión.
7. En fase de proyecto, el adjudicatario aportará la documentación técnica pertinente que demuestre que los sistemas embarcados permanecerán solidarios en la base donde se encuentren fijados, garantizando que no se desprenderán hacia la vía en las condiciones de operación y circulación nominales del equipo. En este sentido, llevará a cabo los estudios mecánicos de integridad estructural (mediante elementos finitos) teniendo en cuenta las fijaciones diseñadas para las masas de los elementos en las condiciones nominales de

desplazamiento del tren. El estudio integrará la valoración de la fatiga y las vibraciones, y se enumerarán los criterios de diseño y los factores de seguridad empleados.

5.4 Especificaciones de la aplicación servidora

5.4.1 Concepto y arquitectura

1. La aplicación servidora se basará en una arquitectura centralizada que, por una parte, implemente las funciones para atender a los clientes del sistema que dispongan de la interfaz hombre-máquina (HMI) y, por otra, implemente las funciones de la capa de datos: la centralización histórica de todos los datos de los equipos embarcados, su posprocesamiento para análisis más exigentes desde el punto de vista computacional y no sujetos a tiempo real y, finalmente, la gestión del ciclo de vida de las alarmas.
2. Se prefiere que tanto la aplicación servidora y sus componentes como la aplicación cliente se implementen sobre tecnologías abiertas y escalables.
3. La interfaz de usuario de la aplicación cliente se acomodará a las necesidades de los casos de uso definidos por el personal de mantenimiento, que son básicamente los siguientes:
 - Gestión del estado de las incidencias activas: el usuario debe poder visualizar y consultar toda la información de contexto de las alarmas activas que puedan requerir una intervención correctiva con cierta urgencia. Dentro de este grupo de funcionalidades, la interfaz debe permitir al usuario silenciar alarmas por zonas y vías para evitar el exceso de falsos positivos derivados de situaciones de contexto controladas *a priori*.
 - Planificación de las intervenciones: monitorizar el estado general de los gálidos y límites térmicos de la infraestructura de ambas líneas de forma que se puedan identificar de forma rápida las zonas en las que los valores se encuentren más comprometidos (sin estar necesariamente fuera de los límites y, por tanto, sin alarmas activas) para priorizar las intervenciones preventivas.
 - Análisis de la evolución y tendencias de los parámetros monitorizados: funciones analíticas que, sobre los históricos de datos, permitan determinar la evolución de los distintos parámetros medidos. Por ejemplo, pero no limitadas a, la evolución temporal del gálibo en los puntos más comprometidos y la evolución temporal de las temperaturas en secciones concretas. En este caso de uso, se contemplará la consulta de los posibles informes que pueda generar la aplicación.
 - Monitorización del estado de los equipos: consulta de los registros de las alarmas de fallo y los indicadores de disponibilidad históricos.
 - Ajustes y parametrizaciones de las alarmas. la interfaz debe permitir ajustar y acomodar la sensibilidad y los umbrales de las alarmas en los diferentes puntos kilométricos o secciones de la vía, etc.
4. La aplicación cliente priorizará la usabilidad y comodidad para los distintos casos de uso enumerados, pudiendo extender las ventanas de visualización a más de un monitor, si resulta necesario para el análisis simultáneo de las imágenes de las diferentes cámaras, y generar una representación de la nube de puntos 3D (con y sin reflectividad).

5. La aplicación cliente debe poder ser multisitio; es decir, debe poder ser utilizada simultáneamente por varios usuarios.
6. Se prefiere que la capa cliente se implemente con acceso web, como web cliente, de forma que no sea necesaria la instalación de ninguna aplicación ejecutable sobre los dispositivos remotos utilizados por los usuarios. También se prefiere que sea adaptativa, de forma que la visualización y la interacción puedan ajustarse automáticamente al dispositivo de navegación utilizado por el usuario, ya sea en ordenador, tableta o teléfono móvil. Sin embargo, no son requisitos imperativos.
7. La capa de gestión de datos se implementará sobre una base de datos de tecnología abierta, preferiblemente relacional (SQL o Structured Query Language) y, si es necesario, complementada por otra no relacional para los datos no estructurados. El gestor suministrado de la base de datos realizará periódicamente las tareas (*jobs*) de copia de seguridad y compactación de los registros.
8. La información generada por el sistema sobre los defectos detectados (históricos), los distintos tipos de informes generados, las imágenes (secuencias de vídeo) y las nubes de puntos deberán poder exportarse a formatos de archivos abiertos (por ejemplo: JSON, CSV, PNG, MP4/MKV, LIS/LIZ) para su procesamiento en otras plataformas.

5.4.2 Requisitos funcionales de alto nivel de la aplicación servidora y la aplicación cliente

1. Estas aplicaciones deben almacenar los datos históricos de los defectos detectados, incluyendo las imágenes discretas y secuencias de vídeo en las que se hayan detectado los defectos, pudiendo almacenar hasta 10.000 por línea.
2. Tener la capacidad de almacenar todos los datos sincronizados (vídeos de las cámaras, datos de los sensores y resultados del análisis en tiempo real) correspondientes a un mínimo de 500 semivuelatas. En este sentido, el sistema deberá permitir que el usuario determine las secuencias que no deban borrarse, a modo de referencia o histórico relevante. Estos trayectos se cargarán a petición del usuario, que seleccionará concretamente uno de los trayectos (semivuelatas por vía 1 o vía 2) almacenados localmente en el equipo embarcado. La carga de los trayectos podrá acondicionarse a la disponibilidad de un canal de comunicaciones wifi en caso de que no se quiera utilizar el canal 4G/5G.
3. El conjunto de la aplicación servidora y la aplicación cliente deberán permitir la reproducción continua de las secuencias de datos almacenadas, de modo que el usuario pueda visualizar simultáneamente desde la oficina la evolución de las imágenes de vídeo de ambas cámaras, la nube de puntos, la posición, la velocidad y los datos tabulares que desee monitorizar (temperaturas, distancias de galibo, etc.), con la eventual superposición de las alarmas que se produzcan. Estas visualizaciones estarán disponibles tanto para las alarmas como para las secuencias integrales/parciales de semivuelatas que estén almacenadas en el servidor.
4. El sistema debe proporcionar una interfaz gráfica que ofrezca una visión general del estado de la vía y de la ubicación de los defectos, con accesos directos a las imágenes correspondientes a cada uno de ellos a fin de facilitar al usuario el contraste del diagnóstico.
5. Disponer de diferentes tipos de visualización de los defectos en forma de tabla descriptiva y sinópticos visuales de la ubicación de los puntos a lo largo de la infraestructura. Los diferentes

modos de visualización deberán poder filtrarse por varios criterios, tales como tipología de defecto, criticidad, intervalo temporal de las capturas, etc.

6. Grabar de forma continua la información del estado de funcionamiento y disponibilidad de los propios equipos de campo y del propio servidor, con el fin de determinar la disponibilidad operativa para iniciar las inspecciones en campo o un nuevo análisis en la aplicación servidora.
7. Ofrecer una visión sinóptica del estado de funcionamiento de los principales componentes del sistema, destacando los eventos que hayan podido ocurrir en los equipos durante el proceso de captación/análisis de las imágenes en campo.
8. Sin embargo, la aplicación servidora, cuando el equipo embarcado disponga de conectividad inalámbrica, registrará la monitorización de los parámetros y estados básicos de funcionamiento del equipo con el fin de disponer de un registro simple de actividad. La aplicación servidora podrá elaborar informes simples con la información de estado y de actividad del equipo, para poder valorar la productividad, la fiabilidad y los eventos y fallos del equipo en un período determinado.
9. Consultar los informes periódicos o de alarma generados (descritos en otro punto).
10. Configurar los roles y las listas de usuarios asociadas a la distribución de informes (por correo electrónico).

5.4.3 Gestión de las alarmas

1. Debe ser posible el acceso a los históricos de los registros y alarmas, con la posibilidad de establecer filtros sobre los atributos guardados para facilitar la búsqueda. Para el caso de las alarmas, estas aplicaciones permitirán al usuario conmutar su estado y establecer comentarios, en su caso.
2. El sistema debe integrar diferentes niveles de severidad de alarma (por ejemplo: leve, moderado y crítico) en función de umbrales específicos establecidos para cada uno de los defectos.
3. Las alarmas dispondrán de al menos dos estados en cuanto a la aceptación por parte del usuario: pendientes de reconocimiento y ya reconocidas. Cuando se detone una nueva alarma, aparecerá en estado “pendiente de reconocimiento”. Mediante la interfaz gráfica, el usuario podrá conmutar su estado a reconocida (o a la inversa). Al cambiar el estado de la alarma a “reconocida”, el usuario podrá añadir un breve comentario que complemente el diagnóstico. Todos estos cambios generarán un registro trazable (fecha y usuario) en la base de datos.
4. Complementar la información de los defectos con metadatos adicionales sobre la captura mediante un texto descriptivo (fruto de la inspección hecha por los operarios en campo) e, idealmente, adjuntar imágenes complementarias de detalle de otras fuentes. Y otro texto descriptivo diferenciado sobre las medidas correctivas aplicadas, idealmente también con la posibilidad de adjuntar imágenes del correctivo.
5. Las alarmas dispondrán de al menos dos estados en cuanto a su notificación a los destinatarios: no silenciadas o silenciadas. Las aplicaciones deben permitir la conmutación de los estados por tipos de alarma, zona, etc.
6. Las alarmas podrán generarse automáticamente por el sistema —lo habitual— o por el usuario. En el caso en que el sistema no haya diagnosticado los defectos, pero efectivamente haya un

problema (es decir, en caso de falso negativo), el usuario debe poder delimitar el defecto en la imagen y detallar las propiedades características de ese tipo de defecto. También debe poder asignarle el nivel de alarma que convenga y forzar su envío a los destinatarios.

7. Los falsos negativos notificados podrán ser fácilmente exportados para generar nuevos conjuntos de datos que permitan al adjudicatario mejorar los algoritmos desplegados en Metro de Barcelona, ya sea en el servidor central o en el equipo embarcado, de acuerdo con la tipología del defecto detectado por cada equipo.
8. En el caso de alarmas generadas automáticamente por el sistema, el usuario debe poder anularlas (pasar a “sin alarma”) o cambiar su severidad (por ejemplo: Alerta \Leftrightarrow Crítica), para corregir los falsos positivos. Todos estos cambios generarán un registro trazable (fecha y usuario) en la base de datos.
9. El sistema debe permitir establecer los umbrales de alarma por cada tipo de defecto, además de ajustar los parámetros de configuración y sensibilidad del algoritmo de detección de cada defecto.
10. El usuario deberá poder silenciar las alarmas, a pesar de que estas se sigan registrando en la base de datos, por tipo de defecto y para zonas concretas de cada carril para cada línea. También debe poder hacerlo para defectos específicos y concretos, de modo que, en caso de que no se hayan reparado, evite generar informes de alarma repetidos sobre el mismo defecto.
11. Deberá permitir aplicar zonas de exclusión en las que no se registre ningún defecto en la base de datos ni se genere alarma alguna (p. ej., zonas de cambios, etc.) para cada línea. También deberá permitir seleccionar los algoritmos de detección que deben aplicarse por defecto en cada línea.
12. El sistema deberá permitir también la gestión y visualización de las alarmas asociadas al estado de funcionamiento y disponibilidad del propio sistema, tanto de los subsistemas del equipo de campo como de la aplicación servidora.

5.4.4 Elaboración de informes y descarga de datos:

1. El *software* deberá permitir la generación de informes resumen sobre los defectos identificados por línea y por período de tiempo, que presenten los datos agrupados por defecto y ordenados según diferentes criterios (punto kilométrico, fecha, de mayor a menor número de ocurrencias, etc.). Incluirá también una valoración de la calidad de los datos por tipología de defecto, mostrando métricas tales como la precisión, la sensibilidad (*recall*), etc.
2. Generará un informe resumen de la disponibilidad y productividad del propio equipo a partir de la información de autodiagnóstico registrada, incluyendo también el listado de las alarmas de los subsistemas.
3. En caso de detección de una alarma sobre el mal funcionamiento de un componente del propio sistema, la aplicación generará un informe de la alarma en el que se presentará toda la información contextual necesaria. Estos informes se dirigirán automáticamente por correo electrónico a una lista de usuarios configurable (que podrá ser diferente de la lista de alarmas de tren).
4. Los informes se almacenarán en un registro que permitirá su búsqueda mediante filtros, así como la visualización y descarga del informe seleccionado.

5. En los registros históricos de datos, la aplicación deberá permitir al usuario descargar los datos en crudo (por ejemplo, CSV, JSON, LIS/LIZ) de todos los campos y atributos de datos disponibles sobre el filtro aplicado (rango de fechas, trenes, etc.).

5.4.5 Gestión básica de usuarios y roles

1. Los usuarios tendrán que identificarse para acceder a la aplicación.
2. Se podrán crear usuarios de la aplicación y asignarles uno o más roles. También podrán darse de baja usuarios.
3. En términos generales, habrá tres roles principales para interactuar con la aplicación, que podrían ser similares o asimilables a los siguientes:
 - Rol Básico: Permite realizar todas las funciones nominales de operación, excepto las propias de configuración y ajuste sobre el comportamiento del sistema, tales como el establecimiento de umbrales de alarma, la parametrización de los informes, la definición de listas de distribución, etc.
 - Rol Maestro: Permite realizar las mismas funciones que el rol básico y, adicionalmente, configurar los parámetros de la aplicación, tales como los umbrales de alarmas, la parametrización de informes, la inhibición de defectos, la creación de zonas de exclusión, listas de distribución y nuevos usuarios, y la asignación de roles.
 - Rol Mantenimiento del sistema: Se podrá asignar este rol, si procede, en la implementación de la solución del adjudicatario. Permite configurar aspectos de bajo nivel del sistema, sobre los módulos sensores, las comunicaciones, etc.

5.4.6 Aplicación servidora: análisis offline

1. La aplicación servidora dispondrá de una serie de algoritmos que permitirán detectar un conjunto de defectos más amplio o con mayor precisión que el equipo embarcado, en particular para el análisis de los cambios de objetos de volumen mínimo fuera del alcance del gálibo de seguridad.
2. Cuando se detecte un defecto, la aplicación generará una notificación de alarma en la que se presentará toda la información contextual, adjuntando las características del defecto, la ubicación, la referencia temporal y las imágenes asociadas en las que se destaque el defecto. Estos informes se enviarán automáticamente por correo electrónico (y si es posible también por notificación *push*) a una lista de usuarios configurable.

5.4.7 Aplicación servidora: API para el intercambio de datos “machine to machine”

1. La aplicación servidora implementará una API REST (o similar) con codificación JSON (o similar) para realizar las consultas básicas para la extracción de datos que faciliten la integración de la solución con otros sistemas de información. A grandes rasgos, la API deberá permitir:
 - Recuperar la totalidad de los datos asociados a los registros de los defectos que cumplan un conjunto de criterios de filtro: por línea, en un rango de tiempo, por tipología de defecto (uno, varios o todos). Las imágenes y nubes de puntos asociados se adjuntarán como enlaces URL para su descarga. Similarmente, en el caso de que los registros conlleven la generación de un informe, se adjuntará también el enlace URL al informe.

- Recuperar la totalidad de los datos asociados a los registros de estado y alarmas de los subsistemas que conforman la totalidad del sistema, pudiéndolos seleccionar por rango de tiempo. En el caso de que los registros conlleven la generación de un informe, se adjuntará también el enlace URL al informe.
 - En el momento en que el servidor registre una notificación, ya sea generada por el equipo embarcado o por el proceso de análisis profundo realizado por el propio servidor o *backend*, la API deberá notificar la existencia de estos nuevos defectos detectados a un servidor externo mediante *webhook* o tecnología similar, que se acordará entre las partes en la fase de proyecto.
2. La aplicación servidora también implementará una API básica para la reproducción en clientes web de los vídeos (videocámara y cámara térmica) correspondientes a las semivueltas (vía 1, vía 2) almacenados en el servidor, ofreciendo la totalidad del trayecto o un intervalo entre dos puntos kilométricos definidos en la petición a la API.
 3. Similarmente, la aplicación servidora implementará una API básica para el retorno de los datos tabulares y las nubes de puntos correspondientes a las semivueltas (vía 1, vía 2) que estén almacenadas en el servidor, ofreciendo la totalidad de los datos correspondientes al trayecto o un intervalo entre dos puntos kilométricos definidos en la petición a la API.

6 Instalación de los equipos embarcados

6.1 Instalación de los equipos

6.1.1 Ubicación, alimentación y cableado

1. Los equipos deberán ubicarse prioritariamente en la parte superior de cualquiera de los dos coches testers, emplazándolos de forma que puedan realizar su función sin interferir con ningún elemento del tren. La unidad de procesamiento se instalará prioritariamente en el exterior, sobre la propia base de sujeción. Sin embargo, en la fase de proyecto se valorará la opción de instalarla en un armario técnico del interior del coche tester. En este caso, si se optara por instalar este dispositivo en el interior, los componentes de conectividad adicionales (entre los distintos elementos de captación y la propia unidad de procesamiento) correrán a cargo del adjudicatario.
2. La alimentación de los equipos se obtendrá del propio coche. En la fase de proyecto ya se determinará con precisión la acometida y dónde se instalará el magnetotérmico que gobierne la alimentación de todos los equipos.
3. Cableado:
 - Tipo de cable: se utilizarán cables que cumplan los estándares ferroviarios más exigentes, como la norma EN45455, garantizando así una alta resistencia al fuego y a otros factores ambientales típicos del entorno ferroviario.
 - Separación y apantallamiento: los cableados de alimentación, control y comunicaciones se separarán físicamente y se apantallarán para evitar interferencias electromagnéticas.

- Instalación: los cables se conducirán a través de canalizaciones específicas y se anclarán adecuadamente para evitar movimientos y tensiones que puedan dañarlos.
- Protección: los cables estarán protegidos contra vibraciones y otros factores mecánicos que puedan dañarlos durante el funcionamiento del tren.

7 Documentación específica

1. El adjudicatario deberá entregar la siguiente documentación en las fases que se indican a continuación:
 - Memoria descriptiva de cada uno de los componentes clave de la solución; es decir, del equipo embarcado (con todos sus subsistemas), la aplicación servidora, la aplicación de campo y la API. En cada caso, desde una perspectiva de ingeniería de sistemas y con un planteamiento de arriba abajo (*top-down*), se describirán los principales bloques, explicando las especificaciones funcionales y no funcionales (métricas de resolución, rendimiento, latencia, etc.) y las especificaciones técnicas. También se explicarán las principales interfaces entre los bloques y se describirá su tipología (lógicas, eléctricas, mecánicas) y los principales intercambios de información entre ellas. Se detallará la ubicación de las funcionalidades (*function allocation*) de forma clara. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
 - Para el equipo embarcado: diagrama de despiece o explosión que describa gráficamente el conjunto de los componentes desde el punto de vista mecánico, muestre el ensamblaje y ajuste de todas las partes, así como los tamaños de los componentes y los mecanismos y características de los elementos de sujeción. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
 - Para el equipo embarcado: diagrama esquemático del conexionado eléctrico de los elementos. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
 - Para el equipo embarcado: estudio mecánico de los soportes y fijaciones que garantice la integridad mecánica del conjunto embarcado, basado en un análisis de los elementos finitos, la fatiga de los materiales, etc. [Se entregará en la fase de proyecto como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
 - Para equipos informáticos embarcados, servidor y dispositivos móviles (aplicación de campo): requisitos de los distintos componentes del *hardware* y el sistema operativo para la ejecución de los respectivos programas. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Para los equipos informáticos y de comunicaciones: informe técnico sobre las medidas, configuraciones y parámetros aplicados en su implementación, en relación con el

cumplimiento de los requisitos de ciberseguridad. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]

- Para los equipos informáticos embarcados y el servidor: manuales de instalación y configuración del *software*, controladores (*drivers*), etc., de modo que, en caso de tener que reemplazar uno de estos componentes, se puedan restituir y utilizar de nuevo. [Se entregará antes de finalizar la puesta en servicio.]
- Fichas con las características de los materiales y componentes instalados. [Se entregará antes de finalizar la puesta en servicio.]
- Descripción de alto nivel de la arquitectura del *software* con identificación de los principales bloques funcionales y una breve explicación de las atribuciones funcionales y las principales interfaces internas (entre bloques/componentes) y externas (sistemas de información externos). También deberá incluir una breve explicación de las tecnologías subyacentes sobre las que se han implementado los distintos componentes. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Descripción de los modelos/algoritmos de detección y diagnóstico —sin entrar en detalles que comprometan la propiedad intelectual—, las entradas de información, las salidas y los tipos de procesamiento aplicados (p. ej., heurístico, estadístico, analítico, aprendizaje automático). En el caso del aprendizaje automático (*machine learning*), se deberá identificar si es supervisado o no supervisado. [Se entregará en la fase de proyecto, como condición previa para iniciar la fase de ejecución. Al final de la fase de instalación y pruebas se actualizará, reflejando la realidad (*as-built*) del sistema entregado.]
- Registro de cambios (*changelog*) en el que se indicará el módulo afectado, el tipo de cambio —categorizado según su alcance (corrección, mejora, nueva funcionalidad, eliminación de prestación, seguridad, etc.)—, una breve descripción, la fecha de implementación y la versión en la que el cambio ha entrado en producción. Este registro también se aplicará sobre los módulos de detección y diagnóstico. [Se irá manteniendo desde la fase de producción y hasta el final de la garantía.]
- Conjuntos de datos (*datasets*) creados específicamente para el proyecto de Metro de Barcelona, ya sean para entrenar a los algoritmos o para validar su rendimiento. [Se entregarán al final de la fase de instalación y pruebas, y se actualizarán si se enriquecen durante la fase de puesta en servicio o garantía].
- Manuales de usuario de todos los equipos y aplicaciones. Aparte de la descripción de las funcionalidades, expondrán los pasos para los diferentes casos de uso de cada contexto (operarios en campo, usuarios en oficina), enfocados a la operación y uso del sistema en su conjunto. Particularmente, incluirán capítulos específicos en los que se detallarán los diferentes algoritmos de detección y los parámetros configurables por parte del usuario. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Manuales de mantenimiento de todos los equipos (tanto preventivo como correctivo), incluyendo una guía para la resolución de los problemas más habituales y de seguimiento

- de averías. Véase el apartado “Mantenimiento y servicio técnico” de este documento. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
- Manuales para la inspección y calibración de los equipos que incorpore los protocolos de referencia. En caso de que, para la calibración el sistema, sea necesario algún tipo de herramienta o patrón de referencia, el adjudicatario deberá suministrarlos por duplicado. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Plan de Formación y contenidos de formación y pruebas que se utilizarán en las acciones formativas que se llevarán a cabo durante la fase de puesta en servicio. Los contenidos irán dirigidos específicamente a la operación del sistema y al mantenimiento de primeros niveles de los equipos embarcados y del sistema informático. Una de las sesiones de formación se grabará en audio y vídeo para su posterior uso. [Se entregarán durante la fase de puesta en servicio.]
 - Manual de la API de intercambio de información que describa los parámetros e incluya ejemplos concretos de cada caso. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Plan de Pruebas que incluya el detalle de los protocolos (SAT, FAT) y un plan de puesta en servicio. Todos ellos deberán consensuarse con FMB. [Se entregarán antes de finalizar la fase de ejecución.]
 - Resultados de los protocolos de pruebas FAT. [Se entregarán en la fase de ejecución, previamente al inicio de la fase de instalación y pruebas.]
 - Resultados de los protocolos de pruebas SAT. [Se entregarán en la fase de instalación y pruebas, previamente al inicio de la fase de puesta en servicio.]
 - Certificados de garantía y conformidad y del marcado CE. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Calibraciones iniciales y certificaciones de los equipos, en su caso. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
 - Tabla resumen con los ciclos de vida previstos para los principales componentes (*hardware* y *software*) del sistema según los distintos proveedores, con el objetivo de que Metro de Barcelona pueda realizar la gestión de la obsolescencia durante el ciclo de vida del sistema. [Se entregará en la fase de instalación y pruebas, previamente a la fase de puesta en servicio.]
2. La entrega de la documentación en los plazos definidos será una condición indispensable (pero no suficiente) para avanzar formalmente, y a todos los efectos de certificaciones y pagos, a la siguiente fase del proyecto.
 3. Durante todo el plazo del suministro, incluido también el período de garantía, cualquier modificación que se lleve a cabo sobre los equipos y que difiera de lo que recoja la documentación ya entregada, en todo lo relativo al alcance de este contrato (excluyendo posibles mejoras o nuevas funcionalidades futuras), requerirá la actualización de dicha documentación y estará vinculada a la finalización del período de garantía.

4. Toda la documentación del sistema (manuales de usuario y mantenimiento, documentos descriptivos, etc.) se entregará en catalán, salvo los documentos de especificaciones técnicas, planos, certificaciones y fichas técnicas de los componentes, que podrán ser en catalán o en inglés para ahorrar traducciones juradas de documentos técnicos.

8 Condiciones específicas de entrega

1. De acuerdo con las fases definidas en el apartado “Condiciones generales”, la fase de puesta en servicio, que culmina con la aceptación formal del sistema, no podrá finalizar más tarde de 18 meses después de la adjudicación del contrato. Por lo tanto, deberá haberse superado todas las pruebas (SAT, FAT), sin fallos críticos pendientes de resolver, entregado toda la documentación, realizado la formación y demostrado la realización de detección y diagnóstico (sin exceso de falsas alarmas ni falsos negativos) antes de dicho plazo.
2. En caso de que la aplicación cliente requiera un ordenador *workstation*, se entregarán tres equipos completos con el correspondiente número de pantallas necesarias para el uso fluido del sistema.
3. Las condiciones de entrega o transferencia de la aplicación servidora se determinarán durante la fase de ejecución en función de si se trata de un servidor independiente o de un servidor privado en la nube. De hecho, podrán estipularse condiciones provisionales para las fases previas a la puesta en servicio para facilitar los ajustes y pruebas del adjudicatario. Sin embargo, durante la fase de puesta en servicio, la aplicación servidora deberá estar instalada en las condiciones finales de operación del sistema, ya sea en un equipo entregado a Metro de Barcelona o instalada en un servidor privado en la nube.
4. Durante la puesta en servicio deberán suministrarse todos los elementos necesarios para la operación y mantenimiento del sistema:
 - Equipación del tren con el sistema completo para la monitorización del gálibo y la temperatura del túnel.
 - Una (1) aplicación servidora, ya sea en servidor local totalmente equipado o en servidor en la nube.
 - Cinco (5) licencias de la aplicación cliente. En caso de que la aplicación cliente requiera un ordenador *workstation*, se entregarán tres equipos completos con pantallas, teclados y ratones para la ejecución del *software* y para prestar las funciones nominales descritas.
 - Licencias de uso de todo el *software*, aplicaciones y componentes empleados en el conjunto de la solución suministrada.
5. El adjudicatario será el responsable de la ejecución de todas las fases del suministro previas al inicio de la garantía. Por consiguiente, deberá aportar los medios humanos y técnicos para la realización de pruebas, instalaciones, ajustes de los algoritmos, formación, puesta en servicio, etc.
6. Los componentes se entregarán debidamente embalados e identificados para su almacenamiento y posterior recuperación en el momento de su instalación.
7. Las licencias asociadas a todo el *software* implicado (aplicaciones servidora y cliente, API de integración, firmware, sistema operativo del equipo embarcado, algoritmos, modelos de

detección, etc.), ya sean tecnologías abiertas o propietarias, se entregarán con las últimas versiones con soporte a largo plazo, vigentes en el momento de la finalización del proyecto, y se mantendrán debidamente actualizadas durante el período de garantía.

9 Condiciones específicas de la garantía

1. Una vez finalizada la fase de instalación y puesta en servicio con la aceptación formal del sistema y entregada toda la documentación especificada en los puntos anteriores, se iniciará un período de garantía de 3 años (36 meses) de todo el sistema.
2. Durante este período, el adjudicatario será el responsable de llevar a cabo las siguientes acciones sin repercutir ningún coste adicional ni suscripciones a Metro de Barcelona:
 - Mantenimiento preventivo: ejecutar las tareas de mantenimiento preventivo establecidas en el Plan de Mantenimiento Preventivo, necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de todo el sistema, incluidas las inspecciones/revisiones *in situ* de los componentes físicos de los equipos embarcados. En cuanto a todo el *software* (aplicaciones cliente y servidora, API de integración, firmware de la unidad embarcada y de los propios modelos/algoritmos de detección), el adjudicatario llevará a cabo las tareas de actualización correspondientes y la aplicación de parches de seguridad.
 - Reparaciones: sustituir o reparar, con sus propios medios (mano de obra y materiales), cualquier componente que presente defectos de fabricación o instalación. La garantía incluirá un acuerdo de servicio con la opción de recogida y devolución o de reparación *in situ*. Tendrá también la consideración de defecto que requiera su reparación, incluida en la garantía, toda aquella casuística inherente al sistema —es decir, no motivada por cambios externos— que resulte en una degradación significativa de las prestaciones del sistema. Concretamente, cuando el sistema se desvíe de los resultados alcanzados previos a la puesta en servicio, en cuanto a la fiabilidad (por ejemplo, precisión de las mediciones, funciones de diagnóstico y detección de alarmas, tasas de falsos positivos y falsos negativos, etc.) o disponibilidad del sistema.
3. A los equipos electrónicos que compongan el sistema, tales como sensores, fuentes de alimentación, etc., se les aplicará una garantía legal de 2 años desde el momento de su puesta en servicio. Esta garantía cubre los defectos de fabricación que se manifiesten durante este período, siempre que no hayan sido causados por un mal uso o una negligencia por parte del usuario.
4. En caso de que la aplicación servidora, incluidos todos los componentes necesarios tanto para el procesamiento centralizado como para las bases de datos, cliente de oficina y API, esté alojada en un servidor en la nube, el adjudicatario deberá administrar y garantizar la disponibilidad del sistema sin coste adicional para FMB durante todo el período de garantía.
5. A pesar de la preferencia por tecnologías abiertas, en caso de que el adjudicatario opte por el uso de tecnologías propietarias sujetas a licencia, tanto en la implementación de la aplicación servidora (IT) como para los equipos de campo embarcados, el adjudicatario deberá suministrar las licencias con una vigencia mínima de todo el período de garantía.

6. Durante el período de garantía, tanto las tarjetas SIM 4G/5G como los correspondientes contratos de datos pertinentes para la operación nominal del sistema correrán a cargo del adjudicatario, sin repercutir su coste en Ferrocarril Metropolità de Barcelona.
7. Quedarán fuera del alcance de la garantía todas las actuaciones correctivas que estén inducidas por un mal uso del sistema o por daños fortuitos ocasionados sobre los equipos por elementos ajenos al propio sistema suministrado por el adjudicatario.

ANEXO: DISPOSITIVO DE AUSCULTACIÓN GEOMÉTRICA EMBARCADO**1 Alcance**

El objetivo de esta licitación es el suministro, instalación y puesta en servicio de un dispositivo de auscultación geométrica de la vía embarcado en tren del vmRail de Virtualmechanics S.L. o un equipo equivalente con las mismas características técnicas y funcionales, que identificaremos como vmRail en el marco del presente pliego. Este equipo mide parámetros fundamentales de la geometría de la vía (ancho, alineación, nivelación, peralte, alabeo) y el desgaste ondulatorio. Al estar embarcado en un tren de servicio, realiza estas funciones en condiciones reales de utilización de la vía; es decir, circulando a la velocidad comercial y con carga, lo cual permite detectar irregularidades geométricas y corrugaciones no deseadas que empeoran gradualmente la seguridad y el confort de la marcha de los trenes. Sin embargo, estos defectos de la vía son también inductores, por la fatiga y el estrés mecánico, del desgaste acentuado de ruedas, suspensiones y otros componentes del material móvil. El sistema embarcado realiza las mediciones de forma no invasiva, de forma que el tren equipado puede circular sin tener que prever ninguna restricción operativa especial.

La instalación permanente en un tren de servicio permite efectuar una medición continua de dichos parámetros. Estos datos posibilitan la detección precoz de la aparición y evolución de los defectos, lo que permite optimizar la planificación de los trabajos preventivos y correctivos para un mantenimiento óptimo de la vía. Asimismo, permite establecer un modelo de mantenimiento predictivo basado en datos, logrando una mayor eficiencia de las intervenciones al anticipar las actuaciones correctivas antes de que se produzcan incidencias de mayor degradación, que acaban empleando más recursos y, en algunas ocasiones, pueden provocar afectaciones mayores al servicio comercial, con operación degradada (cortes, servicios parciales, limitaciones, etc.). La anticipación de las actuaciones correctivas ante los primeros síntomas detectados por este sistema de auscultación también contribuye a reducir el impacto que las incidencias de vía puedan ocasionar en la degradación prematura de las ruedas del tren y, en su conjunto, contribuye también a mermar los niveles de vibración inducidos en la infraestructura y, por tanto, reduce proactivamente —en vez de reactivamente— las quejas de los vecinos por las vibraciones en sus viviendas. Este sistema también permite evaluar de forma inmediata (apenas unas horas después) si las actuaciones nocturnas de mantenimiento en vía han preservado los parámetros de geometría y, eventualmente, programar más actuaciones sobre la base de criterios objetivos.

2 Variables medidas

El equipo vmRail medirá los siguientes parámetros de la geometría de vía:

- Ancho de vía
- Alineación en carril izquierdo y derecho
- Nivelación en carril izquierdo y derecho
- Peralte
- Alabeo
- Desgaste ondulatorio en cuatro longitudes de onda

Todas estas magnitudes se medirán con referencia a una base de tiempo común, al posicionamiento del tren relativo al inicio de la adquisición, y respecto a los puntos kilométricos absolutos. Esta última referencia requerirá, además, que el sistema integre los parámetros de diseño de la vía georreferenciados. El sistema también deberá compartir datos con la plataforma de monitorización de trenes Digital Train, instalada en el grueso de la flota de trenes. Además, deberá integrarse con la plataforma de digitalización de activos DAVANA, ambas creadas por Smart Motors.

El equipo de auscultación deberá ser ajustable al ancho internacional (1435 mm) o al antiguo ancho ibérico (1674 mm).

El sistema también permitirá el envío bajo demanda de las mediciones en crudo —es decir, sin procesamiento— de los distintos sensores, tanto de los ópticos (secuencia de imágenes) como de los inerciales y de la velocidad extraída del odómetro, que intervengan en el proceso de cálculo y estimación de la geometría de vía y corrugación.

El equipo también incorporará una cámara de visión que ofrecerá una vista azimutal de la vía grabando una secuencia continua de vídeo georreferenciada y síncrona con los demás sensores, de forma que complemente la información de estos últimos con la información visual del contexto que ofrece la cámara.

En términos generales, el grueso del procesamiento de los datos se llevará a cabo en los propios equipos embarcados, pudiéndose realizar un posprocesamiento adicional en la nube.

3 Normativas y resoluciones de las mediciones

Los dispositivos y el sistema vmRail, o sistema equivalente suministrado, deberán cumplir las siguientes normativas:

- Geometría de vía: UNE-EN 13848
- Corrugación: UNE-EN 13231
- Desgaste cabeza de carril: UNE-EN 13674
- Deberá tomar las mediciones de la geometría de la vía hasta una velocidad máxima de 80 km/h del vehículo en el que se encuentre instalado.
- Todas las mediciones de geometría de la vía, posición del tren y desgaste de la cabeza de carril deberán tener una resolución temporal máxima de 4 milisegundos (250 Hz).
- Cámaras de alta velocidad de precisión submilimétrica a una frecuencia de 250 fotogramas por segundo para una correcta medición de las tolerancias de desgaste. No aplica a la cámara de visión azimutal.
- Resolución horizontal teórica en la reconstrucción de la posición horizontal de la cabeza del carril de 0.0972 mm.
- El sistema de medición inercial tendrá un rango de frecuencia de adquisición de hasta 800 Hz y los siguientes rangos de medición:

IMU Specifications	ACCELEROMETER	GYROSCOPE	MAGNETOMETER
Range	±16 g	±2,000°/s	±2.5 Gauss
In-Run Bias Stability (Allan Variance)	< 0.04 mg	< 10°/hr (5-7°/hr typ.)	-
Non-Linearity	< 0.5 % FS	100 ppm	< 0.1 % FS
Noise Density	0.14 mg/√Hz	0.0035 °/s /√Hz	140 μGauss/√Hz
Bandwidth	260 Hz	256 Hz	200 Hz
Cross-Axis Sensitivity	±0.05 °	< 0.05 °	±0.05 °

4 Descripción de los dispositivos embarcados

El sistema constará de dos tipos de módulos de *hardware* que se podrán posicionar de forma independiente:

- Módulo de percepción: se trata de dos equipos situados uno sobre cada carril. Estos módulos cuentan con los sensores necesarios para, sin contacto directo con el carril, captar las mediciones que resulten en las estimaciones de la geometría de la vía y el desgaste de la cabeza del carril.
- Módulo de adquisición y procesamiento de datos: contiene la electrónica encargada de adquirir y procesar las mediciones de los sensores para obtener los resultados de geometría de vía, desgaste y otros. También contiene la electrónica que controla la alimentación de todos los dispositivos de vmRail.
- Módulo de visión azimutal que, a pesar de no intervenir en las mediciones de la geometría y corrugación, ofrece información visual de contexto de la vía.

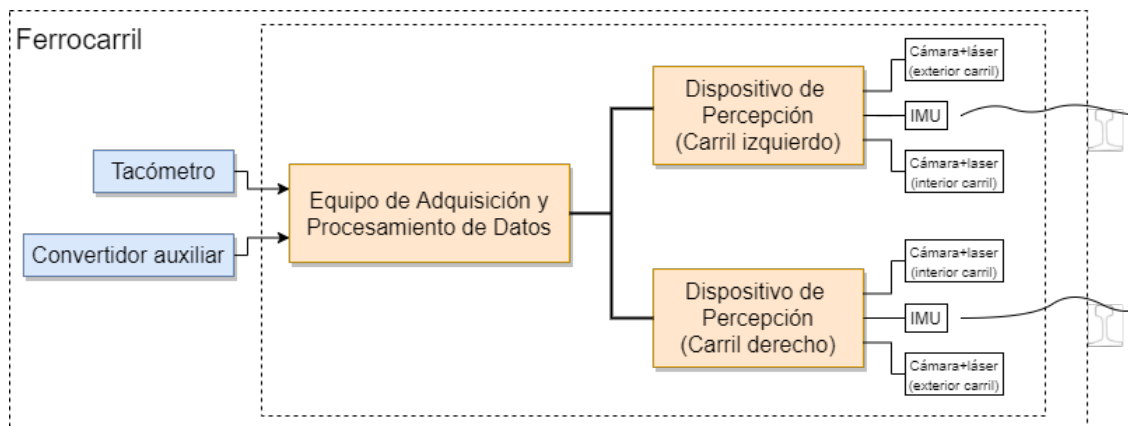
Ambos módulos de percepción se conectarán al módulo de adquisición y procesamiento de datos mediante cables protegidos por tubos corrugados que les conferirán protección y flexibilidad para su anclaje y conducción. El enrutamiento de los cables se replanteará con el proveedor/mantenedor de FMB, para que dicho enrutamiento no interfiera con otras rutinas de mantenimiento o no se vea sometido a tracciones mecánicas que puedan dañarlo (giros, movimientos relativos bogie-caja, etc.).

Todas las conexiones con los equipos fijados al bogie se efectuarán con conectores Harting, a fin de facilitar la desconexión rápida de los equipos para aquellas acciones de mantenimiento que lo requieran (torneado, cambio de bogies, etc.).

Los dispositivos vmRail instalados en el tren se conectarán a los sistemas del tren en dos puntos:

- Alimentación. El equipo vmRail embarcado se conectará a la acometida de alimentación auxiliar embarcada.
- Tacómetro. Para obtener la odometría más precisa posible, el equipo vmRail deberá poder conectarse a alguno de los generadores de pulsos de las ruedas del coche en el que se encuentra. El sistema también podrá conectarse a otros subsistemas que proporcionen información sobre la posición del vehículo a lo largo de la vía, como el PC embarcado de Digital Train.

A continuación, se muestra un esquema básico de los módulos del sistema instalado y su integración con el vehículo ferroviario:



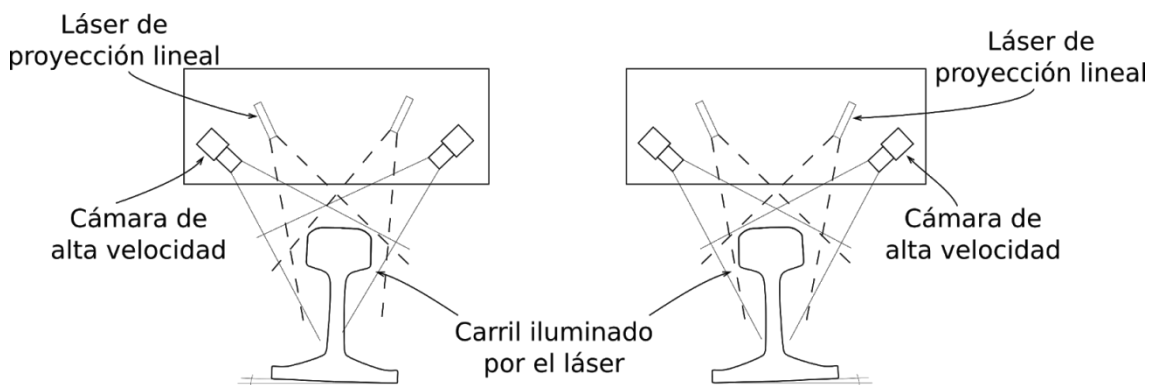
El proveedor realizará los ajustes mecánicos necesarios a los diferentes equipos embarcados para acomodarlos a las especificidades del tren en el que se instale. Todo este proceso de ajuste se contrastará con el proveedor del material rodante, facilitándole toda la documentación requerida (planos de instalación mecánica y eléctrica, simulaciones, etc.) para la revisión o eventual integración con la documentación del tren.

4.1 Dispositivos de percepción

Cada uno de estos dispositivos contiene un sistema de visión completo. Los sistemas de visión estarán formados por dos cámaras de alta velocidad y dos láseres de proyección lineal de alta robustez y estabilidad. Acompañando al sistema de visión, cada módulo de percepción incluirá una unidad de medición inercial (IMU MEMS) de altas prestaciones. El módulo estará anclado en el bogie del vehículo ferroviario o en la caja.

4.1.1 Sistema de visión con luz estructurada

Los sistemas visuales con luz estructurada (láser) son ampliamente utilizados en la industria debido a su probada eficacia para reconstruir en 3D la envolvente de cualquier objeto. A continuación, se muestra la configuración de los elementos del sistema de visión:



El sistema de visión dotado con doble cámara por carril deberá permitir la reconstrucción de la parte interna y externa de la cabeza del carril. La parte externa se utilizará para una reconstrucción más precisa de la geometría de la vía, por dos razones:

- La zona exterior sufre menos desgaste.
- La parte interior puede quedar cubierta por la grasa utilizada para evitar el desgaste de las ruedas en curvas debido al contacto rueda-carril.

La banda de rodadura del carril se encuentra en la cara interna de este y es, por lo tanto, la que experimenta un mayor desgaste y sobre la que habrá que tomar las mediciones efectivas. En cualquier caso, el dispositivo vmRail de medición permitirá obtener la curva completa de la cabeza del perfil del carril.

Se tomarán las imágenes del carril con un bajo tiempo de exposición para que los únicos puntos iluminados en la imagen sean los proyectados por el láser, con los siguientes objetivos:

- Reducir la complejidad de los algoritmos de procesamiento de imagen aplicados y reducir el volumen de datos tratados en etapas posteriores.
- Disminuir el efecto de difuminado del carril producido por la velocidad relativa del carril respecto al ferrocarril (*motion blur*).

4.1.2 Sistema de apagado automático del láser

El dispositivo vmRail provisto dispondrá de un sistema automático de apagado de los láseres de proyección, de forma que con el tren parado se apague automáticamente y en ningún caso pueda suponer un riesgo para el personal de mantenimiento.

El sistema funcionará de la siguiente forma:

- Encendido automático: Se activa el encendido automático si el sistema está realizando una medición y si el tren está en movimiento (se reciben pulsos del tacogenerador).
- Apagado automático: Se activa el apagado automático si el sistema no está midiendo o si el vehículo está detenido durante al menos 10 segundos (no se reciben pulsos del tacogenerador durante 10 segundos).

4.1.3 Medición inercial

Los dispositivos de percepción para cada carril también dispondrán de una unidad de medición inercial (IMU o Inertial Measurement Unit), que integrará acelerómetros, giroscopios y magnetómetro.

El sistema de medición inercial incluido será capaz de medir en tres ejes aceleraciones lineales, velocidades angulares y la intensidad del campo magnético. Deberán seguirse las especificaciones de la norma UNE-EN-13484-1 (2020) en cuanto a los rangos de frecuencia y medición de las aceleraciones en los diferentes puntos del vehículo:

E.3 Rango de frecuencia

- C1 – aceleración vertical de la caja de cojinetes	0 a 500 Hz
- C2 – aceleración del bogie	0 a 100 Hz
- C3 – aceleración de la caja	0 a 50 Hz

E.4 Rango de medición

- C1 – aceleración vertical de la caja de cojinetes	$\pm 1\,000\text{ m/s}^2$
- C2 – aceleración del bogie	$\pm 50\text{ m/s}^2$
- C3 – aceleración de la caja	$\pm 20\text{ m/s}^2$

Los datos de estos sistemas podrán ser enviados bajo demanda de forma puntual.

4.1.4 Módulo de adquisición y procesamiento de datos

La función principal de este módulo será el procesamiento de los datos captados por los sensores ópticos e inerciales a fin de obtener los parámetros de la geometría de vía y los niveles de corrugación en las cuatro bandas de frecuencias espaciales en pseudo-tiempo real y sin requerir ningún otro procesamiento adicional fuera del equipo. Se podrá parametrizar el sistema para determinar el número de vueltas en las que efectuará la captura continua de datos para, justo después, iniciar el procesamiento de dichos datos, obteniéndose así los valores de geometría y desgaste contextualizados en el tiempo y georreferenciados. Este proceso en pseudo-tiempo real comportará un tiempo proporcional al número de datos captados. Una vez obtenidos, los resultados estarán disponibles de inmediato para su acceso a través de una interfaz programática (API). La determinación de las alarmas por valores fuera de tolerancia se tratará en la plataforma externa de gestión de activos de DAVANA.

Este módulo constará de:

- Toda la electrónica de adquisición y procesamiento de datos
- Memoria y elementos de almacenamiento con la capacidad necesaria para conservar una gran cantidad de mediciones tomadas y resultados elaborados.

Dispondrá de los siguientes elementos:

- Conversor de potencia. Permite conectar el dispositivo vmRail suministrado a la alimentación proporcionada por el tren (con aislamiento galvánico mínimo de 1500 V), conforme a la norma EN50155 relativa a ferrocarriles. El rango de tensiones de entrada es de 67 a 143 VDC.

- Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) con batería, que regulará las tensiones de alimentación del sistema vmRail suministrado y seguirá funcionando con normalidad en caso de pérdidas puntuales de alimentación.
- Unidad de adquisición de datos. Adquiere los datos de todos los sensores del sistema y realiza la sincronización temporal de todos ellos.
- Unidad de procesamiento de imágenes (FPGA). Ejecuta el preprocesado de las imágenes de los sistemas de visión.
- Unidad de procesamiento de datos. Concentra todas las mediciones del sistema y ejecuta los algoritmos que reconstruyen la geometría de vía y el desgaste. Dispone de una memoria que permite almacenar una gran cantidad de datos y resultados. Esta unidad permite comunicarse con equipos en el exterior.

4.1.5 Cámara de visión azimutal

La función principal de esta cámara es la grabación continua de una secuencia de vídeo de la visión azimutal de la vía desde la perspectiva del bogie. Las características de la cámara, en cuanto a fotogramas por segundo, sensibilidad, óptica, distancia focal, etc., se ajustarán tanto a su ubicación en el bogie como a las condiciones de iluminación existentes con el fin de grabar las imágenes en las condiciones nominales de explotación, hasta 80 km/h.

Las imágenes se podrán descargar mediante una API, por fecha y rango de puntos kilométricos. Se les aplicará un procesamiento elemental, para poderlas georreferenciar y extraer las secuencias de vídeo, de forma que puedan sincronizarse y etiquetarse con los demás sensores del equipo vmRail suministrado (geometría, corrugación, inerciales y velocidad). A pesar de que el procesamiento avanzado de las imágenes no esté incluido en el alcance de la licitación, el equipo *hardware* embarcado tendrá capacidad computacional suficiente para poder realizar un tratamiento avanzado de dichas imágenes en un futuro.

4.2 Instalación de los equipos en el tren

Será objeto de esta licitación la instalación de los equipos en los trenes.

Para efectuar una adecuada instalación de los dispositivos en los trenes donde se vayan a instalar deberán respetarse las siguientes condiciones:

- Se efectuará una *checklist* de comprobaciones que deben ejecutarse para validar la instalación de los equipos en el tren, detallando comprobaciones de equipos, pares de apriete, verificaciones de cableado, etc.
- Se efectuará una calibración de todos los dispositivos montados que lo requieran.

4.2.1 Cableado

Los cableados exteriores entre los distintos dispositivos del sistema vmRail dispondrán de las siguientes características:

- El cableado deberá poder montarse y desmontarse con facilidad, sin pérdida de estanqueidad o robustez, gracias al uso de conectores Harting o similares.
- Todo el cableado estará protegido mediante tubos corrugados de uso exterior.
- Todos los corrugados que lleven conexiones de señal (digital o analógico) estarán apantallados.
- Los cables utilizados serán de alta calidad, con doble apantallamiento interno (por ejemplo, los cables Ethernet SFTP).
- Puntos de conexión de alimentación.
- Punto de conexión con el tacómetro.

4.2.2 Odometría

Todas las medidas obtenidas están asociadas a un punto kilométrico. Para obtener esta referencia de posición con precisión, el dispositivo vmRail suministrado podrá conectarse a alguno de los tacómetros del vehículo o al PC de Digital Train.

La conexión con el tacómetro tendrá los siguientes requisitos:

- Aislamiento. La señal de pulsos del tacómetro se conectará a la entrada de un optoacoplador (mínimo 500 V de aislamiento) a través de una resistencia limitadora de corriente. Los únicos elementos conectados directamente al optoacoplador serán la resistencia limitadora de corriente y el micro-LED del optoacoplador. El resto del sistema vmRail suministrado estará eléctricamente aislado.
- Se proporcionará la alimentación al optoacoplador, si requiere ser alimentado, siempre que se encuentre en el rango de 0 a 24 VDC.

El dispositivo vmRail suministrado deberá corregir los posibles errores debidos al desgaste de las ruedas y del deslizamiento de estas sobre los carriles, integrando información de los planos de construcción de vía en los algoritmos del sistema. En caso de modificaciones en la vía, el dispositivo vmRail suministrado deberá permitir la actualización de los planos, entregándose esta información a su proveedor en un archivo con formato adecuado.

4.2.3 Requisitos de montaje y anclaje de los dispositivos

Los dispositivos suministrados deberán ser solidarios al vehículo ferroviario. El equipo de diseño mecánico del proveedor diseñará un sistema de anclaje específico para la forma y el espacio disponible en la parte inferior del vehículo.

Todos los sistemas de anclaje diseñados deberán simularse mediante herramientas de simulación mecánica virtual para asegurar que todos los elementos mecánicos (platinas, perfiles, pernos, etc.) pueden soportar con total garantía las tensiones que experimenta el vehículo. Tanto la calidad de los pernos como su par de apriete se calcularán para garantizar la integridad mecánica con un margen de seguridad.

4.2.4 Acceso a los datos y comunicación con la plataforma de monitorización de metro DAVANA

Las comunicaciones de los equipos se integrarán en el router FW/VPN/4G/WIFI descrito en el apartado 3.5 ("Trenes auscultadores"), lo cual permitirá enviar los datos procesados (y, eventualmente, en crudo bajo demanda) a la nube del proveedor. Dispondrá también de un puerto Ethernet para, en caso de que

el tren disponga de un sistema de conectividad centralizada, se utilice de forma prioritaria por encima del 5G. En este caso, el sistema de conectividad móvil actuará como respaldo frente a la indisponibilidad de las comunicaciones por Ethernet.

Se podrán obtener todas las mediciones y datos obtenidos mediante conexión a una interfaz programática (API) expuesta en una URL pública. Adicionalmente, también serán accesibles localmente mediante conexión Ethernet o podrán extraerse mediante conexión USB.

Los archivos de datos se generarán en formato binario para ahorrar espacio en disco y para aumentar la velocidad de carga de datos en la memoria RAM.

Es también objeto de esta licitación la entrega de los siguientes elementos:

- La documentación que incluya la información detallada y completa sobre el formato de los archivos generados por el sistema suministrado y cómo reconstruir la información. Deberá incluirse toda la información sobre orden de los datos, tipos, significado, etc.
- Una librería para la conversión de estos archivos a formato .csv o .txt en lenguaje Python o C++.
- Los datos de mediciones de geometría de la vía y desgaste serán transmitidos a la plataforma DAVANA de Smart Motors®. La pasarela entre ambos sistemas no es objeto de esta licitación.
- Disponibilidad de informes diarios (HTML y datos en crudo CSV de los distintos sensores) en un directorio en la nube. Se mantendrán los datos del último mes, así como un informe mensual y una captura de datos CSV de los últimos 24 meses.

5 Instalación de los equipos embarcados

5.1 Pruebas y validación del equipo instalado

En el proceso de instalación del equipo, también dentro del alcance de esta licitación, deberá cumplirse estrictamente la normativa vigente de seguridad que sea de aplicación en las instalaciones de la red de metro y, muy concretamente, en los talleres de material móvil donde se llevará a cabo el montaje. Entre otros, pero especialmente durante la fase de instalación, deberá cumplirse el procedimiento P104 “Normas para trabajos en los talleres del Servicio de Material Móvil”. En cualquier caso, la instalación deberá coordinarse con el Servicio de Material Móvil de FMB para armonizarla con la planificación de las intervenciones de mantenimiento que requieran la retirada del tren a los talleres.

Como cualquier actuación de una empresa externa en las instalaciones de FMB, requerirá la formalización del proceso preventivo de coordinación de actividades empresariales para garantizar la seguridad y salud de los trabajadores que intervengan.

5.2 Pruebas y validación del equipo instalado

Previamente al inicio de las pruebas de validación, el adjudicatario deberá haber incluido una caracterización de referencia del trazado y geometría de cada vía en el sistema embarcado para que pueda realizar los ajustes y sincronismos necesarios. A tal efecto, FMB le facilitará la información relativa a las características de diseño de la vía (geometría) y la auscultación Krab más reciente.

La instalación de los equipos culminará con un conjunto de pruebas en las que el sistema deberá demostrar la calidad de los datos, de acuerdo con las normas mencionadas (UNE-EN 13848, UNE-EN 13231 y UNE-EN 13674), así como la robustez y disponibilidad de todos los equipos que lo componen. Para ello, el proveedor elaborará un conjunto de indicadores básicos sobre la calidad de los datos y disponibilidad de sus equipos, que se recogerán en un informe diario automatizado (HTML + CSV en crudo). Durante un mes se revisarán semanalmente los resultados del informe y, en caso de que se encuentren dentro de los límites acordados, se dará por finalizada la instalación. El detalle de este proceso se compilará en el documento de protocolo de pruebas que el proveedor preparará antes de la instalación del equipo y que requerirá la aprobación explícita del contratante FMB.

6 Condiciones específicas de la garantía

Una vez finalizada y aceptada la instalación del sistema en el tren de acuerdo con las condiciones del punto anterior y entregada toda la documentación definida en el punto de “Otras obligaciones del adjudicatario”, se iniciará el período de aplicación del plazo de garantía de 12 meses.

Durante este período el adjudicatario realizará las tareas de mantenimiento preventivo del equipo, tanto de los componentes físicos como de los ajustes en el algoritmo y las eventuales calibraciones necesarias, con el fin de garantizar su operatividad y rendimiento en las mismas condiciones que se aprobaron en el período de validación. Para ello, el adjudicatario seguirá elaborando los informes automatizados de disponibilidad y calidad de los datos, que se revisarán con una periodicidad máxima de 3 meses, con la posibilidad de acortarla en caso de incidencia en los equipos.

Durante el plazo de garantía el adjudicatario será el responsable de reemplazar, con mano de obra y materiales, los componentes defectuosos o que se hayan dañado por defectos en el diseño o instalación.

6.1 Otras obligaciones específicas del adjudicatario

Aparte de la realización de las tareas necesarias descritas en los puntos anteriores, las siguientes también son obligaciones del adjudicatario:

- Formación y capacitación del personal asignado a la realización de estas tareas, en caso de que estos equipos no correspondan a los utilizados por FMB en otros trenes auscultadores en servicio.
- Vigilancia de la obsolescencia de los equipos y componentes de los subsistemas que conforman el sistema.
- Entrega de la documentación de los equipos, en concreto:
 - Esquemas eléctricos, planos mecánicos e información sobre las características físicas de los componentes (peso, dimensiones, etc.).
 - Informes de simulación y análisis de elementos finitos del diseño mecánico de los soportes fijados en el bogie.
 - Listado desglosado de materiales y componentes (BOM o Bill of Materials) necesarios para el montaje y su eventual mantenimiento.

- Dossier descriptivo de la instalación efectuada con imágenes que identifiquen los principales componentes y puntos de fijación y conexión, a efectos prácticos de facilitar el desmontaje y montaje de los equipos cuando deba retirarse el bogie por tareas de mantenimiento.
- Manual de mantenimiento en el que se incluyan las actuaciones básicas preventivas y *troubleshooting* en caso de fallo.
- Registro de los parámetros de configuración y versiones de los *software* instaladas. Registro de cambios (*changelog*) de las modificaciones relevantes efectuadas tanto en el *hardware* como en el *software*.
- Descripción de los tipos de datos resultantes (magnitudes, precisión, frecuencias de actualización, etc.) y de las interfaces API de acceso a los datos.
- Protocolos de pruebas e informes de calibración.

ANEXO: SONÓMETRO EMBARCADO

1 Objeto

El objeto de este pliego es el suministro e instalación de un (1) equipo de monitorización de la presión acústica embarcado en tren.

Con la intención de poder caracterizar y evaluar a diario el estado de la infraestructura y la vía en condiciones reales de utilización, se definió la estrategia de incorporar trenes equipados con instrumentación diversa y singular para recoger información en sus circulaciones en servicio, dando lugar a lo que se ha denominado “tren auscultador”.

La evaluación acústica del estado de la infraestructura y la vía y su impacto en el ruido generado permitirá:

- Monitorizar la presión acústica en tiempo real a lo largo de toda la línea de metro.
- Realizar comparativas entre el estado de la infraestructura de la vía y el ruido recogido, identificando posibles correlaciones y puntos críticos.
- Llevar a cabo análisis frecuenciales para determinar las fuentes de ruido y sus características y poder establecer patrones de degradaciones y defectos.
- Complementar la información disponible proveniente de otros dispositivos/sensores con datos acústicos, ofreciendo una visión más completa y detallada del estado de la infraestructura de las líneas de metro.
- Optimizar el mantenimiento: una planificación más eficiente de las intervenciones de mantenimiento basadas en datos reales y detallados.
- Mejorar la seguridad: identificación de puntos de la vía que puedan requerir mantenimiento preventivo para evitar potenciales problemas futuros.
- Evaluar de forma objetiva el resultado de las acciones de mejora realizadas.
- Aumentar el confort de los pasajeros, como resultado de aplicar medidas para reducir el ruido y las vibraciones percibidas durante el trayecto.

- Disminuir el riesgo para los trabajadores más expuestos a ruidos al tener mayor visibilidad del nivel acústico y su evolución.

Todo esto contribuirá a garantizar un servicio de metro más seguro, confortable y eficiente, ya que permitirá una gestión más proactiva e informada de la infraestructura, contribuyendo a la mejora continua del servicio ofrecido a los usuarios.

2 Alcance

El sistema de monitorización de la presión acústica requiere de los siguientes equipamientos y actividades:

- Suministro e instalación de un (1) sensor de audio modelo CESVA TA150 con módulos de análisis de 1/3 de octava y captura de audio en (1) un tren.
- Desarrollo de una interfaz entre el sensor de audio y el equipo embarcado Digital Train de Smart Motors para llevar a cabo el preprocesado y el envío de la información de audio a los servidores de la plataforma DAVANA vía el DTE (equipo terminal de datos).
- Se entregará la documentación con la información técnica de las actividades realizadas, incluyendo los esquemas de la instalación efectuada en los trenes; la descripción y el detalle de la interfaz desarrollada entre el DTE y el sensor de audio, y los manuales de funcionamiento y mantenimiento de los sensores de audiofrecuencia.

3 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas

A partir del alcance anteriormente expuesto, en este apartado se enumeran las tareas que deberán efectuarse, detallando sus principales especificaciones funcionales y técnicas.

3.1 Sensores de audio

El sensor de audio que deberá utilizarse para esta aplicación es el sensor espectral para la medición de ruido CESVA TA150, con los módulos de análisis de 1/3 de octava y captura de audio con las siguientes funcionalidades y características técnicas:

Medición acústica según la norma IEC 61672-1.

Funciones acústicas medidas. Medición continua simultánea 24 horas al día y 7 días a la semana de los niveles de presión acústica máximos de pico, y equivalente con ponderación frecuencial A, C y Z y ponderación temporal F, S e I:

- Niveles de pico L_{CpeakT} y L_{ZpeakT} , con un tiempo programable entre 1 segundo y 60 minutos.
- Niveles máximos L_{AFmaxT} , L_{ASmaxT} y L_{AlmaxT} , con un tiempo programable entre 1 segundo y 60 minutos.
- Niveles equivalentes L_{AeqT} , L_{CeqT} , L_{ZeqT} y L_{AleqT} , con un tiempo programable entre 1 segundo y 60 minutos.
- Niveles percentiles L_{10} , L_{50} y L_{90} .
- Niveles en banda de 1/3 de octava para el intervalo de frecuencias desde 6,3 Hz hasta 20 kHz.

Precisión según IEC 61672-1, clase 1:

- L_F , L_S , L_I , L_t y L_T :
 - Margen de medición (sin escalas): de 25,5 a 137 dBA.
 - Margen de linealidad a 1 kHz: de 30,5 a 137 dBA.
- L_{Cpeak} :
 - Margen de medición (sin escalas): de 29,1 a 140 dBC.
 - Margen de linealidad a 1 kHz: de 55,0 a 140 dBC.

Verificación con calibrador acústico (IEC 60942).

Características del micrófono:

- Tipo: con condensador de 1/2 pulgada.
- Polarización: 0 V
- Sensibilidad nominal: 16 mV/Pa

Alimentación:

- VDC 5-12 V.
- PoE (Power over Ethernet).

Conectividad:

- Ethernet (Rj45), serie (opcional) y Wifi.
- Protocolos de transmisión: HTTP, HTTPS, MQTT/TLP y MQTT/TLS.
- Dirección IP: Dinámica (DHCP) y estática.
- Formato: Sentilo, JSON, Ultralight 2.0.

Otras funcionalidades:

- Pantalla mini-OLED que muestre el nivel sonoro, el estado de las comunicaciones y la alimentación del sensor.
- Memoria volátil con capacidad de hasta 2 meses.
- Obtención de archivos de audio (formato MP3, FLAC o WAV) con automatismos (por nivel, tiempo o emergencia).

3.2 Interfaz entre el sensor de audio y el equipo Digital Train de Smart Motors embarcado en el tren

Se desarrollará (si es necesario, en caso de uso de equipos alternativos a los descritos) una interfaz bidireccional entre el sensor de audio y el equipo Digital Train embarcado (DTE) para etiquetar las muestras tomadas por el primero y, consecuentemente, permitir la localización del punto kilométrico en el que se ha efectuado cada medición. Seguidamente, el DTE deberá empaquetarlas con el resto de la información del tren y transmitir las por el módem 4G del citado Digital Train a los servidores en la nube de la plataforma DAVANA.

De igual forma, la selección de los ajustes de los niveles de lectura, filtros de tercio de octava o la recuperación de archivos se comunicará desde la interfaz de usuario de los *widgets* de la plataforma DAVANA al equipo Digital Train y, vía esta interfaz, al sensor de audio por su puerto Ethernet o serie.

4 Instalación del sensor de audio en los trenes

4.1 Instalación de los sensores de audio

Ubicación y conectividad

El sensor de audio se ubicará en el armario BT1 del coche motor MB2, compartiendo espacio con el PC industrial del sistema Digital Train o DTE. La conexión entre el sensor y el PC industrial se realizará mediante el correspondiente cable en función de la interfaz utilizada (Ethernet o serie).

Alimentación

La alimentación de los sensores se obtendrá del armario de alimentación del propio coche. A tal efecto, se instalará un térmico adicional y el circuito se etiquetará adecuadamente. A continuación, se conectará el circuito a un convertidor de tensión, que reducirá los 72 VDC proporcionados por el tren a una tensión de salida compatible con el rango de alimentación de los sensores de audio. Este convertidor se instalará adyacente al sensor de audio (armario BT1).

Cableado

- Tipo de cable: se utilizarán cables que cumplan los estándares ferroviarios más exigentes, como la norma EN45455, garantizando así una alta resistencia al fuego y a otros factores ambientales típicos del entorno ferroviario.
- Separación y apantallamiento: los cableados de alimentación, control y comunicaciones se separarán físicamente y se apantallarán para evitar interferencias electromagnéticas.
- Instalación: los cables se conducirán a través de canalizaciones específicas y se anclarán adecuadamente para evitar movimientos y tensiones que puedan dañarlos.
- Protección: los cables estarán protegidos contra vibraciones y otros factores mecánicos que puedan dañarlos durante el funcionamiento del tren.

Ubicación del micrófono

El micrófono se instalará dentro del armario del sensor, en una posición que permita captar el ruido exterior de forma óptima. Se propone ubicarlo cerca de la rejilla de ventilación (en caso de que exista) para garantizar una medición precisa del nivel de ruido exterior. Sin embargo, la ubicación definitiva se determinará durante la fase de pruebas del sistema.

4.2 Pruebas y validación

Se realizará un conjunto de pruebas para validar la captura de datos y todas las funcionalidades de los diferentes *widgets* afectados, especificadas en este documento técnico. El proveedor entregará un informe detallado de todas las pruebas realizadas.

5 Documentación específica

Como parte de esta licitación, el proveedor deberá entregar la siguiente documentación técnica:

- Esquemas de instalación: esquemas detallados de la instalación realizada en los trenes.
- Descripción de la interfaz: descripción detallada de la interfaz desarrollada entre el sistema Digital Train (DTE) y el sensor de audio.
- Manuales técnicos: manuales completos de uso y mantenimiento de los sensores de audiofrecuencia.

ANEXO: TERMÓMETRO DE CARRIL EMBARCADO

1 Objeto

El objeto de este pliego es el suministro e instalación de un (1) equipo de medición de temperatura de carril embarcado en el tren y el suministro y la correspondiente certificación del anclaje para la instalación a bordo de dicho equipo. El dispositivo permitirá medir de forma continua y sin contacto la temperatura del carril, y enviar esta información a la plataforma de monitorización de activos utilizada en Metro de Barcelona, que generará mapas térmicos en tiempo real de las líneas recorridas en la prestación del servicio comercial con pasajeros. Esta información será clave para identificar los tramos de vía con mayor gradiente térmico y, por tanto, más susceptibles a tensiones longitudinales que puedan provocar roturas de carril. Estas tensiones se inducen a los carriles soldados a causa de los cambios de temperatura, generando fuerzas de compresión o tracción. La detección precoz de estas zonas críticas y la monitorización continua de la temperatura permitirán optimizar las labores de inspección; implementar medidas proactivas puntuales, como el ajuste de los sistemas de ventilación en previsión de olas de frío, y liberar tensiones, reduciendo así el riesgo de roturas. Las roturas del carril en servicio ocasionan perturbaciones en la circulación de los trenes porque provocan falsas ocupaciones y, además, podrían llegar a provocar descarrilamientos.

Se suministrará:

- Una (1) unidad de termómetro de carril embarcado en el tren, formado por los siguientes elementos:
 - Placa de soporte
 - Caja de procesado
 - Equipo de medición
 - Cableados necesarios entre los elementos
- Un (1) kit de anclaje. Formado por los soportes y tornillos para fijar la placa de soporte y la caja de procesado en el tren de forma segura, con la documentación estructural necesaria para su validación y la instalación permanente de los equipos.
- Manuales de uso de mantenimiento y montaje y esquemas de los equipos.

2 Requisitos funcionales y especificaciones técnicas

2.1 Unidad de termómetro de carril para embarcar en los trenes

El termómetro de carril embarcado en los trenes debe cumplir con los siguientes requisitos funcionales y técnicos:

- Dispositivo sensor de infrarrojos con sistema de enfoque activo para la medición continua de la temperatura de la banda lateral del carril, compatible con velocidades comerciales de hasta 90 km/h.
- Las comunicaciones de los equipos deberán integrarse a través del router FW/VPN/4G/WIFI descrito en el apartado 3.5 ("Trenes auscultadores"), permitiendo el envío de datos en tiempo

real hacia la plataforma en la nube de monitorización de activos de FMB (plataforma DAVANA). El equipo transmitirá los datos de temperatura y una etiqueta temporal que permite al equipo Digital Train/plataforma DAVANA registrar información detallada de la temperatura del carril en cada punto kilométrico.

- Todo el sistema incorporará un mecanismo de reinicio automático del equipo en caso de bloqueo.
- Kit de anclaje. Incluida la documentación estructural necesaria para su validación y la instalación permanente de los equipos.
- Especificaciones técnicas:
 - Exactitud de la medición de la temperatura: $\pm 1\%$ de la lectura o $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (la que sea mayor)
 - Repetibilidad: $\pm 0,3\%$ o $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Emisividad: 0,1 - 1
 - Respuesta espectral: 8-14 μm .
 - Protección: IP65/IEC 60529 (NEMA-4)
 - Temperatura de operación, desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - Humedad del 10 % al 95 % a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin condensación.
 - Vibración y choque: IEC 60068-2-27 (choque mecánico): 50 G, 6 ms, 3 ejes
IEC 60068-2-26 (vibración sinusoidal): 3G, 11-200 Hz, 3 ejes
 - EMC, EN 61326-1:2013 industrial
 - Equipos integrados de comunicaciones o control conformes a la norma EN-50155.
 - Alimentación a partir de la tensión DC disponible en el vehículo (43-160 VDC): con adaptador DC/DC (conforme a la norma EN-50155), aislamiento entrada-salida superior a 2,000 VAC; filtros de entrada conformes a la norma EN 55032, clase B; EMI o interferencias electromagnéticas (emisiones no deseadas) conformes a la norma EN 50121-3-2 (Compatibilidad electromagnética para material rodante) y EMS o inmunidad electromagnética según la misma norma.

2.2 Kits de anclaje

Los kits de anclaje los forman el conjunto de soportes, piezas mecánicas y tornillos que fijan la unidad de termómetro al tren de forma segura. El punto de anclaje de la placa de soporte y el equipo de medición al tren está situado en el entorno del bogie para conseguir una visión óptima del carril. La caja de procesamiento se sitúa en un punto cercano, debajo de la caja del tren.

El suministro incluirá la documentación necesaria para la validación y la instalación del kit por parte del fabricante de los trenes (adaptados a sus características mecánicas), que es la que sigue:

- Esquemas e instrucciones de cableado y montaje.
- Documentación de análisis estructural (certificados). El adjudicatario deberá entregar la siguiente documentación técnica, resultado de un análisis estructural detallado mediante el

método de los elementos finitos, que demuestre la integridad estructural de los kits de anclaje en las condiciones de servicio a bordo del tren:

- Modelo de elementos finitos. Un modelo tridimensional detallado del kit de anclaje, incluyendo todas las piezas y conexiones, que represente fielmente la geometría y las propiedades del material.
- Análisis estático. Un análisis estático que determine las tensiones máximas equivalentes de Von Mises en cada componente del kit bajo las cargas máximas esperadas en servicio. Deberá verificarse que estas tensiones no superen el límite elástico del material utilizado.
- Análisis de fatiga. Un análisis de fatiga que evalúe la vida útil a fatiga de los componentes críticos del kit, considerando los ciclos de carga variables a los que estará sometido durante la vida útil del tren. Se aplicarán los criterios de fatiga establecidos en el eurocódigo correspondiente, verificando que las tensiones alternantes y medias no superen los límites admisibles.
- Informe detallado. Un informe técnico que presente los resultados de los análisis, con los siguientes elementos:
 - Geometría del modelo y propiedades de los materiales.
 - Condiciones de contorno y cargas aplicadas.
 - Tensiones máximas y mínimas en cada componente.
 - Factores de seguridad utilizados.
 - Comparativa de resultados obtenidos con los criterios de diseño establecidos.
 - Conclusiones sobre la adecuación del diseño del kit de anclaje.

3 Pruebas y validación

Se realizará un conjunto de pruebas para validar la captura de datos y todas las funcionalidades de los diferentes *widgets* afectados, especificadas en este documento técnico. El proveedor entregará un informe detallado de todas las pruebas realizadas.

4 Documentación específica

Como parte de esta licitación, el proveedor deberá entregar la siguiente documentación técnica:

- Esquemas de instalación. Esquemas detallados de la instalación realizada en los trenes.
- Descripción de la interfaz (en su caso). Descripción detallada de la interfaz desarrollada entre el sistema Digital Train (DTE) y el sensor de temperatura.
- Manuales técnicos. Manuales completos de uso y mantenimiento de los sensores de audiofrecuencia.