

WHITEPAPER TÉCNICO

Monitorización predictiva no intrusiva para material rodante ferroviario

Arquitectura del sistema, sensórica MEMS y motor de diagnóstico residual basado en filtro de Kalman extendido para la detección temprana de anomalías en bogies, puertas y rodamientos.

Documento	IN-SIGHT-WP-001 · Versión pública 1.0
Fecha	Junio 2026
Organización	Ingérop España — División de Transportes (T3)
Programa	IN³ Season IV — Ingérop Incube vos Innovations
Audiencia	Ingenieros de flota, responsables de mantenimiento, direcciones técnicas

1. El problema: la brecha de digitalización

Aproximadamente el 40–50% de la flota ferroviaria europea de pasajeros se encuentra en la franja de vida media de 15 a 30 años: vehículos plenamente operativos cuya garantía OEM ha expirado y que, en su mayoría, carecen de un sistema TCMS moderno capaz de generar datos de diagnóstico. Para estos activos no existe telemetría nativa: el operador mantiene a ciegas, alternando mantenimiento preventivo por calendario —que sustituye componentes sanos— con mantenimiento correctivo tras el fallo, cuyo coste de indisponibilidad puede alcanzar los 15.000 € por hora de servicio perdido.

IN-SIGHT cierra esa brecha con una premisa de diseño radical: **no intrusividad total**. El sistema captura los signos vitales del vehículo —vibración, firma acústica, temperatura, posición y dinámica— mediante pods de sensores externos, sin conectarse a ningún bus de datos del vehículo (MVB, CANbus, Ethernet vehicular), sin acceder al TCMS y sin modificar ninguna certificación de seguridad funcional.

Principio de no intrusividad

El kit IN-SIGHT no se conecta a ningún sistema del vehículo. Se instala como equipamiento embarcado independiente, con alimentación propia y comunicación celular dedicada. Esto elimina el principal bloqueante regulatorio y comercial de las soluciones de monitorización tradicionales, y hace al sistema agnóstico al fabricante: funciona sobre cualquier flota, de cualquier OEM, de cualquier edad.

2. Arquitectura de tres capas

El sistema se estructura en tres capas funcionales desacopladas, comunicadas por protocolos estándar. Cada capa puede evolucionar de forma independiente sin afectar al resto.

Capa	Componentes	Función	Tecnología
1 — Borde	Pod A (bogie, ×2) · Pod B (puertas, ×4) · Gateway IoT Edge	Captura multi-física, extracción de características local (FFT, RMS, envelope), buffer ante pérdida de cobertura	MEMS COTS + Raspberry Pi CM5 + Azure IoT Edge
2 — Transporte	Módulo celular 4G + eSIM · backup WiFi en depósito	Uplink seguro de características de baja densidad (no señal cruda)	MQTT sobre TLS 1.3
3 — Cloud	Ingesta · series temporales · motor de alertas · dashboard	Diagnóstico residual, gestión de alertas, informes automáticos, portal de administración	Azure IoT Hub · Data Explorer · Functions · Power BI

El procesamiento en el borde es deliberado: la señal de vibración de alta frecuencia se reduce localmente a un vector compacto de características (energías en bandas espectrales, kurtosis, factor de cresta, envolvente acústica), lo que reduce en órdenes de magnitud el volumen transmitido y hace viable la operación con conectividad celular intermitente —el buffer local cubre semanas sin cobertura, con sincronización retroactiva automática.

3. Sensórica MEMS de grado industrial

Toda la cadena de captura emplea componentes comerciales estándar (COTS) de grado industrial, eliminando dependencias de proveedor único y riesgos de obsolescencia. La selección por subsistema:

Magnitud	Sensor	Especificación clave	Subsistema
Vibración alta frecuencia	ADXL357B (MEMS triaxial)	Bajo ruido, ancho de banda apto para firmas de rodamiento	Bogie / caja de grasa
Firma acústica	ICS-43434 (micrófono MEMS digital)	Salida I2S, inmune a EMI en cadena analógica	Bogie
Temperatura sin contacto	MLX90614 (IR)	Medición superficial sin contacto con el eje	Caja de grasa
Posición y dinámica	u-blox NEO-M9N (GNSS)	Contexto operativo: velocidad, localización de eventos	Vehículo
Presión / posición puerta	MLH016 + ADXL355 + SS49E	Cycle profiling: curva tiempo-presión de cada ciclo	Puertas (×4)

En el Pod B cada puerta integra un microcontrolador ESP32-S3 con interfaz Ethernet W5500 que digitaliza la señal en origen, evitando tiradas largas de cable analógico susceptibles a interferencia electromagnética en el entorno ferroviario. El backbone de a bordo es Ethernet industrial con conectores M12 conforme a EN 50155.

4. El motor de diagnóstico: EKF y residuo estadístico

4.1 La golden run como modelo, no como grabación

El corazón del sistema es la comparación continua entre lo que el vehículo *debería* estar haciendo si estuviera sano y lo que realmente mide la sensórica. La referencia de salud —la **golden run**— no es una grabación histórica: es un modelo dinámico paramétrico que, dadas las condiciones operativas instantáneas (velocidad, carga, temperatura ambiente, régimen de tracción), predice qué deberían leer los sensores. Esto resuelve el defecto estructural de los sistemas basados en promedios históricos: un rodamiento sano a 60 km/h con 12 t/eje produce una firma muy distinta del mismo rodamiento a 220 km/h con 16 t/eje, y compararlos directamente genera falsos positivos sistemáticos.

4.2 Filtro de Kalman extendido

La confrontación modelo-medida se formaliza mediante un filtro de Kalman extendido (EKF), la herramienta canónica de estimación de estado en sistemas dinámicos no lineales, validada durante más de seis décadas en industrias críticas en seguridad. En cada instante, el EKF produce la **innovación**: la diferencia entre la

predicción del modelo de salud y la observación multi-modal real. Bajo hipótesis de activo sano, la innovación normalizada al cuadrado (NIS) sigue una distribución chi-cuadrado conocida.

Tasa de falsa alarma controlada matemáticamente

Que el NIS siga una distribución chi-cuadrado bajo la hipótesis de salud permite fijar umbrales de detección con probabilidad de falsa alarma elegida a priori (típicamente $1e-3$ o $1e-4$), en lugar de calibrarlos empíricamente por prueba y error. Para evitar disparos por transitorios benignos, un test secuencial de razón de probabilidades (SPRT) acumula evidencia a lo largo del tiempo antes de elevar una alerta de mantenimiento.

4.3 Fusión multi-física por construcción

A diferencia de las soluciones que aplican un detector por modalidad y combinan resultados con reglas heurísticas (AND/OR, votación), el EKF funde vibración, acústica y temperatura a nivel de innovación, capturando las correlaciones entre modalidades. Una desviación leve pero coherente en las tres modalidades —invisible para cada detector aislado— produce un NIS conjunto claramente detectable. Esta es la base formal de la reducción de falsos positivos del sistema.

4.4 Segunda etapa: aprendizaje automático sobre residuos

El EKF no decide mantenimiento: entrega materia prima estadísticamente caracterizada. Una segunda etapa de aprendizaje automático (gradient boosting con regresión cuantílica) opera sobre características derivadas de la secuencia de innovaciones —tendencias, espectro del residuo, degradación acumulada, contexto operativo— para clasificar modos de fallo y estimar vida útil remanente (RUL) con intervalos de confianza P10/P50/P90. La combinación de modelo físico riguroso y ML moderno es lo que diferencia IN-SIGHT de soluciones puramente data-driven que se comportan como cajas negras: cada alerta es explicable y auditable, un requisito de diseño alineado con el AI Act europeo.

5. Plan de validación

La validación del motor de diagnóstico sigue una progresión de tres niveles con criterios medibles: (1) datasets públicos de referencia —Case Western Reserve University Bearing Dataset para la detección, FEMTO-ST/PRONOSTIA para pronóstico RUL— con comparación contra benchmarks publicados; (2) banco de ensayos propio con adquisición multi-modal sincronizada sobre componentes sanos y con fallo inducido, midiendo la tasa de falsos positivos del sistema fusionado frente a detectores mono-modales; y (3) instrumentación de vehículo real en servicio comercial, con campaña de adquisición sobre activo sano y validación de consistencia estadística del NIS en condiciones operativas reales.

Para profundizar en la arquitectura, el protocolo de calibración o una evaluación sobre su flota, contacte con el equipo en in3-insight.cloud.