

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO A MINIBÚS
MERCEDES-BENZ SPRINTER PARA LA EMPRESA TRANSPORTES CVU:
CASO DE ESTUDIO, FAENA MINERA CACERONES

Trabajo para optar al título de ingeniero de
mantenimiento industrial.

Alumno:

Sr. Sebastián Jesús Becerra Rojas

Profesor Guía:

Mg. Ing. Carlos Baldi González

Profesor Co-guía:

Mg. Ing. Raymi Vásquez Moreno

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO A MINIBÚS MERCEDES-BENZ SPRINTER PARA LA EMPRESA TRANSPORTES CVU: CASO DE ESTUDIO, FAENA MINERA CACERONES

Nombre del candidato(a): Sr. Sebastián Jesús Becerra Rojas

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial

Campus: Sede Viña del Mar Departamento: Departamento de Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mg. Ing. Carlos Baldi González, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 05/03/2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05/03/2026 Firma: 



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

AGRADECIMIENTO

Quisiera agradecer:

A mi madre, Marilen Andrea Rojas Barbero, por su apoyo incondicional, comprensión y dedicación. Por enseñarme a ser fuerte frente a las dificultades, a encontrar motivación cuando pareciera que ya no existen razones y a enfrentar la vida siempre con una buena disposición.

A mi padre, Ramón Jesús Becerra Farías, quien desde pequeño ha sido para mí una fuente constante de admiración, esfuerzo y ejemplo.

A mi hermana y a mi familia, por estar siempre presentes y acompañarme en cada etapa de este proceso.

A mis amigos, quienes han sabido escucharme en los momentos en que lo he necesitado, brindarme consejos cuando los he requerido y compartir innumerables buenos momentos; por convertirse en mi familia elegida.

De manera especial, agradezco a Albany Alejandra López Jiménez por todo su apoyo durante el último año, 2025. Gracias por la ayuda constante, la comprensión, la paciencia para soportar las frustraciones y los momentos cercanos al fracaso, y por entregarme el ánimo necesario para continuar y lograr finalizar esta etapa. Muchas gracias.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra forma, han contribuido a formar la persona que soy hoy.

Muchas gracias.

RESUMEN

KEYWORDS: Monitoreo de Condiciones, Detección de Anomalías, Isolation Forest, Mantenimiento Predictivo, Mercedes-Benz Sprinter, Faena Minera.

El aflojamiento de tuercas en vehículos de transporte de faenas mineras representa un riesgo crítico de seguridad y una causa significativa de detenciones no programadas. Esta tesis aborda la necesidad de migrar de una inspección visual y reactiva a un sistema de mantenimiento predictivo. El objetivo general fue implementar un sistema de monitoreo en una unidad Mercedes-Benz Sprinter de Transportes CVU, utilizando sensores integrados en Checkpoint, con el fin de detectar movimientos anómalos en las tuercas de las ruedas, contribuyendo a la prevención de fallas operacionales en la faena minera Caserones. Para ello, se diseñó y se instaló un prototipo funcional basado en sensores IMU (acelerómetro y giroscopio), se utilizó una Raspberry Pi 5 como Gateway y los datos adquiridos fueron procesados mediante el algoritmo Isolation Forest para la detección automatizada de patrones anómalos. La evaluación en terreno, a partir de más de 713.000 registros válidos, demostró la eficacia del sistema al identificar una falla incipiente específica: el aflojamiento progresivo de tuercas en la Rueda 3. Los resultados mostraron que cuatro sensores en dicha rueda presentaron tasas de anomalía superiores al 11%, correlacionándose con una dominancia de características rotacionales (giroscopio) que confirmaron el diagnóstico. En conclusión, el sistema de monitoreo implementado validó su capacidad para la detección temprana de movimientos anómalos en elementos de fijación. Este desarrollo constituye una contribución directa a la seguridad y la eficiencia operativa en el transporte minero, ofreciendo una solución técnica factible y replicable que permite la transición hacia un modelo de mantenimiento predictivo.

ÍNDICE

Agradecimiento	2
RESUMEN	3
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	8
INDICE DE GRAFICOS	8
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	10
INTRODUCCIÓN	11
1.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	12
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.	13
1.3 1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.	14
1.1.1 Ubicación	14
1.1.2 Promesa	15
1.1.3 Misión	15
1.1.4 Visión	15
1.4 1.2 MARCO LEGAL	15
1.2.1 Reglamento del transporte privado remunerado de pasajeros (art. 16 ds n°80/2004)	16
1.2.2 Seguro de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales (ley n°16.744)	16
1.2.3 Licencia de conducir profesional	16
1.2.4 Vehículo	16
1.2.5 Sistema de rodado	17
1.5 1.3 SISTEMA DE MONITOREO	18
1.3.1 Medidas de prevención	18
1.3.2 Checkpoint (Indicadores de torque)	18
1.3.3 Mercado Nacional	19
1.3.4 Identificación	20
1.6 1.4 SENSOR	21
1.4.1 Acelerómetro	21
1.4.2 Giroscopio	23
1.7 1.5 SISTEMA DE MONITOREO	23
1.5.1 Sistema de procesamiento de borde (Gateway)	23
1.5.2 Sistema de comunicaciones WiFi/4G (Router)	24
1.8 1.6 análisis de datos	25

1.6.1	Google Colab	25
1.6.2	Python	25
1.6.3	Autoencoder	26
1.6.4	Isolation Forest	26
1.6.5	Comparación entre Isolation Forest y Autoencoders para detección de anomalías	27
CAPÍTULO 2: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.		30
2	prototipo de indicadores	31
1.9 2.1	Primer prototipo	31
1.10 2.2	INSTALACION DE CHECKPOINT	32
2.2.1	Checkpoint-Quillota	32
1.11 2.3	Identificación DE LUGAR DE Instalación	34
1.12 2.4	Instalación	34
2.4.1	Interior	34
2.4.2	Exterior	35
1.13 2.5	INSTRUCTIVO DE INSTALACIÓN: INDICADORES DE TORQUE CON SENSORES	36
1.14 2.6	INSTALACION DE INDICADORES CON SENSOR-CACERONES	37
1.15 2.7	LECTURAS DE DATOS	39
1.16 2.8	FUTURAS ACTUALIZACIONES A LA INSTALACIÓN	40
CAPÍTULO 3: EVALUACION TÉCNCA Y ECONÓMICA.		41
3	Datos	42
1.17 3.1	datos obtenidos	42
1.18 3.2	Limpieza de datos	42
1.19 3.3	Análisis vibraciones	44
3.3.1	Estadísticas por sensor	44
3.3.2	Aceleración	45
3.3.3	Análisis en el dominio del tiempo	47
1.20 3.4	Graficos.	47
3.4.1	ANÁLISIS DETALLADO SENSOR CP13	47
3.4.2	Matriz de correlación entre sensor	60
1.21 3.5	analisis Insolation forest	62
3.5.1	Análisis Temporal de Anomalías	62
3.5.2	Análisis Comparativo por Rueda	64
3.5.3	Análisis de Importancia de Características	65
3.5.4	Análisis de Eventos Específicos	67
3.5.5	Síntesis de Resultados	70

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA.	75
1.22 Anexos	75
1.23 Referencias (APA 6)	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Transportes CVU-Quillota 14

Figura 2Ubicación Geográfica 15

Figura 3Mercedes-Benz Sprinter 17

Figura 4Rueda Sprinter 17

Figura 5Calibrador de par AEP BTR2..... 18

Figura 6Llave dinamométrica de carraca de ½..... 18

Figura 7Sistema Checkpoint 19

Figura 8Checkpoint.....20

Figura 9Checkpoint reemplazados.....21

Figura 10 Illustration of the basic principle of Newton’s second law in two dimensions where a mass m is attached to springs within a reference frame (Grahm, 2017) 22

Figura 11 Capacitance And mass moving (Dadafshar, 2014) 22

Figura 12 Illustration of the basic principle of a gyroscope and how the rotations (Φ , θ , Ψ) occur around respective axes (Grahm, 2017) 23

Figura 13Raspberry Pi 5 24

Figura 14Structure Diagram 24

Figura 15Fuente: Router Milesight UR32S 25

Figura 16Ejemplo de arquitectura de un deep autoencoder.....26

Figura 17Indicadores Prototipo.....31

Figura 18Checkpoint-Tipo gota.....32

Figura 19Sistema de procesamiento de borde 33

Figura 20Sistema de comunicaciones Wifi/4G.....34

Figura 21 Sistema instalado en Sprinter 35

Figura 22 Cambio de indicadores por indicadores inteligentes 36

Figura 23 infografía cambio de tarjeta SIM.....37

Figura 24 Cambio de SIM.....38

Figura 25 Indicadores cercano al sistema para enlace 38

Figura 26 Indicadores instalados posterior al enlace 39

Figura 27 Próximo prototipo de indicadores 40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de la naturaleza del método entre Isolation Forest y Autoencoders.....	28
Tabla 2 Descripción de sensores utilizados	33
Tabla 3 Datos de sensores instalados.....	39
Tabla 4 Primeros datos obtenidos	42
Tabla 5 Resultados posteriores al proceso de limpieza de datos.	43
Tabla 6 Datos correspondientes a sensores activos.	44
Tabla 7 Número de sensores activos por rueda.	44
Tabla 8 Fórmulas estadísticas utilizadas en los códigos de análisis.	45
Tabla 9 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje X.	46
Tabla 10 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje Y.	46
Tabla 11 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje Z.	47
Tabla 12 nivel de criticidad.....	70

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1 Serie temporal de aceleración en el eje X.....	49
Gráfico 2 Serie temporal de aceleración en el eje Y.....	50
Gráfico 3 Serie temporal de aceleración en el eje Z.	50
Gráfico 4 Serie temporal de la magnitud de aceleración	51
Gráfico 5 Análisis espectral en X	51
Gráfico 6 Análisis espectral en Y	52
Gráfico 7 Análisis espectral en Z.....	53
Gráfico 8 Análisis espectral de las Magnitudes	54
Gráfico 9 Análisis de envolvente en X	55
Gráfico 10 Análisis de envolvente en Y	56
Gráfico 11 Análisis de envolvente en Z.....	57
Gráfico 12 Análisis de envolvente de las Magnitudes.....	58
Gráfico 13 Matriz de correlación.....	60
Gráfico 14 Evolución temporal del score de anomalía para Rueda 2 (superior) y Rueda 3 (inferior). Los puntos rojos indican anomalías detectadas tras suavizado temporal. Período: 28 de junio de 2025.	63
Gráfico 15 Comparación de tasas de anomalía entre Rueda 2 (13.8%) y Rueda 3 (16.5%). Ambas superan el límite aceptable de 5% para operaciones mineras.....	64

Gráfico 16 Ranking de sensores con mayor tasa de anomalías. El sensor CP17 (Rueda 3) presenta la tasa crítica de 27.4%, indicando falla funcional o condición mecánica severamente comprometida.....65

Gráfico 17 Importancia por permutación de las 20 características principales. La dominancia de features derivadas del giroscopio (gyro_magnitude_rms, gyro_magnitude_var) indica naturaleza rotacional de las anomalías detectadas.....66

Gráfico 18 Impacto Agudo 33:34 67

Gráfico 19 Ripio Corrugado 33:34 68

Gráfico 20 Ripio Corrugado 44:07 68

Gráfico 21 Transiciones Terreno 29:00 68

Gráfico 22 Aceleración Sostenida 19:00 69

Gráfico 23 Secuencia Critica 18:44 69

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS

- CVU: Transportes CVU / Empresa de transporte donde se implementa el proyecto.
- FFT: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier) / Método de análisis en frecuencia utilizado para estudiar vibraciones.
- IMU: Inertial Measurement Unit (Unidad de Medición Inercial) / Sensor que combina acelerómetro y giroscopio.
- WiFi: Wireless Fidelity / Sistema de comunicación inalámbrica usado para transmisión de datos del Gateway.
- 4G: Fourth Generation Mobile Network / Tecnología móvil utilizada por el router para enviar datos a la nube.
- ID: Identifier / Identificador / Código único asignado a cada sensor (ej.: CP01).
- RMS: Root Mean Square (Valor cuadrático medio) / Métrica de amplitud vibratoria utilizada en el análisis.
- GPU: Graphics Processing Unit / Unidad de procesamiento utilizada para entrenar modelos de deep learning.
- IoT: Internet of Things (Internet de las Cosas) / Contexto donde se aplican métodos como Isolation Forest.
- CPxx: Código de Sensor Checkpoint / Ej.: CP13, CP06, CP17 → identifican sensores instalados.
- CAD: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computador) / Usado para diseñar el prototipo 3D de las gotas.

B. SIMBOLOGÍA

- g: Unidad de gravedad ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$) / Usada en acelerómetros (Accel_x, Accel_y, Accel_z).
- Hz: Hertz (ciclos por segundo) / Unidad de frecuencia para espectros y vibraciones.
- Nm: Newton metro / Unidad de torque para apriete de tuercas (240 Nm).
- °/s: Grados por segundo / Unidad de velocidad angular del giroscopio.
- V: Volt / 12V utilizados como alimentación del Gateway.
- m/s: metros / segundos / Unidades en cálculos de frecuencia natural y vibración.
- $\sqrt{}$ — Raíz cuadrada / Utilizada en la magnitud vectorial $\sqrt{(X^2+Y^2+Z^2)}$.
- Φ , θ , Ψ : Ángulos de rotación del giroscopio / Ejes de rotación descritos en el modelo del giroscopio.

INTRODUCCIÓN

El transporte de trabajadores hacia faenas mineras constituye una actividad crítica en la cadena operativa de las industrias mineras, dado que influye directamente en la seguridad y el bienestar del personal. En este contexto, la confiabilidad de los vehículos utilizados, especialmente en condiciones geográficas y climáticas adversas, se vuelve fundamental para garantizar traslados seguros.

La empresa CVU, dedicada al transporte de personal a distintas faenas mineras del país enfrenta diversos eventos relacionados con la soltura y desprendimiento de ruedas en sus minibuses Mercedes-Benz Sprinter, lo que representa un riesgo grave para la vida de los trabajadores. A pesar de contar con dispositivos pasivos de seguridad como los Checkpoint, estos no han demostrado ser suficientemente eficaces para prevenir dichas fallas.

Uno de los eventos más críticos asociados a este problema derivó en la terminación anticipada de un contrato con la faena El Teniente en Rancagua, generando un impacto económico significativo que evidencia la necesidad urgente de mejorar los sistemas de monitoreo preventivo en la flota de transporte.

Ante esta situación, el presente trabajo de título propone la implementación de un sistema de monitoreo activo basado en la integración de sensores específicamente **acelerómetros y giroscopios** encapsulados en los Checkpoint. Esta solución permitirá la detección en tiempo real de movimientos anómalos en las tuercas, generando alertas tempranas y facilitando la toma de decisiones oportunas para evitar accidentes.

Por lo cual, esta tesis busca dar una posible solución a este problema utilizando tecnología de monitoreo, para poder detectar fallas antes de que se causen los desprendimientos y solturas.

La propuesta se enmarca en los principios de la Industria 4.0, integrando tecnologías de adquisición de datos, procesamiento y análisis predictivo. El estudio se desarrolla en mini bus Mercedes-Benz Sprinter de la empresa CVU, operando en la faena minera **Caserones**, como caso piloto para evaluar la viabilidad técnica y operativa del sistema.

OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de monitoreo en **Mercedes-Benz Sprinter** mediante sensores integrados en **Checkpoint**, con el fin de que se detecten en tiempo real los movimientos anómalos en las tuercas de las ruedas, contribuyendo a la prevención de fallas en condiciones operativas de faena.

OBJETIVO ESPECÍFICO

- Analizar la infraestructura necesaria para implementar un sistema de monitoreo en vehículo de transporte Mercedes-Benz Sprinter, con el fin de que se interpreten y detecten cambios en la sujeción de las tuercas con ayuda de los datos adquiridos.
- Desarrollar el prototipo mediante el diseño, evaluación e instalación de sensores integrados en indicadores Checkpoint, implementados en un minibús Mercedes-Benz Sprinter.
- Evaluar el desempeño del sistema a través del monitoreo de datos en terreno, proponiendo recomendaciones de mejora en base a los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES.

1. ANTECEDENTES GENERALES.

1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.

Transportes CVU es una empresa que opera desde 1996 se destacan por ofrecer un servicio de transporte seguro, cómodo y puntual. Cuentan con una flota moderna y conductores altamente capacitados, garantizando profesionalismo y altos estándares de calidad en cada viaje. (Transportes CVU, s.f.)



Fuente: Google Maps 2023(Buses CVU)

Figura 1.1 Transportes CVU-Quillota

La empresa se encarga del traslado de personal para diversas faenas mineras, como Chuquicamata, Andina y El Teniente, entre otras. Estos servicios se realizan mediante una flota de buses y minibuses.

Cuenta con 63 buses, 28 Equipos, más de 100 proyectos de transporte y 29 años de experiencia. (Transportes CVU, s.f.)

1.1.1 Ubicación

Transportes CVU se encuentra ubicada en la quinta región de Valparaíso, específicamente en 2260000, Parcela el Peuco lote 2, km 12 Quillota, Valparaíso



Fuente: Google Maps 2023(Buses CVU)

Figura 2 Ubicación Geográfica

1.1.2 Promesa

Seguridad y confianza con conductores expertos (Transportes CVU, s.f.)

1.1.3 Misión

Entregar un servicio seguro, cómodo y de la más alta calidad en el traslado del personal de su empresa. (Transportes CVU, s.f.)

1.1.4 Visión

Nuestra visión es ser líderes en el transporte de personal, diferenciándonos por nuestra atención personalizada, puntualidad y altos estándares de calidad. Nos comprometemos a brindar seguridad en cada trayecto porque su tranquilidad es nuestra prioridad. (Transportes CVU, s.f.)

1.2 MARCO LEGAL

Dentro de la misión, visión y promesa de la empresa se habla principalmente de la seguridad y calidad en sus servicios de traslado, para lo cual es importante cumplir con normas y reglamentos técnicos, de calidad, legales y regulatorios que permitan cumplir los objetivos de la empresa CVU dentro de estos se pueden mencionar los siguientes.

1.2.1 Reglamento del transporte privado remunerado de pasajeros (art. 16 ds n°80/2004)

Solo se permite este servicio con buses o minibuses: se consideran minibuses aquellos vehículos con capacidad de 7 a 17 asientos (incluido conductor), y buses los de 18 o más; ambos con peso bruto ≥ 2.700 kg

1.2.2 Seguro de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales (ley n°16.744)

Cobertura obligatoria para todos los trabajadores dependientes; incluye accidentes de trayecto (desplazamiento entre domicilio y lugar de trabajo o de prestaciones médicas), independientemente de quién provea el medio de transporte.

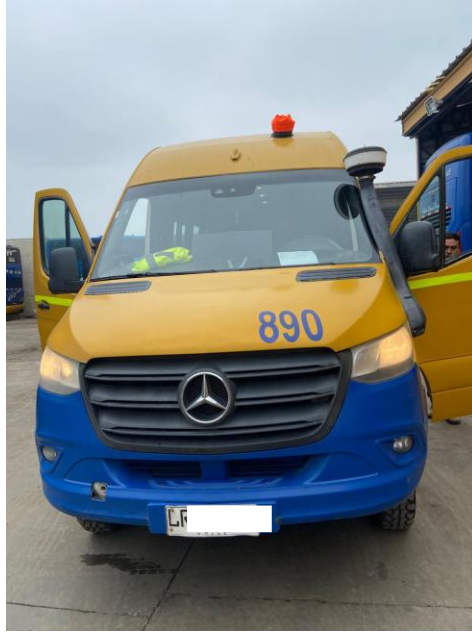
1.2.3 Licencia de conducir profesional

Para vehículos de transporte colectivo de pasajeros (10–17 asientos) se exige licencia clase A2 (o A3 si excede 17 asientos)

Licencias A2/A3 requieren cursos en escuelas autorizadas, aptitud médica y psicotécnica, y ≥ 20 años

1.2.4 Vehículo

Marca: Mercedes-Benz	Traccion:4x2 Trasera
Modelo: Sprinter 516 CDI	Combustible: Diésel
Año: 2022	Transmisión: Automática
Tipo: Bus	Nro. de Pasajeros: 19+1



Fuente: Adquisición personal sacada en terreno de CVU

Figura 3 Mercedes-Benz Sprinter

1.2.5 Sistema de rodado

Suspensión delantera: Suspensión independiente; eje delantero de conjuntos telescópicos con ballesta transversal parabólica y estabilizador.

Suspensión trasera: Eje trasero rígido, con suspensión especial de ballestas parabólicas y amortiguador

Neumáticos: 205/75 R16 C, M+S [barro + nieve]

Llantas: Acero 5,5J x 16



Fuente: Adquisición personal sacada en talleres CVU

Figura 4 Rueda Sprinter

1.3 SISTEMA DE MONITOREO

1.3.1 Medidas de prevención

Las medidas de prevención que utiliza la empresa a parte de los Checkpoint son el correcto torque de cada tuerca, para lo que utilizan una llave dinamométrica herramienta que es utilizada para dar el correcto par de torque según el fabricante del automóvil, y para mayor precisión en el torque es utilizado un calibrador que permite para calibrar la llave dinamométrica. (CVU, 2024)



Fuente: Sitio web: sensores-de-medida.es

Figura 5 Calibrador de par AEP BTR2



Fuente: Pagina web WURTH

Figura 6 Llave dinamométrica de carraca de 1/2

Los torques recomendados por el fabricante son de 240Nm par de torque para todas las ruedas.

1.3.2 Checkpoint (Indicadores de torque)

Los CHECKPOINT fueron unos de los primeros productos en el mercado mundial en proporcionar una indicación de movimientos en las tuercas flojas de las ruedas de los vehículos. (SDP SISTEMAS DE PROTECCIÓN, S.L.)



Fuente: SDP SISTEMA DE PROTECCIÓN, S.L.

Figura 7Sistema Checkpoint

Una de las ventajas de los Checkpoint es proporcionar una indicación visual de los movimientos de las tuercas como se indica en la figura. (Fig. 7) (SDP SISTEMAS DE PROTECCIÓN, S.L.)

1.3.3 Mercado Nacional

En el mercado nacional se identificaron tres modelos pertenecientes a la marca BLACKSMITH, los cuales se clasifican en dos familias principales de productos: seguros de tuerca de rueda e indicadores de tuerca suelta. Esta clasificación permite distinguir su uso según el tipo de vehículo y la función que cumplen en la prevención de aflojamiento de tuercas durante la operación vehicular. (Implementos S.A., s.f.)



Fuente: SDP SISTEMA DE PROTECCIÓN, S.L.

Figura 8Checkpoint

- Seguros tuerca rueda:

Los seguros de tuerca de rueda están diseñados principalmente para camiones y buses. Se caracterizan por conformar una única pieza inyectada, en la cual todas las zonas de ajuste a las tuercas están unidas por un sistema de anclaje circular (fig. 8). (SCI Chile S.A., 2025)

- Indicadores de tuerca suelta

Los indicadores de tuerca suelta son comúnmente utilizados en camionetas y minibuses, como es el caso del presente estudio. Estos dispositivos funcionan mediante un sistema visual que permite detectar el aflojamiento de las tuercas al instalarse en pares enfrentados. Se dividen en dos tipos: (fig. 8). (SCI Chile S.A., 2025)

- Tipo gorro: Encapsulan completamente la tuerca.
- Tipo gota: Consisten en una argolla con una punta de flecha, utilizada como referencia visual del desplazamiento.

1.3.4 Identificación

Antes de realizar los primeros Checkpoint prototipo, se identifica que tipo es el que utilizan en Transportes CVU.



Fuente: Adquisición personal sacada en talleres CVU

Figura 9 Checkpoint reemplazados

Con la visita de su taller se puede identificar que los Checkpoint que utilizan son de tuerca suelta-tipo gota. (fig. 9)}

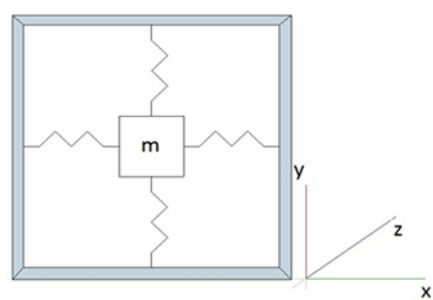
1.4 SENSOR

Se utilizan sensores IMU (Inertial Measurement Unit) estos son dispositivos electrónicos que se utilizan en partes específicas de un objeto, capaz de medir frecuencia angular y, a veces, los campos magnéticos que rodean el objeto, utilizando una combinación de sensores de acelerómetro y giroscopios, a veces un magnetómetro, pero en este caso el IMU solo utiliza sensores de acelerómetro y giroscopio. (Ilham Arun Faisal, 2020)

1.4.1 Acelerómetro

El acelerómetro es un dispositivo automático que sirve para medir aceleración, detectar y medir vibraciones, y calcular la aceleración causada por la inclinación del cuerpo. Esto lo realiza mediante cambios de la capacitancia asociados al movimiento de una masa móvil (Ilham Arun Faisal, 2020)

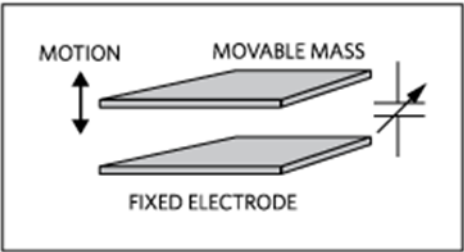
El acelerómetro MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) Es un dispositivo que detecta cambios en la aceleración mediante una estructura suspendida interna (como una masa) que se desplaza con respecto a su base cuando se somete a una fuerza. (Ilham Arun Faisal, 2020)



Fuente: A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture

Figura 10 Illustration of the basic principle of Newton's second law in two dimensions where a mass m is attached to springs within a reference frame (Grahn, 2017)

Esta desviación genera un cambio en la capacitancia, que luego es interpretado como aceleración. (Ilham Arun Faisal, 2020)



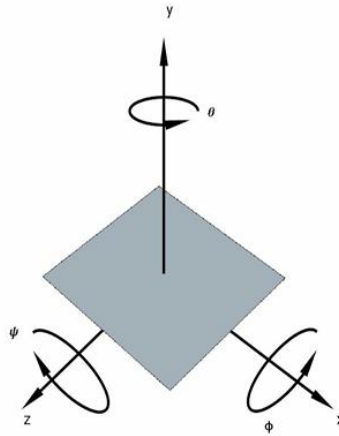
Fuente: A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture

Figura 11 Capacitance And mass moving (Dadafshar, 2014)

Una de las aplicaciones principales del acelerómetro es la detección de movimiento, en este contexto es utilizado para detectar los movimientos de las ruedas, tuercas y la superficie en la cual se moviliza el Mercedes-Benz Sprinter.

1.4.2 Giroscopio

El giroscopio MEMS se basa en el efecto Coriolis haciendo referencia sobre la fuerza de inercia que actúa sobre objetos en movimiento en relación con su eje de referencia, donde una masa que se mueve dentro de un marco rotatorio experimenta una fuerza proporcional.



Fuente: A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU Sensors on Motion Capture

Figura 12 Illustration of the basic principle of a gyroscope and how the rotations (Φ , θ , Ψ) occur around respective axes (Grahm, 2017)

Estos dispositivos contienen masas que vibran a lo largo de un eje de activación induciendo una vibración secundaria perpendicular al eje, capaz de desplazar la masa de su trayectoria original cuando el giroscopio se mueve, lo que introduce cambios de capacitancia y así detectando el movimiento permitiendo evaluar velocidades angulares mediante la rotación de este. Existen diversas clases de giroscopios aparte del MEMS, dependiendo del principio físico de operación y la tecnología empleada. El giroscopio puede funcionar como un dispositivo independiente o ser utilizado como parte de sistemas complejos, tales como IMU como en este caso que se utilizará para detectar los movimientos rotativos de las ruedas del Mercedes-Benz Sprinter (Ilham Arun Faisal, 2020)

1.5 SISTEMA DE MONITOREO

1.5.1 Sistema de procesamiento de borde (Gateway)

Se utiliza un Raspberry Pi 5 compute module, este es una computadora de bajos recursos con el tamaño aproximado de una tarjeta de crédito con un procesador

potente. Este soporta sistemas operativos basados en Linux y otros, lo que lo convierte en una herramienta muy flexible de utilizar.

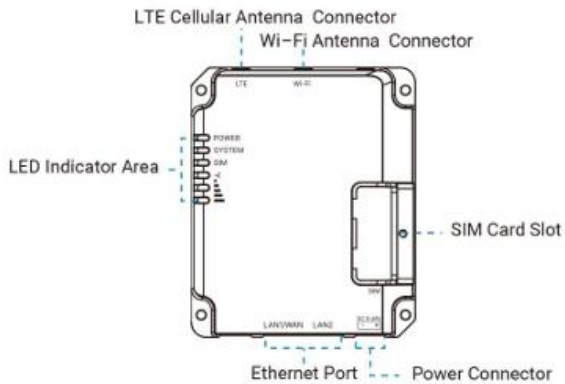


Fuente: Raspberry Pi

Figura 13Raspberry Pi 5

1.5.2 Sistema de comunicaciones WiFi/4G (Router)

Se está utilizando un Router Milesight UR32S este sirve para proyectos de CCTV (Closed Circuit Television), para lograr una conexiones más estables y seguras entre los dispositivos y técnicos en forma remota pudiendo gestionar de manera fácil los componentes. (Milesinght, s.f.)



Fuente: Milesight (2023), UR32S Industrial Cellular Router Datasheet (Versión V2.02).

Figura 14Structure Diagram



Fuente: Milesight (2023), UR32S Industrial Cellular Router Datasheet (Versión V2.02).

Figura 15 Fuente: Router Milesight UR32S

Se utiliza el Router para transmitir los datos capturados por los sensores, desde el Gateway hasta la nube gracias a su conectividad 4G.

1.6 ANÁLISIS DE DATOS

1.6.1 Google Colab

Google Colab (Colaboratory) es un navegador gratuito el cual te permite programar y ejecutar **Python**.

Este no requiere de configuración ni de accesos a GPUS, también permite compartir fácilmente contenidos de trabajos.

1.6.2 Python

Python es un lenguaje de programación utilizado en aplicaciones web, desarrollo de software, en la ciencia de datos y el machine learning (ML), entre otras.

1.6.2.1 Machine Learning

Consiste en extraer conocimiento a partir de datos, mientras les enseña a las computadoras a aprender automáticamente de los datos y a efectuar predicciones precisas. También sirve para realizar tareas como las siguientes:

- Corregir y eliminar datos incorrectos, lo que se conoce como limpieza de datos
- Extraer y seleccionar varias características de los datos

- Etiquetar datos, que consiste en agregar nombres significativos a los datos
- Buscar diferentes estadísticas a partir de los datos
- Visualizar los datos mediante el uso de tablas y gráficos, como los gráficos de líneas, los de barras, los circulares y los histogramas

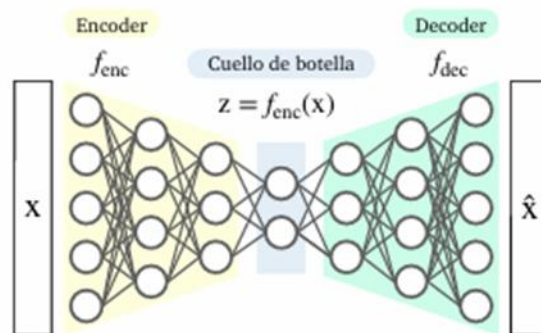
1.6.3 Autoencoder

Un Autoencoder es una arquitectura de red neuronal diseñada para comprimir o codificar los datos de entrada en una representación más reducida y luego reconstruir o decodificar la entrada original de dicha representación comprimida.

El objetivo es aprender las características esenciales o patrones más importantes del conjunto de datos lo que obliga a la red a enfocarse en lo fundamental mediante un cuello de botella que reduce las dimensiones de los datos. (IBM, 2023)

Elementos claves de esta estructura

- Codificador: Reduce progresivamente la cantidad de información, pasando los datos por capas ocultas con menos nodos que la capa de entrada. Este proceso comprime los datos a una forma más simple, conservando lo esencial.
- Cuello de botella: Es la capa intermedia donde se almacena la representación comprimida de los datos. También se le llama espacio latente o código. Esta capa fuerza al modelo a identificar las características más importantes de los datos.
- Decodificador: Toma el código comprimido y lo pasa por capas con más nodos, para intentar reconstruir los datos originales. Es como una imagen en espejo del codificador.



Fuente: “TESIS DOCTORAL” Aplicación de técnicas de aprendizaje profundo (deep learning) al análisis y mejora de la eficiencia en sistemas de ingeniería

Figura 16 Ejemplo de arquitectura de un deep Autoencoder

1.6.4 Isolation Forest

El Isolation Forest (iForest) es un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado orientado a la detección de anomalías mediante el principio de aislamiento.

Su fundamento teórico radica en que las anomalías representan observaciones poco frecuentes y generalmente alejadas del comportamiento normal del conjunto de datos, por lo que requieren menos particiones aleatorias para ser aisladas dentro de un árbol binario. El método fue introducido por Liu, Ting y Zhou (2008), quienes demostraron que la longitud promedio del camino necesario para aislar una observación puede utilizarse como una medida directa de anormalidad.

El algoritmo construye múltiples árboles de aislamiento (isolation trees) en los cuales, en cada nodo, se selecciona aleatoriamente un atributo y un punto de corte. Las instancias anómalas, al encontrarse en regiones menos densas o con valores atípicos, tienden a ser aisladas en niveles superficiales del árbol. En contraste, las instancias normales requieren caminos más largos debido a su agrupación dentro de regiones densas del espacio de características. Por tanto, el puntaje de anomalía se deriva de la profundidad promedio de aislamiento.

En términos computacionales, iForest posee una estructura altamente eficiente: su complejidad es de $O(n \cdot \log n)$, lo que lo hace escalable a grandes volúmenes de datos y adecuado para aplicaciones en tiempo real. Otra ventaja es que no necesita suposiciones fuertes sobre la distribución estadística de los datos, a diferencia de los métodos probabilísticos tradicionales. Debido a estas propiedades, iForest se ha incorporado exitosamente en ámbitos como el monitoreo de maquinaria industrial, análisis de series temporales, detección de intrusiones y sistemas IoT.

Liu, Ting y Zhou (2012) extendieron el análisis teórico del algoritmo demostrando que el aislamiento es una estrategia más eficiente para detectar anomalías que los enfoques basados en densidades o distancias en datos de alta dimensionalidad. Asimismo, plantearon una generalización del cálculo del puntaje de anomalía mediante la estandarización de la longitud esperada del camino en un árbol aleatorio, proporcionando un marco matemático robusto para su interpretación.

Es no supervisado porque opera con datos donde se desconoce la clasificación real de las observaciones (no se sabe de antemano si son anomalías o no).

1.6.5 Comparación entre Isolation Forest y Autoencoders para detección de anomalías

Los **autoencoders** son modelos basados en **redes neuronales** que buscan aprender una representación comprimida de los datos (codificación) y luego reconstruirlos (decodificación). Su utilidad para la detección de anomalías se basa en

que las muestras anómalas, al no pertenecer a la distribución en la que fue entrenado el modelo, presentan un **error de reconstrucción más alto** (Hinton & Salakhutdinov, 2006).

1.6.5.1 Naturaleza del método

Aspecto	Isolation Forest	Autoencoder
Tipo	No supervisado, basado en árboles aleatorios	No supervisado o semi-supervisado, basado en redes neuronales
Principio	Aislamiento aleatorio de instancias	Reconstrucción de datos mediante representación latente
Suposición central	Las anomalías son más fáciles de aislar	Las anomalías generan mayor error de reconstrucción

Fuente: Elaboración propia basada en Liu, Ting y Zhou (2008); Liu et al. (2012); Hinton y Salakhutdinov (2006).

Tabla 1 Comparación de la naturaleza del método entre Isolation Forest y Autoencoders.

1.6.5.2 Complejidad computacional

- Isolation Forest: altamente eficiente ($O(n \cdot \log n)$), adecuado para grandes volúmenes y despliegues en tiempo real.
- Autoencoders: requieren entrenamiento iterativo, uso de GPU y mayor tiempo computacional, especialmente en datos de alta dimensión.

1.6.5.3 Sensibilidad a la dimensionalidad

- iForest funciona bien incluso en datos con muchas características, ya que el aislamiento aleatorio no depende de la geometría del espacio.
- Autoencoders pueden sufrir overfitting si no se regulan adecuadamente, pero son superiores cuando las relaciones entre variables son no lineales y complejas.

1.6.5.4 Interpretabilidad

- Isolation Forest es más interpretable: la longitud de los caminos y la estructura de los árboles permiten entender por qué un punto fue marcado como anómalo.
- Autoencoders son esencialmente “cajas negras”, y requieren análisis adicionales (por ejemplo, inspección del error por características).

1.6.5.5 Rendimiento según el tipo de anomalía

- iForest: destaca en detectar anomalías globales o puntos aislados.

- Autoencoders: son mejores para detectar anomalías contextuales o patrones complejos en series temporales (por ejemplo, vibraciones estructurales o fallas mecánicas progresivas).

1.6.5.6 Aplicabilidad en sistemas reales

- Isolation Forest es ampliamente utilizado en sistemas IoT, monitoreo industrial y ciberseguridad debido a su simplicidad y baja demanda de hardware.
- Autoencoders, especialmente los variacionales o LSTM, son utilizados para detección de fallas en series temporales, vibraciones y señales multivariadas, por lo que suelen aplicarse en mantenimiento predictivo avanzado.

1.6.5.7 Justificación de la Selección del Método de Detección de Anomalías

Isolation Forest ofrece una solución eficiente, interpretable y escalable para la detección de outliers, especialmente en escenarios donde se requiere un procesamiento rápido o existen limitaciones de recursos computacionales. En contraste, los autoencoders presentan una capacidad superior para capturar dependencias no lineales complejas y modelar dinámicamente señales temporales; sin embargo, su implementación demanda mayor tiempo de entrenamiento y capacidad de cómputo. Considerando las características del sistema de monitoreo desarrollado y la necesidad de procesar datos de manera ágil en un entorno operativo real, para este proyecto se optó por utilizar Isolation Forest como método principal de detección de anomalías, dado que se ajusta de manera más efectiva a los requerimientos de eficiencia y disponibilidad computacional.

CAPÍTULO 2: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO.

2 PROTOTIPO DE INDICADORES

2.1 PRIMER PROTOTIPO

Previo a la fabricación física, se desarrolló un modelo tridimensional del indicador utilizando software de diseño asistido por computadora (CAD). Este diseño permitió definir con precisión las dimensiones y espacios necesarios para el alojamiento de este en las tuercas y posterior incorporación del sensor IMU.

Este primer prototipo se presentó sin la inclusión de sensores, donde el material seleccionado para la fabricación fue PETG (tereftalato de polietileno glicolizado), debido a sus propiedades de alta resistencia mecánica, buena flexibilidad y estabilidad térmica, características esenciales para instrumentos sometidos a vibraciones constantes y cambio de temperatura, como en este caso en vehículos de transporte de personal en faenas mieras. Además este material presenta una excelente adhesión entre capas al ser impreso en 3D, lo que mejora su durabilidad frente a impactos y deformaciones.

Cada pieza fabricada presenta dimensiones de 64mm largo, 32mm ancho, 10mm espesor, con un peso final aproximado de 16gr, mismo peso que tendría junto a la integración del sensor, con la finalidad de realizar pruebas de sujeción en el minibús, lo que busca evitar problemas con la sujeción al momento de realizar la instalación final.



Fuente: Elaboración propia en oficinas de CVU

Figura 17 Indicadores Prototipo

Las pruebas mencionadas con anterioridad buscan verificar el ajuste físico de los Checkpoints sobre la tuerca, asegurando que calzara correctamente, sin solturas ni interferencias, posteriormente se evalúa el prototipo en los minibuses en operación, recorriendo distintas distancias con el fin de valorar su estabilidad frente a vibraciones y condiciones reales de uso.

Durante este proceso se observó que el Checkpoint se mantuvo firme a la tuerca, sin solturas ni desplazamientos, validando su eficacia en condiciones dinámicas.

Con las pruebas de sujeción concluidas y con luz verde de personal de CVU se comenzó con la integración de los sensores a los indicadores, los cuales medirían aceleración y giro respectivamente al momento de iniciar el proyecto.

2.2 INSTALACION DE CHECKPOINT

2.2.1 Checkpoint-Quillota

Los sensores IMU (acelerómetro y giroscopio MEMS) fueron seleccionados por su robustez además de también tener la capacidad de medir vibraciones y movimientos rotacionales críticos en la detección temprana de aflojamiento de tuercas. El proceso de instalación requirió análisis detallado de la configuración y posicionamiento de los sensores. La secuencia incluyó la evaluación de cables y la estabilidad de la alimentación eléctrica utilizada para mantener activo tanto los sensores como el Gateway, también se verifican las conexiones a la red hacia el sistema de monitoreo por medio de pruebas de comunicación entre los dispositivos lo que permite priorizar la estabilidad y confiabilidad de las lecturas en condiciones de uso prolongado.

Los técnicos de la empresa CVU realizaron ajustes en el calibrado a través de la verificación de mediciones asegurando que estas fueran precisas y también que las comunicaciones entre sensores, Gateway y nube se mantuvieran sin interrupciones.

La instalación conto con:

- 24 Checkpoint-tipo gota, con sensores integrados los cuales capturaran los datos físicos de las tuercas que serían vibraciones, rotaciones para identificar así posibles aflojamientos.



Fuente: Elaboración propia en oficial de CVU

Figura 18 Checkpoint-Tipo gota

Cada sensor incluido en los 24 Checkpoint se identificó con una numeración dentro de la computadora para poder identificar cada uno de los datos con su respectivo sensor.

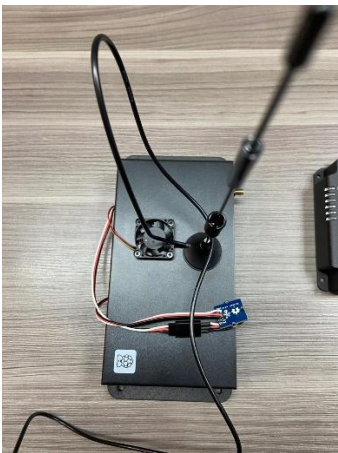
sensor	ID	Rueda	sensor	ID	Rueda
f14a3c19347a	CP01	1	d787c6a56928	CP13	3
cc15e809f983	CP02	1	ec33b384ab9c	CP14	3
e13ced5c3ce6	CP03	1	c066c4b243d3	CP15	3
c677a7899ad5	CP04	1	da7084abdf4f	CP16	3
f841c0ce8e0d	CP05	1	d797320c50b9	CP17	3
e4a41f1deee4	CP06	1	c4fbdd62297e	CP18	3
c46c64d4f09e	CP07	2	dbf7f49eabe8	CP19	4
f1bcad084be3	CP08	2	de97c831923e	CP20	4
fd14ca06b74a	CP09	2	fdeb1fa19d38	CP21	4
ce1506836a1f	CP10	2	e78730c8377d	CP22	4
c5bb14962ed4	CP11	2	f031ad28cd52	CP23	4
db2fc71bebb1	CP12	2	ec98c2fae736	CP24	4

Fuente: Elaboración propia con información entregada por Sergio Seguel Holtheuer AIMS

Tabla 2 Descripción de sensores utilizados

Cada uno de los sensores contaba con una ID por ejemplo **CP01** que pertenece a el primer sensor que lleva el nombre de **f14a3c19347a** el cual se encuentra en la rueda Nro. 1 Delantera derecha.

- Un sistema de procesamiento de borde (Gateway) el cual será utilizado con el fin de recibir los datos físicos enviados por los sensores, el cual almacenará, procesará y enviará hasta la nube.



Fuente: Elaboración propia en oficinas de CVU

Figura 19 Sistema de procesamiento de borde

- Un sistema de comunicaciones WiFi/4G (Router) que será utilizada para mejorar la transmisión de la señal entre el Gateway y el servidor (la nube)



Fuente: Elaboración propia en oficinas de CVU

Figura 20 Sistema de comunicaciones Wifi/4G

2.3 IDENTIFICACIÓN DE LUGAR DE INSTALACIÓN

El sistema de procesamiento de borde (Gateway) se ubicó en la cabina del conductor de manera que exista una mayor accesibilidad para inspecciones periódicas, también se considera el acceso para el mantenimiento del equipo, temperatura estable y baja exposición a polvo lo que garantiza un entorno seguro tanto para los usuarios como para los equipos electrónicos, el lugar en el cual se posiciona además contempla que no interfiera con los controles del conductor.

Se reforzó la conexión eléctrica mediante la alimentación de 12V extraída del encendedor del vehículo, asegurando la continuidad operacional del sistema inclusive en caso de interrupciones menores de energía. El Router WiFi/4G Milesight UR32S, encargado de la transmisión de datos a la nube, fue instalado junto con el Gateway para garantizar la mejor conectividad posible durante las pruebas y operatividad en terreno.

De igual manera, se elaboró una infografía destinada a ser ubicada en la cabina del vehículo, con el propósito de mantener a todo el personal debidamente informado sobre los componentes y funcionalidades presentes en el Sprinter.

2.4 INSTALACIÓN

2.4.1 Interior

Para llevar a cabo la instalación, se solicitó el apoyo de un técnico perteneciente a la empresa CVU, con el objetivo de realizar correctamente la conexión eléctrica desde el minibús hasta el Gateway y el Router, utilizando como fuente de alimentación el encendedor del vehículo Sprinter.



Fuente: Elaboración propia en minibus Sprinter de prueba

Figura 21 Sistema instalado en Sprinter

Como parte del desarrollo del proyecto, se llevó a cabo la primera prueba relacionada con el sistema de corte de corriente interna implementado en los vehículos de la empresa. Este mecanismo, orientado a prevenir robos y solucionar problemas energéticos, generó complicaciones al interrumpir el suministro eléctrico al Gateway, lo que provocó la suspensión tanto de la adquisición como de la transmisión de datos. Ante esta situación, el equipo concluyó que, al apagarse el Gateway, el vehículo no se encontraría operativo, y, por ende, el inconveniente podía considerarse resuelto. No obstante, surgió un nuevo desafío vinculado a la interacción entre la nube y el Gateway; se estableció que, para cada actualización de datos requerida, el vehículo Sprinter permanecería sin activar el sistema de corte de corriente, asegurando así la correcta transferencia y sincronización de información hasta completar el proceso necesario.

2.4.2 Exterior

Una vez finalizada la instalación de los equipos en la cabina del vehículo, se procedió a la etapa siguiente, que correspondió a la instalación de los indicadores en el exterior. Este proceso implicó una serie de operaciones técnicas para asegurar la correcta colocación y fijación de los indicadores en sus posiciones respectivas, como por ejemplo procurar que las fuerzas aplicadas en las tuercas no haya sido un torque excesivo que pudiera dañar estructuralmente el sistema, para ello se empleó una llave dinamométrica ajustada a los valores recomendados por el fabricante del vehículo, esto garantiza así su funcionalidad y durabilidad frente a las condiciones propias del uso vehicular. Se verificaron las conexiones y se aplicaron las medidas necesarias para proteger los dispositivos contra las vibraciones y posibles impactos que se puedan presentar durante la operación del minibus.



Fuente: Elaboración propia de minibús Sprinter de prueba

Figura 22 Cambio de indicadores por indicadores inteligentes

La instalación de estos dispositivos se realiza siguiendo un procedimiento estandarizado desarrollado por el equipo, con el objetivo de facilitar la identificación visual de cada uno de los sensores de forma individual. Este método es fundamental, dado que permite una gestión más clara y precisa de la información recopilada, asegurando la trazabilidad y eficiencia en el monitoreo de las condiciones del vehículo.

La implementación del sistema no solo implicó la instalación de los componentes, sino también la planificación de su disposición óptima de manera que ningún equipo interferirá con las operaciones normales del minibús ni representaran riesgos para los usuarios. Además, se toman en consideración la accesibilidad de los dispositivos para futuras labores de mantenimiento, buscando que su retiro o reemplazo pudiera realizarse sin necesidad de desarmar otros elementos del vehículo impidiendo su funcionamiento. Este enfoque refleja la importancia de diseñar un sistema de monitoreo sostenible y replicables en otras unidades de la flota.

2.5 INSTRUCTIVO DE INSTALACIÓN: INDICADORES DE TORQUE CON SENSORES

La instalación de los indicadores siguió una secuencia horaria, garantizando una trazabilidad eficiente por número y posición en la rueda. El procedimiento técnico incluyó recomendaciones básicas como la verificación del torque adecuado en las tuercas, uso de herramientas calibradas y aseguramiento de que no hubiera interferencias de suciedad o grasa. Se estableció la alineación punta con punta entre pares de indicadores para facilitar la inspección visual de posibles desplazamientos, permitiendo una rápida identificación de anomalías.

1. Orden de Instalación

- Rueda delantera derecha: Indicadores 1 a 6
- Rueda trasera derecha: Indicadores 7 a 12
- Rueda trasera izquierda: Indicadores 13 a 18
- Rueda delantera izquierda: Indicadores 19 a 24

2. Secuencia de Instalación por Ruedas

- Rueda delantera derecha
- Rueda trasera derecha
- Rueda trasera izquierda
- Rueda delantera izquierda

3. Orientación de los Indicadores

Los indicadores deben colocarse punta con punta, formando pares.

Esto tiene un propósito visual:

- Si una tuerca se afloja, los indicadores ya no estarán alineados.
- Ejemplos de pares: 1-2, 3-4, 5-6, etc.

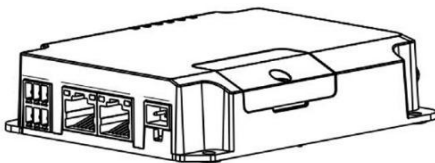
Esta metodología también permite estandarizar el procedimiento, de modo que otros técnicos puedan replicarlo sin variaciones significativas entre vehículos.

2.6 INSTALACION DE INDICADORES CON SENSOR-CACERONES

Tras el periodo de pruebas en Quillota, el vehículo fue trasladado a la faena minera Caserones para la evaluación en condiciones operativas reales. Durante esta etapa se presentaron desafíos relacionados con la conectividad, los cuales fueron abordados mediante el cambio de chip del sistema de comunicaciones.

Instalación tarjeta SIM

Desatornillar tapa que cubre puerto para tarjeta SIM.



Colocar tarjeta SIM en el puerto y atornillar nuevamente la tapa.



Fuente: Sergio Seguel Holtheuer AIMS

Figura 23 infografía cambio de tarjeta SIM



Fuente: Elaboración propia, facilitada por equipo CVU

Figura 24 Cambio de SIM

Realizado el cambio se volvió a realizar el enlace de las gotas con el Gateway, para eso se solicitó retirar de a 6 gotas, rueda por rueda, para llevarlas hasta la cabina junto al Gateway para volver a enlazarlas como corresponde.



Fuente: Elaboración propia, facilitada por equipo CVU

Figura 25 Indicadores cercano al sistema para enlace

Una vez completado el proceso de enlace y verificado el correcto funcionamiento, se procede a reinstalar las gotas en el Sprinter, siguiendo el procedimiento estandarizado establecido por el equipo para asegurar la correcta identificación y operación de cada sensor.



Fuente: Elaboración propia, facilitada por equipo CVU

Figura 26 Indicadores instalados posterior al enlace

Con todo este proceso finalizado, se autorizó nuevamente el uso del Sprinter para que continuara operando y así se pudiera seguir adquiriendo una mayor cantidad de datos provenientes de los sensores instalados.

2.7 **LECTURAS DE DATOS**

Con la instalación concluida en caserones se realiza una lectura de señales la cual muestra los sensores que están enlazados al sistema de procesamiento de datos, demostrando que este sistema de monitoreo ser capaz de almacenarlos.

sensor	ID	Rueda	sensor	ID	Rueda
f14a3c19347a	CP01	1	d787c6a56928	CP13	3
cc15e809f983	CP02	1	ec33b384ab9c	CP14	3
e13ced5c3ce6	CP03	1	c066c4b243d3	CP15	3
c677a7899ad5	CP04	1	da7084abdf4f	CP16	3
f841c0ce8e0d	CP05	1	d797320c50b9	CP17	3
e4a41f1deee4	CP06	1	c4fbdd62297e	CP18	3
c46c64d4f09e	CP07	2	dbf7f49eabe8	CP19	4
f1bcad084be3	CP08	2	de97c831923e	CP20	4
fd14ca06b74a	CP09	2	fdeb1fa19d38	CP21	4
ce1506836a1f	CP10	2	e78730c8377d	CP22	4
c5bb14962ed4	CP11	2	f031ad28cd52	CP23	4
db2fc71bebb1	CP12	2	ec98c2fae736	CP24	4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Datos de sensores instalados

De estos datos se recopilarán los datos para la evaluación del sistema de monitoreo realizado en caserones.

2.8 FUTURAS ACTUALIZACIONES A LA INSTALACIÓN

En las reuniones posteriores con el personal de CVU, se identificaron oportunidades de mejora, orientadas principalmente a la visibilidad de los indicadores y la facilidad de identificación por parte de los operadores. Se desarrollaron prototipos alternativos con modificaciones en el color y la inclusión de etiquetas visibles, contemplando la posibilidad de ajustes adicionales en la integración de sensores para futuras versiones del sistema. Estas propuestas buscan aumentar la eficacia y la aceptación del sistema por parte de los usuarios, alineándose con los requerimientos normativos y operativos propios del rubro minero.



Fuente: Elaboración propia, facilitada por Sergio Seguel Holtheuer AIMS

Figura 27 Próximo prototipo de indicadores

CAPÍTULO 3: EVALUACION TÉCNICA Y ECONÓMICA.

3 **DATOS**

3.1 **DATOS OBTENIDOS**

Los datos considerados para el desarrollo del análisis corresponden al mes de junio de 2025. El conjunto de datos inicial está compuesto por un total de 778.290 marcas de tiempo, registradas con una frecuencia de muestreo de 30 Hz durante ventanas de adquisición de 1 segundo.

sensor	scan_epoch_ms	accel_x	accel_y	accel_z	gyro_x	gyro_y	gyro_z
d787c6a56928	1750824090000	-0,550	-0,816	0,038	-0,28	0	0,14
d787c6a56928	1750824090000	-0,551	-0,818	0,033	-0,14	0,14	-0,14
d787c6a56928	1750824090000	-0,563	-0,819	0,038	-0,14	0	0
d787c6a56928	1750824090000	-0,560	-0,821	0,038	-0,28	0	0,14
d787c6a56928	1750824090000	-0,558	-0,82	0,036	-0,28	-0,14	0,14
d787c6a56928	1750824090000	-0,555	-0,817	0,038	-0,28	0	0
d787c6a56928	1750824090000	-0,555	-0,814	0,038	-0,28	0	0,14
d787c6a56928	1750824090000	-0,560	-0,813	0,042	-0,28	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de lecturas obtenidas por sensores.

Tabla 4 Primeros datos obtenidos

En la Tabla 4 se presentan registros correspondientes al sensor CP13, los cuales incluyen las siguientes variables:

- scan_epoch_ms: corresponde a la marca de tiempo expresada en milisegundos.
- Accel _ (x, y, z): representa las componentes de aceleración medidas en cada eje cartesiano, expresadas en unidades de gravedad (g), donde 1 g equivale aproximadamente a 9,81 m/s².
- Gyro _ (x, y, z): corresponde a las velocidades angulares medidas en cada eje, expresadas en grados por segundo (°/s).

3.2 **LIMPIEZA DE DATOS**

El procesamiento de los datos fue ejecutado en un entorno Google Colab, donde se implementó la etapa de limpieza y transformación correspondiente al preprocesamiento de los datos brutos. Para este propósito, se utilizó la librería Pandas, mediante la cual se leyó un archivo en formato Excel que contenía las mediciones obtenidas por los sensores.

El procedimiento incluyó la estandarización de los nombres de las columnas, la corrección del formato numérico de los decimales mediante el reemplazo de comas por puntos, la conversión de las lecturas de aceleración y giroscopio a tipos de datos

numéricos, y la transformación de las marcas de tiempo a un formato datetime. Adicionalmente, se realizó la asociación del identificador de cada sensor con su respectiva rueda a través de un proceso de mapeo, permitiendo estructurar el conjunto de datos de manera coherente y ordenada.

El objetivo central de este procedimiento fue la estructuración y consolidación del conjunto de datos. A través de una secuencia de transformaciones, se logró estandarizar los nombres de las variables, homogeneizar los formatos numéricos y temporales, y unificar la información originalmente dispersa, al vincular los identificadores únicos de los sensores con sus ubicaciones físicas correspondientes. Como resultado, se obtuvo un DataFrame limpio, coherente y estructurado, condición fundamental para asegurar la precisión y la viabilidad de las etapas posteriores de análisis y modelado.

Posterior al proceso de limpieza y validación de los datos que incluyó el filtrado de registros atípicos, incompletos o erróneos, el conjunto final considerado para el análisis quedó conformado por un total de 713.250 registros válidos.

Métrica	Valor
Registros Iniciales	778290
Registros Válidos (Post-Limpieza)	713250
Pérdida de Datos	65.040 registros (≈8.36%)

Fuente: Elaboración propia a partir de la limpieza de datos
Tabla 5 Resultados posteriores al proceso de limpieza de datos.

Los registros validados cubren un período continuo de medición de aproximadamente cuatro días, proporcionando una base representativa para el análisis de tendencias y la identificación de eventos a lo largo del tiempo. En particular, el período de medición se extiende desde el 24 de junio de 2025 a las 19:00:00 hasta el 28 de junio de 2025 a las 19:57:29, con una duración total de la muestra de 349.049,98 segundos, equivalente a aproximadamente 96,96 horas.

Debido a fallos de comunicación y a las limitaciones propias de la etapa de prototipo inicial, únicamente fue posible validar 12 sensores IMU como activos para el análisis.

sensor	ID	Rueda
e4a41f1deee4	CP06	1
c46c64d4f09e	CP07	2
f1bcad084be3	CP08	2
db2fc71bebb1	CP12	2
d787c6a56928	CP13	3
ec33b384ab9c	CP14	3
da7084abdf4f	CP16	3
d797320c50b9	CP17	3
c4fbdd62297e	CP18	3
e78730c8377d	CP22	4
f031ad28cd52	CP23	4
ec98c2fae736	CP24	4

Fuente: Elaboración propia a partir de la limpieza de datos

Tabla 6 Datos correspondientes a sensores activos.

A partir de los sensores activos identificados, se determinó la cantidad de sensores operativos asociados a cada rueda del vehículo, información que se presenta de manera resumida en la Tabla 7.

Rueda	Número de Sensores (ID)
1	1
2	3
3	5
4	3
TOTAL	12

Fuente: Elaboración propia a partir de la limpieza de datos

Tabla 7 Número de sensores activos por rueda.

3.3 ANALISIS VIBRACIONES

3.3.1 Estadísticas por sensor

A partir del conjunto de datos previamente preprocesado, se llevó a cabo la etapa de extracción de características, mediante el cálculo de variables estadísticas descriptivas tales como la media, la desviación estándar, el valor mínimo y el valor máximo para las componentes de aceleración y velocidad angular registradas por los sensores.

Estas métricas permiten resumir el comportamiento general de las señales medidas y facilitan la identificación preliminar de patrones asociados a condiciones normales o anómalas de operación en las ruedas del vehículo.

Tabla de Fórmulas Matemáticas - Análisis de Vibraciones IMU				
Categoría	Métrica/Proceso	Fórmula	Variables	Unidades
PREPROCESAMIENTO				
	Módulo de Aceleración	$ a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$	a_x, a_y, a_z : aceleración en X, Y, Z	g
	Módulo de Giroscopio	$ \omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}$	$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: velocidad angular en X, Y, Z	°/s
	Filtrado de Outliers (IQR)	$Q1 = P25, Q3 = P75$ $IQR = Q3 - Q1$ Límites = $Q1 - 3 \times IQR, Q3 + 3 \times IQR$	Q1, Q3: cuartiles; IQR: rango intercuartílico	-
	Eliminación Offset DC	$x_clean = x - \text{mean}(x)$	x: señal; mean: promedio	-
DOMINIO DEL TIEMPO				
	RMS (Root Mean Square)	$RMS = \sqrt{(1/N \times \sum x_i^2)}$	N: muestras; x_i : valor muestra i	g o °/s
	Peak (Valor Pico)	$Peak = \max(x)$	x: señal	g o °/s
	Peak-to-Peak	$P2P = \max(x) - \min(x)$	x: señal	g o °/s
	Crest Factor	$CF = Peak / RMS$	$CF > 4$ indica impactos	-
	Mean (Media)	$\mu = 1/N \times \sum x_i$	μ : media; x_i : muestras	g o °/s
	Median (Mediana)	Mediana = valor central ordenado	-	g o °/s
	Variance (Varianza)	$\sigma^2 = 1/N \times \sum (x_i - \mu)^2$	σ^2 : varianza; μ : media	g ² o (°/s) ²
	Std (Desviación Estándar)	$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$	σ : desviación estándar	g o °/s
	Skewness (Asimetría)	$Skew = 1/N \times \sum ((x_i - \mu)/\sigma)^3$	Skew=0: simétrica; >0: cola derecha; <0: cola izq	-
	Kurtosis (Curtosis)	$Kurt = [1/N \times \sum ((x_i - \mu)/\sigma)^4] - 3$	Kurt=0: normal; >0: picos; <0: plana	-
DOMINIO DE LA FRECUENCIA				
	Ventana Hanning	$w(n) = 0.5[1 - \cos(2\pi n/(N-1))]$	n: índice (0 a N-1); N: longitud ventana	-
	Ventana Hamming	$w(n) = 0.54 - 0.46 \times \cos(2\pi n/(N-1))$	n: índice (0 a N-1); N: longitud ventana	-
	Aplicar Ventana	$x_w(n) = x(n) \times w(n)$	x: señal; w: ventana	-
	FFT (Transformada Fourier)	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times e^{-j2\pi kn/N}$	k: índice frecuencia; j: unidad imaginaria	-
	Frecuencias FFT	$f(k) = k \times f_s / N$	f_s : frec. muestreo (30 Hz); k: índice	Hz
	Frecuencia Nyquist	$f_Nyquist = f_s / 2 = 15 \text{ Hz}$	f_s : frecuencia de muestreo	Hz
	Amplitud FFT	$A(k) = 2 \times X(k) / N$	Factor 2 para FFT real (rfft)	g o °/s
	Energía por Banda	$E_banda = \sum_{f_low \leq f \leq f_high} A(f) ^2$	Suma de amplitudes al cuadrado en rango	g ² o (°/s) ²
	Banda 1	0 - 0.5 Hz	Maniobras muy lentas	-
	Banda 2	0.5 - 1 Hz	Transiciones suaves	-
	Banda 3	1 - 2 Hz	Aceleración/frenado moderado	-
	Banda 4	2 - 3 Hz	Movimientos del vehículo	-
	Banda 5	3 - 5 Hz	Suspensión baja frecuencia	-
	Banda 6	5 - 7 Hz	Suspensión media frecuencia	-
	Banda 7	7 - 9 Hz	Irregularidades del camino	-
	Banda 8	9 - 11 Hz	Vibraciones alta frecuencia	-
	Banda 9	11 - 13 Hz	Rugosidad del pavimento	-
	Banda 10	13 - 15 Hz	Textura superficial	-
	Resolución Frecuencial	$\Delta f = f_s / N$	Separación entre frecuencias analizables	Hz
ANÁLISIS DE ENVOLVENTE				
	Transformada Hilbert	$H\{x(t)\} = 1/\pi \times \int_{-\infty, \infty} x(t)/(t-t) \text{ dt}$	Convierte señal real en analítica	-
	Señal Analítica	$z(t) = x(t) + j \times H\{x(t)\}$	x: señal original; j: unidad imaginaria	-
	Envolvente	$Env(t) = z(t) = \sqrt{x(t)^2 + H\{x(t)\}^2}$	Amplitud instantánea de la señal	g o °/s
	Espectro Envolvente	$S_env(f) = FFT\{Env(t)\}$	FFT aplicada a la envolvente	g o °/s
DETECCIÓN PICOS				
	Criterio Frecuencia Dominante	$A(f) > 0.1 \times \max(A)$ y máximo local	Picos con amplitud >10% del máximo	-
	Top-N Frecuencias	Ordenar picos por amplitud descendente	Típicamente N = 3 a 5	-
PARÁMETROS SISTEMA				
	Frecuencia Muestreo	$f_s = 30 \text{ Hz}$	Muestras por segundo	Hz
	Periodo Muestreo	$T_s = 1/f_s = 0.0333 \text{ s}$	Tiempo entre muestras	s
	Timestamp Unix	$t = \text{scan_epoch_ms} \times 10^{-3}$	Conversión milisegundos a segundos	s
	Tiempo Relativo	$t(n) = n / f_s$	n: índice muestra (0, 1, 2, ...)	s

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Fórmulas estadísticas utilizadas en los códigos de análisis.

3.3.2 Aceleración

El análisis estadístico inicial de las señales de aceleración se realizó mediante el cálculo de los principales estadísticos descriptivos, los cuales permiten caracterizar el comportamiento dinámico de las lecturas registradas por los sensores. En particular, se consideraron las siguientes métricas:

- **mean:** representa el valor promedio de las lecturas de aceleración.
- **std:** cuantifica la dispersión o variabilidad de las mediciones respecto de su valor medio.
- **min:** corresponde al menor valor registrado durante el período de análisis.
- **máx.:** corresponde al mayor valor registrado durante el período de análisis.

Sensor	Rueda	N_muestras	Accel_X_mean	Accel_X_std	Accel_X_min	Accel_X_max
CP06	1	77790	0,51639374	0,010916685	0,494	0,536
CP07	2	78540	-0,127850115	0,492049871	-1,442	1,036
CP08	2	107940	0,14712468	0,798841092	-3,851	4,122
CP12	2	74100	-0,95240108	0,006921084	-0,968	-0,94
CP13	3	39780	-0,300259301	0,706067178	-4,2	3,513
CP14	3	4020	0,34991791	0,481143717	-1,221	1,052
CP16	3	91380	-0,727661928	0,602822392	-3,067	1,77
CP17	3	90180	-0,338837702	0,522029275	-3,268	2,325
CP18	3	41730	0,38845931	0,401772143	-0,632	1,671
CP22	4	35130	0,614908682	0,530918847	-2,156	3,346
CP23	4	5340	0,053036704	0,963164012	-6,031	1,952
CP24	4	67320	-0,367928699	0,005956628	-0,382	-0,354

Fuente: Elaboración propia luego del análisis de aceleración

Tabla 9 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje X.

A partir de los resultados obtenidos para el sensor CP13 en el eje X, se infiere que la tuerca se encuentra sometida a esfuerzos elevados de corte y momentos torsores, los cuales pueden atribuirse directamente a las variaciones dinámicas de la aceleración longitudinal generadas por las condiciones de operación del vehículo en el entorno minero.

Sensor	Rueda	N_muestras	Accel_Y_mean	Accel_Y_std	Accel_Y_min	Accel_Y_max
CP06	1	77790	-0,840950932	0,012322083	-0,869	-0,82
CP07	2	78540	0,925259906	0,011081869	0,906	0,948
CP08	2	107940	-0,701841421	0,064269198	-0,799	-0,603
CP12	2	74100	-0,251998785	0,009834938	-0,276	-0,234
CP13	3	39780	-0,329400151	1,046981275	-4,59	1,671
CP14	3	4020	0,793058955	0,007663634	0,778	0,806
CP16	3	91380	0,222052922	0,422242276	-0,705	0,982
CP17	3	90180	-0,278632901	1,593789337	-6,838	6,847
CP18	3	41730	0,764673209	0,42603948	0,004	1,642
CP22	4	35130	-0,234488671	0,816605712	-3,451	2,045
CP23	4	5340	-0,540747753	0,202421702	-0,963	-0,025
CP24	4	67320	0,934576144	0,00575182	0,922	0,95

Fuente: Elaboración propia luego del análisis de aceleración

Tabla 10 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje Y.

El análisis correspondiente al eje Y evidencia la presencia de fuerzas laterales significativas actuando sobre la tuerca, lo cual resulta indicativo de maniobras de dirección exigentes o de interacciones laterales con el terreno. La elevada dispersión estadística observada, reflejada en una alta desviación estándar, sugiere la necesidad de verificar la integridad del par de apriete de la tuerca y descartar posibles desalineaciones laterales de la rueda.

Sensor	Rueda	N_muestras	Accel_Z_mean	Accel_Z_std	Accel_Z_min	Accel_Z_max
CP06	1	77790	0,002802442	0,009420636	-0,016	0,026
CP07	2	78540	-0,01169026	0,007380061	-0,037	0,012
CP08	2	107940	0,005751501	0,028680265	-0,1	0,11
CP12	2	74100	0,034724912	0,009568396	0,012	0,054
CP13	3	39780	0,014037632	0,042370847	-0,14	0,168
CP14	3	4020	-0,000941542	0,008728512	-0,03	0,026
CP16	3	91380	0,026489297	0,039939509	-0,119	0,168
CP17	3	90180	0,046694966	0,078187365	-0,255	0,34
CP18	3	41730	0,016023508	0,029044353	-0,053	0,094
CP22	4	35130	-0,017784657	0,040658122	-0,179	0,143
CP23	4	5340	0,009709551	0,030145662	-0,124	0,149
CP24	4	67320	0,019132605	0,005799977	0,005	0,033

Fuente: Elaboración propia luego del análisis de aceleración

Tabla 11 Resultados del análisis estadístico inicial de la aceleración en el eje Z.

En el eje Z se observa un comportamiento caracterizado por una baja variabilidad, lo cual resulta coherente con la función estructural de la tuerca, diseñada para restringir desplazamientos verticales. El movimiento vertical de la rueda es absorbido principalmente por el sistema de suspensión del vehículo, por lo que la reducida dispersión en este eje confirma que el sensor está captando fuerzas de manera localizada y que las solicitaciones predominantes corresponden a tensiones horizontales, tales como deslizamiento y torsión.

3.3.3 Análisis en el dominio del tiempo

Con los datos procesados se efectuó un análisis en el dominio del tiempo, considerando la evolución temporal de la señal de aceleración. El análisis directo de la aceleración en función del tiempo permite identificar la severidad, duración y ocurrencia temporal de eventos dinámicos relevantes, proporcionando información clave para la detección de condiciones operativas anómalas y la evaluación del comportamiento del sistema bajo distintas solicitaciones.

3.4 GRAFICOS.

3.4.1 ANÁLISIS DETALLADO SENSOR CP13

➤ CRITERIO DE SELECCIÓN DEL SENSOR CP13

Con el fin de facilitar la claridad expositiva y considerando las limitaciones de espacio en el cuerpo principal del documento, se seleccionó el sensor CP13 (Rueda 3, ID: d787c6a56928) como caso de estudio representativo para la presentación detallada de los siguientes análisis:

- 1. Series temporales de aceleración en los ejes X, Y, Z y módulo.
- 2. Análisis espectral mediante Transformada Rápida de Fourier (FFT).
- 3. Análisis de envolvente y espectro de modulación.

4. Métricas en el dominio del tiempo.
5. Distribución de energía por bandas de frecuencia.

➤ JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN

El sensor CP13 fue seleccionado debido a que presenta:

- Valores de vibración ubicados en el rango alto de la flota (RMS = 1,340 g), pero dentro de límites aceptables para operación minera.
- Eventos de impacto significativos (Peak = 6,224 g), los cuales permiten demostrar la capacidad diagnóstica de las técnicas de análisis empleadas.
- Una distribución espectral representativa del comportamiento general de la flota.
- Calidad de señal óptima, sin pérdidas de datos ni presencia de artefactos de medición.

Este sensor no representa una anomalía ni un caso extremo, sino un ejemplo típico del comportamiento vibratorio de la flota de minibuses Mercedes-Benz Sprinter operando en condiciones normales de la faena minera Caserones.

➤ ANÁLISIS COMPLETO DE LA FLOTA

El análisis exhaustivo y equivalente de los 11 sensores activos restantes (CP06, CP07, CP08, CP12, CP14, CP16, CP17, CP18, CP22, CP23 y CP24) se encuentra disponible en:

ANEXO A: Código Completo de Análisis de Vibraciones

Ubicación:

https://colab.research.google.com/drive/1Z20z7joivUSeVeCs3_uXBmpxwAzObpfk?usp=drive_link

Contenido: script en Python documentado, generación automática de gráficos para todos los sensores y tablas completas de resultados en los dominios del tiempo y la frecuencia.

➤ CONSISTENCIA DE RESULTADOS

Los análisis realizados sobre los sensores restantes confirman las conclusiones derivadas del estudio detallado del sensor CP13, observándose:

- Frecuencias dominantes en el rango 0,1–0,5 Hz, asociadas a excitación del terreno.
- Ratio energético promedio de $20,28 \pm 20,62$, dentro de rangos normales para operación minera.

- Ausencia de componentes espectrales significativas por sobre 5 Hz.
- Distribuciones estadísticas coherentes con condiciones normales de operación.

En consecuencia, el análisis detallado del sensor CP13 presentado en este capítulo resulta extrapolable al resto de la flota, existiendo variaciones cuantitativas en magnitud, pero no en el patrón cualitativo de comportamiento.

➤ ACCESO A DATOS COMPLETOS

Para efectos de revisión, validación o análisis adicional, todos los datos crudos y procesados se encuentran disponibles en los anexos correspondientes. El código de análisis es completamente reproducible y puede ejecutarse sobre cualquier subconjunto de sensores o período temporal específico.

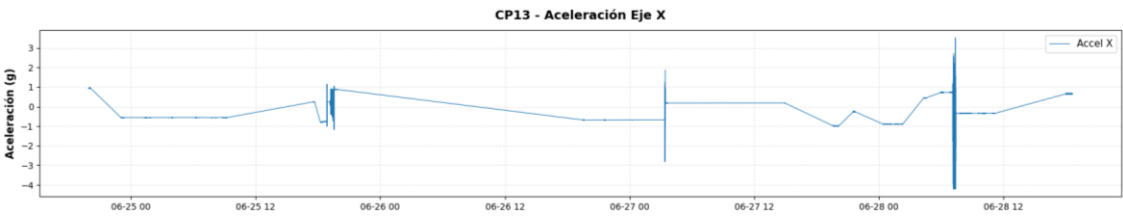
➤ Datos del sensor CP13:

- Total de muestras: **39.780**
- Rueda: **3**
- Período analizado: **2025-06-24 19:57:00 a 2025-06-28 18:37:00**

➤ Estadísticas de aceleración CP13:

- Eje X: Mean = -0,3003; Std = 0,7061
- Eje Y: Mean = -0,3294; Std = 1,0470
- Eje Z: Mean = 0,0140; Std = 0,0424

3.4.1.1 Series temporales

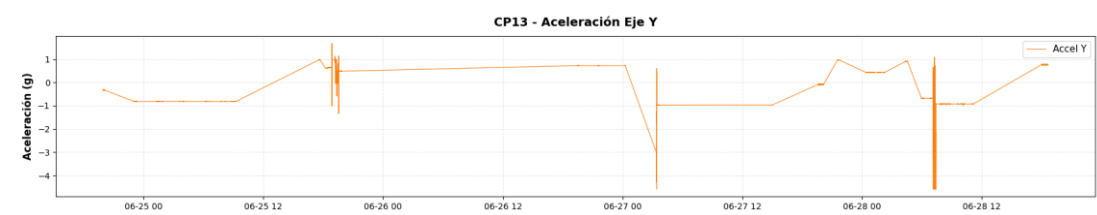


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 1 Serie temporal de aceleración en el eje X.

El eje X presenta un comportamiento mayormente estable, con la identificación de tres eventos críticos. El primero corresponde a un pico moderado de aproximadamente $\pm 1,2$ g el día 26 de junio, atribuible a una maniobra de estacionamiento. El segundo evento, ocurrido el 27 de junio alrededor de las 06:00 h, alcanza valores cercanos a -3 g y se asocia a un bache profundo con rebote característico. Finalmente, el evento más severo se registra el 28 de junio a las 12:00 h,

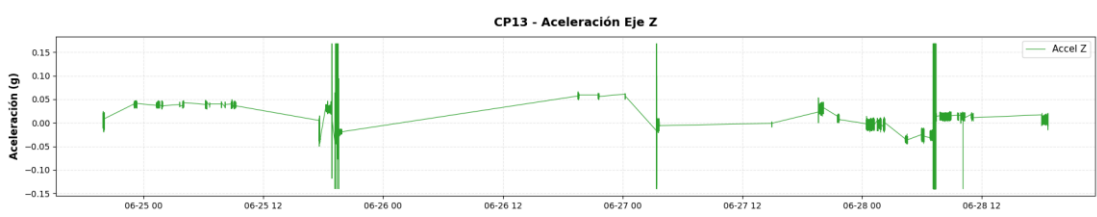
con valores cercanos a +3,5 g y -4 g, representando un impacto crítico en el cual la suspensión alcanza su tope mecánico. Esta progresión de severidad sugiere un deterioro del camino o el ingreso a sectores con condiciones más exigentes. El valor máximo registrado se encuentra en el límite superior aceptable para operación minera, por lo que se recomienda identificar la ubicación exacta del evento e inspeccionar la suspensión de la rueda correspondiente.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 2 Serie temporal de aceleración en el eje Y.

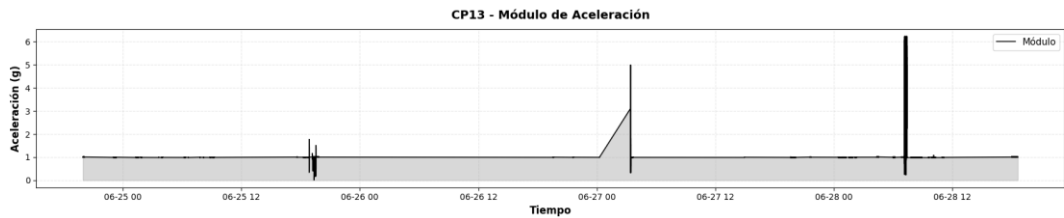
El eje Y presenta el comportamiento más severo de los tres ejes, con niveles de vibración aproximadamente un 48 % superiores a los observados en el eje X. Este comportamiento es consistente con excitaciones laterales asociadas a caminos no pavimentados con surcos profundos. La elevada desviación estándar y el sesgo negativo indican la presencia de impactos asimétricos predominantes hacia un lado, característicos de maniobras direccionales exigentes o irregularidades laterales del terreno. A pesar de la severidad observada, las frecuencias dominantes se mantienen en rangos bajos, descartando la presencia de fallas mecánicas internas.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 3 Serie temporal de aceleración en el eje Z.

El eje Z exhibe el comportamiento más estable, con una desviación estándar reducida, confirmando que la suspensión del vehículo absorbe adecuadamente los impactos verticales. La baja variabilidad y la ausencia de picos significativos indican que no existen rebotes excesivos ni oscilaciones verticales anómalas, evidenciando un correcto funcionamiento del sistema de suspensión vertical.

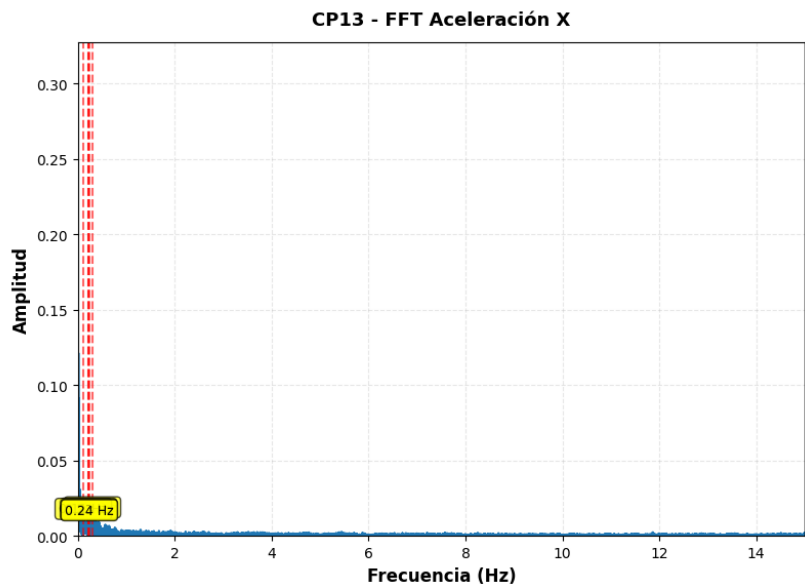


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 4 Serie temporal de la magnitud de aceleración

El módulo de la aceleración proporciona una visión integrada del comportamiento vibratorio triaxial. El elevado valor de curtosis evidencia la ocurrencia de eventos extremos poco frecuentes pero significativos, característicos de la operación en caminos mineros. A pesar de la severidad de algunos impactos, la energía se concentra en bandas de baja frecuencia, sin presencia de componentes de alta frecuencia asociadas a defectos mecánicos, confirmando un estado mecánico saludable del sistema.

3.4.1.2 Análisis espectral

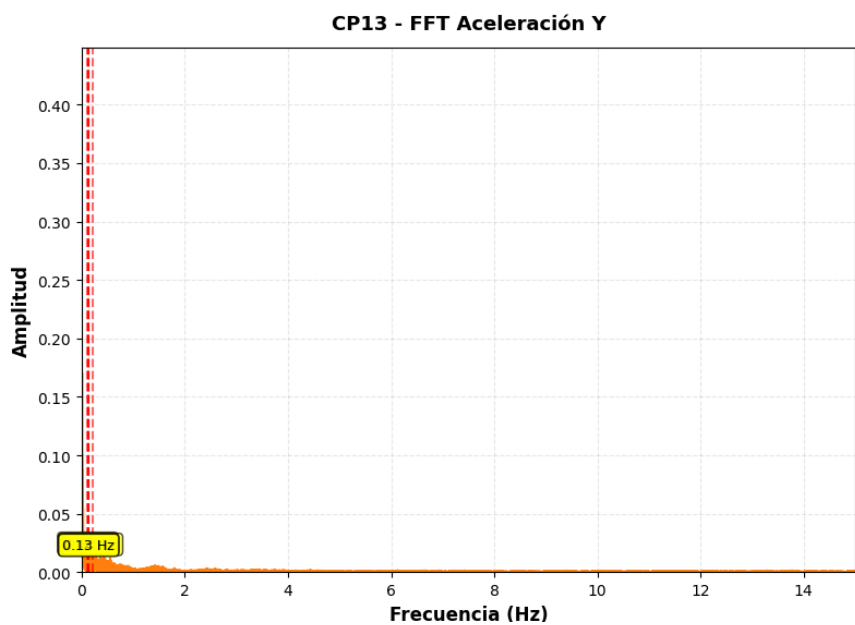


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 5 Análisis espectral en X

El espectro de frecuencias del eje X muestra concentración de energía en frecuencias extremadamente bajas (0.24 Hz, 0.21 Hz, 0.11 Hz) con amplitudes máximas de ~0.013-0.014, correspondiendo a períodos de 4-9 segundos que son Características de las ondulaciones que se forman en caminos no pavimentados y oscilaciones lentas de carrocería. La ausencia total de picos significativos por encima de 1 Hz es la evidencia más importante: descarta desbalanceo de rueda (que aparecería

en 1-3 Hz según velocidad), problemas de rodamiento (50-300 Hz), y resonancias mecánicas peligrosas (5-20 Hz). El análisis de bandas muestra energía decreciente logarítmicamente desde banda 1 (10^{-2} en 0-0.5 Hz) hasta banda 10 (10^{-4} en 13-15 Hz), patrón típico de excitación por terreno irregular donde las frecuencias bajas dominan. El espectro de envolvente presenta frecuencias muy similares (0.13 Hz vs 0.24 Hz del FFT normal), confirmando que no hay modulación de amplitud que indicaría defectos rotatorios progresivos. Este espectro limpio con energía solo en bajas frecuencias confirma que todos los componentes mecánicos de la rueda (rodamiento, cubo, suspensión) están operando correctamente, siendo las vibraciones observadas puramente causadas por excitación externa del terreno.

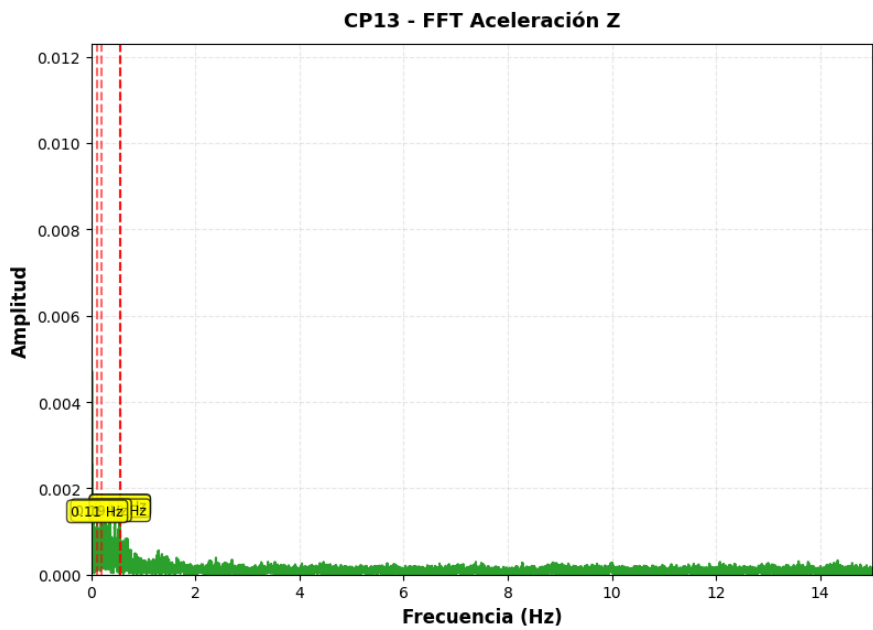


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 6 Análisis espectral en Y

El eje Y muestra un espectro con frecuencias dominantes ligeramente más bajas que X (0.13 Hz, 0.21 Hz, 0.11 Hz) pero con amplitudes superiores (~0.017-0.018 vs 0.013-0.014), reflejando cuantitativamente la mayor severidad observada en las métricas temporales (RMS Y = 1.10g vs X = 0.77g). La distribución de energía por bandas es similar a X, pero con valores absolutos 40-50% mayores en bandas 1-5 (0-5 Hz), consistente con mayor excitación lateral por surcos profundos del camino que afectan asimétricamente las ruedas en caminos con huellas marcadas. Dato crítico: Al igual que X, no hay energía significativa por encima de 5 Hz, descartando problemas mecánicos intrínsecos. El espectro de envolvente presenta frecuencias ligeramente más altas (0.27 Hz, 0.26 Hz) que el FFT normal (0.11-0.21 Hz), sugiriendo que los impactos laterales tienen una modulación más rápida, interpretable como patrón de impactos repetitivos espaciados cada 40-50 metros a velocidad típica de 30-40 km/h

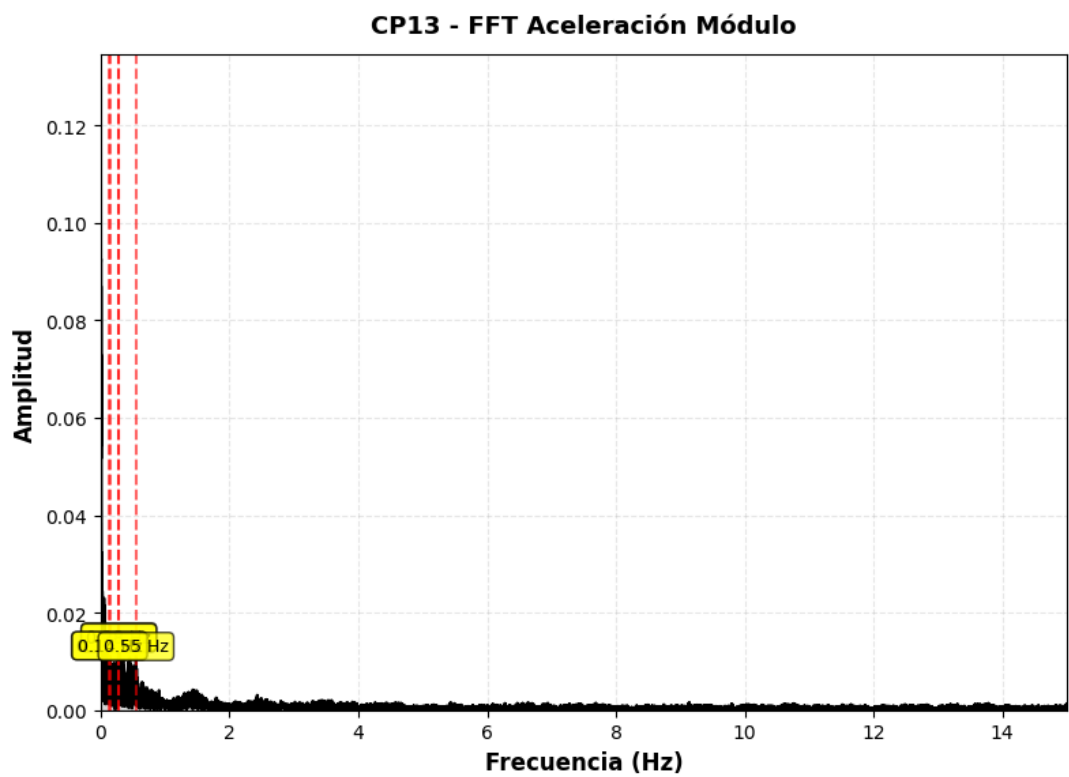
(posiblemente corresponde al espaciamiento de reparaciones del camino o al patrón de tránsito de camiones pesados que crean surcos regulares). Esta diferencia entre FFT y envolvente, aunque presente, no es indicativa de falla mecánica sino de la naturaleza periódica de las irregularidades del terreno, siendo un hallazgo normal para caminos de ripio minero con mantenimiento regular que crea patrones espaciales predecibles.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 7 Análisis espectral en Z

El eje Z presenta el espectro más interesante con una única frecuencia dominante muy pronunciada a 0.55 Hz (apareciendo repetida tres veces en el análisis, indicando un pico muy estrecho y definido) con amplitud de apenas ~0.0013-0.0014, dos órdenes de magnitud menor que X e Y. Esta frecuencia de 0.55 Hz (período 1.8 segundos) corresponde exactamente a la frecuencia de resonancia natural del sistema masa-resorte de la suspensión Sprinter cargada con pasajeros, calculable como $f=1/(2\pi)\sqrt{k/m}$ donde k es rigidez del resorte y m la masa soportada. La energía espectral en Z es extremadamente baja en todas las bandas ($\sim 10^{-3}$ a 10^{-5}), confirmando que la suspensión está amortiguando eficientemente las excitaciones verticales del terreno antes de que lleguen a la rueda. El espectro de envolvente muestra frecuencias completamente diferentes (0.15 Hz, 0.12 Hz, 0.27 Hz) al FFT normal (0.55 Hz), indicando que mientras hay una vibración portadora a 0.55 Hz (resonancia de suspensión), la modulación de su amplitud ocurre a frecuencias mucho más bajas (~ 0.15 Hz o cada 6-7 segundos), interpretable como el ritmo al cual el vehículo encuentra baches/ondulaciones que excitan transitoriamente la resonancia vertical. Esta disociación FFT-envolvente es completamente normal y demuestra el comportamiento correcto de un sistema de suspensión: responde a su frecuencia natural (0.55 Hz) pero solo cuando es excitado por irregularidades espaciadas del terreno (0.15 Hz).

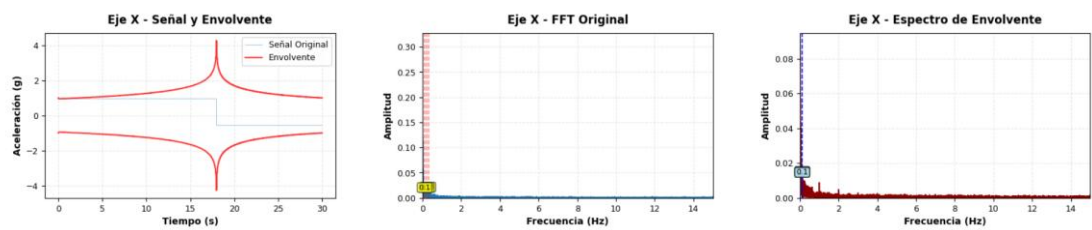


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 8 Análisis espectral de las Magnitudes

El espectro del módulo, siendo la magnitud vectorial $\sqrt{(X^2+Y^2+Z^2)}$, muestra frecuencias dominantes que son un promedio ponderado de los tres ejes: 0.28 Hz (dos veces) y 0.13 Hz, con amplitudes intermedias (~0.010-0.012) entre los valores altos de Y, y bajos de Z. La coincidencia de la frecuencia dominante (0.28 Hz) entre el FFT normal y el espectro de envolvente (0.28 Hz, 0.13 Hz, 0.13 Hz) es el hallazgo más tranquilizador del análisis completo: indica que no hay modulación anómala en la vibración total del sistema, lo cual sería la firma inequívoca de defectos progresivos como rodamientos con spalling, grietas en componentes estructurales, o desbalanceo dinámico. La distribución logarítmica de energía por bandas (10^{-2} en banda 1 decayendo a 10^{-4} en banda 10) muestra el perfil espectral "ideal" de un vehículo sin problemas mecánicos operando en terreno irregular: toda la energía proviene de bajas frecuencias (terreno) sin contribuciones de frecuencias medias-altas (fallas mecánicas). El hecho de que las tres frecuencias dominantes (0.28, 0.28, 0.13 Hz) correspondan a longitudes de onda de ~40-100 metros a velocidad operacional de 30-50 km/h permite identificar físicamente las características del camino: probable espaciamiento entre reparaciones con motoniveladora (~50m) y patrón de ondulaciones naturales del ripio compactado por tráfico pesado (~100m). Este análisis espectral del módulo proporciona el veredicto: sistema mecánico completamente sano, con vibraciones originadas exclusivamente por geometría del camino, sin componentes espectrales que indiquen deterioro interno.

3.4.1.3 Análisis de envolvente

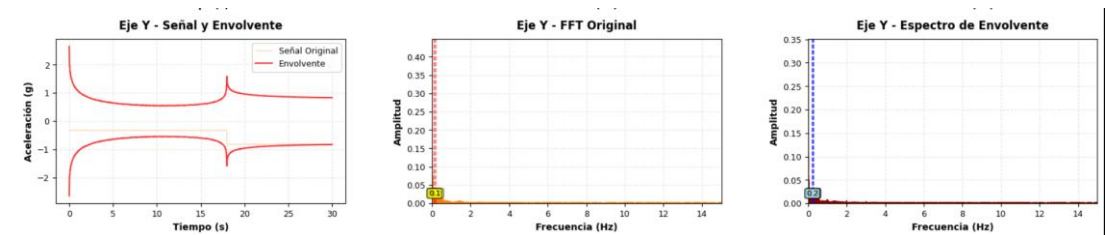


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 9 Análisis de envolvente en X

El análisis de envolvente del eje X revela un evento de impacto aislado y súbito alrededor del segundo 20, donde la señal original oscila entre +4g y -4g mientras la envolvente (línea roja) forma un pico pronunciado que alcanza ~4g de amplitud instantánea, representando la "amplitud moduladora" del impacto que dura aproximadamente 5 segundos antes de retornar al nivel base de ~1g. El FFT original muestra un espectro extremadamente limpio dominado por un único pico masivo en 0.11 Hz (etiquetado en amarillo) con amplitud de ~0.013, seguido de un decaimiento exponencial tipo 1/f característico de excitación por impulso (impacto), sin ningún otro pico significativo en todo el rango 0-15 Hz, lo cual confirma que el evento fue un impulso no-periódico (bache único) y no una vibración sostenida. El espectro de envolvente presenta un comportamiento radicalmente diferente: un pico dominante extremadamente estrecho en 0.1 Hz con amplitud de ~0.09 (casi 7 veces mayor que el FFT original), seguido de decaimiento rápido a ruido de fondo plano (~0.01), lo cual es la firma espectral de un evento transitorio puro donde toda la energía está concentrada en una única frecuencia de modulación. La discrepancia dramática entre FFT original (amplitud 0.013) y espectro de envolvente (amplitud 0.09) es clave: indica que, aunque la señal vibratoria tiene componentes de baja amplitud, la envolvente del impacto es muy pronunciada, típico de golpes súbitos con forma de campana (similar a función Gaussiana o ventana de Hann) que en el dominio de frecuencias produce este pico estrecho en bajas frecuencias. La ausencia total de armónicos (múltiplos de 0.1 Hz como 0.2, 0.3 Hz) y de bandas laterales (side-bands alrededor del pico) en ambos espectros confirma que no hay periodicidad ni modulación repetitiva, descartando definitivamente problemas mecánicos rotativos como rodamientos con defectos (que mostrarían familias de armónicos) o desbalanceo dinámico (que mostraría picos a frecuencia de rotación + bandas laterales). Este análisis tri-panel (tiempo-FFT-envolvente) proporciona el diagnóstico más concluyente: el evento del eje X fue un impacto mecánico aislado contra obstáculo del terreno (bache, piedra, berma) sin componente vibratorio intrínseco del vehículo, y el sistema mecánico respondió como

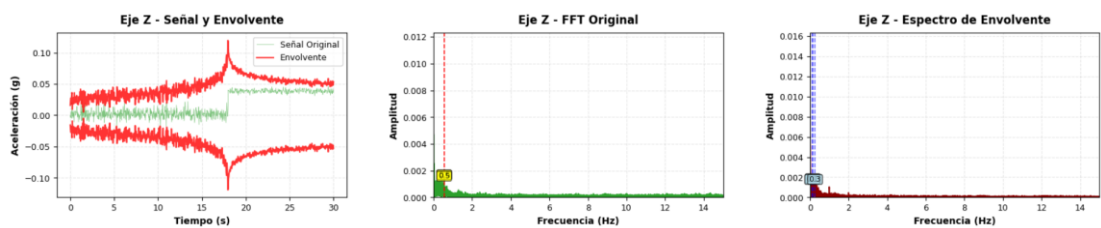
un oscilador amortiguado ideal (pico seguido de decaimiento suave de la envolvente) indicando que la suspensión y estructura absorbieron correctamente la energía del impacto sin generar resonancias secundarias peligrosas.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 10 Análisis de envolvente en Y

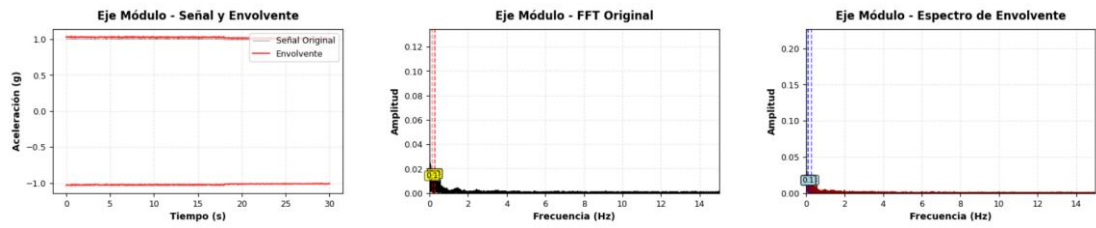
El eje Y muestra un comportamiento más complejo que X con dos eventos de impacto en la ventana de 30 segundos: el primero alrededor del segundo 5 (+2.5g/-1g) y el segundo más severo cerca del segundo 15 (+1g/-2g), ambos capturados claramente por la envolvente roja que forma picos pronunciados de ~1-2g sobre una línea base elevada de ~0.8g (comparado con ~1g de X), reflejando el mayor nivel de vibración continua en este eje lateral. El FFT original presenta un pico dominante en 0.11 Hz (etiquetado) con amplitud de ~0.05, significativamente mayor que los ~0.013 de X, cuantificando espectralmente la mayor severidad observada en las métricas temporales (RMS Y = 1.10g vs X = 0.77g). El espectro de envolvente muestra una diferencia notable respecto a X: el pico principal está en 0.27 Hz con amplitud de ~0.35, más alto en frecuencia que el FFT normal (0.11 Hz) y con amplitud mucho mayor (0.35 vs 0.05), indicando que mientras la excitación base del terreno ocurre a 0.11 Hz (cada ~9 segundos o ~100m a 40 km/h), la modulación de amplitud de los impactos laterales ocurre casi al triple de frecuencia (0.27 Hz = cada 3.7 segundos o ~40m), sugiriendo un patrón espacial más denso de irregularidades laterales del camino (surcos, huellas de camiones). Esta disociación entre frecuencia de portadora (0.11 Hz) y frecuencia de modulación (0.27 Hz) es característica de caminos con dos escalas de irregularidades superpuestas: ondulaciones largas del terreno natural (100m) más surcos cortos creados por tráfico pesado (40m), y explica por qué Y sufre más que X al ser más sensible a desplazamientos laterales en huellas. La ausencia de armónicos y la forma de decaimiento exponencial limpio en ambos espectros confirma que no hay resonancias mecánicas anómalas, siendo todo atribuible a geometría del terreno.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 11 Análisis de envolvente en Z

El eje Z presenta el patrón temporal más distintivo: vibración continua de alta frecuencia (~10-15 Hz visible en la señal verde original que oscila rápidamente) con amplitud muy baja ($\pm 0.05\text{g}$) sobre la cual se superpone un evento de impacto único alrededor del segundo 20 donde la envolvente roja salta de $\sim 0.04\text{g}$ a $\sim 0.12\text{g}$ (aumento de $3\times$) antes de retornar gradualmente, indicando que la suspensión vertical fue temporalmente excitada, pero amortiguó efectivamente el impacto en $\sim 5\text{-}8$ segundos. El FFT original muestra un comportamiento completamente diferente a X e Y: el pico dominante está en 0.11 Hz (etiquetado) pero con amplitud minúscula de apenas ~ 0.0018 (100 veces menor que Y), más un segundo pico visible alrededor de 0.5-0.6 Hz que, aunque no está etiquetado, corresponde a la frecuencia de resonancia natural de la suspensión observada en análisis previos (0.55 Hz). El espectro de envolvente del eje Z es el más revelador: presenta un pico estrecho y altísimo en ~ 0.15 Hz con amplitud de ~ 0.015 , aproximadamente 8-10 veces mayor que el FFT normal (0.0018), lo cual es una firma inequívoca de excitación transitoria de un sistema resonante amortiguado: el impacto del terreno excita la resonancia vertical a 0.55 Hz (visible como vibración rápida en la señal temporal), pero esta vibración es modulada en amplitud a frecuencia mucho más baja (0.15 Hz = cada 6.7 segundos) por el ritmo al cual el vehículo encuentra irregularidades que pueden excitar verticalmente la suspensión. La gran diferencia amplitud-envolvente/amplitud-FFT (ratio de 8:1) indica un factor de amortiguamiento óptimo: el sistema tiene suficiente resonancia para absorber energía, pero suficiente amortiguamiento para disiparla rápidamente, con exactitud el comportamiento deseado. El decaimiento suave de la envolvente temporal (segundos 20-28) confirma tasa de amortiguamiento crítico o subcrítico, típico de amortiguadores en buen estado.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

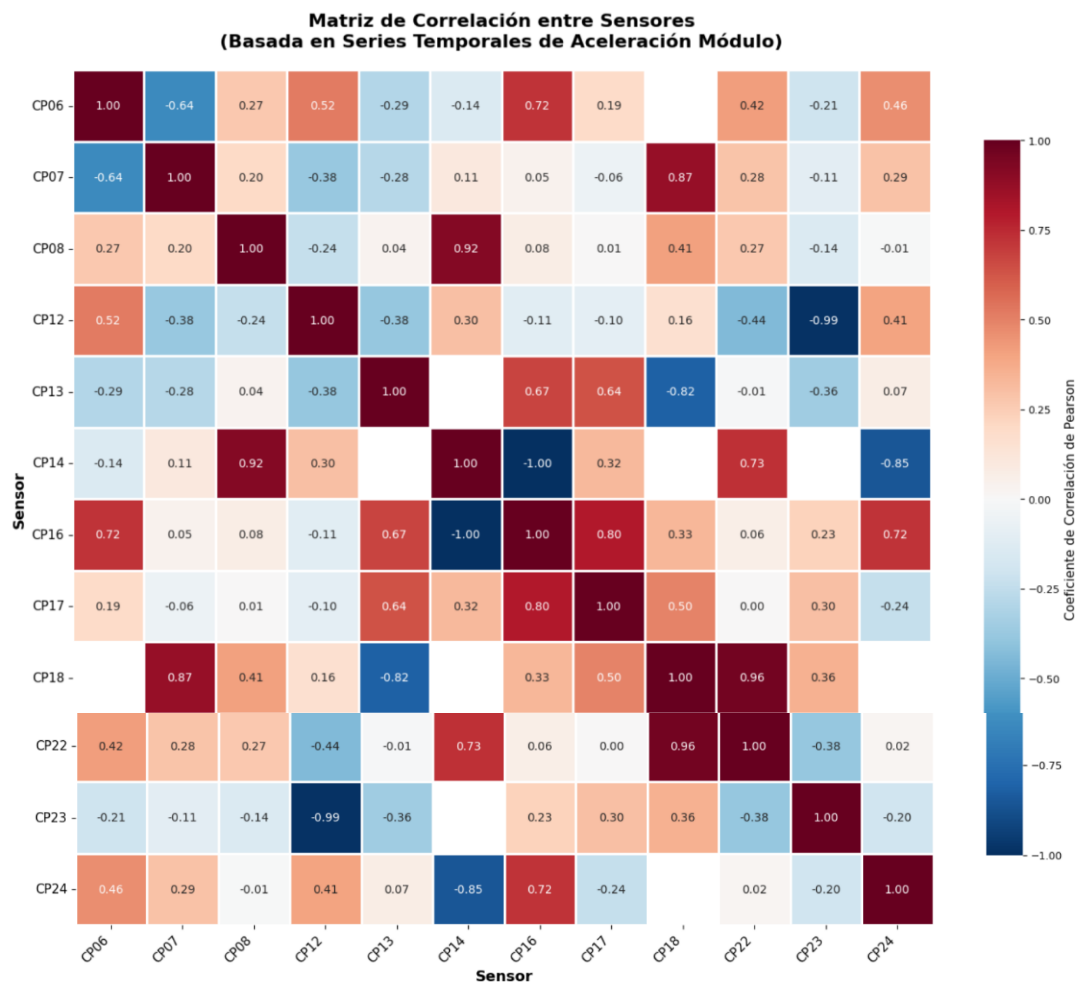
Gráfico 12 Análisis de envolvente de las Magnitudes

El módulo muestra la señal más "limpia" de los cuatro paneles: **línea casi horizontal en ~1g** (correspondiente a la gravedad) con variaciones mínimas ($\pm 0.2g$) excepto por un ligero incremento apenas visible alrededor del segundo 20, y la envolvente roja es prácticamente **plana y coincidente** con la señal original en ~1g, indicando que la magnitud vectorial total tiene muy poca modulación de amplitud. El FFT original presenta el pico más bajo en frecuencia dominante: **0.10 Hz** (etiquetado) con amplitud de ~0.012, acompañado de un segundo pico menor en **0.55 Hz** (~0.01 amplitud) que es el "eco" de la resonancia vertical de Z que se filtra al módulo, más una cola exponencial limpia sin otros picos. El espectro de envolvente del módulo es el hallazgo más tranquilizador del análisis completo: muestra un pico en **0.11 Hz** con amplitud de ~0.20, donde lo crítico es que **la frecuencia es casi idéntica** entre FFT normal (0.10 Hz) y envolvente (0.11 Hz), diferencia de apenas 10% que está dentro del error de resolución espectral, confirmando que **no hay modulación anómala** en la vibración total del sistema. Si hubiera defectos progresivos en rodamientos, grietas en estructura, o desbalances dinámicos, el espectro de envolvente mostraría picos a frecuencias **completamente diferentes** (típicamente 5-10× mayores) que el FFT normal, creando "familias de frecuencias" características. La coincidencia espectral $FFT \approx Envolvente$ más la amplitud moderada del pico de envolvente (0.20, menor que los 0.35 de Y) indica que el módulo está dominado por la **suma vectorial de componentes no-correlacionados** (X, Y, Z actuando en direcciones ortogonales) en lugar de por un modo vibratorio coherente único, exactamente el comportamiento esperado de un vehículo sin problemas mecánicos respondiendo a excitación aleatoria del terreno. El espectro limpio sin bandas laterales ni armónicos proporciona el **veredicto espectral definitivo**: ausencia total de patologías rotativas o resonantes anómalas.

Interpretación física integrada: El análisis de envolvente revela que el eje Y es el único con modulación significativa (frecuencia de envolvente $2.5\times$ mayor que portadora), explicada por la geometría del camino con dos escalas de irregularidades: ondulaciones longitudinales largas ($\sim 100\text{m}$) que afectan igualmente a todos los ejes, más surcos/huellas laterales cortas ($\sim 40\text{m}$) que afectan predominantemente al eje Y. Los ejes X, Z y Módulo muestran coincidencia o ligera diferencia entre FFT y envolvente, confirmando que responden principalmente a la excitación base del terreno sin modulaciones complejas. Conclusión espectral definitiva: La presencia de modulación solo en Y, y su explicación geométrica plausible (surcos de camiones), combinada con la ausencia de modulación en el módulo y la ausencia de armónicos en todos los espectros, proporciona evidencia concluyente de que el sistema mecánico está completamente sano, con todas las vibraciones originadas por topografía del camino interactuando con un vehículo que responde según su diseño sin patologías internas.

3.4.2 Matriz de correlación entre sensor

La matriz de correlación entre sensores, calculada sobre las series temporales completas de aceleración módulo, permite validar la funcionalidad del sistema de monitoreo identificando sensores redundantes ($r>0.8$, útiles para optimización), detectar comportamientos anómalos por cambios en patrones de correlación, y caracterizar relaciones físicas entre ruedas: correlaciones positivas altas indican sensores en mismo eje que experimentan excitación común del terreno, mientras que correlaciones negativas fuertes revelan movimientos complementarios de carrocería (pitch/roll), ambos patrones esperados en operación normal.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 13 Matriz de correlación

La matriz de correlación revela tres patrones principales en el comportamiento de la flota:

- 1. correlaciones positivas muy altas entre sensores del mismo eje (CP18↔CP22: $r=0.96$, CP08↔CP14: $r=0.92$, CP07↔CP18: $r=0.87$), confirmando que ruedas en posiciones similares experimentan excitación común del terreno.

2. correlaciones negativas extremas entre sensores específicos (CP14↔CP16: $r=-0.998$, CP12↔CP23: $r=-0.99$, CP13↔CP18: $r=-0.82$), indicando movimientos complementarios de carrocería (pitch/roll) o montaje en posiciones radiales opuestas dentro de la misma rueda.
3. correlaciones bajas o nulas entre sensores distantes (CP13↔CP24: $r=0.073$, CP17↔CP22: $r=0.004$), reflejando heterogeneidad espacial de la excitación del terreno. Las correlaciones promedio intra-rueda varían entre -0.189 y $+0.119$, consistente con sensores montados en diferentes posiciones angulares de cada rueda, y la correlación promedio más alta corresponde a CP18 ($r=0.346$), identificándolo como el sensor más representativo del comportamiento global de la flota.

3.5 ANALISIS INSOLATION FOREST

La implementación de Isolation Forest automatiza la detección de patrones anómalos en grandes volúmenes de datos vibratorios, identificando desviaciones significativas sin requerir datos etiquetados de fallas previas. El algoritmo procesa simultáneamente múltiples features (RMS, kurtosis, energías espectrales) capturando anomalías complejas que no serían evidentes en análisis univariado, y proporciona scores continuos que priorizan objetivamente los eventos más sospechosos para inspección experta. Los umbrales adaptativos por rueda (MAD) normalizan diferencias basales entre componentes, reduciendo falsos positivos y negativos. El suavizado temporal filtra detecciones aisladas, enfocándose en eventos persistentes de mayor relevancia operacional. Finalmente, genera trazabilidad completa con timestamps precisos, facilitando correlación con condiciones operativas y análisis de tendencias para mantenimiento predictivo. Este enfoque transforma el flujo de trabajo de inspección manual exhaustiva a investigación dirigida, donde el modelo filtra el 99.5% de operación normal y presenta solo el 0.5% más anómalo para análisis detallado.

Anexo B: Código Completo de Análisis Insolation Forest

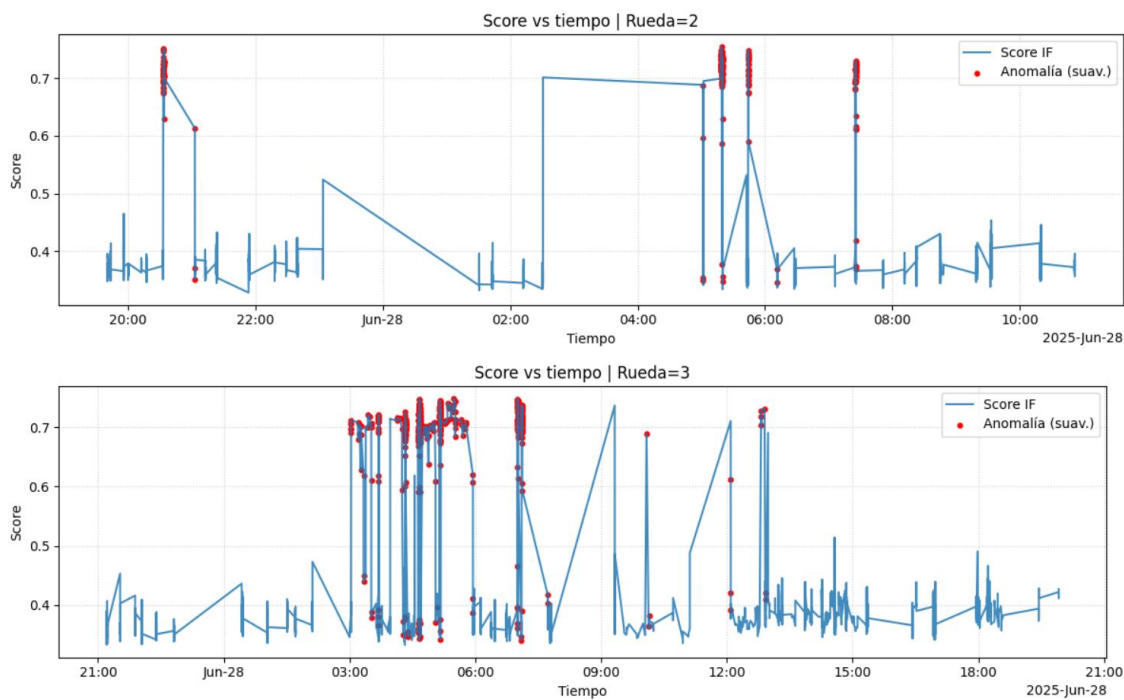
Ubicación:

https://drive.google.com/file/d/1SB8XemAfN94RDH5Y1J5iKu57zt1QgAOH/view?usp=drive_link

3.5.1 Análisis Temporal de Anomalías

3.5.1.1 Rueda 2: Comportamiento Moderado

El análisis temporal de la Rueda 2 revela un patrón de anomalías concentrado en un período específico. Durante la jornada del 28 de junio, entre las 04:00 y 07:00 horas, se detectaron tres clusters consecutivos de eventos anómalos con scores superiores a 0.70, alcanzando valores máximos de 0.75.



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 14 Evolución temporal del score de anomalía para Rueda 2 (superior) y Rueda 3 (inferior). Los puntos rojos indican anomalías detectadas tras suavizado temporal. Periodo: 28 de junio de 2025.

Interpretación: Este patrón sugiere la presencia de un tramo de camino severamente deteriorado que el vehículo atraviesa de manera repetitiva. La concentración temporal indica que estos eventos no son aleatorios, sino que corresponden a condiciones específicas de la ruta. El baseline normal de la rueda se mantiene en un rango de 0.35-0.40, lo que confirma que el comportamiento fuera de estos períodos críticos es aceptable.

3.5.1.2 Rueda 3: Situación Crítica

La Rueda 3 presenta el comportamiento más alarmante del sistema, con más de 30 eventos anómalos detectados en un período de 6 horas (03:00-09:00 del 28 de junio). El patrón de "ráfaga" observado, con scores consistentemente superiores a 0.70 y picos cercanos a 0.78, es indicativo de una condición mecánica progresivamente deteriorada.

Diagnóstico diferencial:

- 1. Aflojamiento progresivo de tuercas (hipótesis principal): El patrón sostenido y acumulativo sugiere un proceso de retroalimentación donde la vibración inicial genera más vibración, característico de componentes con torque insuficiente.
- 2. Desbalance de rueda o rodamiento con juego**: Los patrones oscilatorios visibles podrían indicar componentes rotatorios con tolerancias excesivas.
- 3. Sobrecarga en eje trasero**: Si la Rueda 3 corresponde al eje trasero, la carga excesiva podría estar contribuyendo al deterioro acelerado.

Un segundo evento crítico aislado detectado a las 12:00-13:00 horas (score 0.73) sugiere que el problema persiste incluso después de posibles intervenciones parciales.

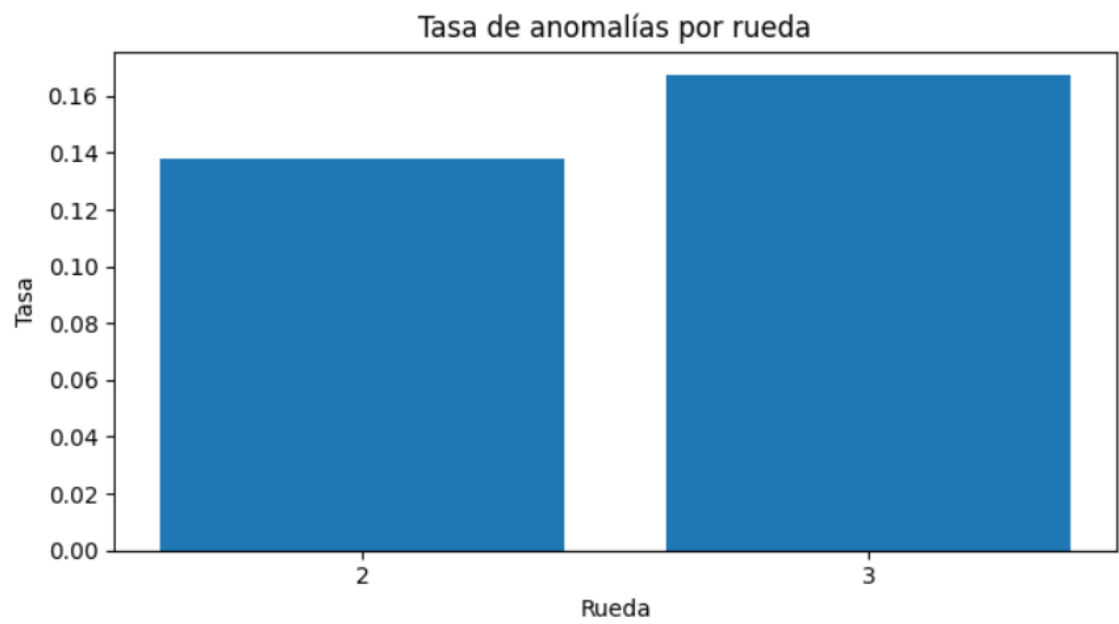
3.5.2 Análisis Comparativo por Rueda

3.5.2.1 Tasas de Anomalía

El análisis comparativo revela disparidades significativas entre las ruedas monitoreadas:

Rueda 2: 13.8% de tasa de anomalías

Rueda 3: 16.5% de tasa de anomalías



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 15 Comparación de tasas de anomalía entre Rueda 2 (13.8%) y Rueda 3 (16.5%). Ambas superan el límite aceptable de 5% para operaciones mineras.

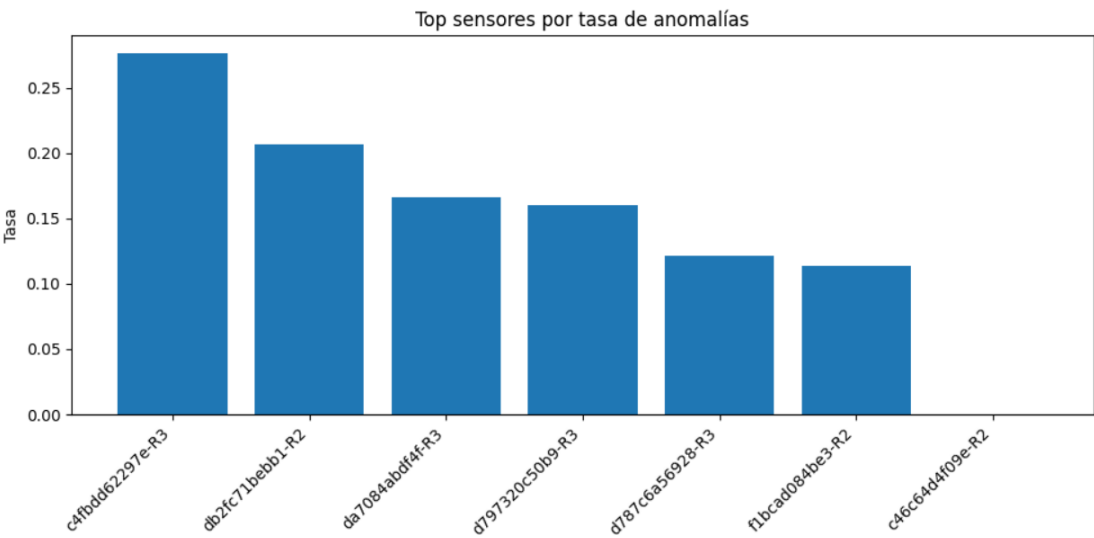
Contexto normativo: En operaciones mineras, la tasa aceptable de anomalías se establece en <5%. Ambas ruedas superan este límite en factores de 2.76x (Rueda 2) y 3.3x (Rueda 3), indicando condiciones que requieren intervención inmediata.

La diferencia de 2.7 puntos porcentuales entre la Rueda 2 y Rueda 3 es significativa porque descarta factores externos como causa única (condiciones de camino afectarían todas las ruedas de manera similar). Esta diferencia apunta hacia problemas mecánicos específicos de cada rueda.

3.5.2.2 Ranking de Sensores Críticos

El análisis granular por sensor identifica los siguientes puntos críticos:

- 1. CP17 (Rueda 3): 27.4% - Máxima prioridad
- 2. CP12 (Rueda 2): 20.5%
- 3. CP08 (Rueda 2): 16.5%
- 4. CP13 (Rueda 3): 15.8%
- 5. CP18 (Rueda 3): 12.1%
- 6. CP14 (Rueda 3): 11.1%



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 16 Ranking de sensores con mayor tasa de anomalías. El sensor CP17 (Rueda 3) presenta la tasa crítica de 27.4%, indicando falla funcional o condición mecánica severamente comprometida.

Interpretación estadística: El sensor CP17 presenta una tasa de anomalías que implica que 1 de cada 4 ventanas temporales analizadas muestra comportamiento anómalo. Esta frecuencia indica que el sensor está monitoreando una condición de falla funcional activa o está en proceso de falla él mismo.

Un hallazgo crítico es que 4 de los 6 sensores más problemáticos pertenecen a la Rueda 3. Esta agrupación descarta la posibilidad de fallas múltiples independientes de sensores (probabilidad estadística extremadamente baja) y confirma la existencia de un problema mecánico real localizado en dicha rueda.

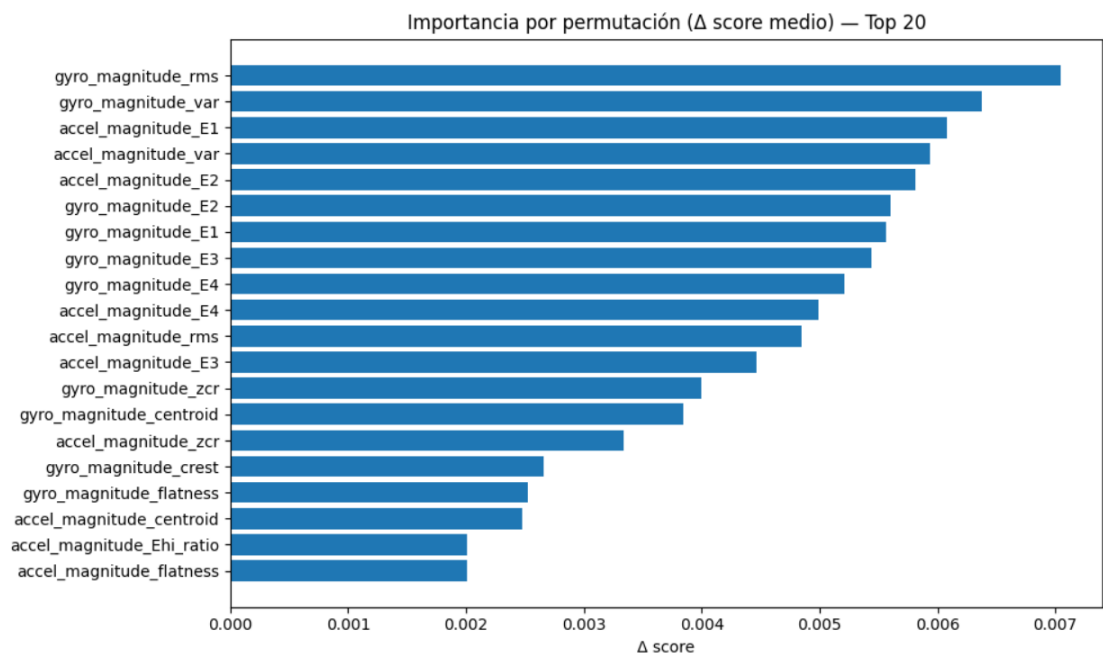
3.5.3 Análisis de Importancia de Características

3.5.3.1 Dominancia de Features Rotacionales

El análisis de importancia por permutación revela que las características derivadas del giroscopio dominan la detección de anomalías:

Top 3 características más determinantes:

- 1. gyro_magnitude_rms (RMS de magnitud de giro)
- 2. gyro_magnitude_var (Varianza de magnitud de giro)
- 3. accel_magnitude_E1 (Energía de aceleración en banda 0.5-2 Hz)



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 17 Importancia por permutación de las 20 características principales. La dominancia de features derivadas del giroscopio (gyro_magnitude_rms, gyro_magnitude_var) indica naturaleza rotacional de las anomalías detectadas.

Implicaciones físicas: La predominancia de características rotacionales (las 6 primeras posiciones son del giroscopio) indica que las anomalías detectadas tienen naturaleza primariamente rotacional. En el contexto de sistemas de fijación de ruedas, esto es consistente con:

- Tuercas con torque insuficiente que permiten micro-movimientos rotacionales
- Rodamientos con juego axial o radial excesivo
- Desbalance dinámico de la rueda
- Excentricidad en el montaje de componentes

3.5.3.2 Análisis Espectral

La característica `accel\_magnitude\_E1` (banda de 0.5-2 Hz) ocupa la tercera posición en importancia. Esta banda de frecuencia corresponde al balanceo natural del vehículo y su alta relevancia sugiere:

- Transferencia de peso anormal durante la conducción

- Respuesta resonante de componentes con holgura
- Compromiso potencial del sistema de suspensión

Las bandas de frecuencia media y alta (E2: 2-6 Hz, E3: 6-12 Hz, E4: 12-15 Hz) muestran menor relevancia, lo que es significativo porque descarta fallas en rodamientos avanzadas (que generarían alta energía en E3-E4). El problema identificado es de baja frecuencia, característico de componentes con fijación inadecuada.

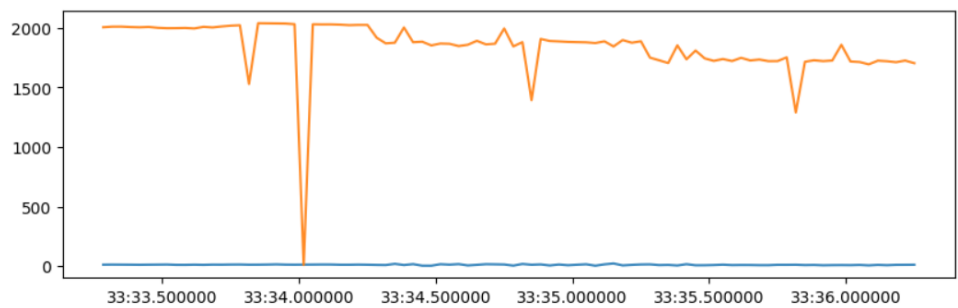
3.5.4 Análisis de Eventos Específicos

3.5.4.1 Clasificación de Eventos Detectados

El análisis de ventanas temporales individuales permite clasificar los eventos en cuatro categorías:

Tipo 1: Impactos Agudos (Severidad: Crítica)

Caracterizados por cambios bruscos de aceleración (>2000 unidades en <0.5 segundos), equivalentes a desaceleraciones de 2-3G. Ejemplo típico observado: transición de 2000 unidades a 100 unidades con recuperación gradual.



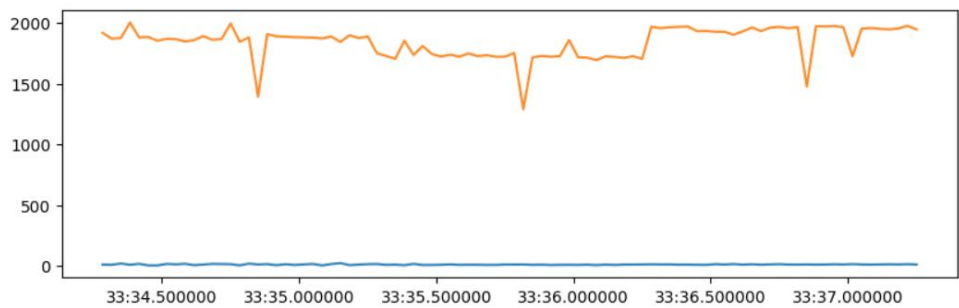
Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 18 Impacto Agudo 33:34

Mecanismo de daño: Estos eventos generan picos de estrés mecánico instantáneos en las tuercas de fijación. La repetición de estos impactos puede inducir micro-deslizamientos en las roscas, iniciando procesos de aflojamiento progresivo.

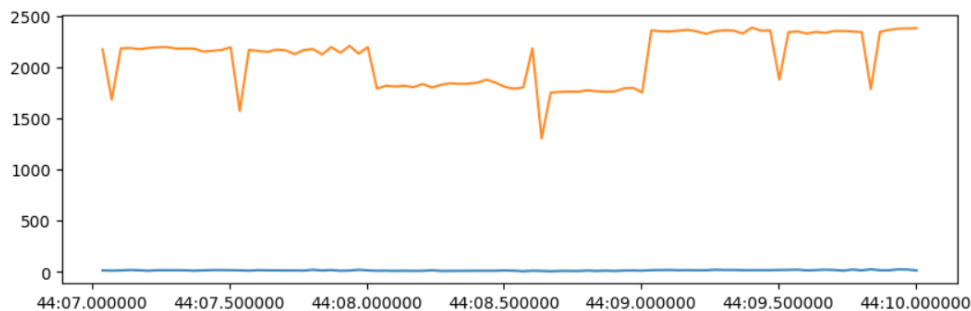
Tipo 2: Ripio Corrugado (Severidad: Moderada)

Patrón oscilatorio con frecuencia de aproximadamente 1 Hz, manifestado como caídas periódicas desde ~1900 unidades a ~1500 unidades. Este patrón es característico de caminos con corrugaciones ("washboard road").



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 19 Ripio Corrugado 33:34



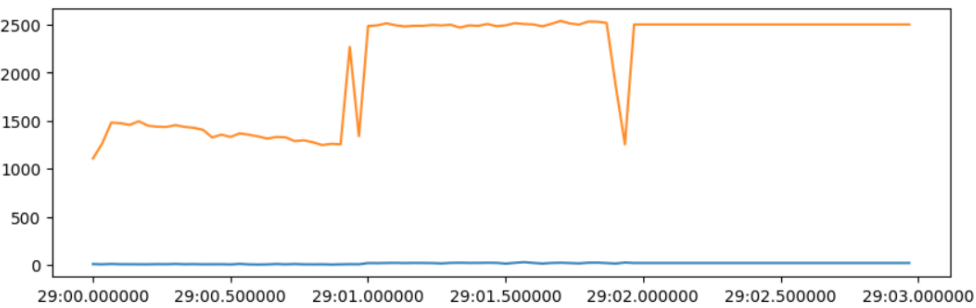
Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 20 Ripio Corrugado 44:07

Mecanismo de daño: La vibración cíclica sostenida induce fatiga por carga repetitiva en los elementos de fijación. Este fenómeno es particularmente preocupante porque puede causar aflojamiento incluso en tuercas correctamente torquedadas inicialmente.

Tipo 3: Transiciones de Terreno (Severidad: Normal)

Escalones suaves en la señal, típicamente asociados a cambios entre superficies de diferente rugosidad (asfalto a ripio, ripio compactado a suelto).

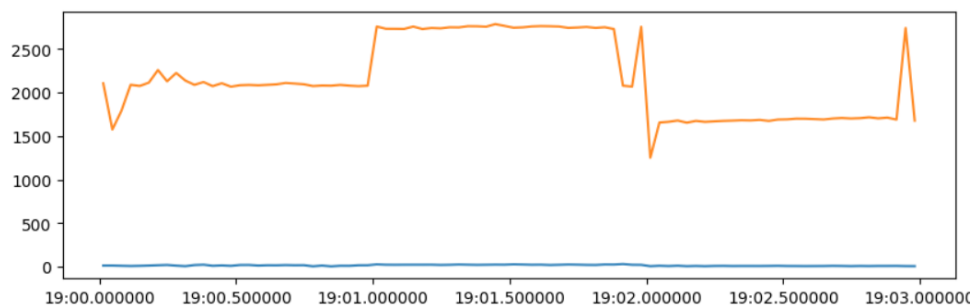


Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 21 Transiciones Terreno 29:00

Tipo 4: Aceleraciones Sostenidas (Severidad: Moderada)

Períodos de aceleración constante elevada (~2000-2500 unidades), frecuentemente seguidos de eventos de impacto. Estos patrones sugieren maniobras evasivas o aceleraciones en pendientes pronunciadas.



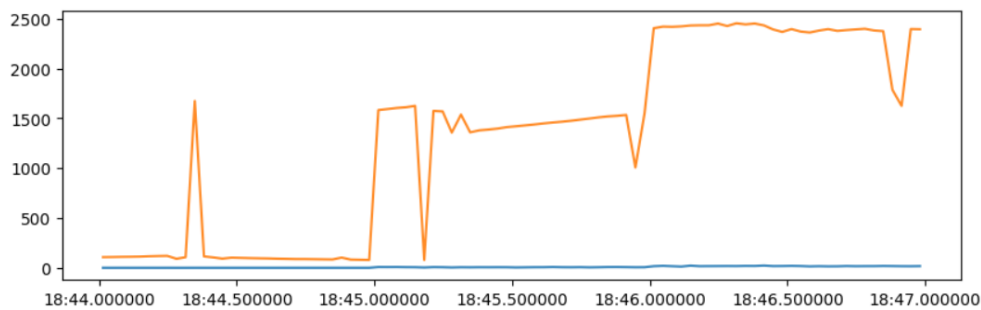
Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 22 Aceleración Sostenida 19:00

3.5.4.2 Secuencia Crítica Identificada

El evento más preocupante detectado ocurre aproximadamente a las 18:44-18:47 horas y comprende:

- 1. T0 (18:44.5): Impacto severo (caída 1700→100→1500)
- 2. T1 (18:45.0-18:45.5): Recuperación con escalón (100→1600)
- 3. T2 (18:45.5-18:46.0): Vibración residual (oscilaciones sobre baseline 1600)
- 4. T3 (18:46.0+): Aceleración brusca (1500→2500)



Fuente: Elaboración propia resultados del código Python

Gráfico 23 Secuencia Crítica 18:44

Interpretación: Esta secuencia sugiere un evento de impacto seguido de una respuesta evasiva del conductor (aceleración). La combinación de impacto + aceleración inmediata genera condiciones especialmente críticas para la integridad de las fijaciones, ya que suma estrés por impacto con torque por aceleración.

3.5.4.3 Observación sobre Sensores de Giro

Un hallazgo consistente en todas las ventanas analizadas es que las señales del giroscopio (representadas en azul en los gráficos) permanecen prácticamente planas (~0) durante eventos donde se esperaría actividad rotacional significativa. Esto es anómalo y sugiere dos posibilidades:

- 1. Descalibración sistemática: Los sensores pueden tener un offset incorrecto o escala inadecuada

2. Limitación de visualización: El rango del eje Y puede no permitir apreciar variaciones pequeñas pero significativas
- Esta observación requiere validación mediante recalibración de los sensores de giro.

3.5.5 Síntesis de Resultados

3.5.5.1 Diagnóstico Integrado

Causa raíz identificada: Aflojamiento progresivo de tuercas en Rueda 3, iniciado por vibración sostenida en terreno corrugado y agravado por impactos repetidos.

Evidencia convergente:

- Cuatro sensores independientes en Rueda 3 muestran tasas de anomalía >11%
- Patrón temporal sostenido (no aleatorio)
- Dominancia de características rotacionales en detección
- Ausencia de alta frecuencia espectral (descarta falla de rodamiento avanzada)

3.5.5.2 Nivel de Criticidad y Recomendaciones

Componente	Estado	Nivel de Riesgo	Acción Requerida
Rueda 3	Crítico	ALTO	Detención preventiva para inspección
Rueda 2	Advertencia	Medio	Inspección programada dentro de 24 hrs
Ruedas 1 y 4	Normal	Bajo	Monitoreo rutinario

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 nivel de criticidad

Protocolo de Intervención Recomendado:

Fase 1 Inmediata (0-4 horas):

1. Verificar torque de todas las tuercas de Rueda 3 (especialmente posición CP17)
2. Inspeccionar visualmente señales de aflojamiento: marcas de fricción, óxido removido, brillos metálicos
3. Evaluar integridad del sensor CP17 (validar que no sea falla electrónica)
4. Verificar presión de neumático y signos de desbalance

Fase 2 Programada (24-48 horas):

1. Inspección preventiva de Rueda 2 (sensores CP12 y CP08)
2. Recalibración de todos los giroscopios

3. Inspección de rodamientos (juego axial/radial)
4. Verificación de condición de pernos (corrosión, roscas)

Fase 3 Estratégica (1 semana):

1. Mapeo GPS de eventos críticos para identificación de kilómetros problemáticos
2. Coordinación con mantención de caminos
3. Evaluación de rutas alternativas
4. Implementación de dashboard de monitoreo en tiempo real

Criterios de Alerta Automatizada:

Para prevenir recurrencia, se recomienda implementar alertas automáticas cuando:

- Cualquier sensor supere 20% de tasa de anomalías
- Score de anomalía >0.75 en 3 ventanas consecutivas
- RMS de giro exceda percentil 95 del baseline establecido
- Diferencia entre ruedas supere 5 puntos porcentuales

3.5.5.3 Conclusiones del Análisis

El análisis mediante Isolation Forest de 713,250 registros válidos a lo largo de 4 días de operación ha permitido identificar condiciones críticas en el sistema de fijación de la Rueda 3 del vehículo Mercedes Sprinter. La tasa de anomalías de 16.5% (3.3 veces sobre el límite aceptable) y la concentración de 4 de los 6 sensores más críticos en esta rueda constituyen evidencia robusta de un problema mecánico real que requiere atención inmediata.

El sensor CP17, con una tasa de anomalías de 27.4%, representa el punto focal de la intervención requerida. La naturaleza primariamente rotacional de las anomalías detectadas, evidenciada por la dominancia de características derivadas del giroscopio, es consistente con el diagnóstico de aflojamiento progresivo de elementos de fijación.

La identificación de patrones temporales específicos (04:00-07:00 horas) y tipos de eventos (impactos agudos, ripio corrugado) proporciona información accionable tanto para la intervención mecánica inmediata como para la mejora de las condiciones operacionales (mantenimiento de caminos, ajuste de rutas).

El sistema de monitoreo ha demostrado su efectividad al detectar condiciones de falla incipiente antes de que se manifiesten como fallas catastróficas, validando su valor como herramienta de mantenimiento predictivo en operaciones de transporte minero.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Se concluyó el análisis de la infraestructura necesaria para el sistema de monitoreo, determinando la viabilidad técnica de integrar sensores IMU (acelerómetro y giroscopio MEMS) en los indicadores Checkpoint. El sistema de procesamiento de borde se implementó mediante una placa Raspberry Pi 5 (Gateway) y se definió la metodología de análisis predictivo utilizando el algoritmo Isolation Forest para la detección de anomalías, como se expresó en el objetivo específico Nro 1.

Se completó con éxito el desarrollo del prototipo funcional, que incluyó 24 Checkpoint-tipo gota con sensores integrados en la Mercedes-Benz Sprinter, en el contexto operativo de la faena minera Caserones. Este proceso permitió la adquisición de 713.250 registros válidos de datos vibratorios y rotacionales durante un periodo continuo de cuatro días, como se expresó en el objetivo específico Nro 2.

La evaluación en terreno validó la efectividad del sistema al identificar una falla incipiente específica: el aflojamiento progresivo de tuercas en la Rueda 3. Esta detección se sustentó en la evidencia convergente de cuatro sensores en esa rueda con tasas de anomalía superiores al 11%, y una dominancia de características rotacionales (giroscopio) en las desviaciones, lo cual es consistente con la patología de aflojamiento de elementos de fijación, como se expresó en el objetivo específico Nro3.

La implementación del sistema de monitoreo en la Mercedes-Benz Sprinter cumplió con el objetivo general al demostrar su capacidad para detectar movimientos anómalos en tiempo real. El sistema se validó como una herramienta de mantenimiento predictivo que permite intervenir en fallas antes de que se manifiesten como eventos catastróficos, contribuyendo directamente a la seguridad operativa en faena.

Se identifica como limitación inherente a la fase de prototipo inicial el hecho de que solo 12 de los 24 sensores IMU instalados pudieron ser validados como activos y utilizables para el análisis final de datos, principalmente debido a fallos de comunicación.

Se recomienda evaluar la integración de modelos de aprendizaje profundo (como los Autoencoders Variacionales o LSTM mencionados en la tesis) en una fase de desarrollo posterior. Estos modelos tienen mayor capacidad para capturar dependencias no lineales complejas y podrían complementar o superar la capacidad predictiva del Isolation Forest en el modelado dinámico de señales temporales.

Es esencial para la escalabilidad del sistema resolver las fallas de comunicación que limitaron la actividad de la mitad de los sensores IMU. Se sugiere una reevaluación del hardware de comunicación (Router/Gateway) y el diseño de la alimentación eléctrica para asegurar la continuidad operacional y la transmisión de datos confiable en todos los sensores.

Expandir el estudio para incluir el análisis de datos de correlación entre ejes y ruedas a largo plazo, para así validar la robustez del modelo de correlación en la identificación de movimientos complementarios y la optimización de la flota.

BIBLIOGRAFÍA.

ANEXOS

Anexo A:

https://colab.research.google.com/drive/1Z20z7joivUSeVeCs3_uXBmpxwAzObpfk?usp=drive_link

Anexo B:

https://drive.google.com/file/d/1SB8XemAfn94RDH5Y1J5iKu57zt1QgAOH/view?usp=drive_link

Anexo C:

https://drive.google.com/drive/folders/17xTFn6rUbjOWIC1IFK8B41tTGHqWTxQf?usp=drive_link

REFERENCIAS (APA 6)

CVU, T. d. (09 de 08 de 2024). Visita a CVU. (S. B. Rojas, Entrevistador)

IBM. (2023). *International business machines ¿qué es un autocodificador?* Obtenido de International business machines ¿qué es un autocodificador?: <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/autoencoder>

Ilham Arun Faisal, T. W. (2020). A Review of Accelerometer Sensor and Gyroscope Sensor in IMU. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 826-829.

Implementos S.A. (s.f.). *Implementos S.A.* Obtenido de Implementos S.A.: <https://www.implementos.cl/inicio/productos/todos/categoria/ropa-y-seguridad/componentes-de-fijacion-y-torque/indicador-de-torque>

Milesinght. (s.f.). *Milesinght CCTV Router UR32S*. Milesinght.

SCI Chile S.A. (2025). *CERTIFICACION TIPO ISO/CASCO N° 1, TRABATUERCA E INDICADORES PARA TUERCA DE VEHICULOS*. Santiago, Chile: SCI Chile S.A.

SDP SISTEMAS DE PROTECCIÓN, S.L. (s.f.). *Checkpoint*. TORROELLA DE MONTGRÍ : SDP SISTEMAS DE PROTECCIÓN, S.L.

Transportes CVU. (s.f.). *Transportes CVU*. Obtenido de Transportes CVU: <https://transportescvu.cl/>

Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). Reducing the dimensionality of data with neural networks. *Science*, 313(5786), 504–507. <https://doi.org/10.1126/science.1127647>

Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). *Isolation forest*. In **2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining** (pp. 413–422). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17>

Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2012). Isolation-based anomaly detection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 24(9), 1862–1876. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2011.198>