

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

incofer

**Estudio de factibilidad de un sistema de monitoreo en tiempo real para
operación y mantenimiento del estado de rieles para Incofer, basado en
tecnología *Axle Box Acceleration*.**

Informe de práctica de especialidad para optar por el título de Ingeniero en
Mantenimiento Industrial, grado Licenciatura

REALIZADO POR:

Carlos René López Flores

Cartago, diciembre 2020



Carrera evaluada y acreditada por:

Canadian Engineering Accreditation Board
Bureau Canadien d'Accréditation des Programmes d'Ingénierie

CARTA DE ENTENDIMIENTO

Fecha: 20 enero, 2021

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Sistema de Bibliotecas del Tecnológico

Yo Carlos René López Flores

carne No. 2016165888, si autorizo no autorizo, al Sistema de Bibliotecas del Tecnológico (SIBITEC), disponer del Trabajo Final de graduación, del cual soy autor, para optar por el grado de licenciatura, en la carrera de ingeniería en mantenimiento industrial, presentado en la fecha 19 enero, 2021, con el título Estudio de factibilidad de un sistema de monitoreo en tiempo real para operación y mantenimiento del estado de rieles para Incofer, basado en tecnología Axle Box Acceleration.

para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC, con el objetivo de ser visualizado a través de la red Internet.

Firma de estudiante:



Correo electrónico:

careloflo@gmail.com

Cédula No.:

604490480

Hoja de información

Información del estudiante

Nombre: Carlos René López Flores.

Cédula: 6 0449 0480.

Carné ITCR: 2016 16 58 88.

Dirección de residencia en época lectiva: Oriental, Cartago.

Dirección de residencia en época no lectiva: Las Mercedes, Cajón, Pérez Zeledón.

Teléfono en época lectiva: 88 32 12 73.

Correo electrónico: careloflo@gmail.com / careloflo@estudiantec.cr

Información del proyecto

Nombre del proyecto: “Estudio de factibilidad de un sistema de monitoreo en tiempo real para operación y manteniendo de estado de rieles, basado en tecnología Axle Box Acceleration.”

Profesor asesor: Ing. Carlos Piedra Santamaría

Información de la empresa

Nombre: Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER).

Dirección: Estación del Pacífico; San José, Costa Rica. Contiguo al Hospital de la Mujer CARIT; Calle 2 – Avenida 20.

Actividad principal: Transporte ferroviario de pasajeros y carga.

Asesora industrial: Ing. Ángela Osorno Loáisiga.

Teléfono: 25 42 58 00.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Llevar el Tren del Siglo XX al Tren del Siglo XXI

Dedicatoria

A mi papá, Reynaldo López Cárdenas, quien me enseñó el valor del trabajo, la dedicación que se le debe dar y lo más importante, la dignidad del trabajo honesto. Con sus virtudes, defectos y fortalezas él es y será mi ejemplo de vida, de cómo ser una persona de bien.

A mi mamá, Karla Flores Saénz, me enseñó a leer, escribir y matemáticas. Más que ser mi primera maestra, fue la primera que creyó en mi potencial, desde que nací. Le agradezco la dedicación y el amor que me ha dado.

Finalmente, a Don Osman Esquivel (QEPD), un amigo que creyó en mí, me apoyó en momentos difíciles. Con sus consejos y anécdotas me dio enseñanzas valiosas que guardaré por toda la vida, siempre lo voy a estimar como a un padre.

Agradecimientos

A mis papás, por apoyarme en todo momento de mi vida y creer en mí en cada momento de mi vida universitaria.

A mi hermana Massiel, por acompañarme y aconsejarme.

A Francis Badilla y Lauren Esquivel, por su amistad incondicional con que han tratado a mi familia.

A Edward, Christopher, Yimy y Alexander, quienes fueron parte fundamental en mi carrera universitaria.

A Edgar Mena y Guillermo Ávila, quienes fueron un pilar importante para mi familia durante el inicio de la carrera.

Contenido

1. Resumen	15
<i>Abstract</i>	16
2. Introducción	17
2.1. Antecedentes.....	17
2.2. Identificación de la institución	19
2.3. Planteo del problema.....	21
2.4. Justificación	23
2.5. Objetivos.....	26
2.5.1. Objetivo general	26
2.5.2. Objetivos específicos	26
2.6. Metodología.....	27
2.7. Viabilidad	28
2.8. Alcance.....	29
2.9. Limitaciones.....	30
3. Marco teórico	31
3.1. Auditorias de mantenimiento	31
3.1.1. Norma COVENIN 2500 – 93	31
3.2. Estructura de la vía férrea	33
3.2.1. Riel.....	33
3.2.2. Durmientes.....	34
3.2.3. Balasto	35
3.2.4. Sujeciones.....	36
3.2.5. Juntas.....	38
3.3. Defectos en riel.....	39
3.3.1. Defectos transversales.....	40
3.3.2. Defectos horizontales.....	41

3.3.3. Defectos en el área de contacto.....	41
3.3.3.a. Squats	43
3.3.3.b. Corrugación.....	44
3.4. Tecnología <i>Axle Box Acceleration</i>	45
3.4.1. Principios.....	47
3.5. <i>Hardware y Software</i> empleados.....	48
3.5.1. Arduino UNO.....	48
3.5.2. Arduino IDE.....	49
3.5.3. MPU 6050	51
3.5.4. <i>GPS Shield</i>	53
3.5.5. RTC DS1032.....	56
4. Situación actual del mantenimiento de rieles.....	58
4.1. Resultados y análisis	60
4.1.1. Organización del mantenimiento	62
4.1.2. Planificación del mantenimiento	63
4.1.3. Mantenimiento rutinario	64
4.1.4. Mantenimiento programado.....	65
4.1.5. Mantenimiento correctivo	66
4.1.6. Mantenimiento preventivo	67
4.1.7. Mantenimiento por avería.....	68
4.1.8. Personal de mantenimiento.....	69
4.1.9. Apoyo logístico	70
4.1.10. Recursos	71
4.2. Oportunidades de mejora	71
5. Estrategia de implementación de modelo de mantenimiento basado en condición	73
5.1. Cuadro de Mando Integral (<i>Balanced Score Card</i>).....	75

5.1.1. Objetivos institucionales	77
5.1.2. Cuadro FODA.....	79
5.1.3. Definición de objetivos estratégicos	81
5.1.4. Mapa estratégico.....	83
5.1.5. Indicadores de desempeño	84
5.2. Esquema de tratamiento de datos	92
5.2.1. Estación base.....	93
5.2.2. Puntos de retransmisión.....	94
5.2.3. Modelo de red	94
5.2.4. Topología de la red de sensores	95
5.2.5. Medio de comunicaciones	96
5.2.6. Propuesta.....	96
5.2.6.a. Configuración de sensores en la locomotora:	97
5.2.6.b. Flujograma del proceso de análisis de los datos.....	98
5.3. Estrategia de implementación.....	98
5.3.1. Etapa 1: [2021-2022].....	100
5.3.2. Etapa 2: [2022-2024].....	101
5.3.3. Etapa 3: [2024-2026].....	101
5.3.4. Etapa 4: [2026-2028].....	102
6. Plan piloto	105
6.1. Conexiones.....	106
6.2. Códigos empleados.....	108
6.3. Instalación <i>in situ</i>	109
6.4. Datos obtenidos.....	112
6.5. Análisis de resultados.....	118
7. Análisis técnico-financiero	123

7.1. Descripción de tecnología de monitorización disponible en mercado (DAS, Frauscher).....	124
7.1. Análisis financiero.....	127
7.1.1. Comparación y análisis	128
7.2. Análisis técnico	130
7.3. Matriz de decisión.....	130
7.4. Discusión de resultados obtenidos	134
8. Conclusiones	135
9. Recomendaciones	136
Bibliografía.....	137
Anexos.....	142
ANEXO 1. Detalle de auditoría.....	142
ANEXO 2. Estrategia de implementación.....	157
ANEXO 3. Prototipo	162
ANEXO 4. Análisis técnico - financiero	169
Apéndices.....	172

Índice de figuras

Figura 1: Organigrama de INCOFER.	20
Figura 2: Diagrama del problema por resolver.	23
Figura 3: Componentes y dimensiones de una vía férrea.	33
Figura 4: Perfil de un riel	34
Figura 5: Durmientes.	35
Figura 6: Balasto.	36
Figura 7: Fijaciones (clavo).....	37
Figura 8: Juntas suspendidas, apoyadas y semisuspendidas.	38
Figura 9: Eclisas de 6 agujeros y de 4 agujeros.	39
Figura 10: Fisura trasversal en un riel.	40
Figura 11: Rotura horizontal en la cabeza.	41
Figura 12: Defectos en rieles detectados por sistema ABA.....	42
Figura 13: Squat.	43
Figura 14: Fotografías de squats, ligero, moderado y severo.....	44
Figura 15: Corrugaciones.	45
Figura 16: Ejemplos de mediciones en juntas.	47
Figura 17: Direcciones de vibraciones para sistema ABA.	48
Figura 18: Placa Arduino UNO.	49
Figura 19: Diagrama de flujo de sketch.	50
Figura 20: Sketch inicial en IDE Arduino.	51
Figura 21: MPU 6050.	53
Figura 22: “Shield GPS for Arduino”.	54
Figura 23: Módulo RTC DS1302	57
Figura 24: Diagrama de flujo del proceso de mantenimiento de rieles.	73
Figura 25: Elementos en una vía férrea.	74
Figura 26: Proceso de elaboración de un Cuadro de Mando Integral.	76
Figura 27: Diagrama de efecto-causa de CMI.	84
Figura 28: Estructura para BSC.....	84
Figura 29: Tramos de red ferroviaria nacional (GAM).	86
Figura 30: Efecto de CBM en costos de mantenimiento.....	86
Figura 31: Elementos típicos de una red de monitoreo de estado.....	93
Figura 32: Diagrama de entrada-salida de Estación Base.	93

Figura 33: Organigrama de Departamento de Procesamiento de Datos.....	103
Figura 34: Diagrama unifilar del prototipo.....	106
Figura 35: Diagrama de conexión entre Arduino UNO y modulo RTC.	107
Figura 36: Diagrama de conexión entre Arduino UNO y módulo MPU.....	107
Figura 37: Diagrama de flujo del programa para la toma de datos.....	109
Figura 38: Conductor UTP.....	110
Figura 39: Big Red Box.	110
Figura 40: Caja de protección de Arduino.	111
Figura 41: Equipo de medición previo a instalación.	111
Figura 42: Diagrama de instalación en el tren.	112
Figura 43: Ruta muestreada por el prototipo.	113
Figura 44: Espectro de vibración en eje X.....	113
Figura 45: Espectro de vibración en eje Y.....	114
Figura 46: Espectro de vibración en eje Z.	114
Figura 47: Espectrograma de vibración en eje X.....	116
Figura 48: Espectrograma de vibración en eje Y.....	117
Figura 49: Espectrograma de vibración en eje Y.....	117
Figura 50: Defecto en vía 1.	119
Figura 51: Defecto en vía 2.	120
Figura 52: Defecto en vía 3.	121
Figura 53: Ubicación de indicios de fallas detectados por ABA.....	122
Figura 54: Centro de recepción de datos de DAS.	126
Figura 55: Configuración deseable de instalación de fibra óptica a lo largo de vía.	126
Figura 56: Defectos detectados por DAS.	126
Figura 57: Estructura jerárquica para la toma de decisiones de equipo para mantenimiento.....	130

Índice de tablas

Tabla 1: Numero de descarrilamientos por año en rutas del GAM.....	21
Tabla 2: Metodología propuesta por cada objetivo.....	27
Tabla 3: Principios básicos COVENIN 2500 - 93.....	32
Tabla 4: Escala de evaluación para la gestión de mantenimiento.....	60
Tabla 5: Resultados por área producto de evaluación.....	60
Tabla 6: Propuestas en distintas áreas del mantenimiento.....	72
Tabla 7: Análisis FODA.....	80
Tabla 8: Indicadores de Perspectiva Financiera.....	88
Tabla 9: Indicadores de Perspectiva de Clientes.....	89
Tabla 10: Indicadores de Perspectiva de Procesos Internos.....	90
Tabla 11: Indicadores de Perspectiva de Aprendizaje y Crecimiento.....	92
Tabla 12: Evaluación por CAUE de ambas tecnologías.....	129
Tabla 13: Escala para comparación de pares.....	133
Tabla 14: Prioridades de cada criterio. Fuente propia, Microsoft Excel.....	133
Tabla 15: Matriz de decisiones resultante de análisis AHP.....	133

Índice de gráficas

Gráfica 1: Cantidad de usuarios de la ruta HER - SJ desde 2014 a 2018.....	22
Gráfica 2: Resultados de evaluación por área.....	61
Gráfica 3: Organización del mantenimiento.....	62
Gráfica 4: Planificación del mantenimiento.....	63
Gráfica 5: Mantenimiento rutinario.....	64
Gráfica 6: Mantenimiento programado.	65
Gráfica 7: Mantenimiento correctivo.	66
Gráfica 8: Mantenimiento preventivo.	67
Gráfica 9: Mantenimiento por avería.	68
Gráfica 10: Personal de mantenimiento.	69
Gráfica 11: Apoyo logístico.....	70
Gráfica 12: Recursos.....	71
Gráfica 13: Avance del tren en horario establecido.....	115
Gráfica 14: Kilómetros avanzados en relación con “samples”.....	116
Gráfica 15: Evolución en el tiempo del Valor Actual de Costos (VAC), en miles de dólares.....	129

1. Resumen

El transporte público se proyecta como uno de los pilares en los esfuerzos gubernamentales para la descarbonización de la economía, en esta dinámica el ferrocarril administrado por el Instituto Costarricense de Ferrocarriles juega un papel preponderante. La norma en los operadores ferroviarios del mundo es ofrecer un servicio de calidad y confortabilidad a sus usuarios; bajo esta premisa los rieles son parte fundamental.

En este trabajo se busca dar una alternativa para implementar un modelo de mantenimiento basado en la condición de los rieles, basándolo en la tecnología *Axle Box Acceleration (ABA)*. Esta tecnología recuenta las vibraciones producto de la interacción riel-rueda, donde los defectos en los rieles generan alteraciones significativas y únicas para cada tipo de defecto y mediante análisis espectrales se discrimina la gravedad de cada defecto. Mediante herramientas de análisis de datos es posible determinar la evolución del estado de rieles y planificar intervenciones. Se construyó un prototipo para demostrar la replicabilidad de esta idea en las vías costarricenses

Para el desarrollo de la propuesta se auditó, mediante la norma COVENIN 2500 93, al Departamento de Vías y Estructuras, con el objeto de conocer el estado de los procesos de mantenimiento y conocer a ciencia cierta la línea base sobre la que se deben presentar las nuevas ideas de mantenimiento.

Seguido se realiza una estrategia de implementación de un modelo de mantenimiento basado en condición, mediante un Cuadro de Mando Integral, además de la presentación de un esquema de tratamiento de datos y una serie de etapas para la paulatina migración de modelo de mantenimiento (basado en tiempo a basado a condición).

Finalmente, se hace una comparativa financiero-técnica de la migración de modelo de mantenimiento usando la tecnología propuesta contra una alternativa comercial, esto con el fin de ofrecer a INCOFER al menos dos opciones del cómo hacer el cambio que la administración eficiente de las operaciones demanda.

Palabras clave: ABA, monitoreo de rieles, CBM, defectos de vía, mantenimiento de rieles, INCOFER

Abstract

Public transport is projected as one of the pillars in government efforts to decarbonize the economy, in this dynamic the railway administered by “Instituto Costarricense de Ferrocarriles” plays a predominant role. The standard in the world's rail operators is to offer a service of quality and comfort to its users; under this premise the rails are a fundamental part.

This work seeks to provide an alternative to implementing a maintenance model based on rail condition, based on Axle Box Acceleration technology (ABA). This technology coats vibrations from rail-wheel interaction, where rail defects generate significant and unique alterations for each type of defect, which by spectral analysis differentiates the severity of each defect. Using data analysis tools, it is possible to determine the evolution of the rail state and plan interventions. A prototype was built to demonstrate the replicability of this idea on Costa Rican roads

For the development of the proposal, the norm COVENIN 2500 93 was applied to audit the Department of Roads and Structures, in order to know the status of maintenance processes and to know for sure the baseline on which the new maintenance ideas should be presented.

A strategy for implementing a condition-based maintenance model is followed, using a Balanced Score Card, as well as the presentation of a data processing scheme and a series of stages for the gradual migration of maintenance model (time-to-condition-based).

Finally, a financial-technical comparison of maintenance model migration is made using the proposed technology against a commercial alternative, this to offer INCOFER at least two options of how to make the change that efficient management of operations demands

Keywords: *ABA, rail monitoring, CBM, track defects, rail maintenance, INCOFER*

2. Introducción

2.1. Antecedentes

El Gobierno de Costa Rica apuesta por la des-carbonización de la economía, uno de los rubros que más aporta en emisiones de gases de efecto invernadero es el sector transporte. Y es que, a diario, miles de personas se desplazan de los distintos lugares del Valle Central hacia sus centros de trabajo, en especial el centro de San José, en esta dinámica el transporte ferroviario ofrece una alternativa de transporte público y de descentralización de la población, por esto existe un esfuerzo por parte de INCOFER de volver el tren una opción atractiva para los potenciales usuarios.

En este contexto, se espera que los servicios de transporte se intensifiquen en las vías actuales, esto hará que los esfuerzos por la interacción riel-rueda desgasten más rápido, este efecto de fatiga se intensifica por la antigüedad de los rieles actuales; además, INCOFER, como las demás instituciones gubernamentales afrontan una situación económica difícil, por lo que se debe gestionar con eficiencia los recursos económicos, estructurales y humanos disponibles, distintos operarios en el mundo han apostado a la monitorización continua del estado de rieles para lograr este manejo de recursos.

Como antecedentes de campo, se toman las experiencias reportadas en una serie de *papers* de autores que aplicaron los conceptos de ABA en distintos países, para este trabajo se toma especial atención al caso de Países Bajos. (NeTIRail-INFRA, 2016) (Nuñez, Hendricks, Li, De Schutter & Dollevoet, 2014)

Núñez et al. (2014), resumen que se han adoptado métodos como la densidad del espectro de potencia, la transformación rápida de Fourier y los métodos de transformación de *wavelet* para detectar defectos en ruedas, cojinetes de eje y rieles. Las señales ABA de los ferrocarriles regionales neerlandeses, semejantes a los costarricenses, son particularmente ruidosas y se ven afectadas no solo por la velocidad del tren y las condiciones de las ruedas, sino también por una ubicación GPS menos precisa.

Para evitar el uso de una señal fija, se emplean herramientas como la transformada de Hilbert-Huang (HHT) basada en una señal adaptativa que puede asociarse con excitaciones físicas, o la clásica transformada rápida de Fourier (FFT).

Los análisis espectrales se usan como un indicador de las condiciones de salud de los elementos de rieles. El uso de ABA para evaluar los rieles es inherentemente estocástico, por lo que se define un conjunto de indicadores clave de rendimiento (KPI) robustos y predictivos para capturar la dinámica de degradación de la soldadura durante un período de mantenimiento dado.

Pasando a otro punto, las industrias y servicios en el mundo se deben adaptar a un nuevo paradigma de hacer las cosas, este paradigma esta dictado por el internet de las cosas, la administración del mantenimiento no escapa de esta realidad. Se ha promovido el uso de tecnología de monitorización de datos dentro de las actividades de mantenimiento como una práctica para la mejora de la eficacia del uso de recursos humanos y económicos.

2.2. Identificación de la institución

El Instituto Costarricense de Ferrocarriles, creado por la Ley N.º 7001 del 19 de setiembre de 1985, es una institución de derecho público, con autonomía administrativa, personalidad jurídica y patrimonio propio y se rige por las disposiciones establecidas en dicha ley y sus reglamentos, así como en las leyes que la complementen. Esta ley une los dos ferrocarriles, Atlántico y Pacífico y abarca todos los ramales que desde 1871 han formado parte del patrimonio ferroviario nacional.

Su **misión** es ser la institución del Estado Costarricense responsable de brindar servicios de transportes ferroviarios modernos, sostenibles y eficientes; integrados en un marco de gestión empresarial que permita la participación del sector privado y que facilite la generación de actividades productivas complementarias. (INCOFER, sf)

La **visión** de la entidad es ser una institución ferroviaria comprometida con el mejoramiento de la calidad de vida de los costarricenses de forma sostenible, garantizando la prestación de los servicios articulados de transporte” (INCOFER, sf)

Actualmente INCOFER brinda el servicio de transporte público para la población. Adicional se utiliza para el transporte de carga pesada agilizando tiempos de transporte y disminuyendo los costos, esta es su actividad principal y la que genera los recursos para la operación.

Rutas en servicio:

- San José-Heredia-San José
- Metrópoli III en Pavas-Curridabat-Pavas
- San José-San Antonio de Belén-San José
- Transporte de banano en Valle La Estrella, Bananito, Estrada, Matina.
- Transporte de acero de Moín a Leesville en Guácimo
- Transporte turístico en Limón y Siquirres
- Transporte turístico a Caldera

Actualmente esta entidad apuesta por los proyectos del Tren Rápido de Pasajeros y el Tren Eléctrico Limonense de Carga como mejora a futuro del servicio a los clientes, además de ser un punto de inflexión después de cerrar en 1995 debido a una crisis económica y sus consecuencias, en especial el retraso y deterioro de los equipos rodantes y vías férreas, la pérdida de derechos de vía por invasiones y la falta de equipo de mantenimiento y de recursos económicos.

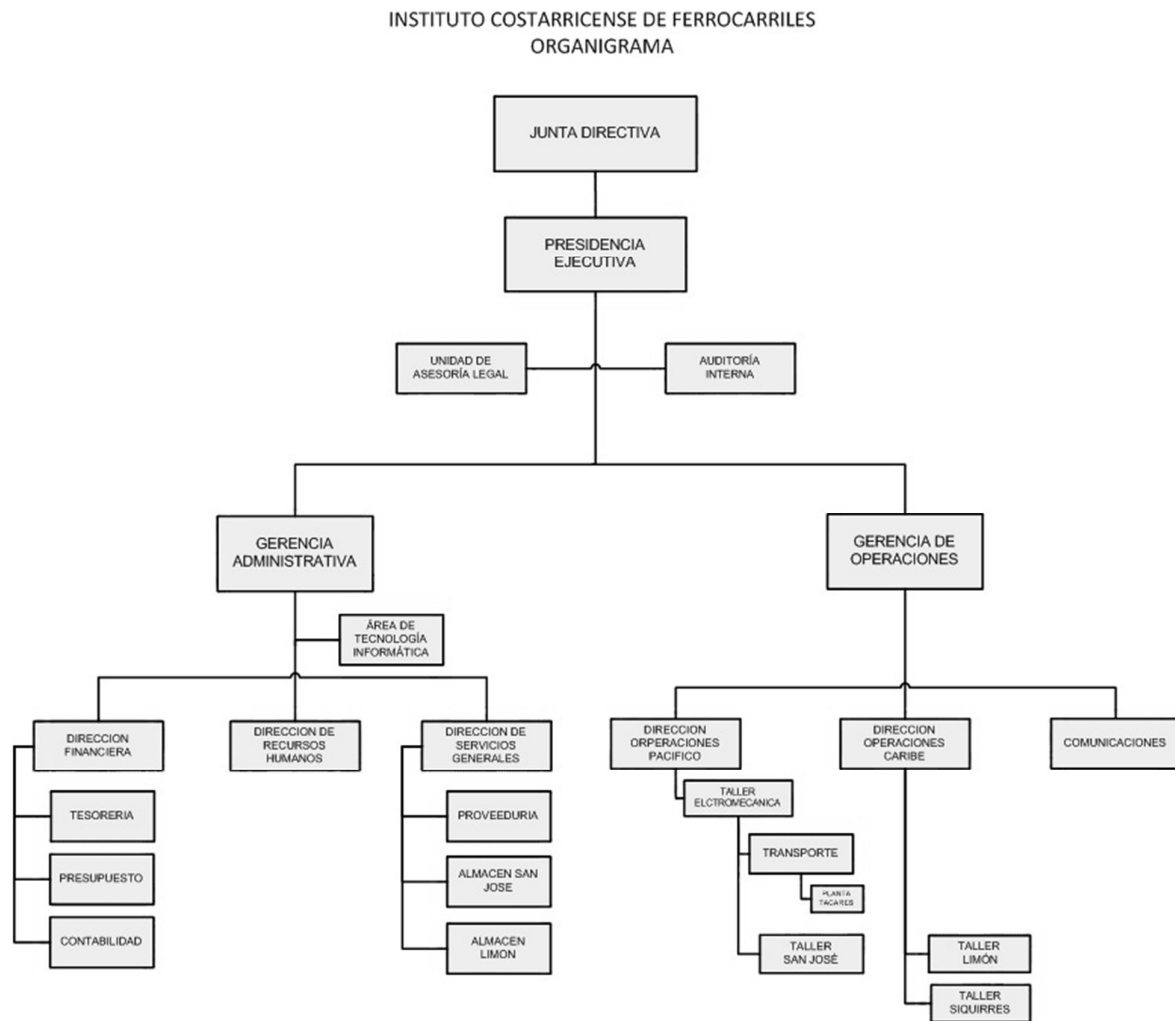


Figura 1. Organigrama de INCOFER. Fuente: <http://www.incofer.go.cr/organigrama/>

2.3. Planteo del problema

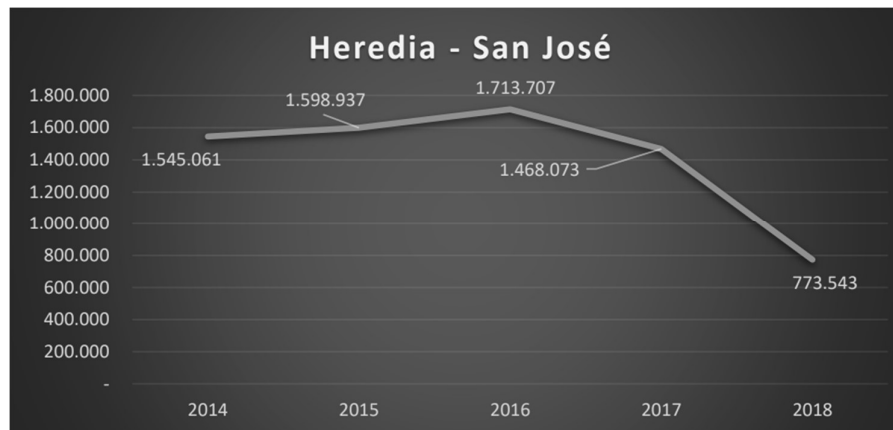
En esta línea, dentro del Perfil del Proyecto del TRP, INCOFER plantea la necesidad de contar con un vehículo auscultador para atender las labores de mantenimiento correctivo y preventivo, dentro de las funciones del equipo mencionado está medir parámetros como el ancho de la vía, variaciones horizontales y verticales, defectos superficiales del riel, peralte. Además de parámetros de rieles miden características de los pantógrafos. Cualquier anomalía es registrada mediante GPS y reportada a las cuadrillas de mantenimiento. (INCOFER, 2016)

Las irregularidades en rieles influyen significativamente en las labores de mantenimiento y en la seguridad de los usuarios, por esto es necesario detectarlas y eliminarlas en sus primeras etapas de formación. Debido a la antigüedad del equipo fijo, la heterogeneidad de rieles en los distintos tramos, sumado al deterioro de estos durante el periodo entre el cierre técnico de INCOFER y su reapertura (1995 – 2005/2009) se evidencia una gran cantidad de defectos en los rieles, que de acuerdo con gran parte de la literatura revisada para la elaboración de este trabajo.

Tabla 1. Numero de descarrilamientos por año en rutas del GAM. Fuente: INCOFER, 2018

Año	2014	2015	2016	2017	2018
Descarrilamiento	21	34	47	30	11

Como se denota, existe un repunte en los descarrilamientos en el año 2016, en el Plan Estratégico Institucional existe una caída en la cantidad de usuarios, por ejemplo se adjunta el grafico del año 2016, donde se nota una caída a partir del año 2017 en la cantidad de usuarios de la ruta Heredia – San José, como se explica en el documento mencionado, la reducción del equipo rodante producto de los incidentes de descarrilamientos del 2016 redujo la oferta de viajes en un 14%, tomando como base la tarifa, se puede presumir que la pérdida económica por concepto de “no retención de usuarios” fue de ₡112,991,640.00 (₡460 por persona al 2017)



Gráfica 1. Cantidad de usuarios de la ruta HER - SJ desde 2014 a 2018. Fuente: INCOFER, 2018

Para solventar esta necesidad, Hodge et al. proponen que con el monitoreo de condición se detecta e identifica deterioro en estructuras e infraestructuras antes que detonen fallas o paros en las operaciones ferroviarias. (Hodge, O'Keefe, Weeks & Moulds, 2015).

El monitoreo de condición de rieles y vehículos a demostrado ser esencial para certificar la seguridad de las vías férreas para los operadores de sistemas ferroviarios de países referentes. Actualmente, la tendencia en los sistemas ferroviarios es migrar del mantenimiento basado en el tiempo (TBM) al basado en la condición (CBM) (Tanaka, Ikeda, Yoda & Aiba, 2018), en este contexto de cambio, el sistema ABA se ha convertido en una opción adoptada por varias operadoras de trenes, particularmente en Europa y Asia.

Instalar tecnología de monitoreo de datos montado en trenes hace posible disminuir o hasta eliminar las rutas de un vehículo auscultador, que funciona con combustible fósiles, disminuyendo la huella de carbono y emisiones, además de ahorrar el dinero de ese rubro y mejorar la imagen institucional, pues se iría en la línea del Plan de Des-carbonización de Costa Rica.

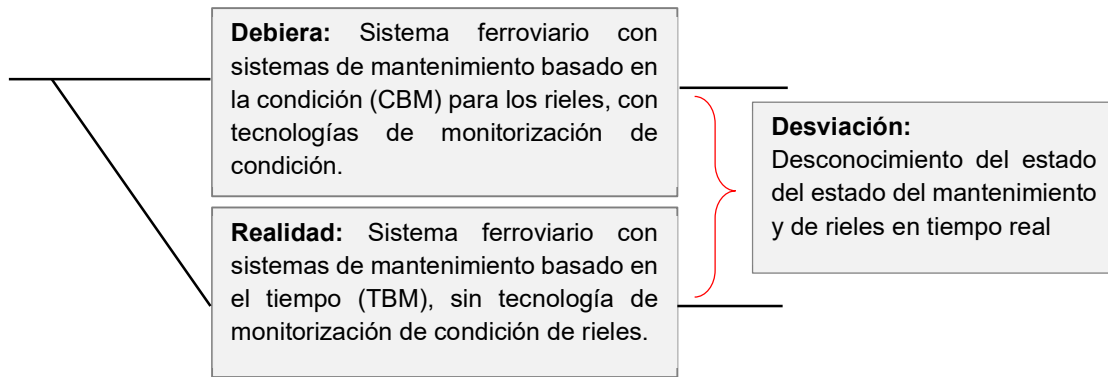


Figura 2. Diagrama del problema por resolver. Fuente: elaboración propia

2.4. Justificación

Es conveniente explicar las consecuencias de los defectos en vías férreas; de acuerdo con Tanaka et al. estas imperfecciones, como corrugaciones, son responsables de transmitir vibraciones mecánicas al equipo rodante, creando fatiga en estos equipos y en la vía misma, además de generar ruidos y movimientos molestos para los usuarios del tren. (Tanaka, Shimizu & Sano, 2014). Varios de los autores consultados coinciden en que, con la monitorización de estado de rieles es posible tomar decisiones de mantenimiento oportunas, antes que los defectos en vía provoquen daños cuantiosos, pero sin exceder en intervenciones de reparaciones.

El Tren Rápido de Pasajeros será el proyecto de infraestructura más grande del país, se prevé que sea el medio de transporte central del Gran Área Metropolitana, con viajes diarios cada media hora, esto se puede traducir en millares de ciclos de fatiga en los elementos fijos y periféricos y con poco tiempo entre viajes es difícil organizar rutinas de mantenimiento sin demorar o cancelar viajes, en este escenario la planificación adecuada y eficiente del mantenimiento es imperativo.

El ferrocarril compite con otras formas de transporte, las compañías ferroviarias se están dividiendo para proporcionar servicios de transporte por un lado y servicios de infraestructura en otro. Además, los clientes necesitan y exigen la mejor calidad de servicio al menor costo, lo que obliga a las compañías ferroviarias a optimizar cada etapa de su operación, incluido el mantenimiento. (Cellaswany, Muthammal & Geetha, 2018)

Para cumplir con las expectativas, el régimen de mantenimiento de los elementos ferroviarios debe ser más estricto, las condiciones de la vía deben estar bien cuidadas y el material rodante debe estar diseñado para resistir trabajos pesados. (S.L. y otros, 2006). Siguiendo esta línea, sin equipo o estrategias adecuadas de mantenimiento, es difícil ofrecer la calidad de clase mundial por que esta política es muy costosa, necesita recursos humanos calificados y lleva mucho tiempo ya que las inspecciones deben realizarse periódicamente en cada tramo de vía. (Dima, Chihaiia, Surugiu & Minea, 2018)

Núñez et al. describen que en las últimas décadas se han introducido varios sistemas basados en distintas técnicas de medición para el monitoreo de condición de vías, como *ABA*, mediciones basados en ultrasonido, corrientes de Foucault e imágenes en tiempo real, todas estas para detectar fallas. (Núñez, Hendricks, Li, De Schutter & Dollevoet, 2014) En ese documento explican que se han implementado diferentes sistemas *ABA* demostrando su eficacia en la detección de corrugaciones, soldaduras y otros problemas en la vía en diferentes países como Polonia, Italia, Japón, España y Corea del Sur.

En estos países se han reportado distintas fallas que el sistema *ABA* es capaz de detectar: irregularidades en la vía lateral y vertical, la evaluación de la fluctuación de carga de la rueda, el ruido en operación, la detección de corrugaciones, la detección de defectos de fatiga por contacto rodante, soldaduras dañadas, juntas defectuosas y el análisis de la geometría de vía vertical. (Núñez, Jamshidi & Wang, 2018)

Adicional, Núñez et al. enumeran algunas ventajas de los sistemas *ABA*: son sistemas de medición de bajo costo en comparación con otros tipos de métodos de detección, los sensores son fáciles de mantener, se pueden implementar en trenes operativos en servicio y permiten la posibilidad de detectar defectos de riel en estados iniciales sin necesidad de instrumentación costosa y compleja.

Los beneficios financieros de usar un sistema de monitoreo de condición montado en un tren, como *ABA*, de acuerdo con datos en los ferrocarriles neerlandeses son altos. Un estudio en el periodo 2005-2008 mostró que se podía lograr una reducción de costos del 88% solo en los costos de “amolado” al monitorear activamente la condición del ferrocarril, lo que sería equivalente a una reducción del 80% de los costos del ciclo de vida. (Núñez, Hendricks, Li, De Schutter & Dollevoet, 2014)

Con los sistemas ABA se encuentran más del 85% de pequeños *squats* y el 100% de los más grandes. Se espera que los desarrollos en algoritmos aumenten aún más estas tasas de detección. Los ensayos con la detección de corrugación en rieles del sistema ABA utilizado en la Universidad Tecnológica de Delft también han mostrado buenos primeros resultados, pueden detectar corrugación severa y también corrugación menos severa en algunos casos, lo cual es consistente con¹ los reportes de países usuarios. (Molodova, Li, Núñez & Dollevoet, 2014)

Algunas necesidades planteadas por INCOFER en el Plan Operativo Institucional 2019, en el Perfil del Proyecto de Mantenimiento de la Red Ferroviaria Nacional, son la adquisición de maquinaria especializada para labores en vías férreas, mano de obra especialidad para labores en vías férreas y la adquisición de equipos y softwares para el diseño y planificación de las obras. (Oficina de Planificación Institucional INCOFER, 2018) Los tres puntos mencionados, según la literatura consultada, pueden ser manejados con versatilidad, en función del estado de los rieles.

Finalmente, el último punto sugerido es la premisa fundamental en que este trabajo se ampara, los sistemas de monitoreo de estado de rieles han demostrado ser una poderosa herramienta para la planificación de labores de mantenimiento y obras periféricas, todo en distintos contextos de operadores, desde India, Turquía, Eslovenia y los demás países mencionados en este documento. Al disminuir la dependencia de las inspecciones visuales y del factor tiempo es posible manejar las intervenciones para encontrar un equilibrio de los flujos de efectivo y la “vida remanente” de los rieles y elementos adyacentes.

2.5. Objetivos

2.5.1. Objetivo general

- Formular una propuesta de un sistema de monitoreo en tiempo real del estado de rieles para el sistema ferroviario costarricense, bajo los criterios de la tecnología *Axle Box Acceleration*, todo esto para el Departamento de Vías y Estructuras de INCOFER

2.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar la situación actual de las operaciones de mantenimiento de las vías férreas de INCOFER mediante una auditoría apegada a la norma COVENIN 2500-93, esto como línea base para la justificación de la propuesta de sistema de monitoreo de condición de rieles.

Indicador de logro: Informe de auditoría

- Elaborar una estrategia orientada hacia la toma de decisiones en el planeamiento de las labores de mantenimiento de vías férreas, mediante la cual se encamine a los departamentos pertinentes hacia la migración paulatina a un modelo de intervenciones basadas en condición, teniendo como plazo meta el año 2028.

Indicador de logro: CMI, Estrategia de implementación hacia 2028, Esquema de tratamiento de datos obtenidos en vía.

- Demostrar los conceptos de la tecnología ABA mediante un plan piloto usando un prototipo de toma de datos, desarrollando un levantamiento del estado de una sección de vía férrea de 5 km en una ruta de INCOFER dentro del GAM.

Indicador de logro: Detección de fallas en la sección de vía.

- Generar un análisis técnico-financiero de la tecnología necesarios para la propuesta, mediante el cual se determine la factibilidad de la propuesta de este trabajo, por medio de comparación de especificaciones técnicas y análisis de flujos financieros.

Indicador de logro: Decisión de selección técnica por análisis matemático, Decisión por análisis financiero.

2.6. Metodología

Tabla 2. Metodología propuesta por cada objetivo. Fuente: elaboración propia

Objetivo	Actividad	Variable	Equipo	Indicador
Evaluar la situación actual de las operaciones de mantenimiento de vías las férreas de INCOFER mediante auditorías apegadas a la norma COVENIN, esto como línea base para la justificación de la propuesta de sistema de monitoreo de condición de rieles.	Preparar el formulario de auditoría COVENIN	---	Formulario en Microsoft Excel	Hoja de Excel con lista de datos de entrada
	Aplicar el formulario en Departamento de Vías y Estructuras	---	Formulario en Microsoft Excel	Hoja de Excel respondida por encargados
	Análisis de resultados	Estado del mantenimiento	Formulario en Microsoft Excel	Informe de auditoría, con oportunidades de mejora
Elaborar una estrategia orientada hacia las labores de mantenimiento de vías férreas, mediante la cual se encamine a los departamentos pertinentes hacia la migración a un modelo de intervenciones basadas en condición.	Elaborar un Cuadro de Mando Integral dedicado hacia el Departamento de Vías y Estructuras	---	---	Entregable: BSC
	Diseño de estrategia de implementación de sistema de monitoreo de rieles.	---	---	Estrategia de implementación
	Desarrollar un esquema de análisis de datos obtenidos de vía	---	---	Esquema de análisis de datos
Demostrar los conceptos de la propuesta de tecnología mediante un plan piloto usando un prototipo de toma de datos, desarrollando un levantamiento del estado de una sección de vía férrea de 5 km en una ruta de INCOFER dentro del GAM.	Desarrollo de un prototipo de toma de datos en vía	---	Acelerómetros, Arduino, Computadora, Matlab, Tren.	Prototipo funcional
	Desarrollo de sistema de almacenamiento de datos	---	---	Sistema de almacenamiento de datos
	Elaborar un informe del estado de vías	Estado de vías férreas	---	Informe de estado
Generar un análisis técnico-financiero del hardware y software necesarios para la propuesta, mediante el cual se determine la factibilidad, por medio de comparación de especificaciones técnicas y análisis de flujos financieros, para la validación de los elementos necesarios para el mantenimiento basado en condición (CBM).	Enlistar equipos necesarios para la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de estado de rieles	---	Lista de proveedores varios	Lista de posibles equipos
	Determinar los equipos idóneos para una implementación	---	Matriz de decisión	Lista de equipos seleccionados
	Determinar los flujos de efectivo asociado a las labores de mantenimiento de vías después de una implementación.	Flujos de efectivo	---	Análisis económico
	Generar un análisis mediante ingeniería económica.	Análisis de flujos.	---	

2.7. Viabilidad

Este trabajo, al ser en mayor parte de carácter exploratorio, requiere en gran medida herramientas teóricas, tales como normas COVENIN, informes financieros y de labores previos. Aunque el acceso a algunos de estos documentos está parcialmente restringido por confidencialidad o exclusividad de compra, no es imposible reponer la información que estas proporcionan mediante otras fuentes de información, entonces, se puede afirmar que los objetivos planteados que requieren herramientas de índole teórico son ejecutables en el plazo y delimitaciones propuestos.

En el eje de la formulación de estrategias de mantenimiento nuevas se debe resaltar que este trabajo tiene como fin solo exponer a los departamentos relacionados con operaciones y mantenimiento en INCOFER nuevos conceptos relacionados con la migración hacia Mantenimiento Basado en Condición, para esto se cuenta con el material de estudio suficiente para proponer estrategias adecuadas al contexto ferroviario.

Al mismo tiempo, por la naturaleza de este trabajo es viable su desarrollo, puesto que se puede visualizar como una "Etapa 0" de una posible implementación a mediano plazo (4 a 7 años). Este podría ser la primera piedra de un proyecto más grande, donde se necesite experticia de profesionales en distintas áreas de ingeniería, en especial de tratamiento y envío de datos.

Finalmente, la tecnología ABA ha demostrado ser versátil y eficaz en distintos campos, desde equipos de muy bajo costo en India, hasta equipos instalados en redes de trenes de alta velocidad en Asia. Este sistema tiene algunas variantes adecuadas a las necesidades de los operadores, por esto se presume, inicialmente, que este sistema es viable en Costa Rica; como se mencionó en los objetivos de este proyecto, se busca justificar la viabilidad.

2.8. Alcance

Como se explicó, este proyecto se espera que sea la base para futuros trabajos en camino a una implementación definitiva en campo, por esto se define que el alcance sea de tipo **exploratorio**. De acuerdo con Hernández et al. *“los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes”*. (Hernández Sampieri, Fernández Collado & Baptista Lucio, 2010)

A pesar de los numerosos reportes, artículos e investigaciones en curso sobre este tipo específico de tecnología, se define este tipo de alcance puesto que se debe empezar una base para contextualizar al entorno de INCOFER (recursos económicos, mano de obra disponible, maquinaria, geometría de rieles...), sería un error tomar como base entera una investigación extranjera para implementación futura.

Se dispone que el proyecto resultante de esta “Etapa 0” tenga impacto en los departamentos de mantenimiento de INCOFER, pero también se busca que sea inspiración o base para otros departamentos o inclusive otras instituciones, la fortaleza de este proyecto no es el *hardware*, sino las estrategias de mantenimiento y de tratamiento de datos.

2.9. Limitaciones

Como se mencionó, se debe empezar una investigación previa para una implementación de un sistema de monitoreo de rieles con tecnología ABA y se debe empezar prácticamente de cero, por lo tanto, una de las limitaciones previstas para este proyecto es la falta de información previa en el plano nacional. Para esto se plantean auditorías para conocer con precisión la situación actual de la organización, además de consultar múltiples fuentes científicas, para compensar, más no “copiar”.

Otra de las limitaciones es que la mayoría de las actividades deben ser virtuales, por lo que no se tendrá acceso completo a los recursos que INCOFER ofrece, por ejemplo, los talleres para la auditoría propuesta, para solventar este obstáculo, se plantea adaptar esta actividad de manera que sea posible que sea virtual (mediante formularios o entrevistas a distancia).

Además, una de las limitantes detectadas es la falta de apoyo económico por parte de la institución, debido a la regulación de gastos estatales y agravado por la situación de la pandemia, para mitigar se plantea usar equipo propio, como sensores, cables, computadora y *software* de libre acceso o provisto por la institución. A pesar de que no será el equipo más adecuado, será posible tener una aproximación adecuada a los datos en vía que se pueda tomar con otro tipo de equipo o licencias.

3. Marco teórico

3.1. Auditorias de mantenimiento

El mantenimiento de activos o procesos es una actividad fundamental en cualquier organización, pero conlleva un reto, que el mantenimiento que se realice sea de la suficiente calidad y eficiencia para que el rendimiento del proceso productivo sea el mejor posible. Para mantener la calidad de este rubro, y en general de cualquier otro, se debe calificar, esto mediante las auditorias de mantenimiento.

Hernández et al. (2017) mencionan la etimología del término “auditar”, proviene del inglés *audit*, a su vez derivado del latín *audire* (oír); de esto se destaca que auditar, conlleva examinar, inspeccionar, revisar, constatar, verificar, comprobar, confirmar, entre muchas otras acciones. Para examinar en una auditoria existen varias herramientas provistas por normas establecidas. En este documento se ahonda en la auditoria siguiendo la norma COVENIN 2500-93

Es un instrumento o herramienta de seguimiento, revisión y evaluación que colabora en la toma de decisiones, gestión y control del mantenimiento. Pero desde una perspectiva más profunda, ésta debe verse como un proceso realizado voluntariamente con la intención de conocer si realmente se están cumpliendo los planes, políticas y programas de mantenimiento. (Hernández et al. 2017)

Sondalini (2015) menciona que se persigue la revisión de los procesos y prácticas de gestión de mantenimiento en la operación, la verificación del mantenimiento de referencia en operación contra el mantenimiento de las mejores prácticas y la identificación de oportunidades para refinar los procesos de mantenimiento existentes, para mejorar la eficiencia en las prácticas de mantenimiento actuales y para hacer un mejor uso de los recursos limitados, particularmente la mano de obra.

3.1.1. Norma COVENIN 2500 – 93

Esta norma ofrece una alternativa para realizar auditorías, en el documento que contiene la metodología (Manual para evaluar los sistemas de mantenimiento de la industria) explica que contempla un método cuantitativo para la evaluación de sistema de mantenimiento para determinar la capacidad de gestión de la empresa. (Comité Técnico de Normalización, 1993)

Esta evaluación la hace calificando cuatro grandes áreas: organización de la empresa, organización de la función de mantenimiento, planificación, programación y control de las actividades de mantenimiento, competencia personal.

A su vez, subdivide las cuatro áreas mencionados en el apartado anterior en doce áreas, once de las cuales se enfocan en el departamento de mantenimiento. Cada área está conformada por principios básicos que se evalúan a través de deméritos. Se establece que un Principio Básico es aquel concepto que refleja las normas de organización y funcionamiento, sistemas y equipos que deben existir y aplicarse en mayor o menor proporción para lograr los objetivos de mantenimiento.

Finalmente se determina como Demérito aquel aspecto parcial referido a un principio básico, que por omisión o su incidencia negativa origina que la efectividad de este no sea completa, disminuyendo en consecuencia la puntuación total. Cada principio básico cuenta con una puntuación máxima establecida, los deméritos restan al principio básico y pueden restar cualquier valor comprendido entre cero y el valor máximo indicado para cada uno de ellos. (Comité Técnico de Normalización, 1993)

Tabla 3. Principios básicos COVENIN 2500 - 93. Fuente: López 2017

Área	Principio Básico
Organización de la empresa Organización del mantenimiento	Funciones y responsabilidades
	Autoridad y autonomía
	Sistema de información
Planificación del mantenimiento	Objetivos y metas
	Políticas para la planificación
	Control y evaluación
Mantenimiento rutinario Mantenimiento programado Mantenimiento circunstancial Mantenimiento correctivo	Planificación
	Programación e implementación
	Control y evaluación
Mantenimiento por avería	Atención a las fallas
	Supervisión y ejecución
	Información sobre las averías
Personal de mantenimiento	Cuantificación de las necesidades del personal
	Selección y formación
	Motivación e incentivos
Apoyo logístico	Apoyo administrativo
	Apoyo gerencial
	Apoyo general
Recursos	Equipos
	Herramientas
	Instrumentos
	Materiales
	Repuestos

3.2. Estructura de la vía férrea

La vía con balasto es el diseño más común de vía férrea utilizado en la red ferroviaria nacional, en los tramos donde coexisten las vías férreas y partes de carreteras asfaltadas se tiene una configuración de rieles sobre una loza de concreto.

Las principales ventajas de la configuración de vías sobre balasto sobre otros diseños son: costo relativamente bajo de su construcción, mayor elasticidad y el drenaje de fluidos. La estructura de la vía se divide en dos partes principales: la subestructura y la superestructura.

La primera incluye los sistemas de fijación entre el riel y los durmientes; la segunda parte está integrada por el material granular colocado por capas de acuerdo con sus propiedades mecánicas.

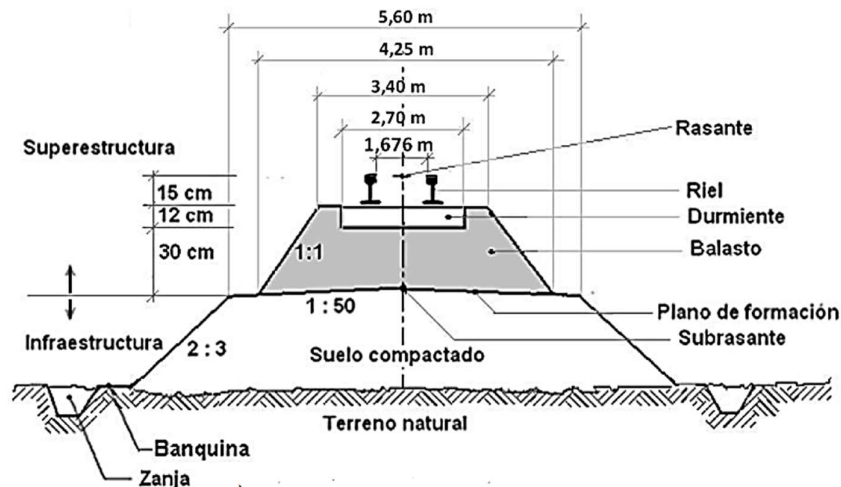


Figura 3. Componentes y dimensiones de una vía férrea. Fuente: NCA, 2014

3.2.1. Riel

Para el ferrocarril, el riel cumple simultáneamente las funciones de camino de rodadura, de elemento portante y de elemento de guiado. Este está sometido tanto a solicitaciones estáticas como dinámicas.

El riel es el elemento que se encuentra en contacto con la rueda por lo que, es uno de los componentes principales en la estructura y el más costoso. Están diseñados para soportar los esfuerzos producidos por las cargas estáticas y dinámicas con una gran capacidad para resistir grandes deformaciones verticales.

En función de lo expuesto el riel fue motivo de minuciosos estudios desde su origen de manera de ir evolucionando junto con el avance tecnológico a través de los años que experimento el ferrocarril. El perfil de riel utilizado es el Vignole, que está constituido por tres partes, que son:

- **Hongo o cabeza:** es la que se utiliza como superficie de rodamiento y está expuesta a las mayores solicitaciones y sufre el desgaste. Debe tener un alto y ancho suficiente, dependiendo del calibre de cada riel.
- **Alma:** es el elemento de espesor reducido que tiene la función de unir el hongo con el patín, asegurando la transmisión de las cargas desde el hongo al patín.
- **Patín:** constituye la base del riel y su parte inferior es plana, lo que permite su apoyo a los durmientes y debe tener un ancho suficiente, con el fin de distribuir la carga sobre los durmientes.



Figura 4. Perfil de un riel. Fuente: Montiel Varela, 2018

3.2.2. Durmientes

El durmiente (o traviesas) es uno de los componentes fundamentales en la estructura de vía. Estos pueden ser de madera dura, de hormigón o de acero. Son elementos que se colocan en posición transversal a la dirección del eje de la vía, sirven como apoyo para los rieles y tienen las siguientes funciones: (NCA, 2014)

- Sostener los rieles, fijando y asegurando su posición, así como su inclinación y separación entre ellos.
- Transfiere las cargas procedentes del riel sobre el balasto.
- Mantiene la estabilidad estructural de la vía, en el plano horizontal y vertical.
- Conserva el aislamiento eléctrico de la vía.
- Mantener a los rieles de la vía con la separación establecida (trocha).
- Disminuir el impacto acústico.



Figura 5. Durmientes. Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Balasto

El balasto de piedra partida es la capa de material que se coloca sobre el plano de formación en espesor de 10 cm a 30 cm y debajo de los durmientes, a fin de proporcionar un apoyo a la estructura de vía. El balasto debe estar constituido por piedra partida proveniente de cantera, por la trituración de rocas de calidad aceptada por las normas, en el caso de INCOFER las interpuestas por AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*)

Los requisitos exigidos a un buen balasto de piedra partida y de óptima granulometría y apto para soportar cargas verticales que superan las 20 Tn/eje son:

- Transmitir lo más homogénea posible las presiones de los durmientes al balasto.
- Obtener un buen comportamiento a los esfuerzos laterales y longitudinales.
- Permitir una fácil corrección de los parámetros geométricos de la vía mediante bateo con equipos mecanizados.
- Permitir una buena evacuación del agua de lluvia para mantener la capacidad portante de la plataforma.
- Garantizar la elasticidad de la vía con el fin de reducir las fuerzas dinámicas y transmitir las lo más atenuada posible al plano de formación.

Para lograr lo antes mencionado es necesario:

- Granulometría del balasto correcta (evitar finos que lo contaminan rápidamente).
- Buen diseño del espesor de balasto.



Figura 6. Balasto. Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Sujeciones

La fijación es el principal material chico que se usa para la fijación de los rieles a los durmientes. Las principales funciones que deben ser desempeñadas por las fijaciones para rieles son las siguientes:

- Fijar los rieles a los durmientes.
- Asegurar la invariabilidad de la trocha.
- Facilitar la transferencia a la infraestructura de la vía (plataforma) de los esfuerzos estáticos y dinámicos ejercidas por el material rodante sobre la estructura de la vía (paquete ferroviario).
- Poseer resistencia mecánica y elasticidad constante a lo largo de la vida útil de la fijación.
- Contribuir al buen aislamiento eléctrico entre ambos rieles.
- Constar del menor número de piezas, lo que facilitara su fabricación, colocación y conservación.
- Tener bajo costo.
- Vida útil lo más prolongada posible.

Las fijaciones para durmientes de madera por el modo de efectuar la sujeción la podemos dividir en rígidas y elásticas y por el tipo de apoyo en directas (sin silletas) e indirectas (con silletas).

- Las fijaciones rígidas (sin silletas), es el clavo de gancho y el tirafondo.
- Las fijaciones elásticas (sin silletas), se el clavo elástico simple y doble, el *shun* y *gauge-Lock* (clip de Pandrol), fijación RN y Nabla.
- Las fijaciones rígidas con silletas, con silletas que poseen la inclinación 1:20 o 1:40, clavo gancho, tirafondo y clip rígidos con bulón.
- Fijación elástica con silleta, se destacan las Nabla, RN, clip E Pandrol, etc.



Figura 7. Fijaciones (clavo). Fuente: elaboración propia.

3.2.5. Juntas

La unión de dos rieles entre si se denomina junta. Se realiza mediante dos piezas metálicas, que sirven de unión, llamadas eclisas, se denomina cala o luz a la pequeña separación que queda entre los dos rieles.

Las funciones que deben desempeñar las juntas son:

- Facilitar la dilatación del riel ante las variaciones de la temperatura.
- Que los dos rieles estén solidarios, que se comporten como una viga continua.
- Presenten una resistencia a la deformación, lo más idéntica posible a la de los rieles.
- Que estén impedidos los movimientos verticales o laterales de los extremos de los rieles (uno con respecto al otro), permitiendo el movimiento longitudinal (debido a la dilatación por efectos térmicos), por tal razón el agujero del riel debe ser de mayor diámetro que el bulón de la eclisa.

Las condiciones de trabajos de las juntas:

- Debido a los efectos dinámicos, son los puntos más débiles de la vía. La causa es que la rigidez de la vía en esa zona es discontinua, porque se produce una variación del momento de inercia disponible.
- Cuando una rueda llega a las proximidades de una junta, el extremo del riel tiende a doblarse (viga en voladizo), provocando un impacto al paso de la rueda.

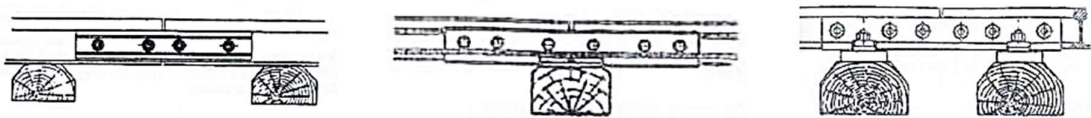


Figura 8. Juntas suspendidas, apoyadas y semi-suspendidas. Fuente: NCA, 2014

En la actualidad las eclisas más usadas son las de *tipo barra*, en la parte exterior tienen dos rebordes y/o saliente en toda la longitud de la eclisa (uno superior y otro inferior) que evitan el giro del bulón (perno que atraviesa la eclisa y el riel), cabeza cuadrada y cuello redondo cuando este es ajustado. Las eclisas se fabrican para cada tipo de riel y de acuerdo con la distribución de los agujeros que posee en cada extremo y pueden ser de 4 o 6 agujeros.

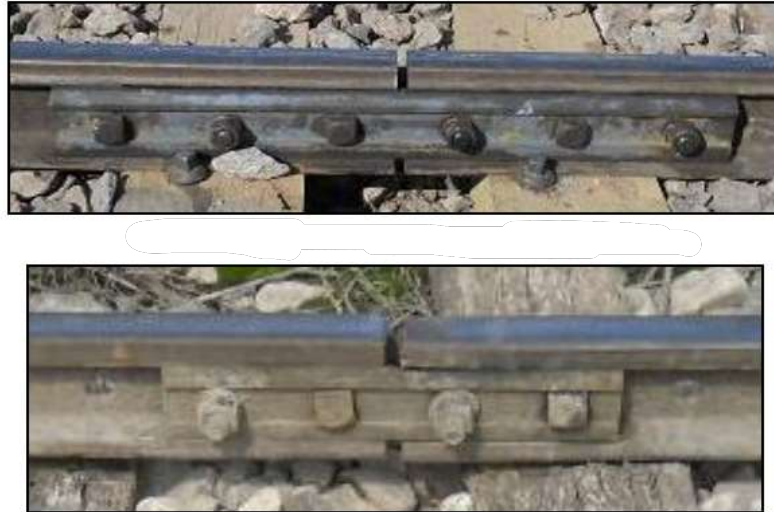


Figura 9. Eclisas de 6 agujeros y de 4 agujeros. Fuente: NCA, 2014

3.3. Defectos en riel

La mayoría de los problemas en los rieles se originan a partir de las grietas por el fenómeno de fatiga por contacto de rodadura (RCF); producto de las tensiones o esfuerzos en la sección de rodadura durante el contacto rueda-riel (rodadura/deslizamiento). Los defectos ocasionan que el riel se debilite, lo que conduce a una falla prematura del mismo. Las principales causas que originan fallas en rieles son: (Montiel Varela, 2018)

- Defectos inherentes a la fabricación del riel, como: composición química defectuosa, la segregación perjudicial y marcas de guía.
- El esfuerzo cortante excesivo que se pueden desarrollar en la zona de contacto rueda-riel, superando los límites permitidos de resistencia del material.
- Los defectos debidos a fallas del material rodante, el deslizamiento de las ruedas, el frenado severo, etc.
- Corrosión excesiva de los rieles, en general se produce por las condiciones climáticas, la presencia de sales corrosivas tales como cloruros y la exposición constante de los rieles a la humedad, cenizales, túneles, etc.
- Defectos en la soldadura, estos defectos surgen ya sea porque la composición del metal de aporte es inadecuada o producto de una mala técnica de soldadura.

- Las cargas de impacto estáticas y dinámicas producidas por la rueda, la gama de factores que influyen en este tipo de cargas, incluyendo: Geometría de la vía, las características de los trenes, la rueda y la geometría del riel, seguimiento súper elevación, etc. contribuyen a incrementar el esfuerzo cortante.
- La contaminación de la superficie del riel, predominantemente por agua, (pero también la grasa lubricante, que se encuentra a menudo en las proximidades de los lubricadores), puede acelerar el inicio y la propagación de grietas.

La Oficina de Seguridad Ferroviaria, parte del Departamento de Transporte (*Office of Railroad Safety*, Estados Unidos) explica que la vida útil de los rieles se ve influenciada principalmente por: la composición química del material, programas de mantenimiento, carga y velocidad del tren, lo que conduce a la generación de desgaste, deformación plástica.

Montiel Varela (2018), enumera tres tipos de defectos en la cabeza del riel, en este proyecto se hará especial énfasis en el tercer enumerado.

3.3.1. Defectos transversales

Es una fractura progresiva que se desarrolla transversalmente al área de la cabeza del riel. La única forma de identificar un defecto transversal de forma más específica es cuando se fractura el riel, realizando un análisis con mayor precisión (Figura 1.8). El tamaño los defectos transversales está en función de un porcentaje del área transversal del hongo del riel.



Figura 10. Fisura transversal en un riel. Fuente: Montiel Varela (2018)

Los defectos transversales más comunes son:

- Fisura transversal.
- Fisura combinada.
- Fisura detallada.
- Fracturas por abrasión en el riel.
- Fractura por soldadura.

3.3.2. Defectos horizontales

Son cualquier tipo de defectos que se desarrollan de forma longitudinal. Los defectos horizontales más comunes son:

- Ruptura horizontal en la cabeza.
- Ruptura vertical en la cabeza.

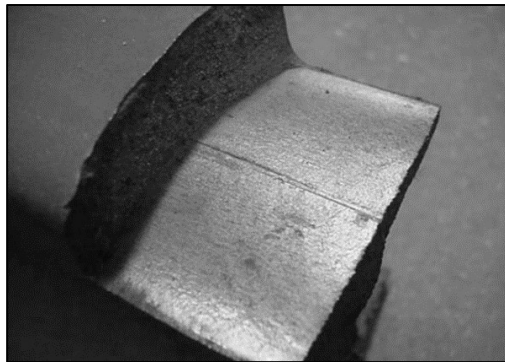


Figura 11. Rotura horizontal en la cabeza. Fuente: Montiel Varela (2018)

3.3.3. Defectos en el área de contacto

Estos defectos son en su mayoría consecuencia del fenómeno por rodadura y deslizamiento, que se producen por la misma naturaleza del sistema debido a la interacción rueda-riel. Los defectos consecuentes por este fenómeno son causados principalmente por el excesivo esfuerzo cortante en la zona de contacto

Algunos de los defectos más comunes en la zona de contacto son:

- Corrugación.
- *Squats* y *studs*.
- Fatiga superficial.
- Flujo plástico.

En este apartado se determinarán algunos de los defectos en el área de contacto que la experiencia de campo en otros países, para esto se tomarán las experiencias de sistemas que usan sistemas electrónicos de bajo costo, por ejemplo, la experiencia de Cellaswany, Muthammal, & Geetha (2018). Además de la experiencia reportada por NeTIRail-INFRA (2016).

En los proyectos mencionados, distintos sistemas *ABA* han detectado con especial efectividad la corrugación y *squats* (80% de acuerdo con unez et. al

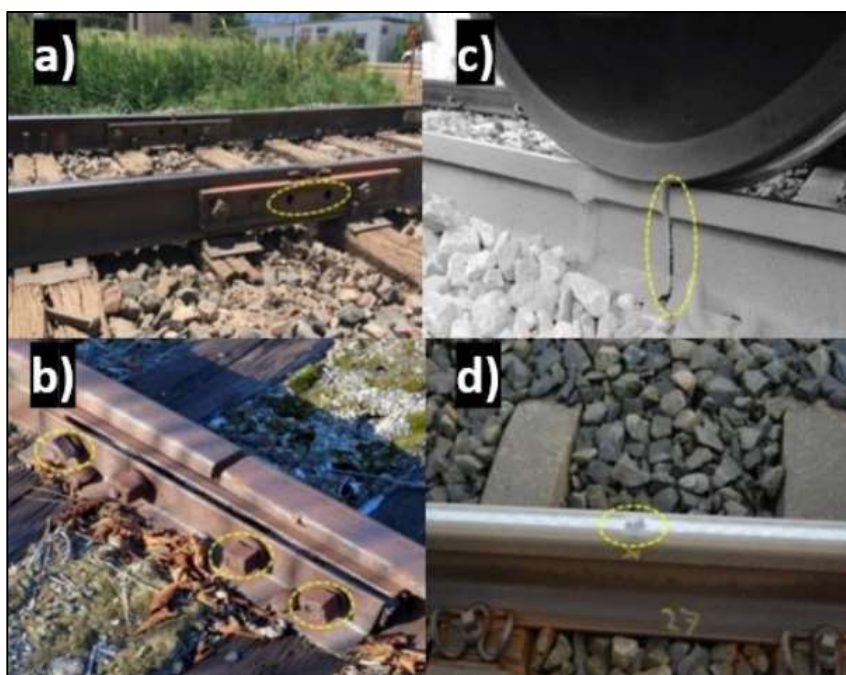


Figura 12. Defectos en rieles detectados por sistema ABA. Fuente: Adaptado de Cellaswany, Muthammal & Geetha, *A new methodology for optimal rail track condition measurement using acceleration signals* (2018)

La figura anterior muestra distintos defectos presentes en rieles detectados por la experiencia en los ferrocarriles de la India, Se llaman defectos de riel a cualquier discontinuidad en la geometría en estos, para efectos de este proyecto, se tomarán mediciones indirectas los defectos de vía en el plano vertical o sea los defectos perpendiculares con respecto a la dirección de avance del tren.

3.3.3.a. Squats

Los squats son un tipo de fatiga por contacto rodante. Se identificaron en Europa hace unos 30 años. Aparecen en la banda de carrera en pista recta y curvas grandes, independientemente del tipo de vía. Los orígenes de estos defectos son diversos, algunos de ellos podrían deberse a la ondulación, soldaduras de mala calidad y pequeñas hendiduras propias de la fabricación de los rieles. En la figura 3 se identifica un squat en la sección D.

La siguiente figura muestra una fotografía de referencia. El crecimiento de los *squats* depende del contacto dinámico entre ruedas y rieles. La experiencia de referenciada por NeTIRail-INFRA, 2016 definen tres clases de *squats*: pequeña (*squat A*), moderada (*squat B*) y grave (*squat C*).



Figura 13. *Squat*. Fuente: NeTIRail-INFRA (2016)

La variable más importante de un *squat* es la longitud ya que está relacionada con la duración del impacto y con la característica de longitud de onda (y por lo tanto la frecuencia) de la fuerza de contacto dinámica posterior, que se determina, por las características del riel. La anchura es menos relevante que la longitud, ya que está relacionada principalmente con la gravedad del defecto y su crecimiento no es lineal.

En el caso de los *squats* ligeros causados, por ejemplo, hendiduras, la forma suele ser irregular, dependiendo de la forma de los objetos que causan la indentación. Con el crecimiento de los *squats*, la anchura se vuelve comparable a la longitud. Pero la longitud puede crecer aún más mientras que la anchura está limitada por la anchura del carril (alrededor de 71 mm).

Las profundidades no se consideran porque las fallas ligeras que surgen de hendiduras suelen ser más profundas que la compresión de los cuerpos de contacto esto, hace que la parte inferior de las fallas ligeras no haga contacto con la rueda (la parte inferior está oxidada y negra). Cuando la parte inferior tiene contacto con la rueda, por lo general, ya hay grietas debajo de la superficie del riel, indicadas, de nuevo, por la parte oxidada.

Por lo tanto, en este último caso la medición de la profundidad tampoco proporcionará información importante porque hay una especie de efecto de resorte proveniente de la grieta que crea un espacio entre el material de la superficie agrietada y el material debajo, que no puede ser capturado por la medición de geometría en condiciones sin carga.

Se recomienda documentar de los defectos y estimar su tamaño. Después de la medición consecutiva, es posible seguir la dinámica de los defectos. Esta información abre las posibilidades de adaptar mejor las estrategias de mantenimiento, anticipando los fallos en lugar de reaccionar en ellas.

En la figura, los squats moderados y graves pueden ser reconocidas por las siguientes características: depresión localizada de la superficie de contacto de la cabeza del riel con una mancha oscura; ensanchamiento de la banda de recorrido; una forma de dos “pulmones” y grietas que comienzan a desarrollarse.

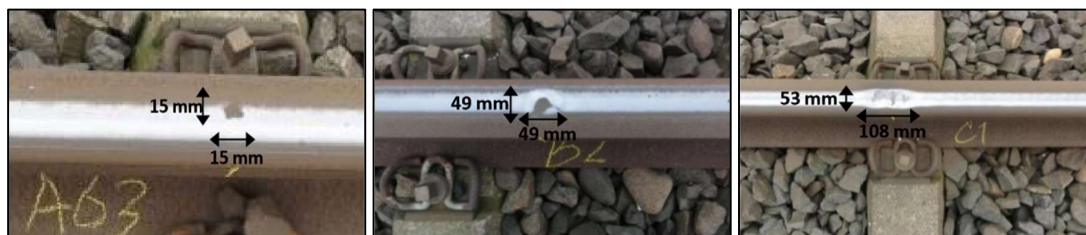


Figura 14. Fotografías de squats, ligero, moderado y severo. Fuente: NeTIRail-INFRA (2016)

3.3.3.b. Corrugación

La corrugación u ondulación del riel es un defecto periódico de la superficie del riel similar a una onda. Según los llamados mecanismos, la ondulación se puede clasificar en distintos tipos: corrugado de paso corto, resonancia P2, recorrido intenso, de carril ligero y corrugado relacionado con la forma de vía.

Entre ellos todavía se desconocen los mecanismos de desarrollo de la ondulación de paso corto. La corrugación de paso corto se refiere a la ondulación con longitud de onda que cae en el rango de 20 – 80 mm, y con amplitudes (distancia de pico a valle) hasta 100 m. En la red ferroviaria neerlandesa, la ondulación más comúnmente registrada tiene la longitud de onda de 20 – 40 mm. (NeTIRail-INFRA, 2016)

Se forma principalmente en tramos rectos o en curvas suaves bajo cargas de eje comparativamente ligeras. Aparecen en diferentes vías, desde las vías de lastre tradicionales hasta las modernas pistas de losas, desde el ferrocarril pesado hasta el tren ligero y el tránsito rápido, por ejemplo, las líneas de metro o tranvía, desde vías discretamente soportadas hasta vías continuamente incrustadas.

Por un lado, la ondulación aumenta las vibraciones/fuerzas de interacción dinámicas del sistema de vía del vehículo, acelerando así el proceso de degradación de los componentes clave del sistema. Por otro lado, el ruido "rugiente" debido a la ondulación es una molestia para los residentes cercanos, especialmente en algunas áreas densamente habitadas. (Oostermeijer, 2008)



Figura 15. Corrugaciones. Fuente: Oostermeijer (2008); NeTIRail-INFRA (2016)

3.4. Tecnología Axle Box Acceleration

La comunidad internacional de ferrocarriles ha llevado a cabo una importante investigación para desarrollar aplicaciones innovadoras con tecnologías avanzadas para mejorar la inspección de las vías. El desarrollo de nuevas tareas juntamente con las diferentes tecnologías disponibles (cámaras, sensores, procesadores informáticos, etc.) para adaptarse a las necesidades del sector ferroviario. (Montiel Varela, 2018). Entre estas tecnologías se encuentra las tecnologías de monitoreo de mediante la interpretación de vibraciones.

Una característica importante de utilizar este tipo de transductores es que la estructura ferroviaria no requiere modificaciones drásticas para su implementación, debido a que los sensores se montan y desmontan de manera muy sencilla. Los acelerómetros pueden ser colocados en diferentes lugares o posiciones a lo largo de toda una estructura. La principal ventaja es la posibilidad de monitorear una longitud considerable de la estructura en comparación con otros métodos disponibles.

En la literatura, los trabajos realizados consideran el uso de 2 a 21 acelerómetros por riel, y está en función del daño y exactitud que se pretende monitorear. Por ejemplo, Oba et. al (2009), desarrollaron un par de algoritmos de monitoreo para la detección de fallas en los vagones *Shinkansen* de Japón.

Estos algoritmos se basan en un análisis estadístico de aceleración durante un periodo determinado. Un algoritmo analiza los picos de la amplitud de la vibración teniendo en cuenta una comparación entre elementos no dañados con dañados, mientras el otro algoritmo considera las vibraciones estáticas de la parte frontal y trasera del vagón analizado. El resultado es la retroalimentación de los dos algoritmos que, incluso teniendo una diferencia de conceptos, presenta resultados similares.

En los ferrocarriles neerlandeses, la medición de la aceleración de la caja de ejes o *boogies* (ABA) se ha utilizado para la detección de *squats*. El sistema también se ha utilizado para comprender la degradación de las juntas de rieles. Otras extensiones del sistema incluyen la detección de corrugado de paso corto, el estudio de cruces, zonas de transición, soldaduras, entre otros. (Dollevoet, Núñez & Li, 2017)

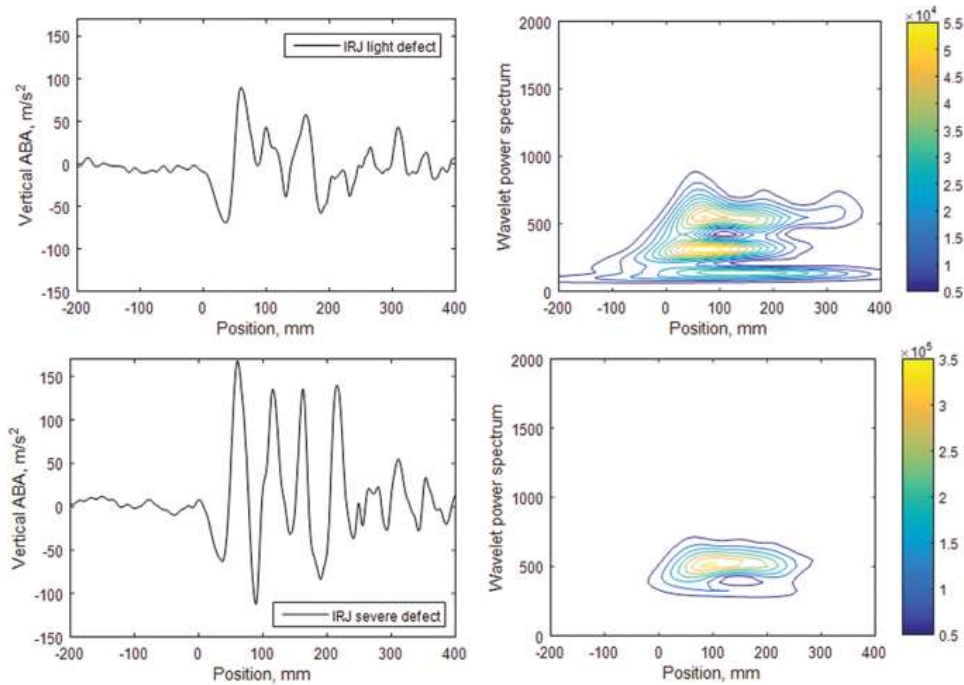


Figura 16. Ejemplos de mediciones en juntas. Fuente: Dollevoet, Núñez & Li (2017)

3.4.1. Principios

El sistema mide aceleraciones longitudinales y verticales, debido a que el objetivo está en la detección de irregularidades de onda corta. Las vibraciones en la componente lateral se ha empleado en la literatura ferroviaria en el rango de frecuencia por debajo de 100Hz, aplicable para irregularidades de vías de onda más largas.

Una irregularidad de la vía en el eje vertical como un *squat* provoca un impacto en la rueda en la dirección vertical lo que induce una vibración forzada del *boogie*. Las vibraciones causadas por el impacto se transmiten luego desde la interfaz rueda-carril hasta el eje.

En el caso de la aceleración longitudinal y vertical (direcciones x y), la simetría axial de la rueda permite analizar alguna correlación entre ellas y los *squats* (plano x-y).

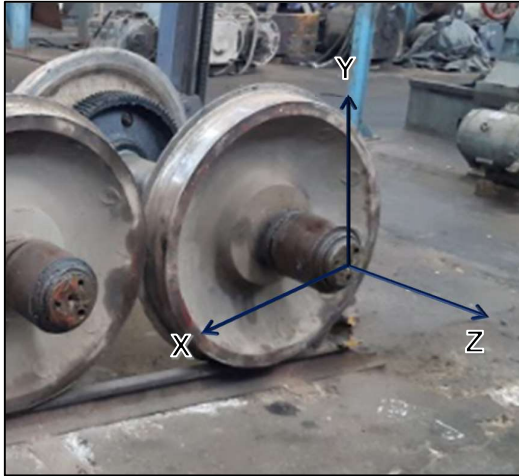


Figura 17. Direcciones de vibraciones para sistema ABA. Fuente: elaboración propia.

3.5. Hardware y Software empleados

Este apartado se dedicará a definir el *software* y los circuitos electrónicos usados durante el desarrollo del proyecto, con el fin de que el lector tenga un panorama claro de la función de cada módulo y como se integran para resolver el problema propuesto. Inicialmente, se debe acotar para la programación de las rutinas del cada sensor/ módulo se empleó el microcontrolador Arduino UNO.

3.5.1. Arduino UNO

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software simples de usar. Las placas Arduino son capaces de leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlo en una salida, activando un motor, encendiendo un LED, publicando algo en línea. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en *Wiring*) y el *software* Arduino (IDE), basado en Processing. (Arduino, 2018)

A lo largo de los años, Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, incluso complejos instrumentos científicos. Una comunidad mundial de creadores (estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales) se ha reunido en torno a esta plataforma de código abierto, sus contribuciones se han sumado a una increíble cantidad de conocimiento accesible. (Arduino, 2018)

Arduino nació en el *Ivrea Interaction Design Institute* como una herramienta fácil para la creación rápida de prototipos, dirigida a estudiantes sin experiencia en electrónica y programación.

A lo largo del tiempo, Arduino comenzó a cambiar para adaptarse a las nuevas necesidades y desafíos, diferenciando su oferta desde placas simples de 8 bits hasta productos para aplicaciones de IOT, *wearable*, impresión 3D y entornos integrados. (Arduino, 2018)

Todas las placas Arduino (además el software) son completamente de código abierto, lo que permite a los usuarios construirlas de forma independiente y eventualmente adaptarlas a sus necesidades particulares. (Arduino, 2018) La siguiente imagen corresponde al modelo oficial de Arduino UNO, sin embargo no es la única, esto se debe a que al ser de código abierto existen distintas manufactureras que fabrican microcontroladores (Adafruit, SparkFun, Royal Tek).

En la sección de apéndices se encuentra información adicional sobre este microcontrolador (esquemáticos, especificaciones de pines)

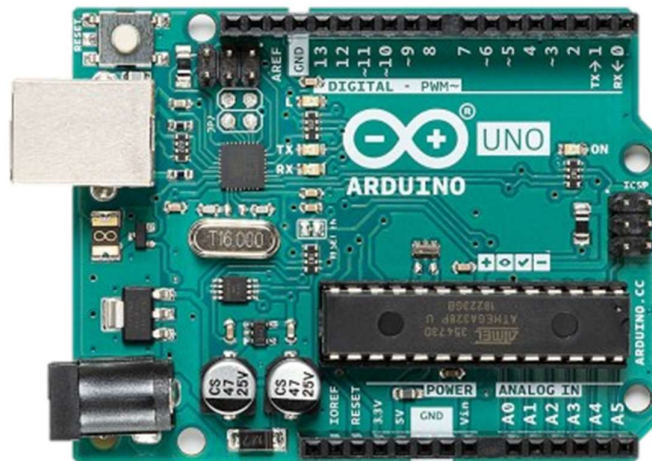


Figura 18. Placa Arduino UNO. Fuente: store.arduino.cc/

3.5.2. Arduino IDE

IDE (*Integrated Development Environment*), es un entorno informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación. Puede dedicarse en exclusiva a un solo lenguaje de programación o bien puede utilizarse para varios.

Un IDE es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, que consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Además, en el caso de Arduino incorpora las herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria *flash* del *hardware*. (Aprendiendo Arduino, 2018)

Los programas de Arduino están compuestos por un solo fichero con extensión “ino”, aunque es posible organizarlo en varios ficheros. El fichero principal siempre debe estar en una carpeta con el mismo nombre que el fichero. La estructura básica de un *sketch* de Arduino es bastante simple y se compone de al menos dos partes. Estas dos partes son obligatorias y encierran bloques que contienen declaraciones, estamentos o instrucciones.

void setup() se “llama” cuando comienza un *sketch*. Usado para inicializar variables, modos de pin, comenzar a usar bibliotecas, etc. ***void setup()*** solo se ejecutará una vez, después de cada encendido o reinicio de la placa Arduino. Después de crear un ***void setup()*** , que inicializa y establece los valores iniciales, ***void loop()*** repite continuamente el código dentro de los corchetes, permitiendo que el programa cambie y responda. (Arduino, 2020)

En resumen, la lógica de recorrido de un *sketch* en el IDE hacia la placa del microcontrolador y los sensores/módulos es que: *setup()* es la parte encargada de recoger la configuración y *loop()* es la que contiene el programa que se ejecuta cíclicamente. En el siguiente diagrama se explica de forma gráfica la afirmación anterior.

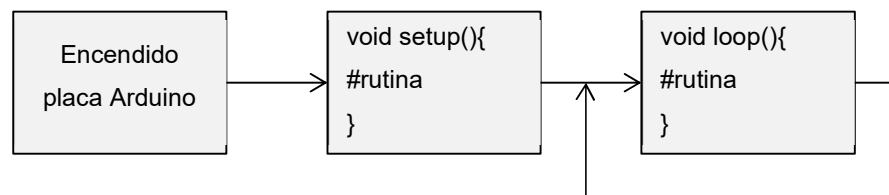


Figura 19. Diagrama de flujo de sketch. Fuente: elaboración propia.

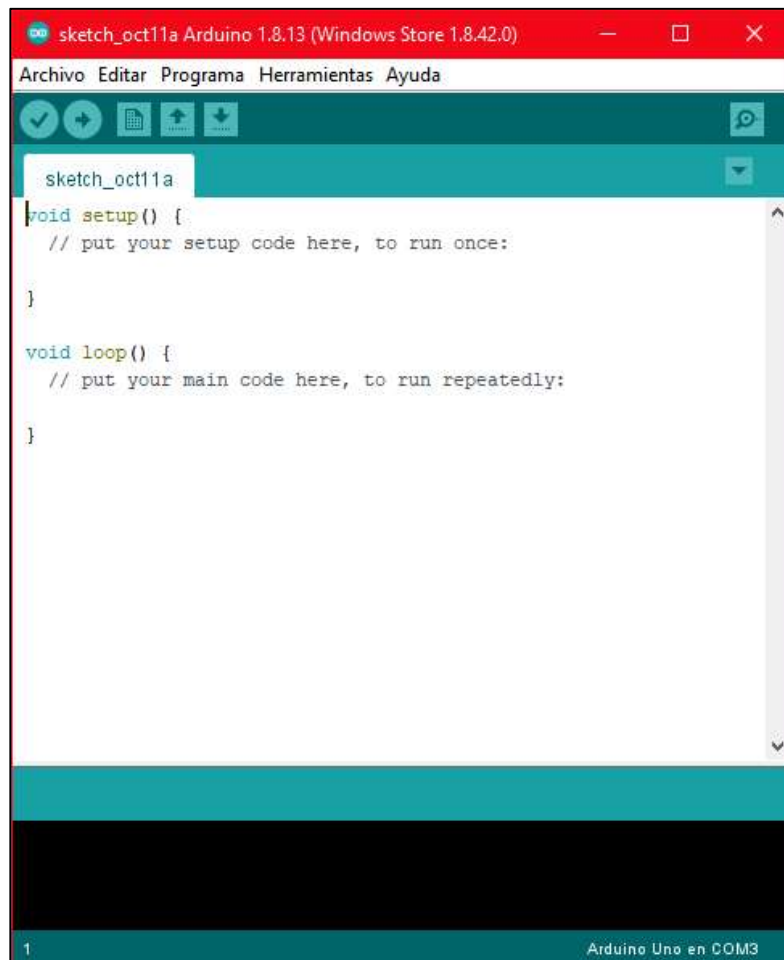


Figura 20. Sketch inicial en IDE Arduino. Fuente: elaboración propia Arduino IDE

3.5.3. MPU 6050

El sensor InvenSense MPU-6050 contiene un acelerómetro MEMS y un giroscopio MEMS en un solo chip. Es muy preciso, ya que contiene hardware de conversión AdC de 16 bits para cada canal. Por lo tanto, captura el canal **X**, **Y**, **X** al mismo tiempo. El sensor utiliza el bus I2C para interactuar con el Arduino. (InvenSense, 2013)

Los módulos IMU (*Inertial Measurement Unit*) son dispositivos capaces de medir la fuerza (aceleración) y la velocidad. Genéricamente constan de un acelerómetro y un giroscopio. Por lo tanto, una IMU no mide ángulos por lo menos no directamente, requiere algunos cálculos. (Unknow, 2014)

El MPU-6050 es una IMU de 6DOF (*6 Degrees Of Freedom*). Esto significa que lleva un acelerómetro y un giroscopio, ambos de 3 ejes (3+3 = 6DOF). Hay IMU's de 9DOF, en este caso también llevan un magnetómetro. Otras pueden tener 5DOF, en cuyo caso el giroscopio sólo mide dos ejes, etc. (Unknow, 2014)

La aceleración puede expresarse en 3 ejes: **X, Y, Z**, las tres dimensiones del espacio. Por ejemplo, la gravedad de la Tierra tiene una aceleración de aprox. 9.8 m/s², perpendicular, así pues, la IMU también detecta la aceleración de la gravedad terrestre.

El MPU-6050 opera con 3.3 V, aunque algunas versiones cuentan con un regulador que permite una conexión a 5 V. El MPU-6050 utiliza el protocolo de comunicación I2C. El protocolo I2C implica el uso de dos líneas para enviar y recibir datos: un pin de reloj en serie (SCL) que la placa maestra pulsa a intervalos regulares, y un pin de datos en serie (SDA) a través del cual se envían datos entre los dos dispositivos. (Arduino, 2018)

A medida que la línea del reloj cambia de baja a alta (flanco positivo), un solo bit de información, que formará en secuencia la dirección de un dispositivo específico y un comando o datos, se transfiere de la placa a el dispositivo I2C a través de la línea SDA. Cuando se envía esta información, la llamada del dispositivo que ejecuta la solicitud y la transmite datos de vuelta. (Arduino, 2018)

Debido a que el protocolo I2C permite que cada dispositivo habilitado tenga una dirección única, y como ambos dispositivos maestro y esclavo se turnen para comunicarse a través de una sola línea, es posible que la placa maestra se capaz comunicarse con muchos dispositivos u otras placas, mientras usa solo dos pines de su microcontrolador. (Arduino, 2018)

Finalmente, este chip cuenta con las siguientes características: (InvenSense, 2013)

- Rango giroscopio: +250 °/s, 500 °/s, 1000 °/s, 2000°/s
- Rango acelerómetro: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g
- Los ADC integrados de 16 bits permiten el muestreo simultáneo de acelerómetros, al tiempo que no requieren multiplexor externo
- Corriente de funcionamiento normal del acelerómetro: 500 µA
- Corriente de modo de acelerómetro de baja potencia: 10 a 1,25 Hz, 20 µA a 5 Hz, 60 µA a 20 Hz, 110 µA a 40 Hz



Figura 21. MPU 6050. Fuente: Arduino.cc

3.5.4. GPS Shield

GPS Shield es una “coraza” de módulo GPS diseñada para el receptor del sistema de posicionamiento global con interfaz SD. Es fácil de usar para registrar los datos de posición en la tarjeta SD. El nivel de tensión de operación es compatible con 5V /3.3V lo hace adaptable con placas Arduino, IFlat32 y otras placas relacionados con el sistema Arduino. Algunas de las principales características son: (IteadStudio, 2012)

- Con interfase MicroSD
- Receptor de antena de alta sensibilidad
- Entrada SMA 1575.42 – 1602.56 MHz
- Corto tiempo para *setear* por primera vez a una baja señal
- Interfaz UART
- Temperatura de operación: -40 °C.-85°C

Se basa en el módulo GPS RoyalTek REB-4216 compatible con las placas Arduino / MEGA. Los pines GPS normales (RX, TX) se pueden conectar a D0-D7 de Arduino. En el caso del dispositivo utilizado, este debe colocar a una alimentación de 5 V, este nivel de tensión es el óptimo para la placa y la alimentación de la antena.



Figura 22. "Shield GPS for Arduino". Fuente: openhacks.com

Complementariamente, la tecnología **GPS (Global Positioning System)** consiste en una constelación de 24 satélites en órbita que transmiten información precisa de tiempo y posición (órbita del satélite) a estaciones terrestres. El sistema GPS provee información de navegación: latitud, longitud, rapidez, rumbo, tiempo, etc. Las estaciones terrestres no transmiten información de vuelta al satélite GPS, solamente utilizan la información recibida para realizar cálculos matemáticos. (Unknow, 2017)

Cuando el receptor GPS recibe la señal y rastrea al menos 4 satélites, tiene la capacidad de calcular su posición y se dice que "ha obtenido un punto GPS" (*GPS Fix*). La estación terrestre (receptor GPS) es la encargada de calcular su posición utilizando la información transmitida por los satélites. El receptor GPS utiliza un método matemático conocido como trilateración.

La forma estándar de comunicación de un módulo GPS con Arduino es a través de una interfaz serial asíncrona: UART. Cuando el GPS recibe alimentación, envía datos NMEA (u otro formato propietario) en el pin TX. La configuración por defecto del puerto serie, depende mucho del fabricante del módulo GPS. El *Shield GPS* envía datos continuamente a través de su puerto serie, aunque aún no sea capaz de calcular su posición (*GPS fix*). (Unknow, 2017)

Al tratarse de una comunicación por UART las señales habituales son:

- Conexión necesaria: GPS TX → Arduino RX
- Conexión opcional: GPS RX → Arduino TX
- VCC positivo de alimentación
- GND tierra o negativo de la alimentación

El *baudrate* estándar para el módulo utilizado es de 9600 baudios, aunque podrían existir otros *baudrates* y configuraciones de fábrica diferentes, por lo que se debe revisar con el fabricante. Las señales enviadas por el *shield* siguen el formato propuesto por NMEA (*National Marine Electronics Asociación*), este trata de un protocolo basado en líneas de texto. Se usan “Sentencias” o líneas de texto delimitadas por saltos de línea. Existen varios tipos de sentencias NMEA según el estándar, pero todas tienen en común lo siguiente: (Unknow, 2017)

- Inician con el carácter \$ seguido del nombre de la sentencia (indica el tipo de datos que contiene)
- Los datos (campos) en cada sentencia están delimitados por comas.
- Envío de *checksum* al final en cada sentencia NMEA

```
$GPRMC,235116.000,A,4003.9040,N,10512.5792,W,0.09,144.75,141112,*,19  
$GPGGA,235317.000,4003.9039,N,10512.5793,W,1,08,1.6,1557.9,M,-20.7,.,0000*5F  
$GPGSA,A,3,22,18,21,06,03,09,24,15,,,,,2.5,1.6,1.9*3E
```

El recuadro anterior enmarca un ejemplo del formato NMEA, de este paquete de datos se obtiene la siguiente información:

- Hora: 235317.000 equivale a 23:53 y 17.000 GMT
- Longitud: 4003.9040, N Norte
- Longitud: 10512.5792, W Oeste
- Numero de satélites vistos: 08
- Altitud: 1577 metros

Como se puede inferir del ejemplo anterior, extraer la información de navegación puede ser una tarea costosa. Sin embargo, existe una librería cuyo uso se ha extendido bastante para comunicar el GPS con Arduino. Se trata de la librería *TinyGPS* disponible para agregar al IDE. Algunos de los comandos más útiles son:

- Obtener posición actual: `gps.get_position(&lat, &lon, &fix_age);`
- Obtener velocidad en centésimas de nudo (*knots*): `speed = gps.speed();`
- Obtener curso en centésimas de grados: `course = gps.course();`

3.5.5. RTC DS1032

El chip de cronometraje DS1302 (*Real Time Clock*) contiene un reloj/calendario en tiempo real y 31 bytes de RAM estática. Se comunica con un microprocesador a través de una interfaz Serial. El reloj/calendario en tiempo real proporciona información de segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. (Maxim Integrated, 2015)

El reloj funciona en formato de 24 o 12 horas con un indicador AM/PM. La interconexión del DS1302 con un microprocesador se simplifica mediante la comunicación serial sincrónica. Solo se requieren tres cables para comunicar con el reloj/RAM: CE, E/S (línea de datos) y SCLK (reloj serie). Los datos se pueden transferir a y desde el reloj/RAM 1 byte a la vez o en una ráfaga de hasta 31 bytes. (Maxim Integrated, 2015)

El DS1302 está diseñado para funcionar con muy baja potencia y retener datos e información de reloj en menos de 1 W. El DS1302 tiene las características adicionales de los pines de alimentación duales para fuentes de alimentación primarias y de respaldo, cargador de goteo programable para VCC₁ y siete bytes adicionales de memoria de *scratchpad*. (Maxim Integrated, 2015)

Algunas de sus principales características: (MicroJPM, 2020)

- Funcionamiento completo de 2.0V a 5.5V
- Cristal 32.768KHz integrado, proporciona el reloj exacto
- Soporte de batería SMD integradomCR1220
- E / S serie para el número mínimo de contactos
- 8-Pin DIP o 8-Pin opcional SO para montaje en superficie

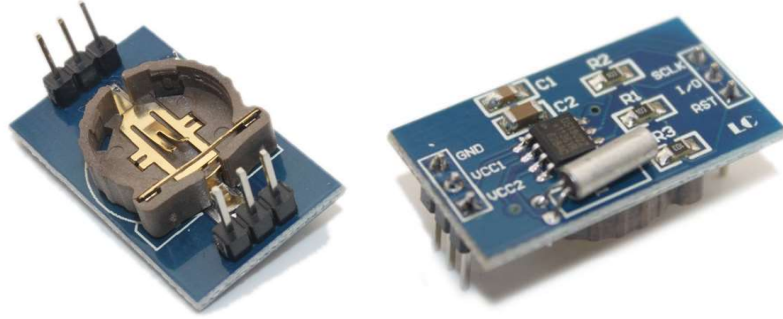


Figura 23. Módulo RTC DS1302. Fuente: MicroJPM

4. Situación actual del mantenimiento de rieles

Evaluar la situación actual de las operaciones de mantenimiento de vías las férreas de INCOFER mediante auditorías apegadas a la norma COVENIN como línea base para la justificación de la propuesta de sistema de monitoreo de condición de rieles.

Como inicio de cualquier propuesta, se debe conocer el punto del que se va a partir para definir una línea base sobre la cual se va a trabajar, para esto se propuso la aplicación de una auditoria sobre el proceso del mantenimiento de vías, a pesar de que este proyecto centra en los trabajos sobre los rieles, no se puede dejar de lado el resto de los componentes de la vía, puesto que todos son parte integral de la salud de estos.

Además, al momento de redacción de este trabajo, no se cuenta con una cuadrilla especializada en la revisión de rieles, sino que como se describe en el siguiente capítulo, se hacen revisiones generales a cargo de personal tercerizado. Por esto es por lo que se evalúan todas las actividades de mantenimiento de vías.

De acuerdo con el Contrato de Servicios Ferroviarios de Mantenimiento de Vías Férreas Sector Pacífico (2018), las labores de mantenimiento de vías son las siguientes, donde se reaclaca en las labores de rieles:

- Recepción, colocación y nivelación de traviesas de vía y de puente.
- Sustitución, colocación, reparación y mantenimiento de rieles, sujeciones y eclisas.

Consiste en sustituir o reponer los rieles de vías férrea dañados, cimbrados, quebrados o con problemas para soportar las cargas a la cuales están sometidos o que pueden afectar la seguridad de las actividades, para todo tipo de riel que se encuentre a lo largo de la vía. La labor de sustitución de rieles consiste entre otros, en soltarlos de las sujeciones o desclavarlos de las traviesas, luego colocar el nuevo riel en perfecto estado, sujetarlos a las traviesas y alinearlos, respecto al trazado original, para el adecuado tránsito de los equipos tractivo y traccionado del sistema ferroviario

Esta actividad consiste también, en la reparación y el mantenimiento de sujeciones, eclisas o mancuernas a lo largo de la red ferroviaria. Para ello se debe revisar periódica y cíclicamente, revisar las uniones, los tornillos y el zoque de presión de las tuercas, realizando los trabajos necesarios para tales fines.

También, cuando existan sujeciones o mancuernas quebradas (dañadas), se deberá reemplazar inmediatamente, asegurando la perfecta presión entre los rieles y tornillos, para el tránsito ferroviario.

- Construcción y reparación de lingadas de riel.
- Colocación sustitución, reparación y mantenimiento de cambiavías, agujas, guarda riles, “sapos” en la vía férrea, apartaderos y espuelas.
- Limpieza de drenajes, alcantarillas y desagües o cunetas.
- Riego y regulación de balasto.
- Construcción de pasos a nivel.
- Revisión, detección y aviso de danos o problemas de la vía férrea, a lo largo y ancho de la misma.

Para realizar esta labor, el tercerizado deberá contar con el personal calificado y con experiencia en este campo, para que realice inspecciones rutinarias a lo largo de la vía férrea, a efectos de detectar problemas o posibles danos y de esta forma avisar a la Gerencia de Operaciones y personal de mantenimiento de vías de INCOFER. Estas inspecciones se llevarán a cabo a través de los guardavías.

- Limpieza por desechos sólidos y recolección de basura (material orgánico e inorgánico) sobre la vía férrea.
- Atención a los descarrilamientos.

Para realizar esta auditoría, se realizaron varias visitas donde se denotaron y evaluaron los puntos que forman los principios básicos de las áreas de mantenimiento dedicados a las labores de los técnicos encargados del mantenimiento. Finalmente, se realizó una serie de entrevistas con ingenieros de la Gerencia de Operaciones para denotar la parte administrativa/gerencial que la norma COVENIN 2500-93 sugiere.

A continuación, se ofrece un resumen de los resultados obtenidos en la evaluación, donde se explicará por área y después se sintetizarán cada uno de los indicadores de cada una.

4.1. Resultados y análisis

En la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos en la evaluación, resumidos por áreas. Asimismo, en la Tabla 4 se resume una escala de evaluación proporcionado por la norma COVENIN 1980-89, este se mide en una graduación que oscila entre 0 y 100. La escala define 4 niveles, en los cuales se clasifica la gestión en función de la calificación obtenida.

Tabla 4. Escala de evaluación para la gestión de mantenimiento. Fuente: adaptado de Norma COVENIN 1980-89

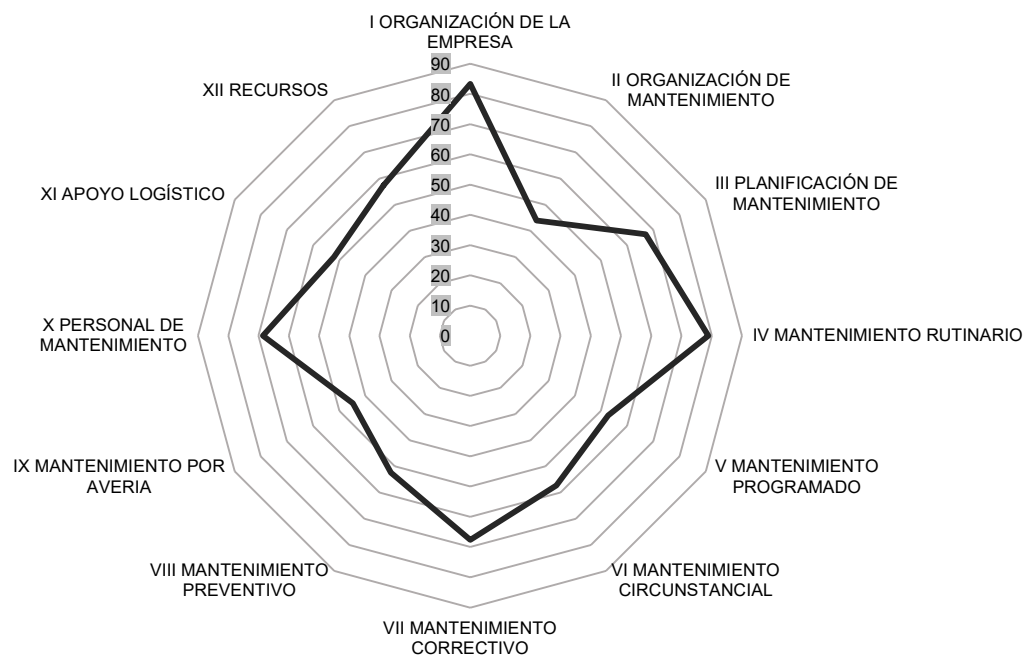
Rango [%]	Estatus	Descripción
100 – 90	Buena	No existen síntomas evidentes de deficiencias en el área que afecten la productividad.
89.9 – 80	Aceptable	Las deficiencias en esta área pueden estar afectando la productividad. De realizarse mejoras pueden influir apreciablemente en la productividad.
79.9 – 50	Deficiente	Deficiencias marcadas que afectan la productividad. Con gran certeza se puede influir en mejoras sustanciales de productividad.
50 – 0	Grave	Deficiencias extremas que repercuten notoriamente en la productividad.

Tabla 5. Resultados por área producto de evaluación. Fuente: elaboración propia.

Área	Calificación [%]	Situación
I Organización de la empresa	83.3	Aceptable
II Organización del mantenimiento	44	Grave
III Planificación del mantenimiento	67	Deficiente
IV Mantenimiento rutinario	78.8	Deficiente
V Mantenimiento programado	52.8	Deficiente
VI Mantenimiento circunstancial	57.2	Deficiente
VII Mantenimiento correctivo	67.6	Deficiente
VIII Mantenimiento preventivo	52.4	Deficiente
IX Mantenimiento por avería	44.8	Grave
X Personal de mantenimiento	68.5	Deficiente
XI Apoyo logístico	52	Deficiente
XII Recursos	57.3	Deficiente

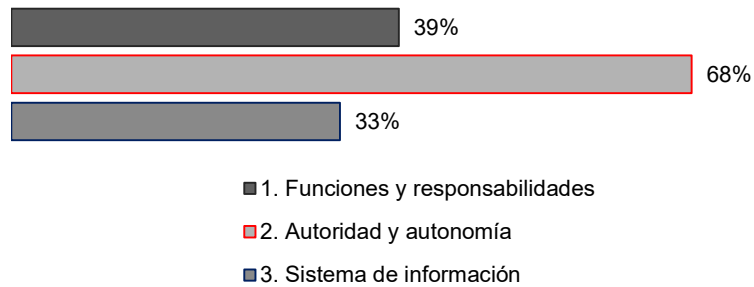
Para el análisis de la auditoría, se ahondará en cada área de mantenimiento, se detallará la razón de la calificación y se harán recomendaciones en el siguiente apartado, el objetivo de esta auditoría es de conocer la situación actual de mantenimiento, entonces se concluirá con un estatus. Se ignorarán en este análisis las áreas I y VI, puesto que salen del alcance de este proyecto

En el siguiente gráfico radar se resume la información de la tabla anterior, donde se denota la asimetría entre las distintas aristas del polígono, producto de falencias en distintas áreas y fortalezas en otras, producto de esfuerzos departamentales recientes (desde 2018 - 2020).



Gráfica 2. Resultados de evaluación por área. Fuente: elaboración propia.

4.1.1. Organización del mantenimiento



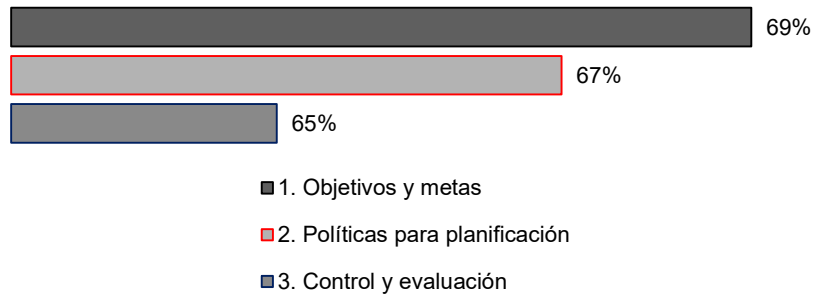
Gráfica 3. Organización del mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

Las funciones de los trabajadores no están claramente definidas, además de que al ser un servicio tercerizado se deben responder en a dos jefaturas, tanto a MANFER. S.A y a la Gerencia de Operaciones de INCOFER, entonces el flujo de información es complicado y con algunas deficiencias en la comunicación de ordenes al tener dos cabezas.

Esta situación también implica que las funciones y las responsabilidades de los funcionarios no estén tan claras, ya que se debe respetar las necesidades de dos partes. A pesar de esto, en la parte de autonomía se tiene una calificación deficiente, pero alta, puesto que la empresa MANFER. S.A. tiene un margen de decisión, pero aun así debe respetar las órdenes de la Gerencia de Operaciones, claramente descrito en los contratos de tercerización.

El sistema de información en este rubro es grave, puesto que no se cuenta con una base de datos computarizada donde se anoten todas las variables de en el mantenimiento de vías, sino que se cuentan con archivos en papel, sin formatos estándar, esto dificulta de gran manera la organización del mantenimiento.

4.1.2. Planificación del mantenimiento

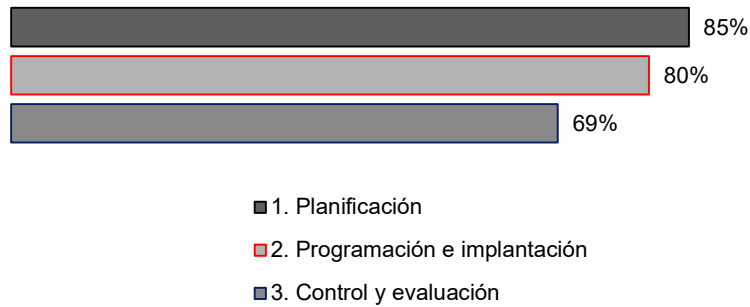


Gráfica 4. Planificación del mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

Las metas y objetivos del mantenimiento están claros, escritos en los distintos planes de la organización de INCOFER, se tienen definidos los objetivos, como los kilómetros que se desean intervenir y los “puntos calientes” en la vía. Aun así, no se vislumbra con claridad cómo se van a cumplir estas metas, puesto que la logística y equipos disponibles no son los adecuados para hacerlo, además de que no todos los involucradas están conscientes de los objetivos (empresa que terceriza)

Las acciones de mantenimiento que se ejecutan no se orientan hacia el logro de objetivos, se limitan a mantener el equipo en marcha. La empresa no cuenta con un inventario detallado de manuales y catálogos de piezas de los equipos a mantener (gran parte de esta información está en manos de los técnicos). Asimismo, no se cuenta con archivos organizados con la información necesaria para crear los programas de mantenimiento preventivo y por tanto no hay información que procesar para la toma de decisiones.

4.1.3. Mantenimiento rutinario



Gráfica 5. Mantenimiento rutinario. Fuente: elaboración propia.

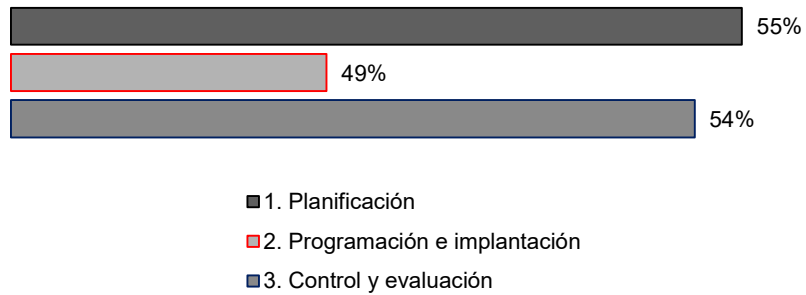
Aquí se evalúan las rutas de revisión de vías, que se realizan semanalmente por distintas cuadrillas en las distintas líneas del Gran Área Metropolitana.

En esta área se denota una de las fortalezas, puesto que este es el tipo de mantenimiento en el que se han centrado, en esta parte se destaca la planificación, aunque cuenta con un gran margen de mejora, como se describe en el siguiente capítulo. En la programación e implementación enflaquece el hecho de la logística, puesto que es demasiado complejo llevar a cabo intervenciones por los lapsos cortos y las condiciones de las vías férreas (ser de vía única).

En la arista del control y evaluación, de nuevo se enflaquece la documentación de las intervenciones, puesto que el trabajo de archivo se hace en la mayor parte en papel, por esto el control y la evaluación de estas se torna difícil y engorroso, por lo que hacer un cambio en asuntos que lo exijan es un proceso que tomaría demasiado tiempo, que en la situación actual no permite contar con este.

Este rubro, junto con la componente de mantenimiento programado y preventivo son los que se harán frente con la propuesta de este proyecto, ya que un plan de mantenimiento basado en la condición debe poder abarcar estas aristas.

4.1.4. Mantenimiento programado



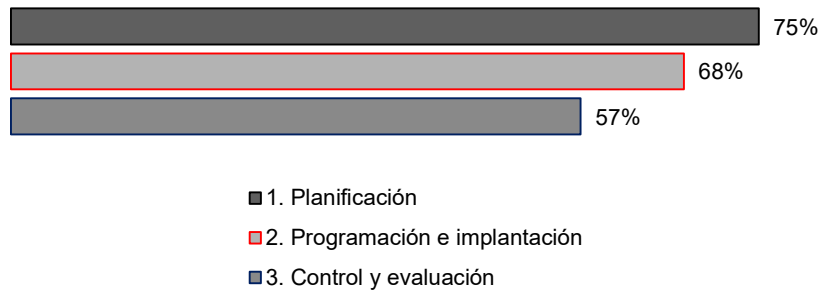
Gráfica 6. Mantenimiento programado. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a planificación, no se tiene conocimiento del estado actual de los rieles, sino que se tiene una idea general del mal estado de secciones de la vía, pero sin indicadores por kilómetro o algún índice de criticidad, no se tiene los manuales de todas las máquinas (coches de pasajeros) y muchos de los existentes no aportan información completa.

Además, en la arista de implementación se falla por las condiciones de trabajo ya mencionadas (logística), además de que el personal de las cuadrillas y el presupuesto no es el adecuado para generar una mejora sustancial en el estado de las vías y mucho menos para alargar el ciclo de vida de los activos (rieles, eclisas, soldaduras).

La evaluación y el control son débiles, esto en parte se debe a que no se cuenta con un sistema computarizado para el manejo de la información de mantenimiento de forma centralizada, los pocos datos que se recolectan se manejan en papel o en hojas de cálculo digitales sin relación alguna.

4.1.5. Mantenimiento correctivo



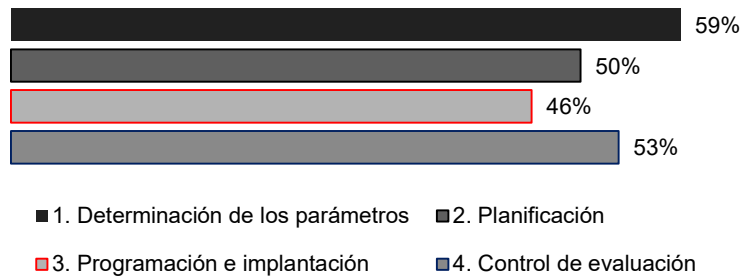
Gráfica 7. Mantenimiento correctivo. Fuente: elaboración propia.

En cuanto al mantenimiento correctivo, no se llevan registros de aparición de fallas en las vías, solamente lo que se anota en bitácora y en los formatos para reporte fallas, además la información recolectada por medio de reportes no es de utilidad debido al mal diseño de los formatos.

Los controles de bases de datos son deficientes, donde no se tiene una clara identificación de los puntos que fueron intervenidos por este tipo de mantenimiento, sino que se anotan en bitácoras en papel, como se ha dicho, esto dificulta las decisiones a futuro y la posibilidad de la realización de sobre-trabajo es alta.

Para la ejecución de mantenimiento correctivo no se tiene una adecuada distribución del tiempo para realizar las labores por las condiciones del proceso productivo de transporte de usuarios y de carga.

4.1.6. Mantenimiento preventivo



Gráfica 8. Mantenimiento preventivo. Fuente: elaboración propia.

Se prestará mayor atención a esta área, puesto que es la que la idea de un modelo de mantenimiento basado en la condición solventara de manera directa. Por esto, la oportunidad de mejora que se propondrá será el desarrollo del próximo capítulo. (*Estrategia de implementación de modelo de mantenimiento basado en condición*)

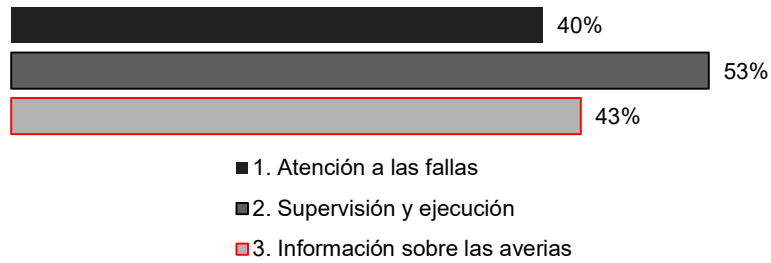
En la *determinación de los parámetros* se castigó especialmente la falta de estudios para conocer a ciencia cierta el estado de las vías, así como la falta de estudios profundos en indicadores de mantenimiento (tiempo entre fallas, tiempo medio entre reparaciones). La falencia en la obtención de esta información recae, reiterando, en la falta de la recolección de información en los niveles primarios (capataces y cuadrillas).

El apartado de *planificación* se ve afectado por la falta de información veraz descrita en apartados anteriores (estado de vías), se tiene una idea de los puntos calientes y de mayor criticidad, pero depende más de la percepción de las cuadrillas de mantenimiento que de una gestión y análisis de parámetros, por lo que las intervenciones son planeadas siempre y cuando los conatos de falla sean notificados.

En *programación e implantación* se falla especialmente en la componente del apoyo por parte de los INCOFER, puesto que los recursos, tanto económicos como insumos tipo *software* y apoyo logístico no son los suficientes para generar una mejora sustancial en las actividades del mantenimiento de vías.

Dentro del *control y evaluación* se cae en el mismo problema de la falta de datos, que como se ha mencionado es un recurrente en el departamento y la empresa que terceriza las acciones de mantenimiento.

4.1.7. Mantenimiento por avería



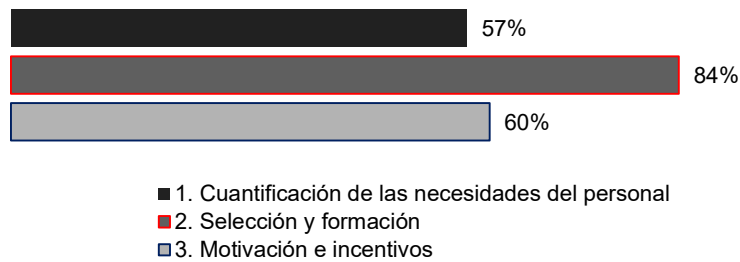
Gráfica 9. Mantenimiento por avería. Fuente: elaboración propia.

La organización de mantenimiento no cuenta con instructivos de registro de fallas, únicamente lo registrado en las bitácora, que no siguen un formato definido, a pesar de esto existen esfuerzos para solventar esta problemática. No existen registros para el control de materiales utilizados en la atención de averías, no se llevan registros para el análisis de fallas y determinar su corrección definitiva o su prevención.

La información con la que se cuenta no permite la evaluación del mantenimiento por avería basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema. La supervisión es escasa o nula en el transcurso de la reparación y puesta en marcha del sistema averiado.

La carencia de herramienta adecuada y los tiempos de espera por repuestos inciden de forma negativa en la atención de averías. Además de la logística compleja que se ha explicado.

4.1.8. Personal de mantenimiento



Gráfica 10. Personal de mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

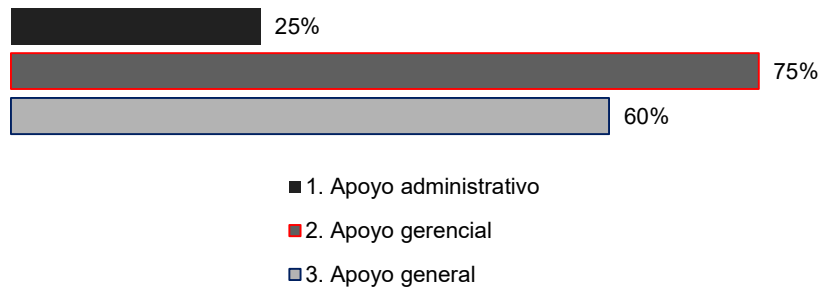
No existen estudios que indiquen el número óptimo de personas que requiere la organización de mantenimiento de vías. Asimismo, no se cuenta con formatos donde se especifique el tipo y cantidad de ejecutores de mantenimiento por tipo de frecuencia, tipo de mantenimiento.

La jefatura de mantenimiento sí considera características como educación, experiencia, conocimiento, habilidades, destrezas y actitudes personales para la selección de personal, sin embargo, debido a los salarios poco competitivos que ofrece es incapaz de reclutar o retener al personal idóneo. Además de que hubo un descenso en el número de personal debido a las restricciones consecuencia de la pandemia por COVID-19.

De tal modo que el proceso de selección es poco efectivo. Aun así, los actuales trabajadores son personas con demasiada experiencia adquirida por las condiciones de trabajo y tiempo, esto mantiene un balance, puesto que en ellos saben cómo hacer labores complejas sin tantos insumos.

No existen programas permanentes de formación del personal, y las descripciones de los cargos no son conocidas a plenitud por los colaboradores. La institución no cuenta con evaluaciones de rendimiento periódicas para fines de ascensos o aumentos salariales y no se otorga ninguna clase de incentivo o estímulo por iniciativa, puntualidad, entre otros.

4.1.9. Apoyo logístico



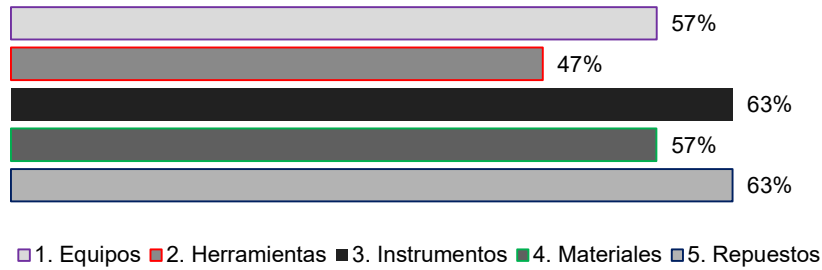
Gráfica 11. Apoyo logístico. Fuente: elaboración propia.

Los recursos asignados a la organización de mantenimiento no son suficientes, y no se posee políticas de financiamiento a largo plazo dirigidas a inversiones, mejoramiento de objetos de mantenimiento u otros. El apoyo económico hacia la componente de mantenimiento es escasa, producto de la difícil situación económica de INCOFER.

En la parte del apoyo gerencial si ha habido esfuerzos para mejorar los procedimientos y la gestión de mantenimiento, pero aún no son suficientes para revertir la difícil situación del mantenimiento de vías.

Y en general, los recursos económicos no son los suficientes, pero esto escapa del control de INCOFER, ya que responde a los presupuestos girados hacia la organización.

4.1.10. Recursos



Gráfica 12. Recursos. Fuente: elaboración propia.

Aquí se recae en la problemática de los recursos económicos, puesto que por falta de presupuesto no es posible contar con los equipos necesarios y los que hay son demasiado viejos y con reparaciones con piezas no originales o hechas por los técnicos del Taller Electromecánico del Pacífico, en esta dinámica los trabajadores deben hacer sus tareas con equipos que no dan el 100% de las funciones que deben realizar, por ejemplo el transporte mediante carros ferroviarios, puesto que los que están en stock (2) están en malas condiciones.

Esto se extiende a maquinaria como back-hoes o tractores, que por el papeleo propio de una institución pública la duración entre reparaciones es muy grande. En el apartado de las herramientas se vive el mismo panorama, parte de ellas son antiguas o “hechizas”, en otras palabras, no son adecuadas en su totalidad para los trabajos en vías.

4.2. Oportunidades de mejora

Resultado del análisis previo: es posible profundizar de manera significativa en todas las áreas, para efectos de este trabajo se tomarán en cuenta las áreas que tengan un peso considerable en las labores de mantenimiento de rieles. Esto no significa que las demás áreas no comprendidas no generen algún efecto, pero se toma en cuenta el alcance propuesto para este proyecto.

Tabla 6. Propuestas en distintas áreas del mantenimiento. Fuente: elaboración propia

Área		Propuestas
III	Planificación del mantenimiento	67
		<ul style="list-style-type: none"> Orientar los objetivos para que sea revisados en lapsos más cortos (mensuales, bimestrales). Además de que cada parte de la organización tenga claro su rol en el cumplimiento de las metas Definir los elementos, tramos o defectos que significan un gran porcentaje de los incidentes y/o reportes de trabajo. Esto para orientar los esfuerzos de planificación a hacia estos. Fortalecer el sistema de información mediante la estandarización y control del flujo de entrada de datos.
IV	Mantenimiento rutinario	78.9
		<ul style="list-style-type: none"> De mano con el área anterior, definir los elementos que necesitan especial atención a intervenir, además de generar un trabajo de normalización de las labores Realizar un proyecto donde la meta sea que las labores de mantenimiento rutinario sean mejor planificadas, en conjunto con las municipalidades y el MOPT Fortalecer el sistema de información mediante la estandarización y control del flujo de entrada de datos.
V	Mantenimiento programado	52.6
		<ul style="list-style-type: none"> Definir los elementos, tramos o defectos que significan un gran porcentaje de los incidentes y/o reportes de trabajo. Esto para orientar los esfuerzos de planificación a hacia estos. Realizar un proyecto donde la meta sea que las labores de mantenimiento rutinario sean mejor planificadas, en conjunto con las municipalidades y el MOPT Fortalecer el sistema de información mediante la estandarización y control del flujo de entrada de datos.
VII	Mantenimiento correctivo	67.6
		<ul style="list-style-type: none"> Llevar un control detallado de las fallas que se atienden mediante este modelo, para usarlo en informes de situación de las vías y analizarlos como parte de la planificación de intervenciones Fortalecer el sistema de información mediante la estandarización y control del flujo de entrada de datos.
XI	Apoyo logístico	52
		<ul style="list-style-type: none"> Trabajar en la agilización de procesos de compra/cambio de activos. Crear una culturalización de la importancia del mantenimiento en los niveles superiores del organigrama de INCOFER
XII	Recursos	57.3
		<ul style="list-style-type: none"> En conjunto con los capataces, técnicos e ingenieros, esquematizar una serie de equipos y herramientas primordiales necesarios para las labores de mantenimiento de vías, y que en la gerencia se trabaje en la adquisición, reparación o alquiler de estos, en función de los recursos financieros disponibles. Agilizar la obtención de materiales, mediante la simplificación de procesos de compra y contratación de proveedores certificados por la institución.

5. Estrategia de implementación de modelo de mantenimiento basado en condición

Elaborar una estrategia orientada hacia las labores de mantenimiento de vías férreas, mediante la que se encamine a los departamentos pertinentes hacia la migración a un modelo de intervenciones basadas en condición.

En la presente sección se detallará el desarrollo de una estrategia de implementación para el desarrollo de un modelo de mantenimiento basado en condición para el proceso de intervenciones de rieles. En principio, se debe definir el proceso productivo, del mantenimiento de vías férreas, que es permanente y cíclico, donde claramente los rieles son parte de toda la infraestructura. Se resume en el siguiente diagrama.

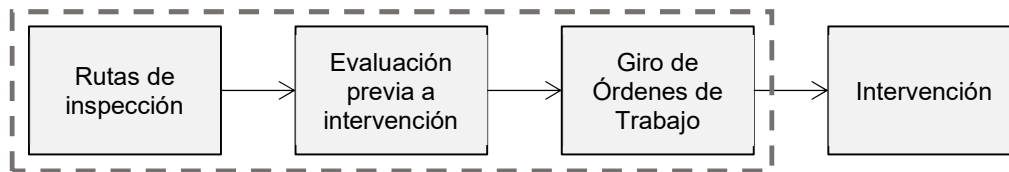


Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de mantenimiento de rieles. Fuente: elaboración propia.

En esta secuencia, las cuadrillas encargadas del mantenimiento de las vías férreas (rieles, balasto, traviesas, fijaciones, maleza, agujas entre otros) deben realizar rutas de inspección frecuentes, con el mínimo tiempo entre ellas para salvaguardar la integridad de los activos (Contrato de Servicios Ferroviarios de Mantenimiento de Vías Férreas Sector Pacífico, 2018), durante estas inspecciones, meramente visuales, se debe verificar la existencia o no de defectos en rieles, descritos en la **sección 3.3**.

Y no solo revisar los rieles, sino las demás variables de los elementos mencionados como parte de la vía férrea. Al detectar algún desperfecto, procede una evaluación de éste, ya sea en el momento de la detección o posterior, esto para conocer la magnitud, repuestos y mano de obra requerida. Esto desemboca en el giro de las Órdenes de Trabajo (OT) por parte de los ingenieros de la Gerencia de Operaciones.

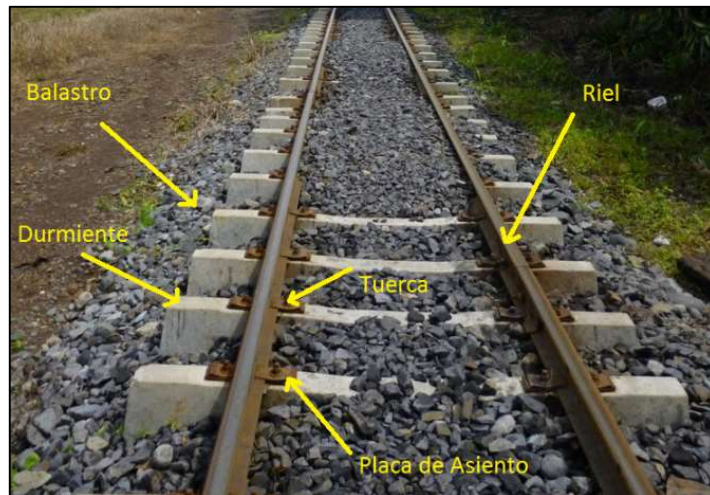


Figura 25. Elementos en una vía férrea. Fuente: disenodeviasrhb.blogspot.com

Finalmente, las OT se ejecutan por parte de las cuadrillas, esto denotado como el punto de proceso de “Intervención”, cada acción se documenta para ser analizada como conjunto en los distintos procesos de rendiciones de cuenta, planeación departamental y auditorías internas.

En esta propuesta de migración a un sistema de acciones basadas en condición, se atacan los procesos encerrados en el cuadro de líneas discontinuas de la **Figura 24**. Este trío de procesos puede tomar varios días para llevarse a cabo, además que la acción de “Rutas de Inspección” queda a criterio de los trabajadores, aunque son expertos en el tema, se ampara a la subjetividad de una persona.

También, se debe tener dentro del panorama la difícil situación económica de la institución, por esta no se pueden realizar todas la obras necesarias en vía; la estructura actual es una mezcla de activos que van desde la década de 1890-1900 hasta equipos más recientes, claramente parte de la infraestructura ya finalizo su ciclo de vida útil (40 años según la literatura), por lo que se sigue una dinámica de “gato contra el ratón” donde después de una intervención aparece un fallo en otra parte cercana a esta.

Finalmente, los espacios temporales de trabajo son pocos, estos se hacen en el periodo donde no hay circulación de trenes (entre 10:00 am a 2:00 pm y de 9:00 pm a 4:00 am) y de lunes a sábado, los lapsos son demasiado cortos como para crear una logística de intervenciones extensas, además con la dificultad de que casi toda la red férrea nacional consta de única vía, por lo que se complica la logística de transporte de equipo y personal al campo.

Toda la situación expuesta exhibe el reto de implementar un sistema de mantenimiento donde sea posible discriminar entre las intervenciones urgentes contra las que pueden esperar a ser atendidas, y al evolucionar como se prevé, no llegar al punto de urgencia, sino que atenderlas en un punto de desarrollo que no represente un riesgo a los usuarios y que no demanden una gran logística donde se tengan que retrasar o cancelar rutas debido al mantenimiento.

La manera de cambiar el método actual de “hacer las cosas” es precisamente hacer una migración del *know-how*, puesto que si se sigue haciendo lo mismo se obtendrán los mismos resultados. Como menciona el objetivo al que responde este capítulo se busca crear una estrategia que apoye al personal de mantenimiento de INCOFER en mitigar la situación heredada por las gestiones anteriores, el cierre técnico de la institución y la antigüedad de buena parte de los activos.

Para esto se propone una serie de pasos precedidos por el informe de la situación del mantenimiento de rieles. Se establecerá un planteo de un Cuadro de Mando Integral, seguido de una estrategia de implementación de la solución del problema y finalmente un esquema inicial para el flujo y tratamiento de datos.

5.1. Cuadro de Mando Integral (*Balanced Score Card*)

Arthur Thompson, quien menciona a Kaplan & Norton (2002), enumera el proceso de elaboración de un Cuadro de Mando Integral, que se puede dividir en seis etapas que agrupan en tres grandes áreas tal y como se muestra a continuación:

Análisis estratégicos: aquí se determina el conjunto de amenazas y oportunidades presentes en el contexto de la organización, así como el conjunto de fortalezas y debilidades. Esto permite el diagnóstico y evaluación de la situación.

Formulación de estrategias: consiste en el diseño tanto a nivel corporativo como de negocio o funcional de las alternativas que se tienen para alcanzar la misión y los objetivos previsto a partir de los resultado del paso anterior.

Implantación estratégica: se pone en marcha la alternativa estratégica seleccionada, en función de factores como la capacidad del equipo directivo para estimular la actividad de recursos humanos para alcanzar eficazmente las metas planteadas, así como de la estructura organizativa y la cultura empresarial que sirvan de soporte a la implantación.

El proceso culmina con la planificación y control estratégico, de tal forma que se comprueben los resultados obtenidos con la misión y los objetivos planteados.

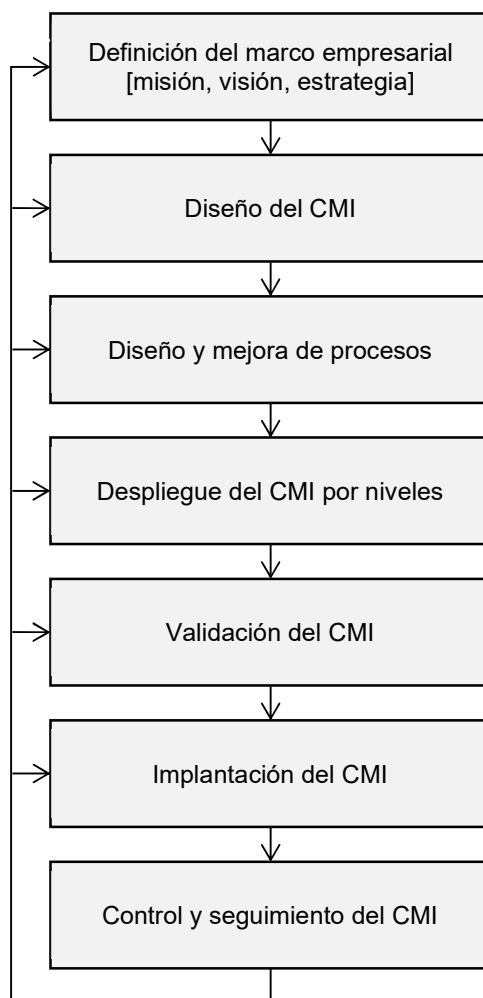


Figura 26. Proceso de elaboración de un Cuadro de Mando Integral. Fuente: adaptado de Matilla & Chalmeta (2007)

A continuación, se describen brevemente las fases para la elaboración de un Cuadro de Mando Integral.

Misión y visión: definen la identidad de la empresa e indica su razón de ser. La visión identifica el objetivo a largo plazo de la organización y define la ruta a de crecimiento y transformación a seguir para conseguirlo.

Análisis FODA: mediante la herramienta de análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), se evalúa el contexto en el que se desenvuelve la organización y cuál es la situación interna actual de la misma.

Mapa estratégico: un mapa estratégico es una representación gráfica empleada para orientar a la dirección de la empresa e identificar hacia dónde dirigirse. Este presenta de forma sencilla los objetivos estratégicos agrupándolos en diferentes perspectivas y representando las relaciones causa-efecto, existentes entre ellos.

Los mapas estratégicos se diseñan bajo una arquitectura específica de causa y efecto; cuyo objetivo primordial es mostrar cómo interactúan las cuatro perspectivas

Indicadores: son instrumentos indispensables en los procesos de planificación y control del cumplimiento de los objetivos y la implementación la estrategia. La importancia de estos es que se cuantifican situaciones importantes y permiten estudiar su evolución en el tiempo.

Existen dos clases de indicadores: indicadores en adelanto (*lead*) y los indicadores en atraso (*lag*), los primeros miden el desempeño en los procesos que permiten alcanzar objetivos (por ejemplo, ventas, satisfacción de empleados) y los otros miden los efectos logrados y el grado de cumplimiento de las metas (horas invertidas en la atención del cliente, propuestas elaboradas).

De acuerdo con Vega (2014) es importante que el CMI contenga ambos tipos de indicadores ya que, si solamente se toman indicadores en atraso, se encargan de informar la situación de la organización, mas no contribuyen a lograr los resultados esperados.

5.1.1. Objetivos institucionales

Se toma como referencia principal para este paso el Plan Operativo Institucional 2019 (Oficina de Planificación Institucional INCOFER, 2018). Como se denotó en la teoría, un componente fundamental para la formulación de un CMI es la definición del “norte del departamento”.

En el documento mencionado se explican los objetivos trazados para el Perfil del Proyecto de Mantenimiento de la Red Ferroviaria Nacional. Adicionalmente, es imperativo tener claro la misión y visión de la institución, puesto que el departamento no cuenta con las propias.

“Mejorar de forma sustancial y sostenida el resultado económico de la institución, mediante el incremento de sus ingresos, la eficiencia en el gasto y el aumento de la capacidad de inversión en la Red Ferroviaria Nacional.” **Objetivo Estratégico Institucional No. 1 (pp 7)**

“Ofrecer servicios de transporte ferroviario de carga y pasajeros seguros, confiables, cómodos, accesibles, respetuosos con el ambiente, competitivos y articulados con otros modos de transporte.” **Objetivo Estratégico Institucional No. 2 (pp 7)**

“Modernizar la institución, a través de la revisión y mejoramiento de sus procesos operativos y administrativos a fin de convertir a INCOFER en un referente entre los operadores de transporte en el país.” **Objetivo Estratégico Institucional No. 3 (pp 8)**

“Desarrollar un entorno laboral de calidad para todos sus colaboradores, en el que se ofrezcan oportunidades reales de desarrollo profesional y personal, con una fuerte apuesta por la formación, el respeto a la igualdad de oportunidades y la seguridad en el trabajo.” **Objetivo Estratégico Institucional No. 4 (pp 8)**

“Mejorar las condiciones de transitabilidad de la vía férrea mediante la reconstrucción y mantenimiento de la vía férrea, de forma tal que la circulación de los trenes sea ininterrumpida y cumplir puntual y oportunamente con los horarios e itinerarios programados a los usuarios de los distintos servicios, dentro del Gran Área Metropolitana y Pacífico, y de carga en el sector Atlántico.” **Objetivo General Proyecto de Mantenimiento (pp 54)**


“Somos la institución del Estado Costarricense responsable de brindar servicios de transportes ferroviarios modernos, sostenibles y eficientes; integrados en un marco de gestión empresarial que permita la participación del sector privado y que facilite la generación de actividades productivas complementarias.” **Misión institucional (pp 7)**

“Ser una institución ferroviaria comprometida con el mejoramiento de la calidad de vida de los costarricenses de forma sostenible, garantizando la prestación de los servicios articulados de transporte.” **Visión institucional (pp 7)**

5.1.2. Cuadro FODA

La técnica FODA se orienta principalmente al análisis y resolución de problemas, es útil para identificar y analizar las Fortalezas y Debilidades de la organización, así como las Oportunidades (aprovechadas y no aprovechadas) y Amenazas reveladas por la información obtenida del contexto externo.

Las Fortalezas y Debilidades se refieren a la organización y sus productos, mientras que las Oportunidades y Amenazas son factores externos sobre los que la organización no tiene control alguno. Por tanto, deben analizarse las condiciones del FODA institucional en el siguiente orden:

- 
- Fortalezas.
 - Oportunidades.
 - Amenazas.
 - Debilidades.

Al detectar primero las Amenazas que las debilidades, la organización tendrá que poner atención a las primeras y desarrollar las estrategias convenientes para contrarrestarlas y con ello ir disminuyendo el impacto de las debilidades. Al tener conciencia de las amenazas, la organización aprovechará de una manera más integral tanto sus fortalezas como sus oportunidades. (López García & Flores Cano, 2013)

Las Fortalezas y Debilidades incluyen entre otros los puntos fuertes y débiles de la organización y de sus servicios, dado que éstos determinarán qué tanto éxito se tendrá al implementar el plan. Algunas de las oportunidades y amenazas se desarrollarán con base en las fortalezas y debilidades de la organización y sus servicios, pero la mayoría se derivarán del ambiente del mercado y de la competencia de servicios semejantes (transporte público).

El FODA como técnica de planeación permite contar con información valiosa proveniente de personas involucradas con la administración del negocio y que con su *know-how* pueden aportar propuestas para el futuro organizacional

Para detallar el cuadro de Fortalezas Oportunidades Debilidades Amenazas se tomaron en cuenta los documentos de INCOFER y consultas a los ingenieros a cargo del Departamento de Vías y Estructuras, además de trabajos de terceros hechos para la institución, por ejemplo, el trabajo hecho por López Abarca (2017)

Tabla 7. Análisis FODA. Fuente: elaboración propia.

Fortalezas	Oportunidades
<ol style="list-style-type: none"> 1. Personal con experiencia 2. Esfuerzos institucionales por la mejora de los índices de mantenimiento 3. Disposición institucional de digitalización de procesos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apoyo de organismos internacionales 2. Capacitación del personal dedicado al mantenimiento 3. Administración eficiente en las intervenciones de mantenimiento
Debilidades	Amenazas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Gestión regular de actividades de mantenimiento 2. Falta de equipo y estudios para <i>CBM</i> 3. Resistencia y pocos recursos para hacer un cambio en la situación 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falta de presupuesto 2. Secciones de rieles en pésimo estado 3. Mínimo tiempo disponible para intervenciones en vías férreas

De este análisis se puede hacer el siguiente resumen:

- En el campo de las Fortalezas se puede concluir que recaen totalmente en la disposición del personal, puesto que se destaca tanto la experiencia de las cuadrillas de mantenimiento, que con pocos insumos han sacado adelante los activos, combinado con la nueva visión del personal gerencial, marcado por el cambio generacional que hubo en el 2018, donde gran parte de la planilla de ingenieros cambió. El cuerpo de trabajadores encarados de las decisiones tiene la anuencia y se han esforzado por un cambio en los procesos internos como en la imagen de la institución.
- Las Debilidades en el departamento radican en la gestión de las intervenciones de mantenimiento, como se mencionó hubo un reciente cambio de los superiores del departamento; se trata de una situación heredada, en este campo también existe una resistencia al cambio, puesto que implicaría un lapso de “acomodo” donde las intervenciones urgentes, que surgen a menudo, pueden verse afectadas por el proceso de cambio no planificado de manera adecuada.
- Se detectaron Oportunidades como el apoyo logístico y de capacitaciones de organismos exteriores, por ejemplo la administración del Metro de Bogotá o el apoyo de *CSR Sifang*, dentro de estas relaciones surgen posibilidades de capacitaciones del cuerpo de trabajadores ya sea en el país o fuera de él.

Además, como una de las oportunidades, quizá la más importante para este proyecto, es la de crear una planificación eficiente del mantenimiento basado en nuevas tecnologías, no solo como parte de la mejora del departamento, sino como una demostración de cómo digitalizar procesos, será caer en el lema de *“Llevar el tren del siglo XX al tren del siglo XXI”*.

- En el área de las Amenazas se tiene la falta de presupuesto, situación compartida con otras entidades autónomas-gubernamentales. Igualmente, dentro de esta dinámica de poco recurso económico que es destinado a las labores de mantenimiento no es suficiente para realizar todas las intervenciones necesarias para mejorar el estado de las vías de manera significativa. Se incrementa por el pésimo estado de varios tramos de vías y el reparto de varias funciones aparte de revisar rieles. Finalmente, como se mencionó, el tiempo disponible para mantenimiento es mínimo, por lo que la gestión actual, descrita en la **Figura 24**, no es suficiente.

Como se explicó, el análisis hecho por medio del Cuadro FODA se tomará como parte de la base donde se sentarán los objetivos de la estrategia del Cuadro de Mando Integral, el contexto departamental se puso en el cuadro. La otra parte de la base es la definición de los objetivos estratégico de INCOFER a los que, al final de cada periodo de evaluación, se debe responder.

5.1.3. Definición de objetivos estratégicos

Para esta parte del planteo del Cuadro de Mando Integral se definen los objetivos para las distintas perspectivas que incluyen el cuadro, pero esto se toma como base los dos puntos anteriores (**Objetivos institucionales,**

Cuadro FODA) más el informe de la auditoría realizada al personal encargado del mantenimiento de rieles.

- *Perspectiva financiera*

En esta perspectiva, los esfuerzos institucionales, siguiendo la línea país, se orientan hacia el ahorro de recursos, debido a la difícil condición económica de INCOFER ahondado por la situación actual del país. Además, esta propuesta se ampara bajo el primer Objetivo Estratégico Institucional, ya que se trata de la componente de eficiencia de las inversiones (gastos).

“Optimizar el uso de recursos financieros asociados a las labores del mantenimiento de rieles, mediante la planificación de las intervenciones en función de la condición de los rieles”

La planificación adecuada de las intervenciones ayuda a tener un registro adecuado de los activos, horas hombre y consumibles, que se traducen en un adecuado control de flujos de efectivo.

- *Perspectiva de clientes*

De esta parte, se debe tener claro que la prioridad de las actividades de mantenimiento de rieles debe ser salvaguardar la integridad de los usuarios de los trenes, esto claramente definido en el Proyecto de Mantenimiento de la Red Ferroviaria Nacional (Oficina de Planificación Institucional INCOFER, 2018)

La seguridad se alcanza mejorando los índices de confiabilidad de todos los elementos rodantes y los fijos, esta propuesta cala en la necesidad de cualquier modelo de mantenimiento de mantener a los clientes a salvo contra incidentes como descarrilamientos.

“Garantizar la seguridad de los usuarios del tren mediante un adecuado mantenimiento de los rieles”

- *Perspectiva de procesos internos*

De acuerdo con el informe de auditoría realizado, la administración del mantenimiento de rieles tiene un amplio margen de mejora; además, entre las metas de este proyecto se encuentra dar una guía a una nueva estrategia en la administración de intervenciones de rieles.

“Elaborar una nueva estrategia apoyada en un sistema de monitoreo de estado de rieles para la planificación eficaz de las intervenciones de mantenimiento en los rieles”

- *Perspectiva del aprendizaje y crecimiento*

Finalmente, la propuesta de un nuevo paradigma, independiente del tamaño del cambio, implica un componente de reaprendizaje y capacitación del personal encargado. Esto en virtud del mejoramiento de la calidad de los servicios ofrecidos (misión institucional).

Asimismo, en el contexto de mejora continua que INCOFER expone en sus objetivos institucionales, las labores de mantenimiento y los demás procesos, exigen la ininterrumpida investigación y desarrollo de tecnologías, para esto se propone abrir las puertas a la colaboración de estudiantes en fases finales de carreras afines a la labor ferroviaria, para así emular una división entera de I+D, común en operadoras de países vanguardia en ferrocarriles.

“Capacitar al personal encargado del mantenimiento para una conveniente transición y aplicación de un nuevo modelo de mantenimiento basado en la tecnología de monitoreo de estado de rieles”

“Promover la participación de la academia para la investigación y el desarrollo de tecnologías para la mejora continua en las labores de mantenimiento y otras áreas relacionadas”

5.1.4. Mapa estratégico¹

Mediante este mapa se describe la estrategia de la empresa basado en los objetivos dados en las 4 perspectivas. Para esto, las perspectivas se vinculan por una relación causa-efecto, donde se denota las implicaciones del cumplimiento o no de una actividad y como afecta las demás actividades de cada una de las perspectivas definidas.

La metodología para la elaboración del Mapa Estratégico fue definir las acciones y los efectos que estos causan en la siguiente secuencia de perspectivas:

¹ Consultar **ANEXO 2. Estrategia de implementación**



Figura 27. Diagrama de efecto- causa de CMI. Fuente: elaboración propia.

5.1.5. Indicadores de desempeño

Los indicadores surgen del principio de: *lo que no se mide no se administra*. Bajo esta premisa estos definen cómo se medirá y seguirá el éxito de cada objetivo además de explicar relaciones entre los ellos.

Para la determinación de los éstos se consulta el Plan Operativo Institucional de 2019 y partes del Contrato de Servicios Ferroviarios de Mantenimiento de Vías Férreas Sector Pacífico (2018). De manera similar a la sección 5.1.3. se irán enumerando los Indicadores de acuerdo con el orden de las perspectivas.

La estructura que se siguió para armar el *Balance Score Card* es el siguiente. (Propuesto por la ingeniera Karla Vindas)

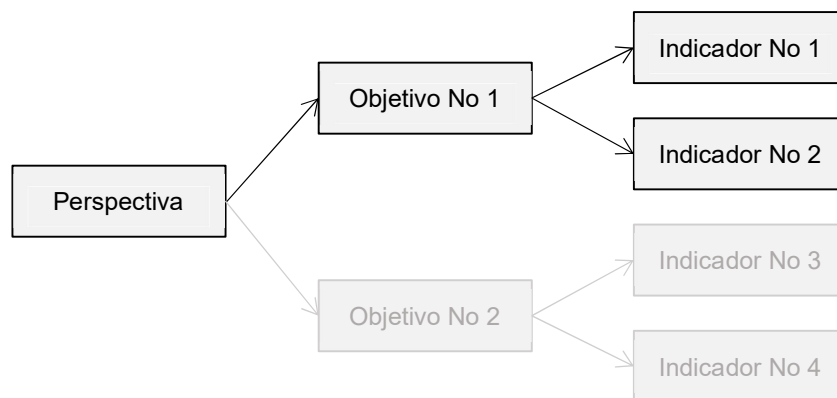


Figura 28. Estructura para BSC. Fuente: elaboración propia.

- *Perspectiva financiera*

La propuesta de CBM pretende servir como plataforma que impulse la eficiencia en la inversión de recursos, empezando con la intervención de los rieles. INCOFER determino que parte de los esfuerzos institucionales deben orientarse a este objetivo.

Entonces, para medir el progreso en el uso eficiente de los recursos debido a la planificación del mantenimiento, se plantea el seguimiento de los siguientes indicadores:

Costo del mantenimiento no planificado: con este indicador se busca cuantificar el peso que representa las intervenciones no planeadas en el total de la inversión del rubro de mantenimiento de rieles. Se espera que conforme madure el plan de intervenciones basadas en condición este porcentaje tienda a la baja. El escenario que se busca es uno donde este porcentaje sea 0%.

Se plantea seguimiento bimestral, con el fin mesurar el éxito de la propuesta y mediante auditorías, conocer y resolver las deficiencias en el plan y/o en la ejecución. La fórmula para determinar este rubro es la siguiente:

$$CMNP = \frac{\text{Costo de mantenimiento no planificado}}{\text{Costo total de mantenimiento}} \times 100\%$$

Crecimiento de costo de mantenimiento por línea: se propone un seguimiento porcentual anual del costo por mantenimiento planificado en cada línea (denotadas en la **Figura 29**) de la red ferroviaria nacional (este trabajo se delimita a las vías en el Gran Área Metropolitana).

Este indicador se basa en la premisa de que, al planificar el mantenimiento, la curva de costos debe seguir una tendencia descendente de costos con pocas variaciones, esto porque las intervenciones serán planificadas y la experiencia teórica de otros países dice que los costos se normalizan a un valor fijo. (Yokoyama, 2015)

Se vislumbra que este indicador empiece a normalizarse casi al final del periodo sugerido en la **Estrategia de implementación**, como se trata del cambio de metodología se sabe que los resultados serán notorios en un mediano plazo, que se puede extender por el estado de las vías actuales.

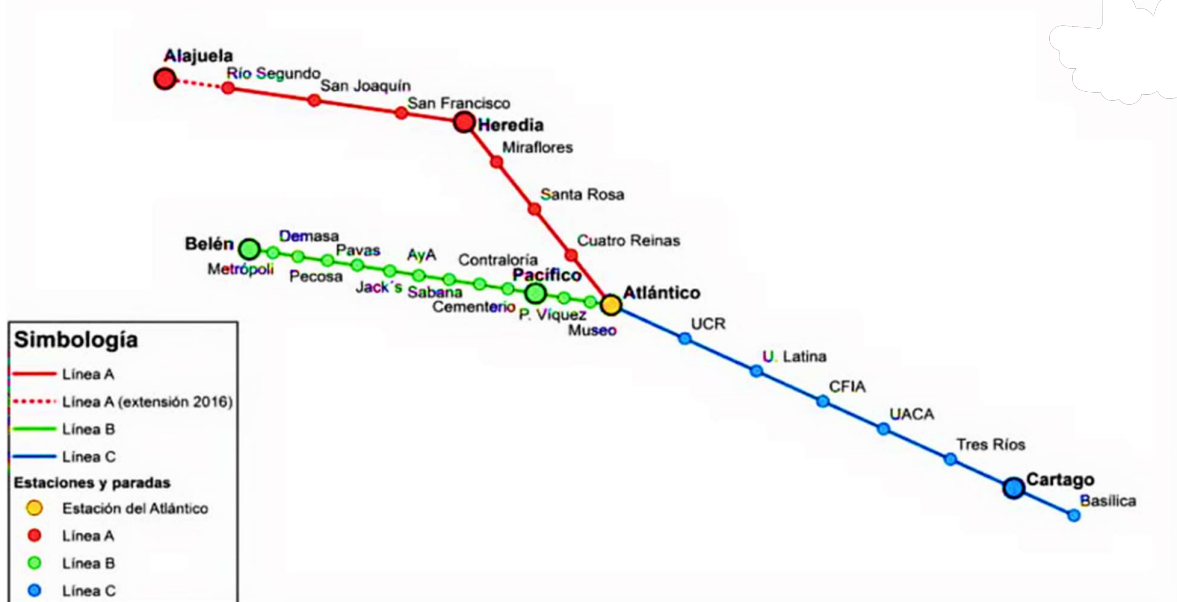


Figura 29. Tramos de red ferroviaria nacional (GAM). Fuente: Oficina de Planificación Institucional INCOFER (2018)

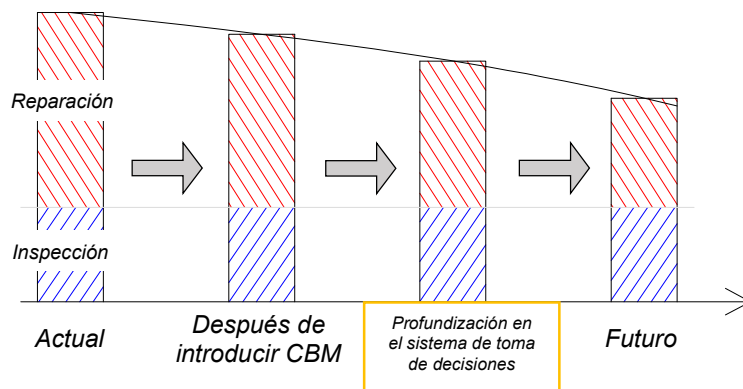


Figura 30. Efecto de CBM en costos de mantenimiento. Fuente: adaptado de Yokoyama, 2015

El seguimiento de este indicador será semestral, para acompañar el seguimiento de la estrategia y formular las bases de las etapas de implementación.

$$CCML = \frac{\text{Costo}_{\text{mnto anterior}} - \text{Costo}_{\text{mnto presente}}}{\text{Costo}_{\text{mnto anterior}}} \times 100\%$$

Costo por viajes cancelados: se trata de medir el impacto que generarían los viajes cancelados o con retrasos debido a defectos de los rieles. Parte fundamental de la operación de transporte público es el ingreso por concepto de tickets, entonces, con este indicador se busca seguir la incidencia de los viajes retrasados/cancelados en la totalidad de los ingresos por concepto de viajes.

INCOFER ofrece distintos tipos de servicios ferroviarios, pero para efectos de este CMI solo se tomarán en cuenta las pérdidas asociadas al transporte de personas. El seguimiento será mensual, con la meta de que las pérdidas sean cero por ciento.

$$CPVC = \frac{\text{Total de pérdidas por viajes cancelados}}{\text{Total de ingresos por viajes}} \times 100\%$$

Para el seguimiento de este rubro, será de especial utilidad el plan piloto de Pago de Digital de Transporte Público, propuesto para el primer semestre de 2021, puesto que con la vinculación de bases de datos será menos compleja. Se propone que las pérdidas por viajes cancelados o retrasados vinculados al estado de rieles se calculen con la modalidad del ingreso por vagón de pasajeros durante el mes.

Tabla 8. Indicadores de Perspectiva Financiera. Fuente: elaboración propia.

Objetivo	Indicador
Optimizar el uso de recursos financieros asociados a las labores del mantenimiento de rieles, mediante la planificación de las intervenciones en función de la condición de los rieles	Costo de mantenimiento no planificado
	Crecimiento de costo de mantenimiento por tramos
	Costo por viajes cancelados

- *Perspectiva de clientes*

Como eje principal en la operación de trenes se tiene la seguridad de los clientes, y es que este no se limita a solo evitar incidentes, sino que se extiende a la conformidad de las personas al usar el tren y la puntualidad del servicio. Concluyendo, los esfuerzos institucionales (y departamentales) deben orientarse a ofrecer viajes seguros y cómodos. El cumplimiento del objetivo propuesto se plantea el seguimiento de los siguientes indicadores.

Incidentes producto de fallas en rieles: se cuenta como incidente cualquier tipo de descarrilamiento, vibración extrema de los vagones o falta de tracción, en general cualquier anomalía durante el paso del tren. Es clave que este indicador sea cero durante el periodo de revisión, que será semanal

Encuestas a usuarios: como se mencionó, dentro de los frentes que afrontar en el sector de los clientes está el nivel de conformidad de los usuarios, por esto se propone la implementación de un cuestionario aplicado a una muestra de los clientes de las distintas rutas, para conocer la percepción real de la calidad de los servicios de transporte.

En la encuesta, que será bimestral, se deslumbra censar distintas variables aparte de las consecuencias del estado de rieles, esto para incentivar la recolección e interconexión de datos entre departamentos. Para la sección de mantenimiento de rieles, se propone que la encuesta arroje como resultado final una calificación entre 0% a 100%.

Tabla 9. Indicadores de Perspectiva de clientes. Fuente: elaboración propia.

Objetivo	Indicador
Garantizar la seguridad de los usuarios del tren mediante un adecuado mantenimiento de los rieles	Incidentes producto de fallas en rieles Encuestas a usuarios

- *Perspectiva de procesos internos*

La implementación de un modelo de intervenciones basado en condición busca que en esta perspectiva haya un mejoramiento de los procesos del mantenimiento de los rieles. Para esto se propone que todos los indicadores se revisen en periodos bimestrales, puesto que para medir el éxito o no de un cambio de procedimientos se debe esperar un tiempo prudente debido a la inercia al cambio.

El acompañamiento de estos indicadores se va de la mano con los objetivos de cada etapa de implementación, con el fin de ajustar ambas (CMI, Etapas) de acuerdo con los retos que se presenten en el camino.

Razón de intervenciones planificadas: parte fundamental del seguimiento de una nueva estrategia es la medición continua del éxito de las acciones previstas; con esto como base, se plantea seguir cada trimestre el porcentaje de las acciones en vías planificadas dentro del total de la cantidad de intervenciones. Para esto se seguirá la siguiente formula.

$$RIMP = \frac{\text{Cantidad de intervenciones planificadas}}{\text{Cantidad total de intervenciones}} \times 100\%$$

Horas invertidas en planificación: este indicador busca medir el seguimiento de mejora de los procesos de mantenimiento, cuando se dice planificación no implica solo la calendarización de labores, sino que también el manejo de auditorías internas, proceso de revisión de informes, en fin, distintas tareas que sirvan para evaluar y desarrollar el presente proyecto.

De igual manera que el indicador anterior, se seguirá de forma trimestral mediante el conteo de las horas empleadas para la planificación de acuerdo con los conceptos de CBM.

HIP = cantidad de horas en planificación

Cumplimiento de estrategia de mantenimiento: dentro de cada una de las cuatro etapas de la implementación de del sistema de mantenimiento basado en condición, donde se toma como cumplimiento de estrategia las notas que se tengan en las evaluaciones periódicas de las acciones referentes al nuevo sistema (análisis de vibraciones, planeamiento, éxito en detección de fallas).

Se plantea que los informes estén diseñados para que una de las “salidas” sean una nota en escala 0-100 de acuerdo con criterios previamente establecidos y comparados con experiencias de campo de otros países. El seguimiento será anual, de acuerdo con la **Estrategia de implementación**

CEM = evaluaciones por auditorías

Tabla 10. Indicadores de Perspectiva de Procesos Internos. Fuente: elaboración propia.

Objetivo	Indicador
Apoyar la estrategia de implementación de un sistema de monitoreo de estado de rieles para la planificación eficaz de las intervenciones de mantenimiento en los rieles	Razón de intervenciones planificadas
	Horas invertidas en planificación
	Cumplimiento de estrategia del mantenimiento

- *Perspectiva de aprendizaje y crecimiento*

El fin de esta perspectiva es crear nuevo conocimiento disponible para la mejora continua del departamento, para esto se formulan dos objetivos, uno donde se busca que el personal existente crezca en sus capacidades orientadas a un modelo de mantenimiento nuevo, propio de los países referentes en materia ferroviaria y un segundo frente, donde se impulse de manera significativa la participación de la academia.

En los operadores de ferroviarios de países vanguardia en temas ferroviarios, existe un común denominador, la investigación y desarrollo continuo. Por ejemplo, en Japón se cuenta con la Oficina de Investigación de los Ferrocarriles Nacionales, en Países Bajos existe un acuerdo entre las universidades y la operadora de ferrocarril de Delft.

Entonces, parte integral del proceso de llevar hacia la modernidad al ferrocarril del país es el I+D, además se alinearía al objetivo país de la generación de conocimiento tecnológico.

Horas de capacitación del personal: con este indicador se busca medir el tiempo invertido en la capacitación del personal encargado de la operación del sistema de modelo de mantenimiento, existe demasiada “tela que cortar” en un modelo CBM, (*Big-Data*, minería de datos, vinculación de BB-DD, gestión de la planificación, matrices de riesgo y muchos más).

El seguimiento propuesto será semestral, donde se tomará como parámetro la moda estadística de las horas que el personal estuvo en capacitación. Se escoge la moda estadística puesto que esta proporciona la cantidad de horas que la mayor parte del personal recibió, el promedio se puede ver sesgado por pocas personas con pocas o muchas horas.

$$\text{HDCP} = \text{moda de horas de capacitación}$$

Calificación del personal en capacitación: no solo se busca una cantidad de horas de calificación, además como medida complementaria se debe medir los conocimientos adquiridos por el personal, para esto se presenta la idea de calificar después cada capacitación.

Se generarán pruebas para evaluar en una escala de 0% a 100%, donde se espera que haya calificaciones mayores a 80%. La evaluación será semestral, de igual manera que el indicador anterior.

$$\text{CPC} = \text{Notas según exámenes}$$

Investigaciones aportadas a INCOFER: el aporte de la academia será seguido mediante este indicador. No solo se trata de admitir proyectos, sino de generar una plataforma de acompañamiento por parte del personal permanente para que el estudiante tenga claras las necesidades de la organización y las pueda solventar con la propuesta de investigación.

Este indicador busca medir el avance en investigación de en una plataforma de crecimiento I+D. Se plantea un número óptimo de 6 investigaciones admitidas por año.

$$\text{IAI} = \text{Número de investigaciones concluidas}$$

Implementación de propuestas: después de admitir investigaciones, se debe avanzar y desarrollar parte de ellas, aquellas que demuestren ser sostenibles y que estén al alcance de los recursos económicos de la institución. Deberán implementarse una serie de filtros para poder discriminar que proyectos pasaran a la fase de desarrollo de I+D.

El seguimiento será anual, con un número deseado de más de 3 proyectos en fase de desarrollo e implementación.

IP = Número de propuestas en fase de desarrollo

Tabla 11. Indicadores de Perspectiva de aprendizaje y crecimiento. Fuente: elaboración propia.

Objetivo	Indicador
Capacitación del personal encargado para una conveniente transición y aplicación de un nuevo modelo de mantenimiento basado en la tecnología de monitoreo de estado de rieles	Horas de capacitación al personal
	Calificación de personal en capacitación
Promover la participación de la academia para la investigación y el desarrollo de tecnologías para la mejora continua en las labores de mantenimiento y otras áreas relacionadas	Investigaciones aportadas a departamentos de INCOFER
	Implementación de propuestas de desarrollo de tecnologías

5.2. Esquema de tratamiento de datos

En el siguiente capítulo (**Plan piloto**) se detalla la operación de un prototipo de equipo de medición de estado de rieles, para esto se tomará como base el trabajo de la experiencia resumida por Hodge, O'Keefe, Weeks, & Moulds (2015), en este se describen los componentes fundamentales en una red de monitoreo de condición en la industria ferroviaria.

Tanto Hodge et al. como Granström (2008) resumen que el diseño de redes de monitoreo debe poder manejar la dureza del monitoreo de condiciones a largo plazo en exteriores; a menudo en entornos hostiles y debe minimizar el uso de energía ya que los sensores no están conectados a una fuente de alimentación con cable.

Por lo tanto, la red para permitir la captura de datos debe diseñarse para superar estos factores y evitar errores de transmisión, latencia, cortes de red, datos faltantes o datos dañados. En la siguiente figura se resumen los componentes identificados como fundamentales para el diseño de una red de monitoreo de datos.

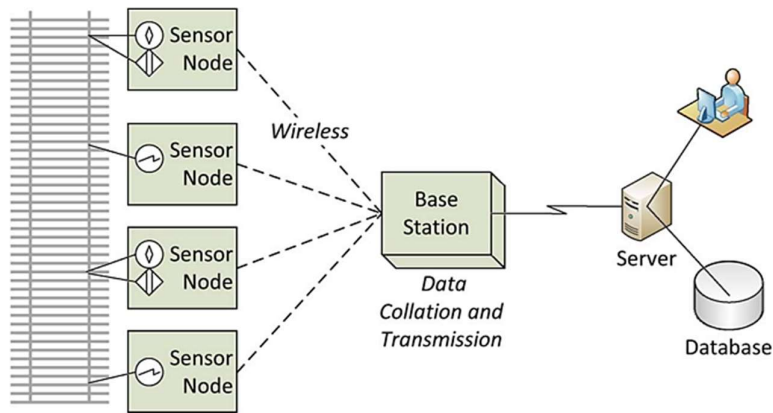


Figura 31. Elementos típicos de una red de monitoreo de estado. Fuente: Hodge et al. 2015

5.2.1. Estación base

La estación base controla los sensores y actúa como una puerta de enlace para la transmisión de datos a un servidor remoto. Los sensores utilizan comunicaciones de corto alcance como Wi-Fi o Bluetooth para transmitir datos a la estación base. La estación base utiliza comunicaciones de largo alcance, como GPRS o satélite, para transmitir datos recopilados a un servidor en un centro de control.

El *hardware* de equipos para estación base demandan una alimentación eléctrica ininterrumpida y robusta, lo normal es que este elemento se alimente con fuentes de potencia del tren o con generadores independientes. El siguiente diagrama muestra las entradas y salidas de este elemento.

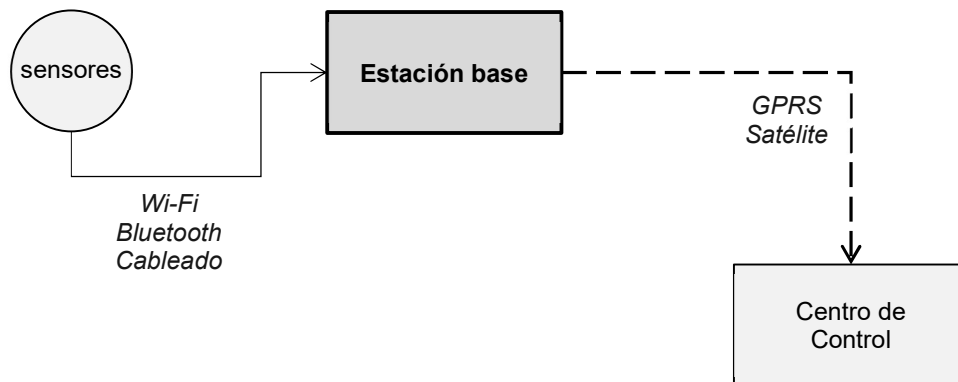


Figura 32. Diagrama de entrada-salida de Estación Base. Fuente: elaboración propia.

5.2.2. Puntos de retransmisión

Los sensores tienen limitaciones de energía, por lo que solo tienen un rango de transmisión corto. Si no pueden llegar a la estación base, se pueden usar dispositivos de retransmisión de mayor capacidad. Contar con varios puntos de retransmisión entre los sensores asegura la conectividad al transmitir la señal de datos desde el nodo sensor a la estación base a través de uno o más nodos de relé utilizando rutas inalámbricas de múltiples saltos.

Se puede aprovechar la tenencia de varios puntos de retransmisión en el tren para colocar más sensores de vibración y otro tipo de dispositivo como sensores de temperatura, cámaras y hasta de alineación laser para verificar la linealidad de los rieles

5.2.3. Modelo de red

Las redes de monitoreo de estado para aplicaciones ferroviarias siguen el modelo de interconexión de sistemas abiertos. Este tipo de sistemas cuentan con un típico modelo de cinco capas en una pila de protocolos con tres planos para transmitir datos desde los nodos sensores a la estación base. Las cinco capas de menor a mayor son la capa física que define cómo los sensores transmiten sus datos a la red. (Al-Karaki & Kamal, 2004)

La capa de enlace de datos especifica la topología de la red y conecta los nodos de sensores entre sí. Utiliza MAC para controlar el acceso a los datos y los permisos y un control de enlace lógico para controlar la verificación de errores y la sincronización de paquetes de datos. Esta es una capa clave en las redes de monitoreo ferroviario, ya que pueden monitorear entornos difíciles como túneles o monitorear trenes en movimiento.

La topología debe diseñarse con cuidado. La capa de red enruta los datos a través de la red como paquetes. Las redes de monitoreo ferroviarios tienen limitaciones de energía; por lo tanto, el enrutamiento debe diseñarse esmeradamente para que funcione dentro del suministro de energía disponible. La capa de transporte controla el envío y la recepción de datos. (Al-Karaki & Kamal, 2004)

Finalmente, la capa de aplicación permite que el software de aplicación acceda a los datos. El tamaño de la transmisión varía desde bits en la capa (física) más baja, bytes y tramas en la capa de enlace de datos, paquetes en la capa de red, segmentos en la capa de transporte y datos en la capa más alta (aplicación). El plano de gestión de energía gestiona el consumo de energía de los nodos de sensores. (Hodge, O'Keefe, Weeks, & Moulds, 2015)

El plano de gestión de la movilidad identifica y registra el movimiento de los nodos sensores para garantizar que los datos puedan enrutarse desde el nodo al centro de control y para que los nodos sensores conozcan a sus vecinos para la comunicación.

Esto es importante para los sistemas que monitorean trenes en movimiento. El plano de gestión de tareas equilibra y coordina las regiones de la red (grupos de nodos) y garantiza que generen datos de acuerdo con su nivel de potencia.

5.2.4. Topología de la red de sensores

La topología está limitada por los requisitos del monitoreo y por el entorno físico. Los nodos sensores pueden disponerse en una configuración *ad hoc* o planificada previamente. En una disposición *ad hoc*, los nodos de sensores se colocan aleatoriamente en el área monitoreada. En una disposición planificada de antemano, los nodos del sensor se organizan en una cuadrícula, la ubicación óptima (que se describe a continuación), la ubicación 2D o 3D.

Determinar la ubicación óptima del nodo es una tarea compleja y, a menudo, requiere una compensación. La configuración de la red se puede optimizar frente a una serie de restricciones diferentes.

Una red puede minimizar los nodos de retransmisión, puede necesitar garantizar un nivel mínimo de servicio (incluir un cierto nivel de redundancia), minimizar el uso de energía para preservar la vida útil de la batería o puede necesitar garantizar la accesibilidad de los nodos

5.2.5. Medio de comunicaciones

Hay muchas técnicas de comunicación utilizadas en las redes de monitoreo de condición en los ferrocarriles. Las comunicaciones entre sensores y la transmisión del sensor a la estación base suelen ser de corto alcance. La estación base transmite los datos recopilados al centro de control, y esto requiere una comunicación de largo alcance.

Hodge (2015) resume que se suelen utilizar tecnologías basadas en telefonía móvil estándar (Bluetooth, GSM, GPRS y UMTS) o técnicas de banda ancha como Wi-Fi (IEEE 802.11, 2007), redes de área personal inalámbricas (WPAN) (IEEE 802.15.4 y ZigBee) o WiMax (IEEE 802.16.2, 2004). ZigBee mejora IEEE 802.15.4 al incluir autenticación, encriptación de datos para seguridad y enrutamiento y reenvío de datos.

La telefonía móvil y WiFi es solo puerto-puerto, mientras que WPAN y WiMax pueden conectar muchos dispositivos en una topología de malla, donde cualquier nodo puede comunicarse con cualquier otro nodo. Además, Wi-Fi, WPAN y WiMax permiten la comunicación a velocidades y anchos de banda mucho más altos que la telefonía móvil y son más baratos de configurar.

Sin embargo, la telefonía móvil tiene mejor cobertura y alcance que las redes Wi-Fi y WPAN. WiMax puede operar a largas distancias. Sin embargo, hay una compensación: altas velocidades de bits o largas distancias, pero no ambas. Un importante avance de comunicación reciente ha sido GSM-R (Sistema global para comunicaciones móviles por ferrocarril), que es una adaptación de la telefonía GSM para aplicaciones ferroviarias.

5.2.6. Propuesta

Los apartados anteriores fueron para definir las partes que el documento de referencia menciona, se escogió ese trabajo puesto que se estudian diversos proyectos tanto prácticos como teóricos de monitoreo de estado en variables dentro del contexto ferroviario. Ahí se denotan los retos que los sistemas deben superar, como condiciones ambientales, dificultades de comunicación y falta de espacio físico.

Para la propuesta de tratamiento que se hará se toma referencia de los casos de Polonia y de Países Bajos, donde se usan sistemas de basados *Axle Box Acceleration*. (Li et al., 2015) (Chudzikiewicz et al., 2017).

Entonces se partirá en dos partes en la propuesta, la primera denotando la colocación y configuración del hardware en las locomotoras y la otra en el flujo de datos obtenidos hacia el departamento. Los detalles en forma de diagramas se adjuntan en el **ANEXO 2. Estrategia de implementación.**

5.2.6.a. Configuración de sensores en la locomotora

Tomando como referencia principal la experiencia de Chudzikiewicz en las líneas ferroviarias en Varsovia, se ofrece el siguiente plan de colocación de equipos, donde la selección de estos quedará a criterio de la experiencia obtenida en cada etapa de la Estrategia de implementación detallada en la siguiente sección. Conjuntamente, se justificará según los conceptos detallados.

Empezando se tendrá una estación base en la cabina del maquinista, en específico en el centro de control de motores (configuración de las locomotoras Apolo), este CPU tendrá conectado una serie de nodos de sensores empezando con acelerómetros, pero con la posibilidad de ampliar a más entradas, como sensores de temperatura, sensores con base laser o incluso cámaras fotográficas, tomando como referencia el trabajo de Lee, Kao & Yang (2014)

Los nodos de sensores se conectarán en una topología de estrella, teniendo como punto central el CPU dentro de la cabina del maquinista, además deberá contar con una entrada para recibir los datos de ubicación por GPS. La comunicación se deberá hacer por medio de Wifi local, puesto que la distancia entre ejes y la cabina es demasiado larga para comunicación por *Bluetooth*, asimismo la posibilidad de cableado es poco práctica por tema de espacio físico y funcionalidad puesto que se necesitarían estaciones repetidoras para los nodos más lejanos y la afectación por ruido puede resultar ser significativa.

Ahora, la CPU deberá conectarse mediante Wi-Fi a una base de datos enlazada en una nube. En este punto es que empieza el trabajo en el Centro de Control. En la próxima sección se explica que este Centro de Control será un Departamento de Tecnologías de Información, en el que se ejercerán las labores propuestas.

5.2.6.b. Flujograma del proceso de análisis de los datos

El punto de partida de este apartado será la base de datos en la nube donde se almacenan los datos de irregularidades de las vías, aquí se trabaja en el desarrollo de un sistema para apoyar la toma de decisiones referentes a las intervenciones de mantenimiento.

En la nube se tendrá la pila de datos que mediante un algoritmo computacional (Microsoft Azure, Python, por ejemplo) apilará y aplicará los filtros necesarios para evitar los efectos del ruido de las señales. Teniendo los datos apilados y organizados seguirá una serie de procesos para el análisis de los datos.

Para el análisis, este trabajo se apoyará en la propuesta que Yokoyama (2015) expone en *Innovative changes for maintenance of railway by using ICT, To Achieve "Smart Maintenance"*. Se explica que con los datos obtenidos a través del tiempo se proyectará una curva de deterioro de cada tramo de vía, donde se "seteará" una serie de límites donde se activarán alarmas a los encargados de mantenimiento.

Paralelo a las alarmas, el sistema deberá ser capaz de generar proyecciones de escenarios de intervenciones, esto para que los profesionales encargados de la toma de decisiones dispongan del mayor número de herramientas para la planificación. La salida de este sistema será un plan completo de intervenciones para cada tramo de vías, donde se tomen en cuenta la urgencia de éstas de acuerdo con la evolución del deterioro.

5.3. Estrategia de implementación

Siendo esta una nueva idea que implica un cambio de paradigma en el proceso productivo de las intervenciones de mantenimiento requiere que se realice de manera gradual, respondiendo a los objetivos del Cuadro de Mando Integral propuesto y con la suficiente flexibilidad de cambio durante el periodo de implementación.

Como principio general, la ejecución requiere de un proceso de programación que permita dar trazabilidad al cumplimiento de las metas y puntos de inflexión planeados. Dependiendo del alcance de las metas se retrasará el avance de las etapas, aunque el propósito de este proyecto, en todos sus alcances, es de ofrecer una alternativa posible de ejecutar, donde a pesar de poder pasar de moderada en cierto punto, cumpla con la regla de que no se quede solo en el papel.

Por esto, en esta sección se detallará un plan a manera de Estrategia de Implementación de la idea de mantenimiento de rieles basado en condición apoyado por la toma de datos de vibración en el eje del tren. El inicio de esta estrategia se define justo después de la culminación del presente proyecto y se define como año meta la entrada de operación del Tren Rápido de Pasajeros.

Se define esa fecha como meta puesto que al ser uno de los proyectos de ingeniería más grande en la historia del país, es perfecta ocasión de llevar cada elemento central y periférico del tren a un nivel cercano a la vanguardia de la tecnología ferroviaria, respondiendo a los objetivos estratégicos de INCOFER. De acuerdo con el Informe Final del Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros, se proyecta el año 2030 como el inicial en las distintas fases de marcha del TRP. (IDOM, 2018)

Una de las partes que se prevé fundamental en la implementación de una nueva tecnología es el crecimiento del personal a cargo, en este caso, de las personas encargadas de la toma de decisiones. Al mismo tiempo, la retroalimentación de la parte académica será de vital importancia, puesto que significa una entrada constante de ideas frescas, finalizando en un proceso de evolución y mejora continua.

Conforme se completen los intervalos, se deberá evaluar los resultados del nuevo sistema de mantenimiento, para esto se propone un seguimiento semestral. Concluyendo, se propone esta serie de intervalos de evaluación para el desarrollo de la propuesta de este trabajo.

La metodología propuesta es de dar puntos de mejora en cada periodo, de dos años, además asociar a cada etapa un costo de inversión, detallado en la tabla adjunta en el **ANEXO 2. Estrategia de implementación** especialmente útil para el análisis de un próximo capítulo (**Análisis técnico-financiero**).

Finalmente, los costes por hardware y software se componen en mantenimiento y operación (esta última solo para el hardware), para definirlos se toma la herramienta teórica presentada por (Tavares, 1999), donde se explica que los costos por mantenimiento rondan por el 15% de la inversión inicial del equipo y que los costes de operación rondan el 20% de ese valor.

Profundizando en la parte financiera, se denota que el mayor peso en los flujos de salida anuales serán la remuneración de los trabajadores, calculados con la lista de salarios mínimos de 2020 publicada por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. Ahora, al tratarse de una proyección a futuro se presenta un área sombreada alrededor de la línea de proyección del coste, donde se espera que haya una diferencia entre la inversión real vs la preconcebida.

5.3.1. Etapa 1: [2021-2022]

En este año se usará la experiencia del equipo del presente proyecto, además de ajustes significativos como el uso de transmisores de datos inalámbricos, aprovechando las facilidades descritas de Arduino. Al final de esta etapa se desea tener un equipo totalmente inalámbrico, teniendo como referencia teórica el documento científico de Hodge et al. (Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey, 2015)

Entonces se usará el mismo equipo, con mejoras como el sistema de alimentación eléctrica y la transmisión de datos vía internet, pero aun dependiendo de las herramientas de software libre. En la componente de costos no se proyecta un alza significativa en la adquisición de hardware, además que el mantenimiento será el mínimo por la naturaleza del hardware, ya que se mantendría el tipo de análisis que se detalla en el siguiente capítulo (**Plan piloto**).

A mitad del periodo, de manera paralela, se deberá empezar una investigación (apoyada por la academia) para migrar a una tecnología con más robustez que Arduino, tomando en cuenta la experiencia con el prototipo con los informes de estado de rieles; todo para sentar una línea base de requerimientos mínimos que el sistema costarricense de vías férreas exige para un sistema *Axle Box Acceleration*.

Al final del periodo, se pretende obtener los siguientes entregables: Un informe detallando el comportamiento del hardware (averías, debilidades, oportunidades de mejora) y otro informe con la funcionalidad y/o eficacia de los análisis espectrales para el Departamento de Vías y Estructuras.

5.3.2. Etapa 2: [2022-2024]

Al inicio se deberá modificar el equipo, empezar la migración a una plataforma tecnológica más robusta, por ejemplo, el uso de más transductores y PLC's especializados (Zhang et al., 2015). La escogencia del software y hardware seguirá los detalles del informe final de la etapa anterior.

Uno de los requerimientos necesarios es que el costo de adquisición, montaje y mantenimiento sean moderados, alrededor de \$1000 siguiendo la experiencia del operador estatal de Eslovenia (*Slovenske železnice*, referenciado por NeTIRail-INFRA, 2016))

El crecimiento de los costos económicos que no sea significativo, aunque de acuerdo con el cuadro de costos inicial (ver 0ANEXO 2. Estrategia de implementación), la mayor parte de la inversión será por concepto de salarios de posibles colaboradores.

De igual manera que la etapa anterior se busca generar informes periódicos sobre el funcionamiento del equipo, oportunidades de mejora en los análisis y eficacia de los espectrogramas en los análisis de estado de rieles.

La experiencia de campo de operadores ferroviarios con sistemas semejantes al planteado en este trabajo ha demostrado que la eficacia en la detección de defectos tales como *squats* y corrugaciones rondan el 80% de los más grandes y el 50% de los pequeños (referirse a **Figura 14**).

Entonces la proyección es que, de acuerdo con la línea base propuesta en el informe final de la Etapa 1, trazar una línea hacia el punto propuesto, esto detallado en el anexo ya mencionado.

En mitad de la etapa, se deberá empezar un proyecto de I+D para determinar el equipo y configuración necesarios para las siguientes 2 etapas, donde se plantea que el equipo que se instale sea prácticamente el definitivo

5.3.3. Etapa 3: [2024-2026]

En esta etapa se tendrá un prototipo casi final, con un software y hardware robusto, donde la diferencia con respecto a las otras etapas será la implementación de un esbozo de Departamento de Procesamiento de Datos (específico para las acciones de mantenimiento), anexo a la Gerencia de Operaciones.

Migrar a un modelo de intervenciones basado en condición requiere que exista toda una plataforma de minería de datos, adecuado al contexto ferroviario; en nuestro país no existe una especialidad en la educación mayor dedicada completamente a infraestructura férrea, por lo que la experiencia de *big-data* obtenidos en ferrocarriles debe empezar de cero en INCOFER.

El principal objetivo en esta etapa es sentar la experiencia de campo para adecuarse al modelo que se ajuste al *Internet of Thing*. Los informes propuestos se centrarán en la evolución de este departamento, donde se enfocará en las oportunidades de mejora como capacitaciones, adquisición de software de almacenamiento de datos y requerimientos de hardware

El prototipo será evaluado mediante distintos informes y auditorias donde se enlazará junto con las peticiones del esbozo de Departamento de Procesamiento de Datos. Las modificaciones de este prototipo no serán totalmente radicales, sino que solo se harán “parches” definidos.

5.3.4. Etapa 4: [2026-2028]

Como se mencionó, el prototipo será el mismo de la etapa anterior, este periodo se concentrará en el tratamiento de datos, fortaleciendo la dinámica del Departamento de Procesamiento de Datos, donde se perfilarán los profesionales dedicados a este componente del proceso productivo del mantenimiento de rieles y vías.

Y no solo en la operación de un dispositivo basado en la tecnología ABA, sino que empezar a introducir módulos de seguimiento de trenes en tiempo real, sincronización con páginas web accesible a los usuarios y enlace con otras bases de datos, por ejemplo, con el proyecto de cobro electrónico o bases de datos del otro ministerio como el MOPT.

Al final de este par de años, se desea contar con personal con la suficiente experiencia y pericia en el tratamiento de datos en contexto ferroviario costarricense, con el fin de que sean capaces de operar diversos sistemas aparte de ABA, por ejemplo, el detallado en el **Análisis técnico-financiero**

Finalmente, al final del periodo de estos siete años propuestos, se contará con personal costarricense entrenado en el mismo Instituto Costarricense de Ferrocarriles apoyados por la academia, además de hacer una migración no abrupta a un modelo distinto de mantenimiento, evolucionando con respecto a las necesidades de los departamentos y empresas pertinentes a las labores de mantenimiento de vías férreas.

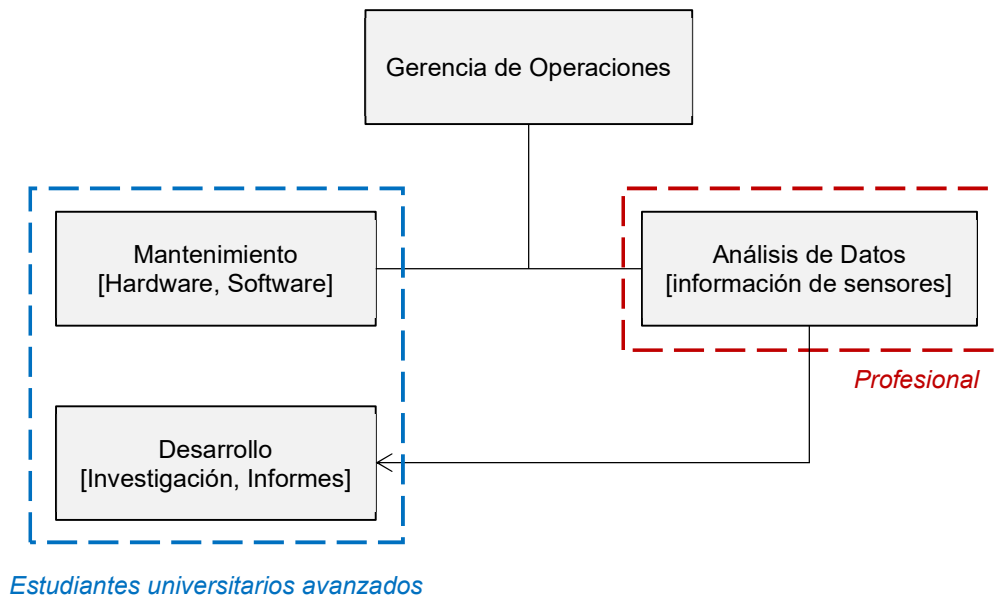


Figura 33. Organigrama de Departamento de Procesamiento de datos. Fuente: elaboración propia.

En este organigrama se notan tres puestos necesarios, esto basándose en el criterio de Camacho (2016), donde en la parte de Análisis de Datos se plantea que sea cubierto por un profesional en ingeniería con competencias en manejo de flujos de datos de información, mientras que los otros dos restantes serán cubiertos por estudiantes que estén en el último tramo de sus carreras (proyectos de graduación o pasantías) y que demuestren las competencias requeridas para desarrollar el mantenimiento del equipo y el desarrollo de actividades de análisis de funcionamiento del equipo junto con la investigación a futuro, siguiendo los lineamientos propuestos en la estrategia de complementación.

En el cuadro de costos se nota un alza en el concepto de “Empleados”, esto es tomando en cuenta posibles remuneraciones a los estudiantes que cubran los puestos descritos. Como fue mencionado, la parte de salarios representa gran parte de los costes, por lo que una posible solución, sería un plan de movilidad laboral al interno, mediante capacitaciones, con esto ya un empleado existente cubriría el puesto, bajando la curva ascendente de costos.

*Nota: en el **ANEXO 2. Estrategia de implementación** se ofrece un diagrama explicativo de las etapas de implementación.*

6. Plan piloto

Demostrar los conceptos de la propuesta de tecnología mediante un plan piloto usando un prototipo de toma de datos, desarrollando un levantamiento del estado de una sección de vía férrea de 5 km en una ruta de INCOFER dentro del GAM.

En esta sección se explicará el detalle del desarrollo e implementación de un plan piloto para llevar a campo una variante de sistema ABA planteado para validar la practicidad de la idea inicial en las vías costarricenses. Para el ensamble y programación de este prototipo se decidió usar como base el microcontrolador Arduino UNO, debido a su bajo costo y la facilidad de ser un lenguaje de código abierto.

Este microcontrolador, con la suficiente protección, tiene la robustez para llevar a cabo una tarea de medición en un ambiente tan difícil como el ferroviario, además posee la capacidad de contar con varias entradas de distintos módulos sensores. Hablando propiamente del prototipo se diseñó para tomar aproximadamente una serie de 7 parámetros distintos cada 250 milisegundos.

Los parámetros que se toman son la hora (en formato hh:mm:ss) aceleración de vibraciones de un *boogie* en los tres ejes (longitudinal, axial y transversal), la rapidez del tren en kilómetros por hora (km/h) y la ubicación por coordenadas terrestres (latitud y longitud). Para la adquisición de los datos mencionados se dispuso de la siguiente lista de módulos, detallada en el apartado de **Hardware y Software empleados**

- Arduino UNO
- Módulo MPU 6050
- *Shield GPS for Arduino*
- Módulo RTC DS 1302
- Antena con entrada SMA, 3 V – 5 V, 1575 MHz - 1610 MHz
- Tarjeta de memoria μ SD de 32 GB, formato FAT 32 ó FAT

La idea central de este equipo es recolectar datos de aceleración producto de la interacción riel-rueda, correlacionarlos con la ubicación por medio de un receptor GPS y además de la rapidez del tren, finalmente este paquete de datos es almacenado en un archivo formato **.txt** en una tarjeta de memoria integrada en el *Shield GPS*. En el siguiente diagrama unifilar se demuestra el flujo de datos (representados por las flechas) que entre dispositivos.

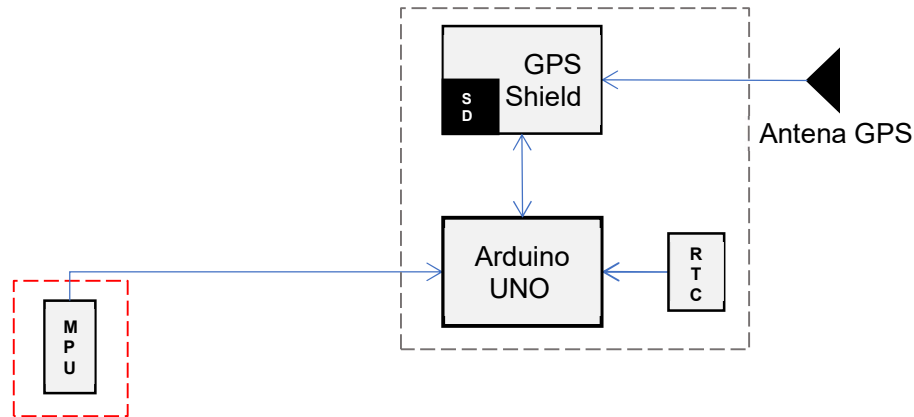


Figura 34. Diagrama unifilar del prototipo. Fuente: elaboración propia

El flujo de información de los módulos sensores converge hacia el almacenamiento en la tarjeta SD. Los cuadros en líneas discontinuas representan *enclosures* donde se alojan los circuitos electrónicos, el rojo se encuentra instalado en el *boogie* del tren, mientras que el gris se encuentra en el interior del tren (cabina), la antena GPS se encuentra “pegada” en la parte superior del tren, esto gracias a un imán incorporado.

Finalmente, los datos obtenidos son analizados mediante la herramienta *Signal Analyzer* de la versión R2017a de Matlab. La entrada en esta app es el archivo de texto, transformado en un archivo tipo *.m* (propio de Matlab). En el apartado de **Códigos empleados** se detalla de manera más profunda estos procesos de análisis.

6.1. Conexiones

A continuación, se resumen las distintas conexiones realizadas para la construcción del prototipo. Inicialmente, el elemento central es el Arduino UNO, pero el módulo de acelerómetros y el módulo RTC se conectan (físicamente) al *Shield GPS*, debido a que, como se mencionó en el marco teórico, este último dispositivo se conecta a todos los pines del Arduino, quedando “puenteadas”, por lo que eléctricamente, los sensores están conectados al microcontrolador central.

En el prototipo, el módulo RTC se encuentra dentro del *enclosure* al interior de la cabina del tren, por esto se conecta con conductores cortos tipo *jumpers dupont* (macho-hembra). Por otra parte, para la conexión entre el microcontrolador y el módulo de acelerómetros MPU 6050 se realiza mediante un bus conformado por 4 pares de conductores UTP, con un largo de 6 metros.

Los diagramas se muestran por separado, pero en la aplicación al campo se conectaron simultáneamente a un mismo microcontrolador. En la sección de anexos se ofrece una tabla resumen, en esta se encuentra el detalle de los pines de cada elemento y su conexión, esto para ofrecer más claridad.

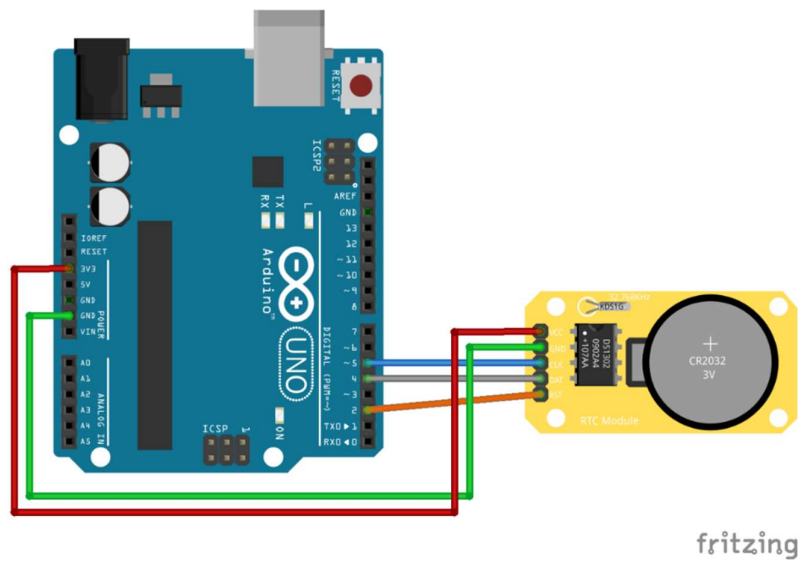


Figura 35. Diagrama de conexión entre Arduino UNO y módulo RTC. Fuente elaboración propia; Fritzing

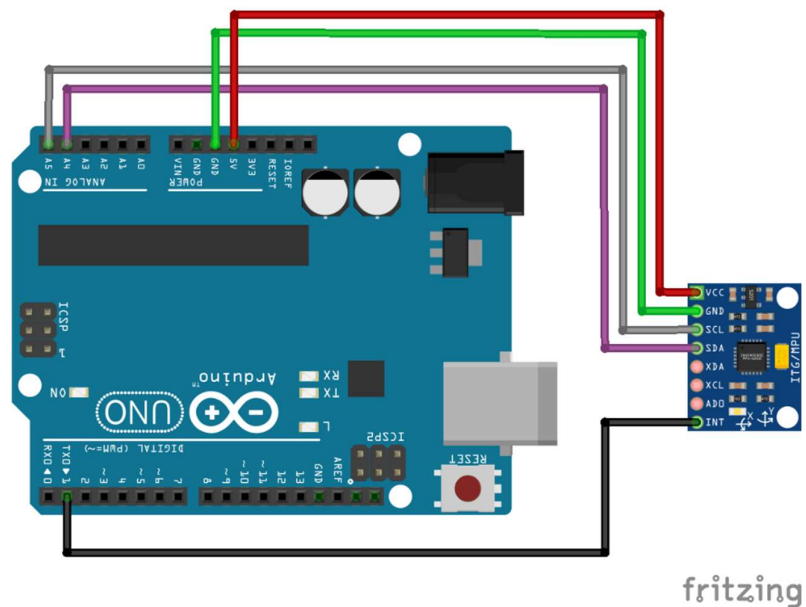


Figura 36. Diagrama de conexión entre Arduino UNO y módulo MPU. Fuente: elaboración propia; Fritzing

6.2. Códigos empleados

Ya detallado el *hardware*, se procede a especificar el *software* empleado para llevar a cabo la toma de datos y el posterior análisis de estos. Para el primer proceso se desarrolló un código usando el IDE proporcionado de manera gratuita y libre por la organización de Arduino. Se define una descripción inicial del problema a resolver por el código que ejecutara la placa Arduino.

«Escribir en la tarjeta de almacenamiento μ SD un archivo de texto (formato .txt) donde los datos estén en la siguiente disposición:

<i>DD</i>	<i>MM</i>	<i>YYYY</i>
-----------	-----------	-------------

<i>hh:mm:ss</i>	<i>tab</i>	<i>LAT</i>	<i>tab</i>	<i>LON</i>	<i>tab</i>	<i>km/h</i>	<i>tab</i>	<i>VIBx</i>	<i>tab</i>	<i>VIBy</i>	<i>tab</i>	<i>VIBz</i>
-----------------	------------	------------	------------	------------	------------	-------------	------------	-------------	------------	-------------	------------	-------------

El primer encabezado es para indexar cada grupo de mediciones según el día. El carácter “tabulador” (tab) es el separador que se indica en el segundo software a usar (Matlab R2017b). Para tomar los datos automáticamente, se coordinará el equipo para que tome datos en un intervalo definido, de acuerdo con el horario provisto por INCOFER en la ruta definida»

Para resolver la premisa descrita, se determinó la siguiente estructura siguiendo el formato de programación que el microcontrolador demanda. En la sección **ANEXO 3. Prototipo**, se encuentra el código tal como se aplicó al campo.

La frecuencia del muestreo (etapa de escritura de datos) está definida por el *baudrate*, este valor está limitado por el *shield GPS* (9600 bps), debido a esto, durante el periodo de operación del tren se registra una nueva fila de datos cada 250 milisegundos. Cada vez que el ciclo descrito finaliza, se envía un comando para “cerrar” el archivo de texto, para así poder retirar con seguridad la tarjeta de memoria sin perder datos o dañarla.

Al final del proceso descrito, el archivo que contiene los datos se convierte en un archivo local de Matlab, en específico un *time – array*, ya que la aplicación *Signal Analyzer* demanda una entrada de ese tipo.

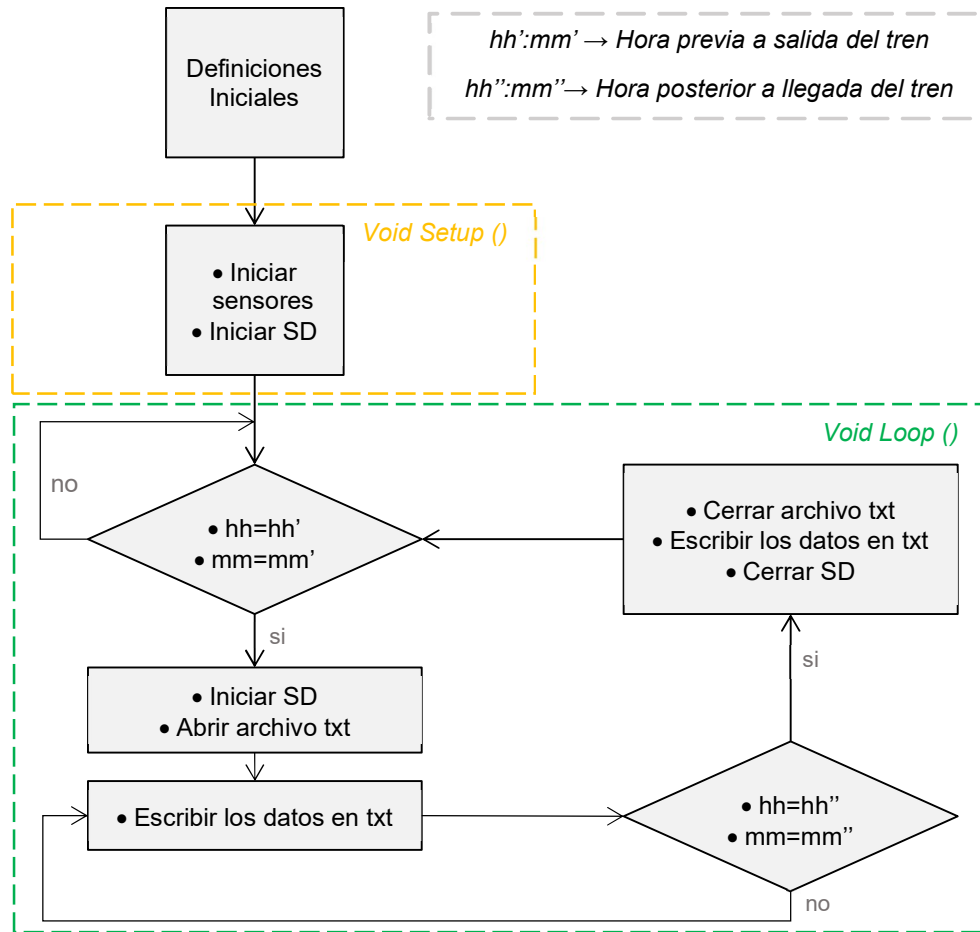


Figura 37. Diagrama de flujo del programa para la toma de datos. Fuente: elaboración propia

Signal Analyzer es una herramienta interactiva para visualizar, medir, analizar y comparar señales en el dominio de tiempo, en el dominio de frecuencia y en el dominio de frecuencia de tiempo. La aplicación proporciona una manera de trabajar con muchas señales de diferentes duraciones al mismo tiempo y en la misma vista. (The MathWorks, Inc., s.f.)

6.3. Instalación *in situ*

El *hardware*, detallado en la **sección 3.5**, fue armado de acuerdo con la sección anterior, para la comunicación entre la parte del equipo en el eje y dentro de la cabina se usó un bus de conductores de tipo CDR UTP CAT-5E 350 MHz, este tipo de cable posee un trenzado para disminuir el ruido. Esta hecho en puro cobre no oxigenado, tiene una máxima calidad para tendidos largos. (MicroJPM, 2020)

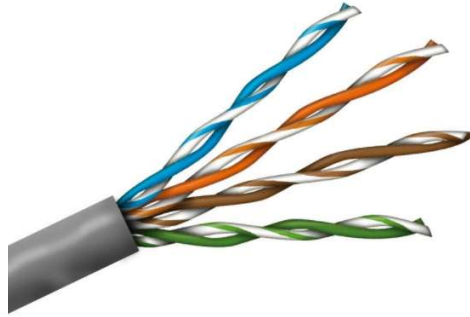


Figura 38. Conductor UTP. Fuente: MicroJPM

El equipo se instaló de acuerdo con el diagrama de la **Figura 42**, se decidió esta configuración junto a los mecánicos del Taller Electromecánico del Pacífico. La protección seleccionada para el acelerómetro fue una caja plástica especial (74×158×90 mm), detallada en la siguiente imagen. Esta caja cuenta con un sello de goma alrededor de la tapa, resistente al polvo y la humedad, está asegurada con seis tornillos de 4 mm, además de contar con bridas para una facilitan la instalación.



Figura 39. Big Red Box. Fuente: MicroJPM

Finalmente, se protegió el Arduino la batería, y el *shield* GPS con una caja de diseño propio, construida en acrílico de 3 mm de grosor. El equipo completo, previo a la instalación en campo, puede observarse en la **Figura 41**.



Figura 40. Caja de protección de Arduino. Fuente: elaboración propia

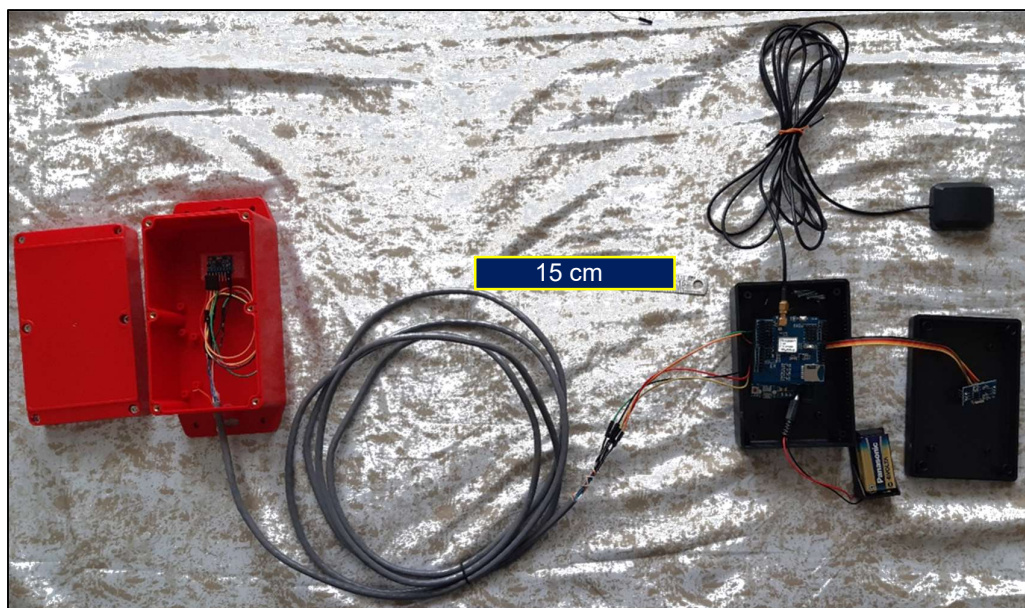


Figura 41. Equipo de medición previo a instalación. Fuente: elaboración propia

Junto con el equipo de técnicos del Taller Electromecánico se decidió la configuración en el campo, se decidió instalar el equipo de medición en la locomotora numero 2404 (tipo Apolo), que normalmente cubre la ruta Belén-San José, debido a la que contaba con una placa metálica remanente de una “caja de arena”. Se soldaron guías para conducir el bus de conductores hacia un “orificio” en el chasis que va al centro de control de motores dentro de la cabina del maquinista.

La antena del dispositivo GPS se fijó a una de las paredes del gabinete del centro de control de motores, puesto que el gabinete esta sellado, a pesar de esto, la recepción de la señal fue suficiente para recolectar datos de posición. En la sección de anexos se detalla la ubicación donde se instalación.

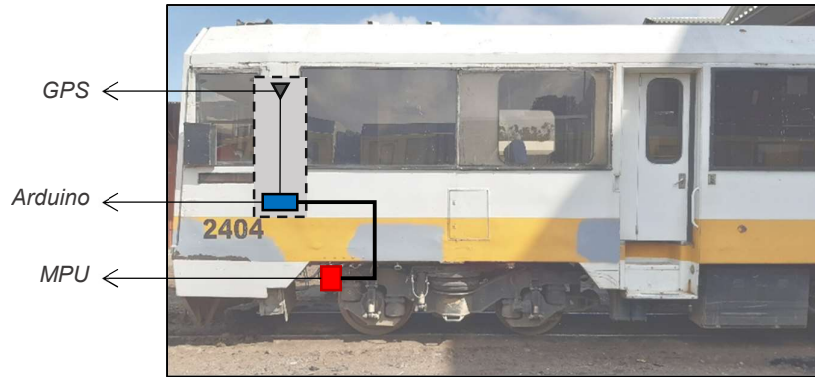


Figura 42. Diagrama de instalación en el tren. Fuente: elaboración propia

6.4. Datos obtenidos

Durante la implementación del equipo surgieron varios retos, siendo la alimentación eléctrica el principal de ellos, puesto que se suministró energía al equipo con una batería de 9V, esta soportaba poco menos de un día, además de ser intermitente, por lo que, al apagarse por un lapso corto, el microcontrolador se reiniciaba, resultando que el RTC lo hiciera, por lo que los datos recolectados no correspondían al tramo seleccionado.

Para solventar el reto, se planteó el reemplazo temporal del *holder* SD del módulo GPS por un módulo SD único, esto para limitar el consumo de potencia, aunque esta solución fue paliativa, puesto que el principal problema estaba en el largo del bus de conductores entre el Arduino Uno y el MPU 6050.

Por esto, se obtuvo un único espectro de vibración, del miércoles 2 de diciembre de 2020, durante las 15:10 a 15:24, como se mencionó, se instaló el equipo en la locomotora que cubre la ruta Curridabat- San José- Pavas- Belén. La metodología del propuesta para este objetivo requiere el muestreo de una sección de 5 km de vía férrea, por lo que se programó el equipo para cubrir el tramo entre la Estación del Pacifico y la Estación de Tubo Tico (AyA).

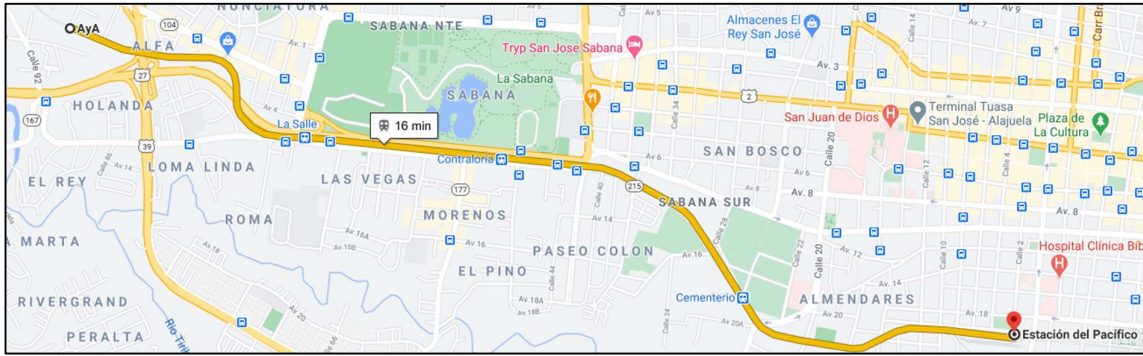


Figura 43. Ruta muestreada por el prototipo. Fuente: Google Maps

Axle Box Acceleration toma mediciones de vibraciones en 2 ejes, según la configuración estándar aplicada en los países que operan este sistema; en este caso se decidió aprovechar la capacidad del MPU 6050 para tomar datos de un tercer eje coordenado (paralelo al eje de las ruedas del tren), esto para tentar que información se puede extraer.

A continuación, se adjuntan los espectros de vibración obtenidos en las mediciones realizadas.

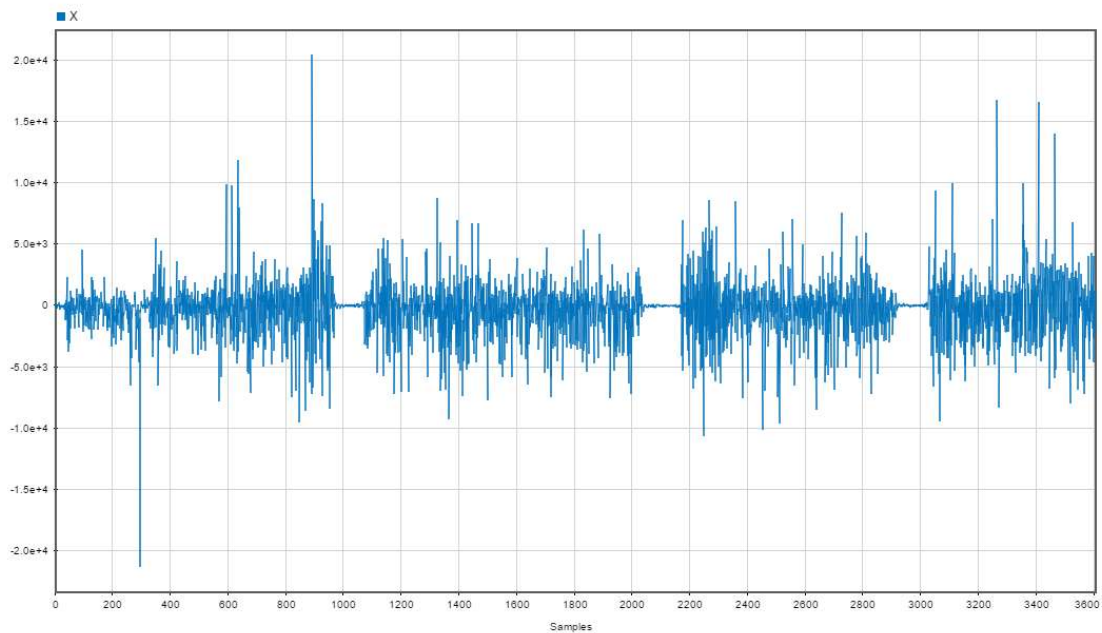


Figura 44. Espectro de vibración en eje X. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

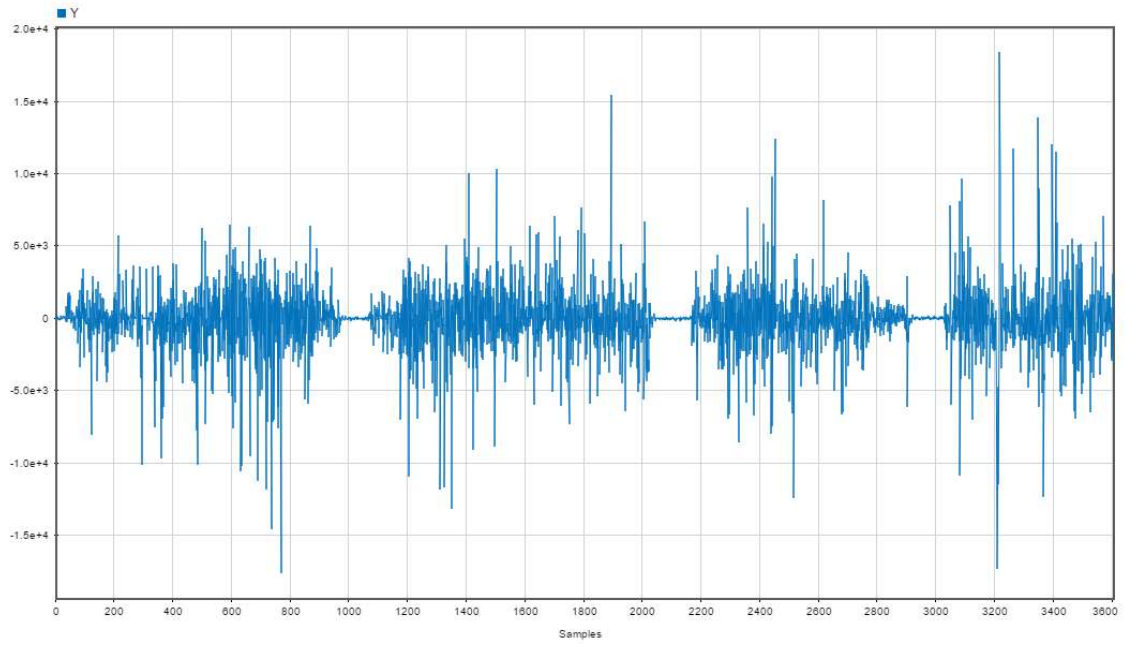


Figura 45. Espectro de vibración en eje Y. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

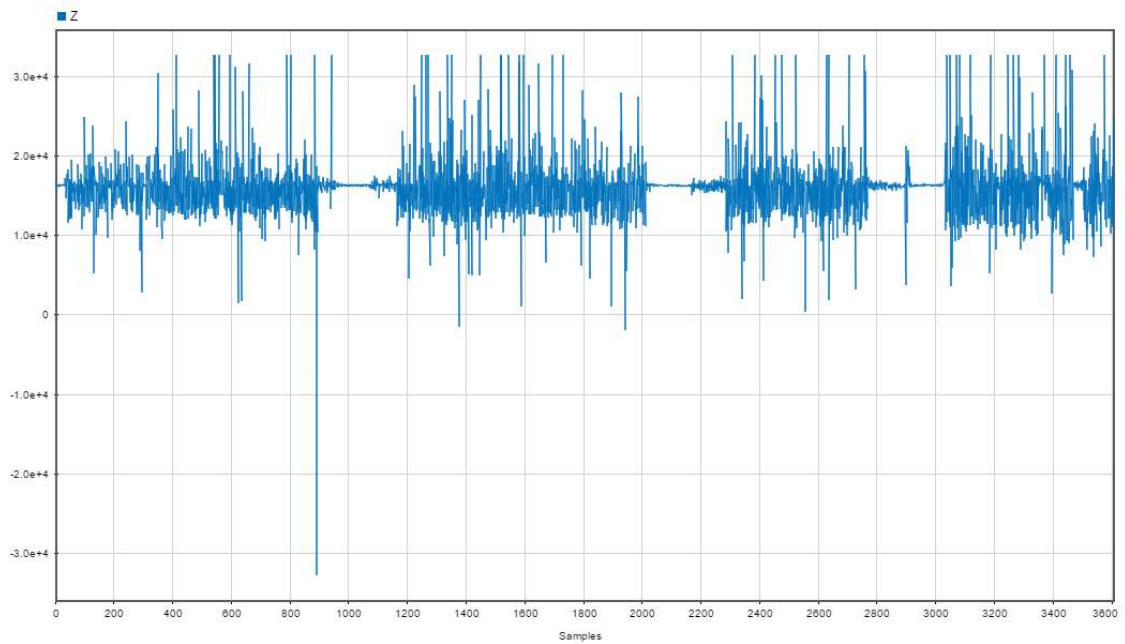


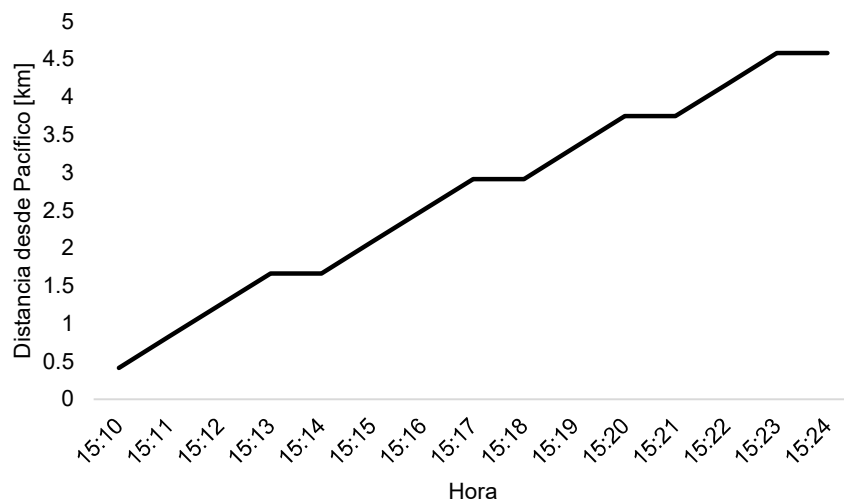
Figura 46. Espectro de vibración en eje Z. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

En los espectros se denotan tres zonas sin vibraciones significativas, correspondientes a la llegada del tren a las estaciones intermedias: Cementerio, Contraloría y La Salle, existe un lapso de 4 minutos entre la salida – primera estación y primera – segunda estación, mientras que entre la segunda – tercera estación y tercera – última estación existe un intervalo de 3 minutos.

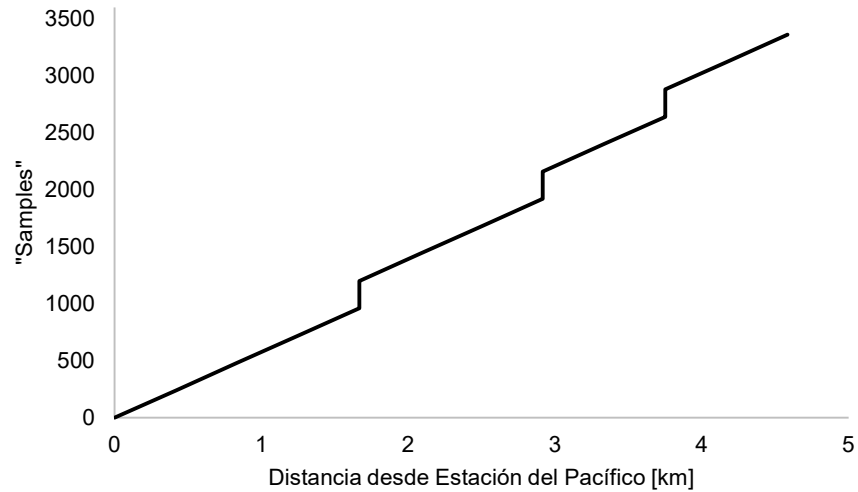
Detallando en el espectro de correspondiente al eje Z, se denota un desfase con respecto al cero, esto debido a un desfase propio del equipo de medición, esto designado para solventar la aceleración por la gravedad terrestre

En el eje temporal, el *baudrate* se definió en 9600 baudios por segundo, esto implicó que existe una tasa de 4 fila de datos por segundo (4 filas de 3 columnas en el archivo de texto). En las figuras anteriores, se denota que en el eje de las abscisas se contabiliza en “*Samples*”, que significa el orden de aparición (1, 2, 3 ... 3048). Al final del periodo de 15 minutos se tomaron 3648 filas de datos.

Para determinar la posición aproximada del tramo de vía, se toma en cuenta la rampa de velocidad de los trenes, que es constante, por esto se puede determinar la posición del tren. La velocidad promedio es de 25 km/h, de acuerdo por uno de los maquinistas.



Gráfica 13. Avance del tren en horario establecido. Fuente: elaboración propia



Gráfica 14. Kilómetros avanzados en relación con "samples". Fuente: elaboración propia

Con estos datos previos, se usa el app *Signal Analyzer* para hacer los espectrogramas de las vías, para cada uno de los ejes.

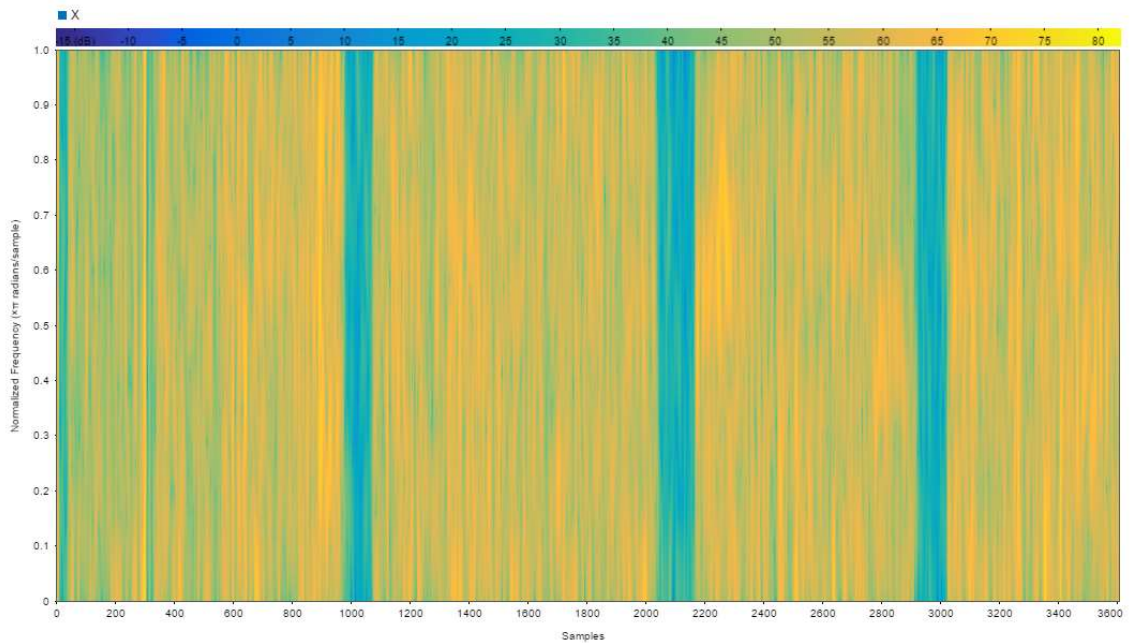


Figura 47. Espectrograma de vibración en eje X. Fuente: elaboración propia, *Signal Analyzer* (Matlab R2017a)

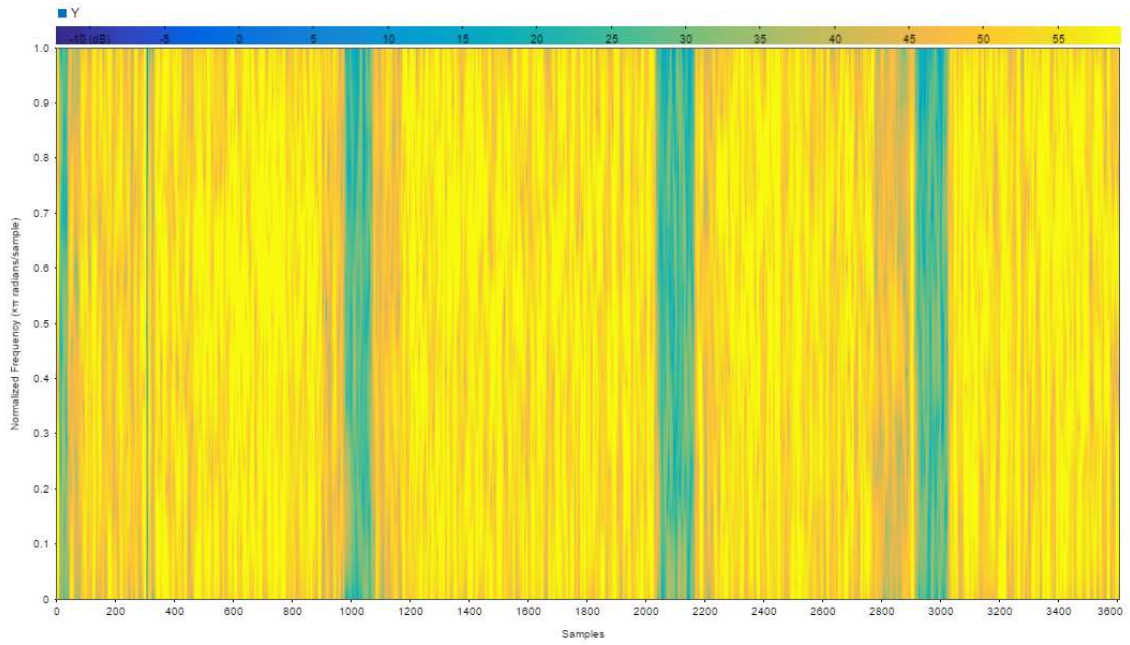


Figura 48. Espectrograma de vibración en eje Y. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

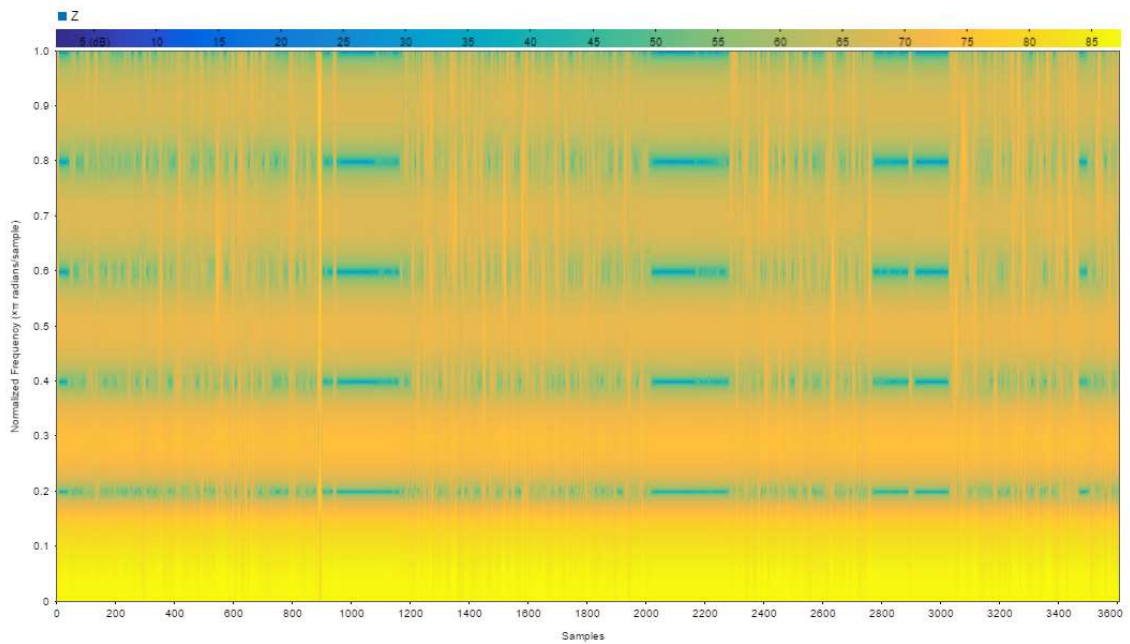


Figura 49. Espectrograma de vibración en eje Y. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

6.5. Análisis de resultados

Una de las limitaciones que se presentan por la pandemia de COVID – 19 es la reducción de las labores presenciales, lo que implica que la coordinación de una inspección de campo en las vías fue imposible, incrementado por la difícil logística de intervenciones o visitas de terceros. Este análisis se limita al análisis teórico de los espectrogramas.

En general, se identifica que en el eje X de la rueda (Figura 1 **Figura 17**) se tiene un espectro limpio, con un contenido energético uniforme bajo. Este eje es el paralelo a los rieles, por lo que se espera que la excitación en esa dirección no sea tan significativa.

El eje Y presenta una excitación mucho más alta, denotado por el poder asociado, entre 55 y 60 dB constantes en toda la vía, se espera un comportamiento así porque este eje es el perpendicular a riel, entonces existe un efecto combinado de las irregularidades del riel, geometría y el efecto resorte que efectúan los amortiguadores neumáticos del tren.

Para concluir este análisis general, en el eje Z se denota poca actividad, esperable porque este es el paralelo al eje de las ruedas, en la teoría revisada no se encuentra información sobre detección de fallas por análisis de este plano, pero se puede intuir que una componente de vibración sobre esa línea puede resultar peligrosa, sabiendo que las amortiguaciones de la locomotora no están diseñadas para absorber con efectividad movimientos en esa dirección. Esto podría provocar, en un caso catastrófico, un descarrilamiento.

Ahora se detallarán algunas secciones de interés encontrados en los espectrogramas.

1.538 km – 1.547 km:

En esta ventana de 10 m existe un defecto puntal que notoriamente excita las componentes X y Z del en el espectrograma, el detalle se encuentra en la siguiente figura. Como se explicó, se puede tomar como un indicio peligroso la existencia de una componente en el eje Z, se puede presumir que es un defecto en una junta de riel o una traviesa.

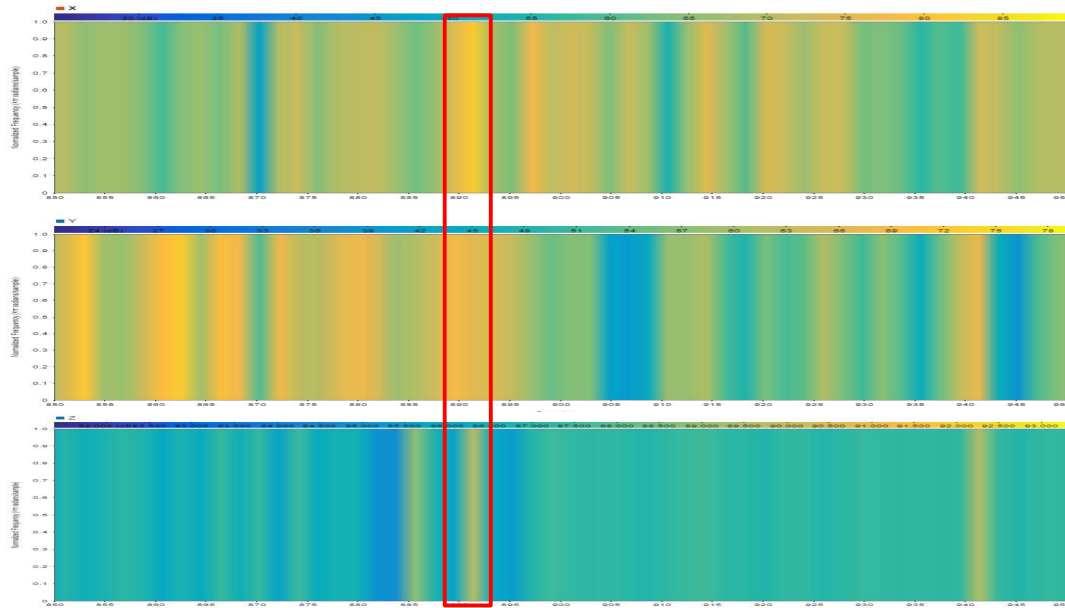


Figura 50. Defecto en vía 1. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

3.157 km – 3.214 km:

En esta ventana de 57 m se midió una serie de defectos uniformemente distribuidos en la longitud que forman varios puntos calientes en el espectrograma del eje X e Y. Este tipo de defectos, de acuerdo con la literatura, se pueden identificar como una ondulación, puesto que por el efecto resorte la magnitud del movimiento aumenta generando puntos igualmente espaciados.

En el eje Z no se notan cambios significativos hasta el último tramo, aunque como se mencionó se debe hacer énfasis en este tramo

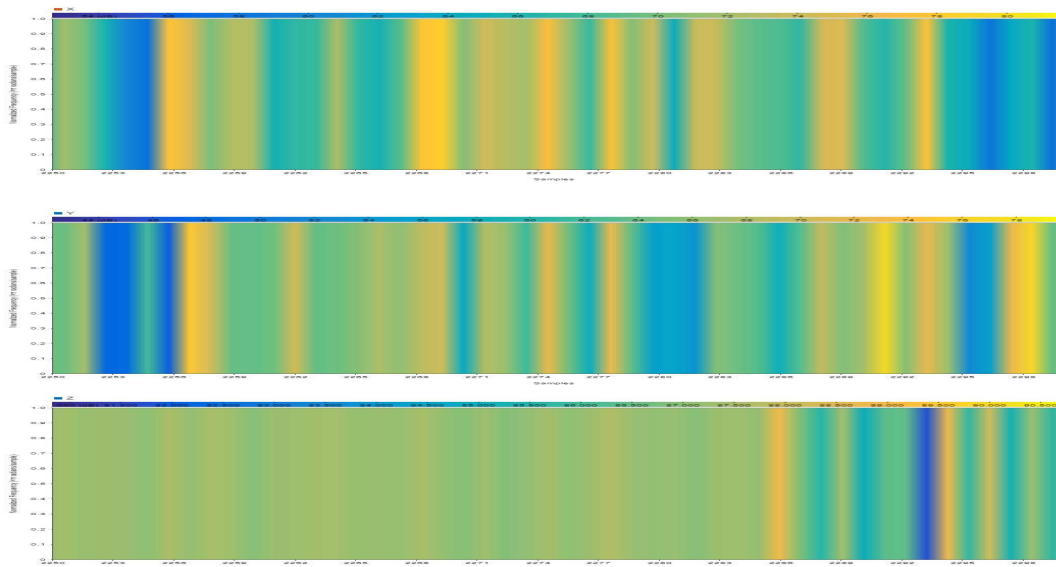


Figura 51. Defecto en vía 2. Fuente: elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)

4.304 km – 3.356 km:

En esta ventana de 52 m se midieron dos defectos que ocasionaron dos grandes alteraciones en el eje Y, además con la particularidad de que ser de gran amplitud en el tiempo, en el intermedio se denota una alza en el nivel de vibración del eje X, lo que denota que el boogie del tren sufrió un movimiento abrupto de a lo largo de su eje, por lo que se puede definir que hubo un movimiento en un tramo de riel cóncavo. Este defecto se puede tomar como una ondulación larga.

En la componente Z no hubo un movimiento importante, por lo que el peligro de un descarrilamiento por movimiento lateral no significa un riesgo en este tramo de interés.

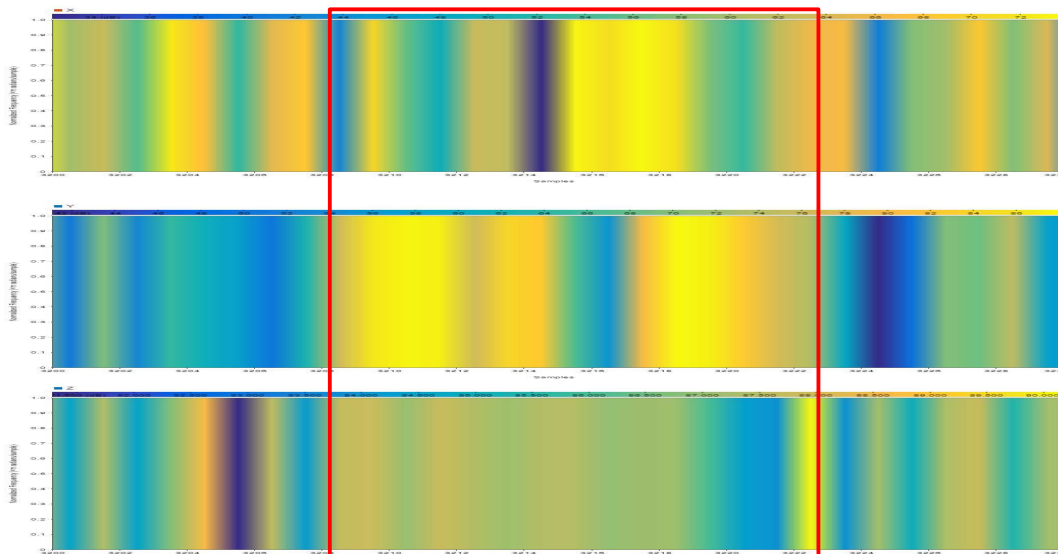


Figura 52. Defecto en vía 3. Fuente elaboración propia, Signal Analyzer (Matlab R2017a)



Figura 53. Ubicación de indicios de fallas detectados por ABA. Fuente: elaboración propia.

7. Análisis técnico-financiero

Generar un análisis técnico-financiero del hardware y software necesarios para la propuesta, mediante el cual se determine la factibilidad, por medio de comparación de especificaciones técnicas y análisis de flujos financieros, para la validación de los elementos necesarios para el mantenimiento basado en condición (CBM).

En este capítulo, se compara una opción disponible en el mercado para la monitorización de estado de rieles contra la propuesta hecha en los capítulos anteriores, esto con el fin de ofrecer a la Gerencia de Operaciones un panorama de la factibilidad de implementación de un sistema de monitoreo de rieles basado en ABA. Para esto se seguirá la siguiente metodología.

- Búsqueda de proveedores con experiencia certificada, con casos de reportados de éxito en distintas partes del globo
- Hacer una revisión de las ofertas comerciales disponibles, que se ajusten a los parámetros que la propuesta basada en *Axle Box Acceleration*.
- Contactar a los intermediarios definidos para América.
- Descripción de la propuesta (en este documento)
- Análisis técnico mediante la construcción de una matriz de decisión, para contrastar las distintas propuestas de manera objetiva.
- Análisis por flujos financieros
- Propuesta de implementación de opción internacional

Para determinar las propuestas externas se realizó una búsqueda de soluciones que integren el monitoreo de estado de rieles como elemento central, para que la comparativa entre opciones sea adecuada.

En esta dinámica, se determinó que la propuesta más idónea es de parte de Frauscher, procedente de Austria. Esta es de renombre mundial, con proyectos instalados por todo el globo, por ejemplo, en Australia, Alemania, Países Bajos y Arabia Saudí, China y Austria.

7.1.Descripción de tecnología de monitorización disponible en mercado (DAS, Frauscher)

Frauscher Sensortechnik GmbH simplifica el acceso de los integradores de sistemas y los operadores de ferrocarril a la información necesaria para el funcionamiento, el control y la protección de la infraestructura. Independientemente de que se trate de líneas principales, de tránsito urbano y de cercanía o de instalaciones industriales. Como componentes esenciales, sus sensores de rueda, sistemas de detección de ruedas y contadores de ejes garantizan que las distintas aplicaciones funcionen de manera confiable y segura. (Frauscher Sensortechnik GmbH, 2019)

Frauscher fue fundada en 1987 por Josef Frauscher, desde su fundación la empresa se ha caracterizado por:

- Contar con una experiencia de 30 años en el desarrollo exitoso de sensores.
- Más de 470 colaboradores en el mundo entero activos en más de 15 ubicaciones.
- Un volumen de producción anual de 35 000 sensores de ruedas.
- Más de 200.000 instalaciones de sensores de ruedas en más de 100 países a nivel internacional.

Distributed Acoustic Sensing

Distributed Acoustic Sensing (DAS) se potencia como base para las aplicaciones ferroviarias. Los sistemas basados en esta tecnología solo requieren una única fibra óptica que funciona con pulsos láser. Las ondas sonoras y vibraciones que alcanzan el cable provocan cambios en el reflejo de estos pulsos. Estos pueden ser medidos y evaluados. Así, la fibra se convierte en un sensor lineal que recorre el riel. Esto permite a los sistemas DAS detectar la posición de un tren sin errores. Además, es posible supervisar el estado de redes ferroviarias enteras. (Frauscher Sensortechnik GmbH, 2018)

El uso de fibra óptica en esta configuración tecnológica permite el cálculo exacto y continuo de la hora de llegada prevista a un punto determinado. De esta manera, es posible optimizar la información de pasajeros y los anuncios de andenes. La información en tiempo real sobre la posición del tren y los perfiles de velocidad permite una gestión más eficiente de las operaciones.

Las FTS supervisan de manera continua la firma acústica del contacto rueda-riel. Un algoritmo optimizado permite percibir cambios de estado en distintos componentes de la infraestructura al pasarlos por un vehículo de vía. Estos incluyen rieles, dispositivos de fijación, traviesas o plataformas de vía.

Sobre la base de análisis de tendencias continuos y la aplicación de parámetros definidos se envían mensajes de advertencia e información al administrador de la infraestructura. De este modo pueden anticiparse de manera temprana tareas de mantenimiento necesarias. Así, la planificación, dirección y ejecución de las tareas de mantenimiento mejoran significativamente. En este contexto, las FTS colaboran en la transición desde ciclos de mantenimientos regulares en función del tiempo hacia un mantenimiento en función de la condición.

Las FTS supervisan de manera continua la firma acústica del contacto rueda-riel. Un algoritmo optimizado permite percibir cambios de estado en distintos componentes de la infraestructura al pasarlos por un vehículo de vía. Estos incluyen rieles, dispositivos de fijación, traviesas o plataformas de vía.

Sobre la base de análisis de tendencias continuos y la aplicación de parámetros definidos, se envían mensajes de advertencia e información al administrador de la infraestructura. De este modo pueden anticiparse de manera temprana tareas de mantenimiento necesarias. Así, la planificación, dirección y ejecución de las tareas de mantenimiento mejoran significativamente. En este contexto, las FTS colaboran en la transición desde ciclos de mantenimientos regulares en función del tiempo hacia un mantenimiento en función de la condición. (Frauscher Sensortechnik GmbH, 2018)

El sistema DAS (Detección Acústica Distribuida), ofrece un rango de cubrimiento de 40 km de vía en ambas direcciones de la unidad de recolección de datos, significa que se puede cubrir 80 km de vía férrea con un solo equipo además de que el equipo solo requiere dos fibras ópticas, por lo que las demás quedan libres para cualquier otro uso. (22 de 24, en una configuración normal)

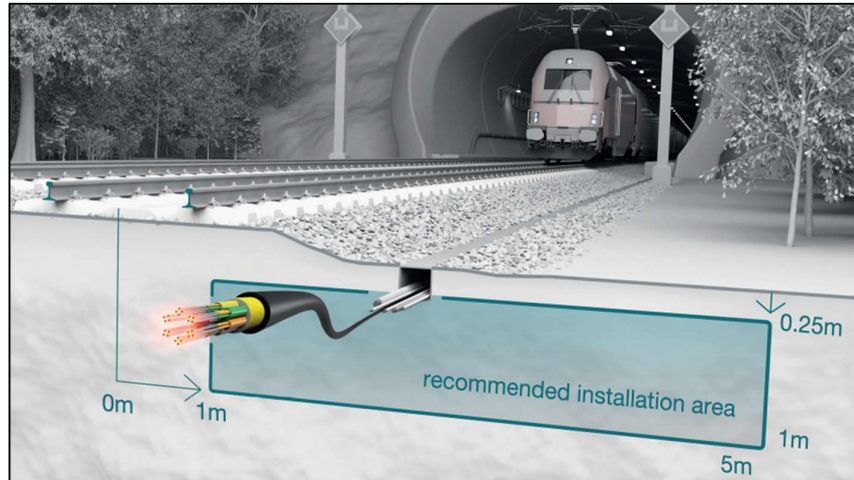


Figura 55. Configuración deseable de instalación de fibra óptica a lo largo de la vía. Fuente: Frauscher, 2020



Figura 54. Centro de recepción de datos de DAS. Fuente: Frauscher Sensonic GmbH, 2020

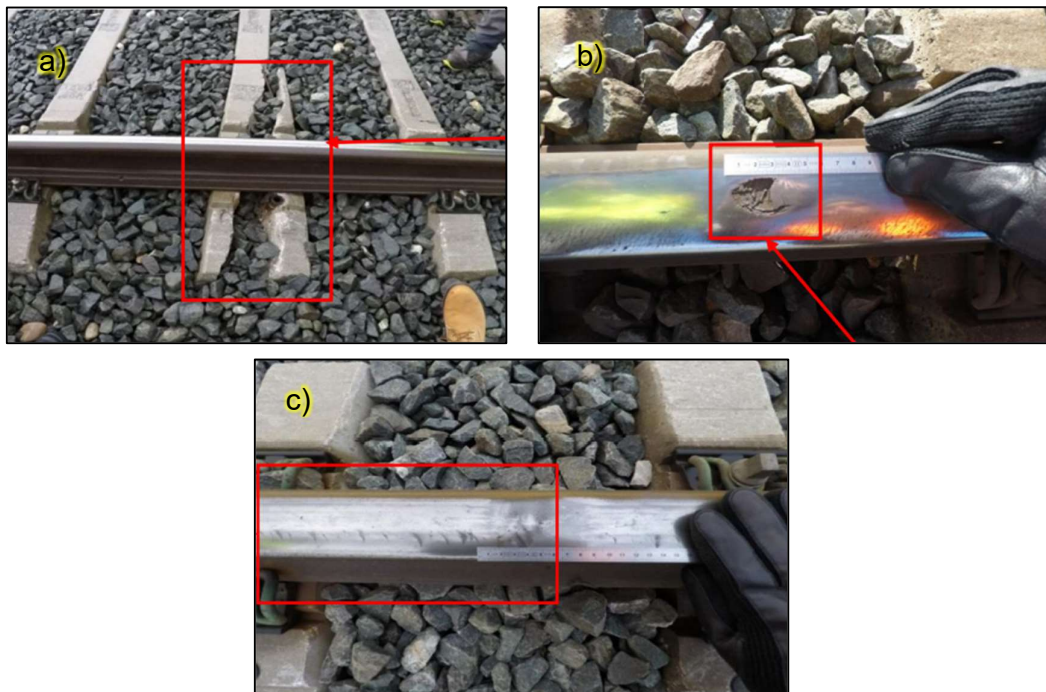


Figura 56. Defectos detectados por DAS; a) durmiente quebrado, b) Quemadura por rueda, c) Squats. Fuente: Frauscher, 2020

7.1. Análisis financiero

Este análisis se hará mediante la herramienta la comparación de Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), este indicador permite comparar proyectos con flujos de efectivos negativos (gastos) usando otros indicadores como el Valor Actual Neto (VAN). El criterio con este indicador es que se busca el proyecto con el menor CAUE, los valores en este caso de estudio deben ser negativos (solo flujos de salida), pero se tomaran como positivos por facilidad de comprensión.

No fue posible realizar un análisis financiero para determinar el *payback* y la Tasa Interna de Retorno porque no se encuentran disponibles datos de costos asociados a mantenimiento de rieles (dejando de lado los demás elemento de la vía férrea), por lo que no fue posible asociar el análisis a una proyección de reducción de costos por concepto de ahorro (no es posible determinar con certeza flujos positivos). Por ende, de acuerdo con Leland & Tarquin (2012), el analisis por CAUE es el más convieneite cunado solo se tienen flujos de salida de efectivo en los proyectos a comparar.

En un apartado anterior se determinó un flujo de salida de efectivo asociado a cada etapa de implementación de ABA, entonces se procede a hacer lo mismo con el caso de DAS. En este, se asume un escenario en el que se instalara en 2021, aunque no fuere así, la herramienta del CAUE permite la comparación de proyectos asincrónicos, pero para afinar el cálculo se asume una tasa de descuento distinta para ambos (14% para ABA y 15% para DAS).

Para determinar la tasa de descuento se toma una base para ambos casos de 10% y se suma la tasa de inflación proyectada máxima determinada por el Banco Central de Costa Rica para el 2020 (4%), y como la tendencia es al alza, para DAS se asume un 1% más.

Para hacer el análisis de los flujos de DAS, se consultó con el proveedor de Frauscher - Sensonic para Norteamérica y Centroamérica CIBA GROUP, con sede en Monterrey (NL, México). Se procedió a consultar por el valor de la inversión inicial de una unidad receptora de datos, puesto que esta sería capaz de cubrir en la totalidad de dos de las tres líneas de ferrocarriles activas en el GAM.

En el 2020, Frauscher – Sensonic se ha lanzado por un cambio generacional en todos sus equipos, por esto los proveedores locales, como CIBA no tienen a mano el dato del costo inicial de inversión del equipo, por lo que se hace el cálculo con una aproximación de acuerdo con el valor de la generación anterior. Cabe destacar que se realizó la consulta con las oficinas centrales de Frauscher, en Viena.

Se plantea un escenario en el que la fibra óptica necesaria para el funcionamiento de DAS sea completamente pagada mediante un acuerdo con empresas de telecomunicaciones, puesto que como se detalló no se ocupa la mayoría de las fibras. Se plantea que este escenario es factible puesto que las vías férreas cruzan varios centros poblacionales grandes del GAM, por lo que resultaría atractivo dar una especie de concesión sobre el derecho de vía de INCOFER.

Como parte de las recomendaciones del representante de CIBA GROUP, se tiene que el equipo debe operar con tres operadores calificados para el análisis de los datos obtenidos en la vía, entonces se toma este rubro como parte de las salidas de efectivo como concepto de “Empleados”. De manera similar que con ABA, se toman como valores constantes de mantenimiento y operación del hardware el 15% y el 20% de la inversión inicial planeada.

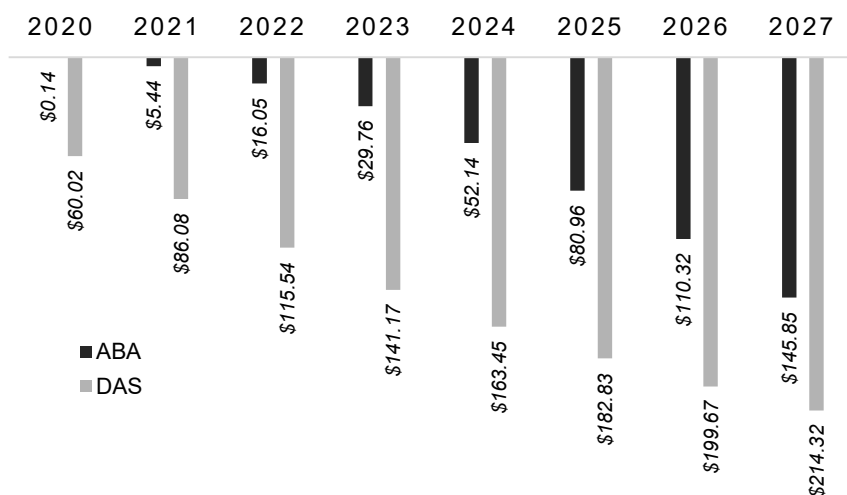
Al final, se tiene una tabla de flujos de salida de efectivo, presentada en el **ANEXO 4**. Los resultados se ofrecen a continuación.

7.1.1. Comparación y análisis

Del cálculo por Costo Anual Uniforme Equivalente, hecho en Microsoft Excel se obtiene el siguiente resultado y en la gráficas se resumen los flujos de salidas anuales llevados a valor actual a un plazo hasta 2028, se nota que los costos iniciales DAS son realmente significativos respecto a ABA. Esa diferencia inicial condiciona a que la opción DAS sea menos atractiva que desarrollar un proyecto ABA durante el plazo establecido.

Pasando al indicador del CAUE, se nota que la diferencia mencionada en el Valor Actual de los flujos genera una un incremento de alrededor del 200% en el Costo Anual Equivalente Uniforme de una implementación de DAS respecto a la de ABA.

Por lo que se puede afirmar que, desde la arista económica, ABA es la opción más conveniente para INCOFER. Sin embargo un análisis de decisión más profundo se ofrece en la sección de **Discusión de resultados obtenidos**, donde se integra la parte técnica al análisis integral propuesto en el objetivo de este capítulo.



Gráfica 15. Evolución en el tiempo del Valor Actual de Costos (VAC), en miles de dólares.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de los indicadores CAUE son los siguientes:

Tabla 12. Evaluación por CAUE de ambas tecnologías. Fuente: elaboración propia.

Tecnología	CAUE
<i>Distributed Acousting Sensing</i>	\$35,210.38
<i>Axle Box Acceleration</i>	\$18,230.11

7.2. Análisis técnico

En este apartado se desarrollará una selección preliminar haciendo uso de una herramienta matemática para la toma de decisiones, además se tomará en cuenta la alternativa de mantener el modelo de intervenciones actual para medir que tan conveniente es dejar el estado de la planificación de mantenimiento tal y como está.

7.3. Matriz de decisión

Ambas tecnologías, ABA y DAS, usan el mismo principio, detectan fallas gracias a las vibraciones producto de la interacción riel – rueda; entonces, para hacer el análisis se empleará una matriz de decisión, se hará referencia a la metodología que Adenuga et al. (2020) propone para la selección entre distintas alternativas para resolver un mismo problema, en el caso de referencia fue para la selección de sistemas de tratamiento de desechos sólidos en Sudáfrica.

En el caso sudafricano se presentó un esquema de decisión usando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés). Para el caso de este proyecto se siguió tanto la metodología presentada por Adenuga et al. y por Bunruamkaew (2012). Inicialmente se definen los criterios que se consideran necesarios en la jerarquización de la toma de decisiones.

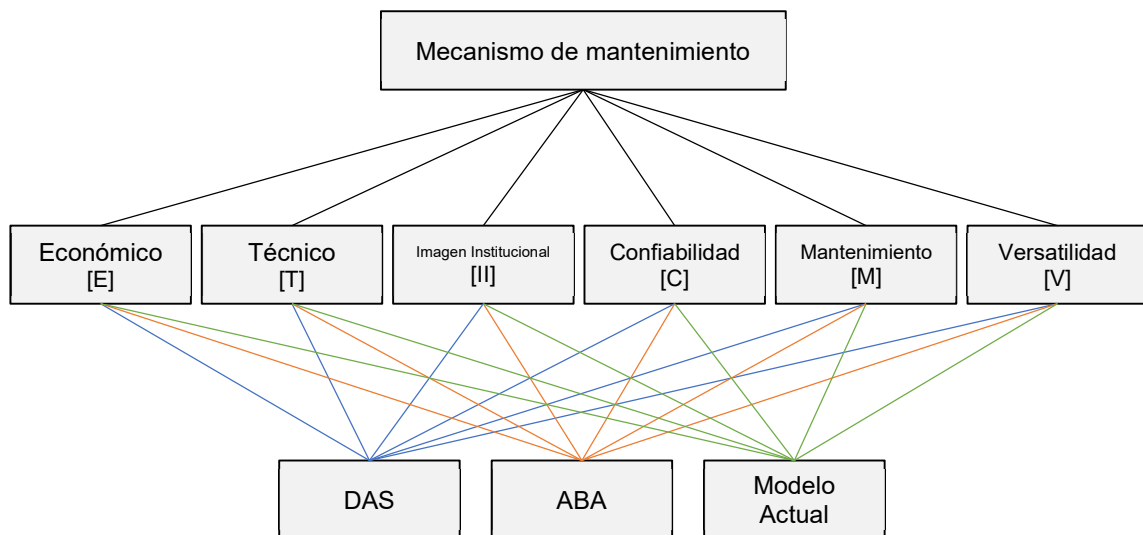


Figura 57. Estructura Jerárquica para la toma de decisiones de equipo para mantenimiento.
Fuente: elaboración propia.

[E] Económico: para este criterio se hace especial énfasis en la inversión inicial que significaría para INCOFER la adopción de cualquier alternativa, este criterio se define como uno de los más importantes por la situación económica tanto de la institución como el contexto país, ahondado por el proyecto de la compra de los trenes nuevos y demás planes de rehabilitación de vías.

Asimismo, se consideran los posibles costos OPEX, como mantenimiento, trabajadores, cuidado del software y capacitaciones. De acuerdo con el análisis realizado por comparación de pares, el criterio económico es el segundo en cuanto a prioridad, representando un 23.5% para la toma de la decisión.

[T] Técnico: se toman en cuenta dos factores en este criterio, la complejidad de la instalación del hardware in situ, como expropiaciones, modificaciones a equipos existentes además de los conocimientos y capacidades que los profesionales deben tener para una instalación inicial.

El segundo factor que se tuvo en cuenta es la especialización del software / hardware, donde se pesa que tan especializado debe ser el personal para operarlo, además de la posibles “parches de expansión” que se pueden agregar conforme la experiencia lo requiera.

Por comparación de pares, resulta que este es el cuarto criterio en la selección de alternativas, representando el 14.7% en el peso total de la decisión.

[II] Imagen Institucional: la inclusión de este criterio se hace para responder a varios de los objetivos institucionales, el de modernización, generación de confianza en los usuarios y ser ejemplo para los demás sectores de servicios de Costa Rica. Se mide el impacto en cada uno de los ejes mencionados al prever y comparar la respuesta que cada uno de los modelos generaría en una posible implementación

Este representa el último de los criterios de selección de acuerdo con su prioridad, con un 2.7% de la totalidad.

[C] Confiabilidad: se definió este criterio como la certeza en los análisis de los datos e información de que cada alternativa ofrece, en otras palabras, contabilizar hasta qué grado se puede tener la convicción de que la información que se obtiene es veraz, además del porcentaje de fallas de que la alternativa es capaz de detectar.

Este es el primer criterio en cuanto a peso en la toma de decisión según la comparación de pares, con un 31.1% de total de la suma de los criterios.

[M] Mantenimiento: se tabulan las futuras labores de mantenimiento que se deben hacer al hardware y/o software de cada sistema; se hace énfasis a la cantidad de componentes, complejidad de mantenimiento, cualidades de los encargados de mantenimiento. Aquí el ideal es que el sistema requiera el mínimo mantenimiento posible y ejecutable por personal propio de INCOFER

Este es el tercer criterio en la selección, representando un 16.3% del total del peso en la decisión.

[V] Versatilidad: aquí se mide la cantidad de posibilidades extras a la medición de estado de vías, por ejemplo, seguimiento por GPS, generación de historiales de mantenimiento, alarmas de defectos en sistemas fuera de los rieles, alarmas por sobre velocidad. Asimismo, la posibilidad de adaptabilidad de cada alternativa, de acuerdo con las necesidades que la experiencia de uso demande

Con el 11.7%, este es el quinto criterio en prioridad para la toma de decisiones para la elección de la mejor alternativa.

Se calculó la importancia usando la comparación de pares, donde cada criterio se compara contra cada uno de los demás, usando la herramienta mostrada en la **Tabla 13**. Mediante, se denota un vector de prioridad donde se tabula el peso de cada criterio para la toma de decisión, presenta en forma de porcentaje.

Se debe tomar en cuenta una regla explicada por Sataay (1980), donde menciona que un factor llamado Radio de Consistencia, que debe ser menor a 0.1, para que el vector prioridad y en general, el análisis completo, sea confiable según los criterios matemáticos implícitos; en este caso, resulta $RC = 0.104$.

Tabla 13. Escala para comparación de pares. Fuente: adaptado de García et al., 2006

Importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos elementos contribuyen idénticamente al objetivo.
3	Dominancia débil	La experiencia manifiesta que existe una débil dominancia de un elemento sobre otro
5	Fuerte dominancia	La experiencia manifiesta una fuerte dominancia de un elemento sobre otro.
7	Demostrada dominancia	La dominancia de un elemento sobre otro es completamente demostrada.
9	Absoluta dominancia	Las evidencias demuestran que un elemento es absolutamente dominado por otro.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Son valores intermedios de decisión.

Tabla 14. Prioridades de cada criterio. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Vector Prioridad
Confiabilidad	0.311
Económico	0.235
Mantenimiento	0.163
Técnico	0.147
Versatilidad	0.117
Imagen Institucional	0.027

Ahora, para cada alternativa se mide el peso usando los criterios de la **Tabla 13** (el proceso completo se muestra en el **ANEXO 4.**). Luego se multiplica el resultado final de las 6 tablas intermedias para obtener el resultado final del Proceso de Análisis Jerárquico propuesto.

Tabla 15. Matriz de decisiones resultante de análisis AHP. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Peso según alternativa			Producto		
	DAS	ABA	Actual	DAS	ABA	Actual
E	0.237	0.711	0.052	0.0557	0.1672	0.0121
T	0.280	0.654	0.066	0.0411	0.0959	0.0096
II	0.368	0.579	0.052	0.0100	0.0157	0.0014
C	0.664	0.284	0.052	0.2065	0.0885	0.0162
M	0.658	0.281	0.061	0.1075	0.0458	0.0100
V	0.685	0.263	0.052	0.0799	0.0307	0.0061
	Suma			50%	44%	6%

7.4. Discusión de resultados obtenidos

Por el criterio económico del Costo Anual Uniforme Equivalente se demuestra que la opción de una implementación de ABA por parte de ingeniería costarricense sería financieramente más factible que la adquisición del equipo DAS de Frauscher, aun así, el resultado de este análisis no debe ser concluyente, puesto que omite varios factores fuera de lo monetario, como capacitaciones o prioridades institucionales.

Mediante el análisis AHP se determinó que la opción que ofrece Frauscher es la mejor para hacer la migración hacia el CBM, seguido de cerca por la opción ABA. Se tabuló además la alternativa de seguir con la situación actual, donde queda de último lugar.

Se destaca que la alternativa ABA resalta en el criterio económico, donde por ser un proyecto desarrollado en forma paulatina el impacto económico no será en un solo punto temporal, mientras que DAS acentúa en el campo de la confiabilidad, donde al ser un sistema con el respaldo de una plataforma de datos previos fortísima además de ser un modelo comprobado alrededor del globo.

A pesar de que la propuesta en este proyecto no resulto ser la primer alternativa, de acuerdo con el análisis AHP, se recomienda tomar esta opción, puesto que los criterios de Versatilidad y Confiabilidad puede ser igualado durante el proceso de mejora continua definido en cada etapa de implementación. Finalmente, aplicar un proyecto de ingeniería nacional mandaría un claro mensaje de los esfuerzos y el compromiso de INCOFER por los procesos de mejora de sus servicios y elementos periféricos.

8. Conclusiones

- Se evaluó el proceso de mantenimiento de las vías férreas, aquí se denotó que de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma COVENIN 2500 93 la situación actual es deficiente. Sin embargo, fuera de la evaluación numérica que la herramienta establece, existe una disposición conjunta con esfuerzos reales de parte de la Gerencia de Operaciones para mejorar esta evaluación a lo largo del tiempo.
- Se diseñó un planeamiento para la migración hacia un modelo de mantenimiento basado en la condición (CBM), para esto se presenta un Cuadro de Mando Integral junto con una estrategia de implementación por etapas para integrar la idea de ABA paulatinamente para llegar a tener un modelo definitivo para la llegada del TRP; además se presentó un modelo inicial de tratamiento de datos obtenidos del cual se partirá hasta que evolucione al final del periodo de implementación formulado (2028+)
- Se diseñó un prototipo para la toma de datos de vibración en eje usando software y hardware de código abierto Arduino, siendo instalado en la locomotora 2404, que cubre la ruta Curridabat – Pavas – Belén. Consecuentemente se realizó un análisis espectral de las vías mediante la aplicación *Signal Analyzer* de Matlab R2017a. El resultado fue la toma de datos de 2 viajes, donde se notan varios tipos de daños en los rieles.
- Mediante el análisis financiero, se determinó que la mejor opción, de acuerdo con el indicador CAUE es aplicar los conceptos ABA, sin embargo desde la parte técnica, mediante el análisis AHP, se determina que la propuesta comercial de Frauscher es la más conveniente. Al final se decide que ABA representa una oportunidad de mejora institucional y posible un banco de conocimiento, por lo que se determina que es la opción más factible para una futura migración a un modelo basado en la condición.

9. Recomendaciones

Como se mencionó, existe un esfuerzo departamental para la mejora del estado no solo del mantenimiento, sino que de los demás elementos de la operación de trenes. Sin embargo, se recomienda evaluar periódicamente cada proceso productivo para denotar su evolución, para evitar quedar estancados en un punto.

Unas de las debilidades que se detectó es la falta de un sistema de manejo de datos digitalizado y estandarizado, en este eje debe existir una mejora sustancial para que la estrategia de implementación sea exitosa, puesto que depende en gran medida de la continua medición de parámetros, aquí es donde un sistema de almacenamiento y procesamiento de datos juega un rol preponderante.

El norte institucional está en la mejora continua y modernización de INCOFER, en cada uno de sus departamentos, la colaboración con la academia puede resultar en una herramienta poderosa en este esfuerzo por modernizar al instituto, por esto se recomienda que se trabaje en una plataforma de intercambio de conocimiento y acompañamiento a estudiantes para la investigación y desarrollo de ideas frescas e innovadoras que apoyen el proceso productivo de INCOFER

Dentro de las oportunidades de mejora detectadas en la instalación del prototipo fue la alimentación eléctrica, ya que representó un reto puesto que consumían 7 baterías de 9V por semana, entonces se recomienda cambiar la alimentación, usando las fuentes de poder del Centro de Control de Motores de cada locomotora. Además, se debe trabajar en la eliminación de las conexiones cableadas, por esto se recomienda hacer uso de un sistema más compacto, usando un Arduino Mino junto con un módulo Wifi, por ejemplo, el módulo ESP8266.

Otra de las oportunidades de mejora radica en el uso más tipos de sensores, como sensores de temperatura, distancia por láser y de sonido; además de ubicarlos en más *boogies* a ambos costados del tren. Finalmente, se aconseja la búsqueda de apoyo (financiero y capacitación) para la implementación de un sistema de robusto tratamiento de datos. Asimismo, la exploración de más ideas disponibles y la comparación versus una tecnología completamente nacional. En el aspecto social y de imagen, se exhorta seguir con la idea de un desarrollo 100% costarricense.

Bibliografía

- Adenuga, O. T., Mpofo, K., & Modise, K. R. (2020). An approach for enhancing optimal resource recovery from different classes of waste in South Africa: Selection of appropriate waste to energy technology. *Sustainable Futures, II*.
- Al-Karaki, J., & Kamal, A. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE wireless communications*(11), 6-28.
- Aprendiendo Arduino. (27 de Enero de 2018). *Preparación IDE Arduino para ESP8266*. Obtenido de Categoría - IDE: <https://www.aprendiendoarduino.com/category/ide/>
- Arduino. (17 de Marzo de 2018). *Master Reader/Slave Sender*. Obtenido de Arduino Library: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/LibraryExamples/MasterReader>
- Arduino. (5 de Febrero de 2018). *What is Arduino?* Obtenido de Arduino Education: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arduino. (25 de Setiembre de 2020). *Sketch - setup() / loop()*. Obtenido de Languages References: <https://www.arduino.cc/reference/es/language/structure/sketch/>
- Arduino. (s.f.). *MPU-6050 Accelerometer + Gyro*. Obtenido de Arduino / Main: <https://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050/>
- Cellaswany, C., Muthammal, R., & Geetha, T. (2018). A new methodology for optimal rail track condition measurement using acceleration signals. *Measurement Science and Technology, 29*(7), 075901.
- Chudzikiewicz, A., Bogacz, R., Kostrzewski, M., & Konowrocki, R. (2017). Condition monitoring of railway track systems by using acceleration signals on wheelset axle-boxes. Varsovia, Polonia.
- Comité Técnico de Normalización. (1 de Diciembre de 1993). Manual para la evaluar los sistemas de mantenimiento en la insdustria. Venezuela.
- Contrato de Servicios Ferroviarios de Mantenimiento de Vías Férreas Sector Pacífico. (15 de Febrero de 2018). San José, Costa Rica.

- Dima, M., Chihaiia, I. A., Surugiu, M. C., & Minea, M. (2018). Preventive Maintenance of the Railway Infrastructure employing Robotized Platform and Virtual Instrumentation. Iasi.
- Dollevoet, R., Núñez, A., & Li, Z. (2017). ABA measurements: Monitoring of Condition Based Maintenance during revenue operations. *Global Railway Review*.
- Frauscher. (2020). Revolution in Railway Operations.
- Frauscher Sensoric GmbH. (Febrero de 2020). Frauscher Sensoric Unit Specification. Austria.
- Frauscher Sensortechnik GmbH. (15 de Agosto de 2018). *El concepto de sensor inteligente: para la industria ferroviaria del futuro*. Obtenido de Prensa y Centro Multimedia: https://www.frauscher.com/es/prensa-y-centro-multimedia/comunicado-de-prensa/El-concepto-de-sensor-inteligente-para-la-industria-ferroviaria-del-futuro_ptd_469
- Frauscher Sensortechnik GmbH. (2019). *Frauscher se presenta*. Obtenido de Empresa: <https://www.frauscher.com/empresa>
- García, L., Noriega, S., Díaz, J., & de la Riva, J. (2006). APLICACIÓN DEL PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA EN LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA AGRÍCOLA. *Agronomía Costarricense*.
- Granström, R. (Junio de 2008). Management of condition information from railway punctuality perspectives. Luleå , Norrbotten, Suecia.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2010). Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa. En *Metodología de la Investigación* (págs. 118-132). México: McGraw-Hill.
- Hernández, J., Laverde, N., & Portillo, A. (2017). Auditoría de mantenimiento: La unión de dos herramientas esenciales para beneficio de la producción industrial moderna. *CICAG: Revista del Centro de Investigación de Ciencias Administrativas y Gerenciales*, 226-228.

- Hodge, V. J., O'Keefe, S., Weeks, M., & Moulds, A. (2015). *Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey*. New York, Estados Unidos.
- IDOM. (2018). *Estudio de Ingeniería de Valor del Proyecto del Tren Rápido de Pasajeros (TRP) en la Gran Área Metropolitana (GAM)*. San José.
- INCOFER. (2016). *Perfil de proyecto Tren Rápido de Pasajeros*. San José.
- InvenSense. (19 de Agosto de 2013). MPU-6000 and MPU-6050. Sunnyvale, California, Estados Unidos.
- IteadStudio. (12 de Abril de 2012). *Arduino GPS Shield. Overview*.
- Lee, J., Kao, H.-A., & Yang, S. (2014). *Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment*. Cincinnati, Ohio, Estados Unidos.
- Li, Z., Molodova, M., Núñez, A., & Dollevoet, R. (2015). *Improvements in Axle Box Acceleration Measurements for the Detection of Light Squats in Railway Infrastructure*. Delf.
- López Abarca, K. (2017). *Diseño de un modelo de gestión de mantenimiento para el Taller Electromecánico del Instituto Costarricense de Ferrocarriles (INCOFER) División Pacífico*. Cartago.
- López García, T., & Flores Cano, M. (2013). *El Foda: Una técnica para el análisis de problemas en el contexto de la planeación en las organizaciones*.
- Maxim Integrated. (2015). DS1302. *Trickle-Charge Timekeeping Chip*. Sunnyvale, California, Estados Unidos.
- Molodova, M., Li, Z., Núñez, A., & Dollevoet, R. (2014). *Automatic Detection of Squats in Railway Infrastructure. IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 15, NO. 5*.
- Montiel Varela, G. (2018). *Análisis experimental del comportamiento del sistema ferroviario-vía por medio de señales dinámica para monitoreo y detección de daño*. Ciudad de México, México.
- NCA. (Octubre de 2014). *Manual Integral de Vías*. Buenos Aires, Argentina.

- NeTIRail-INFRA. (2016). Development of technology for track and ride quality monitoring. Bruselas.
- Núñez, A., Hendricks, J., Li, Z., De Schutter, B., & Dollevoet, R. (2014). Facilitating Maintenance Decisions on the Dutch Railways Using Big Data: The ABA Case Study. Delft, Países Bajos.
- Núñez, A., Jamshidi, A., & Wang, H. (2018). Pareto-Based Maintenance Decisions for Regional Railways With Uncertain Weld Conditions Using the Hilbert Spectrum of Axle Box Acceleration . *IEEE Transactions on Industrial Informatics*.
- Oficina de Planificación Institucional INCOFER. (Septiembre de 2018). Plan Operativo Institucional 2019. San José, Costa Rica.
- Oostermeijer, K. H. (2008). Review on short pitch rail corrugation studies. *Wear Vols. 265:1231– 1237*.
- S.L., H., Lee, K., Lee, K., Tam, H., Chung, W., Liu, S., . . . Ho, T. (2006). A Comprehensive Condition Monitoring of Modern Railway. Birmingham.
- Sondalini, M. (2015). Structure your maintenance audit so that it uncovers both your maintenance problems and your new maintenance improvement opportunities. Obtenido de <http://www.lifetimereliability.com/cms/tutorials/maintenance-management/content-and-structure-ofmaintenance-audit/>
- Tanaka, H., Shimizu, A., & Sano, K. (2014). Development and verification of monitoring tools for realizing effective maintenance of rail corrugation. *6th IET Conference on Railway Condition Monitoring (RCM 2014)*. Birmingham.
- Tanaka, M., Ikeda, R., Yoda, H., & Aiba, M. (2018). Development of condition monitoring system for railway facilities using opportunistic communication. Tokio.
- Tavares, L. A. (1999). *Administración Moderna de Mantenimiento*. Brasil: Novo Polo Publicaciones y Asesoría Ltda.
- The MathWorks, Inc. (s.f.). *Uso de la aplicación Signal Analyzer*. Recuperado el 4 de Octubre de 2020, de Centro de Ayuda: <https://la.mathworks.com/help/signal/ug/using-signal-analyzer-app.html#d122e30512>

- Tripathi, M., & Sensortechnik, F. (2016). *Supervisión de componentes del tren y la vía*. Recuperado el 24 de 11 de 2020, de <https://blog.frauscher.com/es/1615/monitoring-of-components-on-trains-and-rails>
- Unknow. (15 de Octubre de 2014). *Tutorial de Arduino y MPU-6050*. Obtenido de Tutoriales: robologs.net/2014/10/15/tutorial-de-arduino-y-mpu-6050/
- Unknow. (28 de Agosto de 2017). *Geek Factory / Tutoriales*. Obtenido de Tutoriales: <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/shield-o-modulo-gps-con-arduino/>
- Yokoyama, A. (2015). Innovative changes for maintenance of railway by using ICT - To Achieve "Smart Maintenance" -.
- Zhang, J., Ma, J.-e., Huang, X.-y., Fang, Y.-t., & Zhang, H. (2015). Optimal condition-based maintenance strategy under periodic inspections for traction motor insulations. Zhejiang, China.

Anexos

ANEXO 1. Detalle de auditoría

Criterios	Puntuación
AREA I: ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA EN GENERAL	
I.1 Funciones y Responsabilidades. Principios	
I.1.1 La Organización no posee organigramas acordes con su estructura o no están actualizados; tanto a nivel general, como a nivel de departamentos.	1
I.1.2 Las funciones y la correspondiente asignación de responsabilidades no están especificadas por escrito, o presentan falta de claridad.	2
I.1.3 La definición de funciones y la asignación de responsabilidades no llega hasta el último nivel supervisorio necesario, para el logro de los objetivos deseados.	1
I.2 Autoridad y Autonomía	
I.2.1 La línea de autoridad no está claramente definida	1
I.2.2 Las personas asignadas a cada puesto de trabajo no tienen pleno conocimiento de sus funciones	
I.2.3 Existe duplicidad de funciones	
I.2.4 La toma de decisiones para la resolución de problemas rutinarios en cada dependencia o unidad, tiene que ser efectuada previa consulta a los niveles superiores	2
I.3 Sistema de Información	
I.3.1 La Organización no cuenta con un diagrama de flujo para el sistema de información, donde estén involucrados todos los componentes estructurales partícipes en la toma de decisiones.	4
I.3.2 La Organización no cuenta con mecanismos para evitar que se introduzca información errada o incompleta en el sistema de información.	2
I.3.3 La Organización no cuenta con un archivo ordenado y jerarquizado técnicamente.	4
I.3.4 No existen procedimientos normalizados (formatos) para llevar y comunicar la información entre las diferentes secciones o unidades, así como almacenamientos (archivo) para su cabal recuperación.	2
I.3.5 La Organización no dispone de los medios para el procesamiento de la información en base a los resultados que se deseen obtener.	3

I.3.6 La Organización no dispone de los mecanismos para que la información recopilada y procesada llegue a las personas que deben manejarla.	3
AREA II: ORGANIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO EN LA EMPRESA	
II.1 Funciones y Responsabilidades.	
II.1.1 La empresa no tiene organigramas acordes a su estructura o no están actualizados para La Organización de mantenimiento.	6
II.1.2 La Organización de mantenimiento, no está acorde con el tamaño del SP, tipo de objetos a mantener, tipo de personal, tipo de proceso, distribución geográfica, u otro.	12
II.1.3 La unidad de mantenimiento no se presenta en el organigrama general, independiente del departamento de producción.	10
II.1.4 Las funciones y la correspondiente asignación de responsabilidades no están definidas por escrito o no están claramente definidas dentro de la unidad.	5
II.1.5 La asignación de funciones y de responsabilidades no llegan hasta el último nivel supervisorio necesario, para el logro de los objetivos deseados.	4
II.1.6 La Organización no cuenta con el personal suficiente tanto en cantidad como en calificación, para cubrir las actividades de mantenimiento.	12
II.2 Autoridad y Autonomía	
II.2.1 La unidad de mantenimiento no posee claramente definidas las líneas de autoridad.	5
II.2.2 El personal asignado a mantenimiento no tiene pleno conocimiento de sus funciones.	2
II.2.3 Se presentan solapamientos y/o duplicidad en las funciones asignadas a cada componente estructural de La Organización de mantenimiento.	2
II.2.4 Los problemas de carácter rutinario no pueden ser resueltos sin consulta a niveles superiores.	7
II.3 Sistema de Información	
II.3.1 La Organización de mantenimiento no cuenta con un flujograma para su sistema de información donde estén claramente definidos los componentes estructurales involucrados en la toma de decisiones.	10
II.3.2 La Organización de mantenimiento no dispone de los medios para el procesamiento de la información de las diferentes secciones o unidades en base a los resultados que se desean obtener.	10
II.3.3 La Organización de mantenimiento no cuenta con mecanismos para evitar que se introduzca información errada o incompleta en el sistema de información.	7
II.3.4 La Organización de mantenimiento no cuenta con un archivo ordenado y jerarquizado técnicamente.	12

II.3.5 No existen procedimientos normalizados (formatos) para llevar y comunicar la información entre las diferentes secciones o unidades, así como su almacenamiento (archivo) para su cabal recuperación.	3
II.3.6 La Organización de mantenimiento no dispone de los mecanismos para que la información recopilada y procesada llegue a las personas que deben manejarla.	5
ÁREA III: PLANIFICACIÓN DE MANTENIMIENTO	
III.1 Objetivos y Metas	
III.1.1 No se encuentran definidos por escrito los objetivos y metas que debe cumplir La Organización de mantenimiento.	7
III.1.2 La Organización de mantenimiento no posee un plan donde se especifiquen detalladamente las necesidades reales y objetivas de mantenimiento para los diferentes objetos a mantener.	7
III.1.3 La organización no tiene establecido un orden de prioridades para la ejecución de las acciones de mantenimiento de aquellos sistemas que lo requieren.	4
III.1.4 Las acciones de mantenimiento que se ejecutan no se orientan hacia el logro de los objetivos.	4
III.2 Políticas para la planificación	
III.2.1 La organización no posee un estudio donde se especifiquen detalladamente las necesidades reales y objetivas de mantenimiento para los diferentes objetos de mantenimiento.	5
III.2.2 No se tiene establecido un orden de prioridades para la ejecución de las acciones de mantenimiento de aquellos sistemas que lo requieran.	5
III.2.3 A los sistemas sólo se les realiza mantenimiento cuando fallan	10
III.2.4 El equipo gerencial no tiene coherencia en torno a las políticas de mantenimiento establecidas.	3
III.3 Control y Evaluación	
III.3.1 No existen procedimientos normalizados para recabar y comunicar información, así como su almacenamiento para su posterior uso.	7
III.3.2 No existe una codificación secuencial que permita la ubicación rápida de cada objeto dentro del proceso, así como el registro de información de cada uno de ellos.	4
III.3.3 La empresa no posee inventario de manuales de mantenimiento y operación, así como catálogos de piezas y partes de cada objeto a mantener.	2
III.3.4 No se dispone de un inventario técnico de objetos de mantenimiento que permita conocer la función de los mismos dentro del sistema al cual pertenece, recogida ésta información en formatos normalizados.	2
III.3.5 No se llevan registros de fallas y causas por escrito.	

III.3.6 No se llevan estadísticas de tiempos de parada y de tiempo de reparación.	
III.3.7 No se tiene archivada y clasificada la información necesaria para la elaboración de los planes de mantenimiento.	2
III.3.8 La información no es procesada y analizada para la futura toma de decisiones.	4
AREA IV: MANTENIMIENTO RUTINARIO	
IV.1 Planificación	
IV.1.1 No están descritas en forma clara y precisa las instrucciones técnicas que permitan al operario o en su defecto a La Organización de mantenimiento aplicar correctamente mantenimiento rutinario a los sistemas.	4
IV.1.2 Falta de documentación sobre instrucciones de mantenimiento para la generación de acciones de mantenimiento rutinario.	4
IV.1.3 Los operarios no están bien informados sobre el mantenimiento a realizar.	2
IV.1.4 No se tiene establecida una coordinación con la unidad de producción para ejecutar las labores de mantenimiento rutinario.	
IV.1.5 Las labores de mantenimiento rutinario no son realizadas por el personal más adecuado según la complejidad y dimensiones de la actividad a ejecutar.	
IV.1.6 No se cuenta con un stock de materiales y herramientas de mayor uso para la ejecución de este tipo de mantenimiento.	5
IV.2 Programación e Implantación	
IV.2.1 No existe un sistema donde se identifique el programa de mantenimiento rutinario.	4
IV.2.2 La programación de mantenimiento rutinario no está definida de manera clara y detallada.	3
IV.2.3 Existe el programa de mantenimiento, pero no se cumple con la frecuencia estipulada, ejecutando las acciones de manera variable y ocasionalmente.	2
IV.2.4 Las actividades de mantenimiento rutinario están programadas durante todos los días de la semana, impidiendo que exista holgura para el ajuste de la programación.	2
IV.2.5 La frecuencia de las acciones de mantenimiento rutinario (limpieza, ajuste, calibración y protección) no están asignadas a un momento específico de la semana.	2
IV.2.6 No se cuenta con el personal idóneo para la implantación del plan de mantenimiento rutinario.	1

IV.2.7 No se tienen claramente identificados a los sistemas que conformarán parte de las actividades de mantenimiento rutinario.	1
IV.2.8 La organización no tiene establecida una supervisión para el control de ejecución de las actividades de mantenimiento rutinario.	1
IV.3 Control y Evaluación	
IV.3.1 No se dispone de una ficha para llevar el control de los manuales de servicio, operación y partes.	2
IV.3.2 No existe un seguimiento desde la generación de las acciones técnicas de mantenimiento rutinario, hasta su ejecución.	5
IV.3.3 No se llevan registros de las acciones de mantenimiento rutinario realizadas.	
IV.3.4 No existen formatos de control que permitan verificar si se cumple el mantenimiento rutinario y a su vez emitir órdenes para arreglos o reparaciones a las fallas detectadas.	2
IV.3.5 No existen formatos que permitan recoger información en cuanto a consumo de ciertos insumos requeridos para ejecutar mantenimiento rutinario permitiendo presupuestos más reales.	1
IV.3.6 El personal encargado de las labores de acopio y archivo de información no está bien adiestrado para la tarea, con el fin de realizar evaluaciones periódicas para este tipo de mantenimiento.	2
IV.3.7 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento rutinario basándose en los recursos utilizados y la incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento.	10
ÁREA V: MANTENIMIENTO PROGRAMADO (PLANIFICACIÓN)	
V.1 Planificación	
V.1.1 No existen estudios previos que conlleven a la determinación de las cargas de trabajo y ciclos de revisión de los objetos de mantenimiento, instalaciones y edificaciones sujetas a acciones de mantenimiento.	12
V.1.2 La empresa no posee un estudio donde especifiquen las necesidades reales y objetivas para los diferentes objetos de mantenimiento, instalaciones y edificaciones.	10
V.1.3 No se tienen planificadas las acciones de mantenimiento programado en orden de prioridad, y en el cual se especifiquen las acciones a ser ejecutadas a los objetos de mantenimiento, con frecuencias desde quincenales hasta anuales.	7
V.1.4 La información para la elaboración de instrucciones técnicas de mantenimiento programado, así como sus procedimientos de ejecución, es deficiente.	7
V.1.5 No se dispone de los manuales y catálogos de todas las máquinas.	5
V.1.6 No se ha determinado la fuerza laboral necesaria para llevar a cabo todas las actividades de mantenimiento programado	3

V.1.7 No existe una planificación conjunta entre La Organización de mantenimiento, producción, administración y otros entes de la organización, para la ejecución de las acciones de mantenimiento programado.	1
V.2 Programación e implantación	
V.2.1 No existe un sistema donde se identifique el programa de mantenimiento programado.	10
V.2.2 Las actividades están programadas durante todas las semanas del año, impidiendo que exista una holgura para el ajuste de la programación.	2
V.2.3 Existe el programa de mantenimiento, pero no se cumple con la frecuencia estipulada, ejecutando las acciones de manera variable y ocasionalmente.	5
V.2.4 No existe un estudio de las condiciones reales de funcionamiento y las necesidades de mantenimiento.	7
V.2.5 No se tiene un procedimiento para la implantación de los planes de mantenimiento programado.	7
V.2.6 La organización no tiene establecida una supervisión sobre la ejecución de las acciones de mantenimiento programado.	10
V.3 Control y evaluación	
V.3.1 No se controla la ejecución de las acciones de mantenimiento programado	7
V.3.2 No se llevan las fichas de control de mantenimiento por cada objeto de mantenimiento.	4
V.3.3 No existen planillas de programación anual por semanas para las acciones de mantenimiento a ejecutarse y su posterior evaluación de ejecución.	5
V.3.4 No existen formatos de control que permitan verificar si se cumple mantenimiento programado y a su vez emitir órdenes para arreglos o reparaciones a las fallas detectadas.	3
V.3.5 No existen formatos que permitan recoger información en cuanto al consumo de ciertos insumos requeridos para ejecutar mantenimiento programado para estimar presupuestos más reales.	2
V.3.6 El personal encargado de las labores de acopio y archivo de información no está bien adiestrado para la tarea, con el fin de realizar evaluaciones periódicas para este tipo de mantenimiento.	1
V.3.7 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento programado basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento.	10
ÁREA VI: MANTENIMIENTO CIRCUNSTANCIAL	
VI.1 Planificación	

VI.1.1 Los objetos que van a ser sometidos a acciones de mantenimiento circunstancial no están claramente definidos.	10
VI.1.2 No existen formularios con datos de los objetos sujetos a acciones de mantenimiento circunstancial para cuando se tome la decisión de utilizar dichos objetos.	10
VI.1.3 No existe coordinación con el departamento de producción para la ejecución de las acciones de mantenimiento circunstancial.	10
VI.1.4 El personal no está en capacidad de absorber la carga de trabajo de mantenimiento circunstancial.	10
VI.1.5 La organización no concede dentro de la estructura general de mantenimiento, la importancia que tiene el mantenimiento circunstancial a la hora de llevar a cabo la planificación.	5
VI.2 Programación e Implantación	
VI.2.1 El mantenimiento circunstancial se realiza sin ningún tipo de basamento técnico.	1
VI.2.2 No existe información clara y detallada sobre las acciones a ejecutarse en mantenimiento circunstancial en el momento en que sea requerido.	5
VI.2.3 La organización de mantenimiento realiza las actividades de mantenimiento circunstancial sin considerar a los otros entes de la empresa.	5
VI.2.4 No se tiene previsto que sistemas sustituirán a los objetos desincorporados.	10
VI.2.5 Las actividades de mantenimiento circunstancial se realizan según el programa existente, pero no se dispone de la holgura necesaria para atender situaciones imprevistas.	10
VI.3 Control y Evaluación	
VI.3.1 La organización no cuenta con los procedimientos de control de ejecución adecuados para las actividades del mantenimiento circunstancial.	5
VI.3.2 La organización no cuenta con medios para la evaluación de las acciones de mantenimiento circunstancial, de acuerdo con los criterios tanto técnicos como económicos.	5
VI.3.3 No se cuenta con un sistema de recepción y procesamiento de información para la evaluación del mantenimiento circunstancial en el momento oportuno	7
VI.3.4 No se cuenta con mecanismos que permitan disminuir las interrupciones en la producción como consecuencia de las actividades de mantenimiento circunstancial.	7
VI.3.5 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento circunstancial basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento	7
ÁREA VII: MANTENIMIENTO CORRECTIVO	

VII.1 Planificación	
VII.1.1 No se llevan registros por escrito de aparición de fallas para actualizarlas y evitar su futura presencia.	10
VII.1.2 No se clasifican las fallas para determinar cuales se van a atender o a eliminar por medio de la corrección.	5
VII.1.3 No se tiene establecido un orden de prioridades, con la participación de la unidad de producción para ejecutar las labores de mantenimiento correctivo.	5
VII.1.4 La distribución de las labores de mantenimiento correctivo no son analizadas por el nivel superior, a fin de que según la complejidad y dimensiones de las actividades a ejecutar se tome la decisión de detener una actividad y emprender otra que tenga más importancia.	5
VII.2. Programación e Implantación	
VII.2.1 No se tiene establecida la programación de ejecución de las acciones de mantenimiento correctivo.	5
VII.2.2 La unidad de mantenimiento no sigue los criterios de prioridad, según el orden de importancia de las fallas, para la programación de las actividades de mantenimiento correctivo.	5
VII.2.3 No existe una buena distribución del tiempo para hacer mantenimiento correctivo.	15
VII.2.4 El Personal encargado para la ejecución del mantenimiento correctivo, no está capacitado para tal fin	1
VII.3 Control y Evaluación	
VII.3.1 No existen mecanismos de control periódicos que señalen el estado y avance de las operaciones de mantenimiento correctivo.	10
VII.3.2 No se llevan registros del tiempo de ejecución de cada operación.	5
VII.3.3 No se llevan registros de la utilización de materiales y repuestos en la ejecución de mantenimiento correctivo.	5
VII.3.4 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento correctivo basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento.	10
ÁREA VIII: MANTENIMIENTO PREVENTIVO	
VIII.1 Determinación de Parámetros	
VIII.1.1 La organización no cuenta con el apoyo de los diferentes recursos de la empresa para la determinación de los parámetros de mantenimiento.	7

VIII.1.2 La organización no cuenta con estudios que permitan determinar la confiabilidad y mantenibilidad de los objetos de mantenimiento.	10
VIII.1.3 No se tienen estudios estadísticos para determinar la frecuencia de las revisiones y sustituciones de piezas claves.	10
VIII.1.4 No se llevan registros con los datos necesarios para determinar los tiempos de parada y los tiempos entre fallas.	5
VIII.1.5 El personal de La Organización de mantenimiento no está capacitado para realizar estas mediciones de tiempos de parada y entre fallas.	1
VIII.2. Planificación	
VIII.2.1 No existe una clara delimitación entre los sistemas que forman parte de los programas de mantenimiento preventivo de aquellos que permanecerán en régimen inmodificable hasta su desincorporación, sustitución o reparación correctiva.	10
VIII.2.2 La organización no cuenta con fichas o tarjetas normalizadas donde se recoja la información técnica básica de cada objeto de mantenimiento inventariado.	10
VIII.3 Programación e Implantación	
VIII.3.1 Las frecuencias de las acciones de mantenimiento preventivo no están asignadas a un día específico en los periodos de tiempo correspondientes.	7
VIII.3.2 Las órdenes de trabajo no se emiten con la suficiente antelación a fin de que los encargados de la ejecución de las acciones de mantenimiento puedan planificar sus actividades.	7
VIII.3.3 Las actividades de mantenimiento preventivo están programadas durante todas las semanas del año, impidiendo que exista holgura para el ajuste de la programación.	10
VIII.3.4 No existe apoyo hacia la organización que permita la implantación progresiva del programa de mantenimiento preventivo.	7
VIII.3.5 Los planes y políticas para la programación de mantenimiento preventivo no se ajustan a la realidad de la empresa, debido al estudio de las fallas realizado.	7
VIII.4 Control y Evaluación	
VIII.4.1 No existe un seguimiento desde la generación de las instrucciones técnicas de mantenimiento preventivo hasta su ejecución.	7
VIII.4.2 No existen los mecanismos idóneos para medir la eficiencia de los resultados a obtener en el mantenimiento preventivo hasta su ejecución.	7
VIII.4.3 La organización no cuenta con fichas o tarjetas donde se recoja la información básica de cada equipo inventariado.	4
VIII.4.4 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento preventivo basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento.	10

ÁREA IX.1 MANTENIMIENTO POR AVERÍA	
IX.1 Atención a las Fallas	
IX.1.1 Cuando se presenta una falla ésta no se ataca de inmediato provocando daños a otros sistemas interconectados y conflictos entre el personal.	17
IX.1.2 No se cuenta con instructivos de registros de fallas que permitan el análisis de las averías sucedidas para cierto período.	10
IX.1.3 La emisión de órdenes de trabajo para atacar un falla no se hace de una manera rápida.	7
IX.1.4 No existen procedimientos de ejecución que permitan disminuir el tiempo fuera de servicio del sistema.	7
IX.1.5 Lo tiempos administrativos, de espera por materiales o repuestos, y de localización de la falla están presentes en alto grado durante la atención de la falla.	12
IX.1.6 No se tiene establecido un orden de prioridades en cuanto a atención de fallas con la participación de la unidad de producción.	7
IX.2 Supervisión y Ejecución	
IX.2.1 No existe un seguimiento desde la generación de las acciones de mantenimiento por avería hasta su ejecución.	4
IX.2.2 La empresa no cuenta con el personal de supervisión adecuado para inspeccionar los equipos inmediatamente después de la aparición de la falla.	10
IX.2.3 La supervisión es escasa o nula en el transcurso de la reparación y puesta en marcha del sistema averiado.	4
IX.2.4 El retardo de la ejecución de las actividades de mantenimiento por avería ocasiona paradas prolongadas en el proceso productivo.	7
IX.2.5 No se llevan registros para analizar las fallas y determinar la corrección definitiva o la prevención de estas.	5
IX.2.6 No se llevan registros sobre el consumo, de materiales o repuestos utilizados en la atención de las averías.	2
IX.2.7 No se cuenta con las herramientas, equipos e instrumentos necesarios para la atención de averías.	5
IX.2.8 No existe personal capacitado para la atención de cualquier tipo de falla.	1
IX.3 Información sobre las averías	
IX.3.1 No existen procedimientos que permitan recopilar la información sobre las fallas ocurridas en los sistemas en un tiempo determinado.	7

IX.3.2 La organización no cuenta con el personal capacitado para el análisis y procesamiento de la información sobre fallas.	8
IX.3.3 No existe un historial de fallas de cada objeto de mantenimiento, con el fin de someterlo a análisis y clasificación de las fallas; con el objeto, de aplicar mantenimiento preventivo o correctivo.	15
IX.3.4 La recopilación de información no permite la evaluación del mantenimiento por avería basándose en los recursos utilizados y su incidencia en el sistema, así como la comparación con los demás tipos de mantenimiento.	10
ÁREA X: PERSONAL DE MANTENIMIENTO	
X.1 Cuantificación de las necesidades del personal	
X.1.1 No se hace uso de los datos que proporciona el proceso de cuantificación de personal.	10
X.1.2 La cuantificación de personal no es óptima y en ningún caso ajustada a la realidad de la empresa.	10
X.1.3 La Organización de mantenimiento no cuenta con formatos donde se especifique, el tipo y número de ejecutores de mantenimiento por tipo de frecuencia, tipo de mantenimiento y para cada semana de programación.	10
X.2 Selección y Formación	
X.2.1 La selección no se realiza de acuerdo con las características del trabajo a realizar: educación, experiencia, conocimiento, habilidades, destrezas y actitudes personales en los candidatos.	1
X.2.2 No se tienen procedimientos para la selección de personal	1
X.2.3 No se tienen establecidos períodos de adaptación del personal.	1
X.2.4 No se cuenta con programas permanentes de formación del personal que permitan mejorar sus capacidades, conocimientos y la difusión de nuevas técnicas.	5
X.2.5 Los cargos en La Organización de mantenimiento no se tienen por escrito.	1
X.2.6 La descripción del cargo no es conocida plenamente por el personal.	2
X.2.7 La ocupación de cargos vacantes no se da con promoción interna.	1
X.2.8 Para la escogencia de cargos no se toman en cuenta las necesidades derivadas de la cuantificación del personal.	1
X.3 Motivación e Incentivos	

X.3.1 El personal no da la suficiente importancia a los efectos positivos con que incide el mantenimiento para el logro de las metas de calidad y producción.	5
X.3.2 No existe evaluación periódica del trabajo para fines de ascensos o aumentos salariales.	5
X.3.3 La empresa no otorga incentivos o estímulos basados en la puntualidad, en la asistencia al trabajo, calidad de trabajo, iniciativa, sugerencias para mejorar el desarrollo de la actividad de mantenimiento.	5
X.3.4 No se estimula al personal con cursos que aumenten su capacidad y por ende su situación dentro del sistema.	5
AREA XI: APOYO LOGISTICO	
XI.1 Apoyo Administrativo	
XI.1.1 Los recursos asignados a La Organización de mantenimiento no son suficientes.	10
XI.1.2 La administración no tiene políticas bien definidas, en cuanto al apoyo que se debe prestar a La Organización de mantenimiento.	7
XI.1.3 La administración no funciona en coordinación con La Organización de mantenimiento.	5
XI.1.4 Se tienen que desarrollar muchos trámites dentro de la empresa, para que se le otorguen los recursos necesarios a mantenimiento.	4
XI.1.5 La gerencia no posee políticas de financiamiento referidas a inversiones, mejoramiento de objetos de mantenimiento u otros.	4
XI.2 Apoyo Gerencial	
XI.2.1 La Organización de mantenimiento no tiene el nivel jerárquico adecuado dentro de la organización en general.	3
XI.2.2 Para la gerencia, mantenimiento es sólo la reparación de los sistemas.	4
XI.2.3 La gerencia considera que no es primordial la existencia de una organización de mantenimiento, que permita prevenir las paradas innecesarias de los sistemas; por lo tanto, no le da el apoyo requerido para que se cumplan los objetivos establecidos.	1
XI.2.4 La gerencia no delega autoridad en la toma de decisiones.	1
XI.2.5 La gerencia general no demuestra confianza en las decisiones tomadas por La Organización de mantenimiento.	1
XI.3 Apoyo General	

XI.3.1 No se cuenta con apoyo general de la organización, para llevar a cabo todas las acciones de mantenimiento en forma eficiente.	4
XI.3.2 No se aceptan sugerencias por parte de ningún ente de la organización que no esté relacionado con mantenimiento.	4
ÁREA XII: RECURSOS	
XII.1 Equipos	
XII.1.1 No se cuenta con los equipos necesarios para que el ente de mantenimiento opere con efectividad.	4
XII.1.2 Se tienen los equipos necesarios, pero no se le da el uso adecuado.	2
XII.1.3 El ente de mantenimiento no conoce o no tiene acceso a información (catálogos, revistas u otros), sobre las diferentes alternativas económicas para la adquisición de equipos.	2
XII.1.4 Los parámetros de operación, mantenimiento y capacidad de los equipos no son plenamente conocidos o la información es eficiente.	2
XII.1.5 No se lleva registro de entrada y salida de equipos	1
XII.1.6 No se cuenta con controles de uso y estado de los equipos.	2
XII.2 Herramientas	
XII.2.1 No se cuenta con las herramientas necesarias para que el ente de mantenimiento opere eficientemente.	8
XII.2.2 No se dispone de un sitio para la localización de las herramientas, donde se facilite y agilice su obtención.	1
XII.2.3 Las herramientas existentes no son las adecuadas para ejecutar las tareas de mantenimiento.	4
XII.2.4 No se llevan registros de entrada y salida de herramientas.	1
XII.2.5 No se cuenta con controles de uso y estado de las herramientas.	2
XII.3 Instrumentos	
XII.3.1 No se cuenta con los instrumentos necesarios para que el ente de mantenimiento opere con efectividad.	4
XII.3.2 No se toma en cuenta para la selección de los instrumentos, la efectividad y exactitud de estos.	2

XII.3.3 El ente de mantenimiento no tiene acceso a la información (catálogos, revistas u otros), sobre diferentes alternativas tecnológicas de los instrumentos.	1
XII.3.4 Se tienen los instrumentos necesarios para operar con eficiencia, pero no se conoce o no se les el uso adecuado.	1
XII.3.5 No se llevan registros de entrada y salida de instrumentos.	1
XII.3.6 No se cuenta con controles de uso y estado de los instrumentos.	2
XII.4 Materiales	
XII.4.1 No se cuenta con los materiales que se requieren para ejecutar las tareas de mantenimiento.	2
XII.4.2 El material se daña con frecuencia por no disponer de un área adecuada de almacenamiento.	2
XII.4.3 Los materiales no están identificados plenamente en el almacén (etiquetas, sellos, rótulos, colores u otros).	1
XII.4.4 No se ha determinado el costo por falta de material.	2
XII.4.5 No se ha establecido cuáles materiales tener en stock y cuales comprar de acuerdo con pedidos.	1
XII.4.6 No se poseen formatos de control de entradas y salidas de materiales de circulación permanente.	1
XII.4.7 No se lleva el control (formatos) de los materiales desechados por mala calidad.	1
XII.4.8 No se tiene información precisa de los diferentes proveedores de cada material.	1
XII.4.9 No se conocen los plazos de entrega de los materiales por los proveedores.	1
XII.4.10 No se conocen los mínimos y máximos para cada tipo de material.	1
XII.5 Repuestos	
XII.5.1 No se cuenta con los repuestos que se requieren para ejecutar las tareas de mantenimiento.	2
XII.5.2 Los repuestos se dañan con frecuencia por no disponer de un área adecuada de almacenamiento.	1
XII.5.3 Los repuestos no están identificados plenamente en el almacén (etiquetas, sellos, rótulos, colores u otros).	1

XII.5.4 No se ha determinado el costo por falta de repuestos.	1
XII.5.5 No se ha establecido cuáles repuestos tener en stock y cuales comprar de acuerdo con pedidos.	1
XII.5.6 No se poseen formatos de control de entradas y salidas de repuestos de circulación permanente.	1
XII.5.7 No se lleva el control (formatos) de los repuestos desechados por mala calidad.	1
XII.5.8 No se tiene información precisa de los diferentes proveedores de cada repuesto.	1
XII.5.9 No se conocen los plazos de entrega de los repuestos por los proveedores.	1
XII.5.10 No se conocen los mínimos y máximos para cada tipo de repuesto.	1

ANEXO 2. Estrategia de implementación

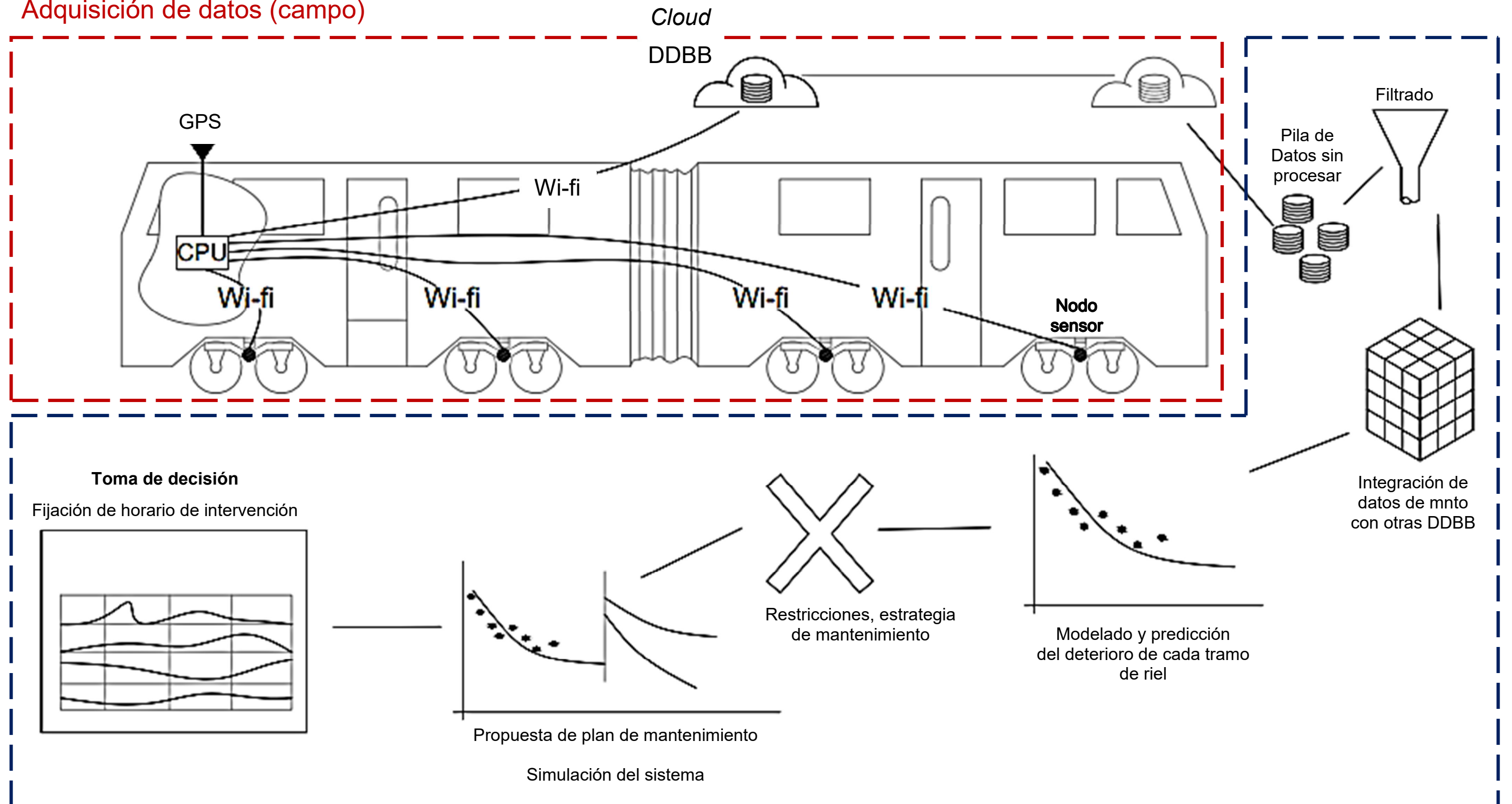
Cuadro de Mando Integral

Perspectiva	Objetivo	Indicador	Descripción	Fuente de información	Código	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Responsable	Meta final		
										Satisfactorio	Aceptable	Deficiente
Financiera	Optimizar el uso de recursos financieros asociados a las labores del mantenimiento de rieles, mediante la planificación de las intervenciones en función de la condición de los rieles	Costo de mantenimiento no planificado	Mesurar que tanto representa el mantenimiento no planificado en las labores	Historial de Intervenciones Costos	F1	$\frac{\text{Costo de mantenimiento no planificado}}{\text{Costo total de mantenimiento}} \times 100\%$	%	Bimestral	Depto. Vías Estructuras	<15%	16% - 20%	>20%
		Crecimiento de costo de mantenimiento por tramos	Seguimiento del comportamiento de los costos de cada tramo de vía	Historial de Intervenciones Costos	F2	$\frac{\text{Costo}_{\text{mnto anterior}} - \text{Costo}_{\text{mnto presente}}}{\text{Costo}_{\text{mnto anterior}}} \times 100\%$	%	Semestral	Depto. Vías Estructuras	<5%	6% - 10%	>10%
		Costo por viajes cancelados	Pesar la afectación por viajes cancelados por fallos/intervenciones en rieles	Historial de Intervenciones Costos Historial usuarios	F3	$\frac{\text{Total de perdidas por viajes cancelados}}{\text{Total de ingresos por viajes}} \times 100\%$	%	Mensual	Jefe de Transportes	0%	1% - 5%	>5%
Clientes	Garantizar la seguridad de los usuarios del tren mediante un adecuado mantenimiento de los rieles	Incidentes producto de fallas en rieles	Contabilizar el éxito de las acciones al minimizar los incidentes	Reporte de incidentes	C1	Cantidad de incidentes	Cantidad	Semanal	Depto. Vías Estructuras	0	1 - 3	>3
		Encuestas a usuarios	Opiniones para conocer el nivel de satisfacción de los clientes	Formularios digitales	C2	Calificación	%	Bimestral	Depto. Tec. Información	>85%	84% - 80%	<79%
Procesos Internos	Elaborar una estrategia apoyada en un sistema de monitoreo de estado de rieles para la planificación eficaz de las intervenciones de mantenimiento en los rieles	Razón de intervenciones planificadas	Porcentaje de actividades planeadas mediante CBM	Plan de acciones Historial de Intervenciones	P1	$\frac{\text{Cantidad de intervenciones planificadas}}{\text{Cantidad total de intervenciones}} \times 100\%$	%	Trimestre	Depto. Vías Estructuras	>90%	89% - 75%	<75%
		Horas invertidas en planificación	Conocer que tanto se trabaja en los conceptos de CBM	Reporte de actividades diarias	P2	Cantidad de horas	Cantidad	Trimestral	Depto. Vías Estructuras	<150	150 - 120	>120
		Cumplimiento de planificación del mantenimiento	Mesurar el éxito en la implementación de las Etapas	Auditorías Internas	P3	Evaluaciones por auditorías	%	Anual	Depto. Vías Estructuras	>90%	89% - 85%	<84%
Aprendizaje y conocimiento	Capacitación del personal encargado para una conveniente transición y aplicación de un nuevo modelo de mantenimiento basado en la tecnología de monitoreo de estado de rieles	Horas de capacitación al personal	Cantidad de horas en cursos/capacitaciones referentes a CBM	Reporte de Recursos Humanos	AA1	Moda de horas de capacitación	Horas	Semestre	Recursos Humanos	>150	150 - 100	<100
		Calificación de personal en capacitación	Exámenes en cursos o evaluaciones periódicas de competencias	Notas de exámenes por Recursos Humanos	AA2	Notas según exámenes	%	Semestre	Recursos Humanos	>85%	85% - 80%	<79%
	Promover la participación de la academia para la investigación y el desarrollo de tecnologías para la mejora continua en las labores de mantenimiento y otras áreas relacionadas	Investigaciones aportadas a departamentos de INCOFER	Cantidad de trabajos de investigaciones, pensado para academia (universidades, educación no formal)	Archivo	AB1	Número de investigaciones concluidas	Cantidad	Anual	Gerencia de Operaciones	>4	3-1	0
		Implementación de propuestas de desarrollo de tecnologías	Desarrollo de investigaciones teórica, en distintos sistemas para alcanzar CBM	Archivo Reporte de Actividades	AB2	Número de propuestas en fase de desarrollo	Cantidad	Anual	Gerencia de Operaciones	>2	1	0

Mapa estratégico para propuesta de migración a CBM

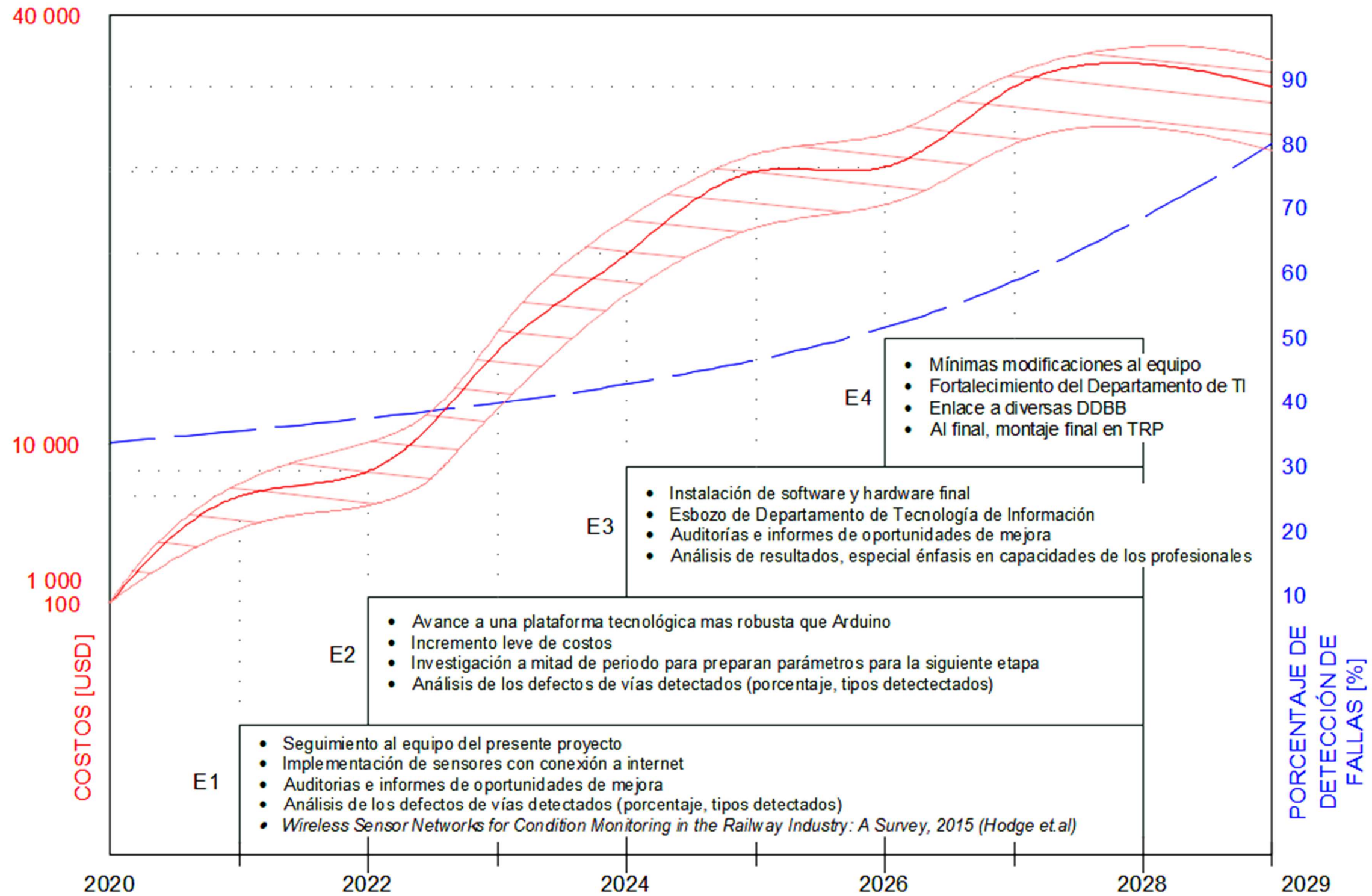


Adquisición de datos (campo)



Centro de Control (Oficinas INCOFER)

Etapas de implementación



Costos proyectados en las distintas etapas de implementación

Etapa	Año	Hardware			Software		Empleados	Total
		Inversión inicial	Mantenimiento	Operación	Inversión Inicial	Mantenimiento		
E0	2020	\$100.00	\$15.00	\$20.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$135.00
E1	2021	\$150.00	\$22.50	\$30.00	\$0.00	\$0.00	\$6,716.11	\$6,918.61
E2	2022	\$1,000.00	\$150.00	\$30.00	\$1,000.00	\$100.00	\$6,716.11	\$8,996.11
	2023	\$0.00	\$150.00	\$30.00	\$0.00	\$100.00	\$13,432.21	\$13,712.21
E3	2024	\$5,000.00	\$750.00	\$1,000.00	\$2,000.00	\$200.00	\$13,432.21	\$22,382.21
	2025	\$0.00	\$750.00	\$1,000.00	\$0.00	\$200.00	\$26,864.43	\$28,814.43
E4	2026	\$500.00	\$800.00	\$1,000.00	\$0.00	\$200.00	\$26,864.43	\$29,364.43
	2027	\$0.00	\$750.00	\$1,000.00	\$0.00	\$200.00	\$33,580.54	\$35,530.54

ANEXO 3. Prototipo

Código de programación empleado

```
1 //Librerías para el shield GPS
2 #include <SoftwareSerial.h>
3 #include <TinyGPS.h>
4
5 //Librerías para el modulo acelerometro
6 #include <MPU6050.h>
7 #include <Wire.h>
8
9 //Librerías para el modulo SD card
10 # include <SD.h>
11 # include <SPI.h>
12
13 //-----
14 //Declaraciones para el shield GPS
15 TinyGPS gps;
16 SoftwareSerial ss(4, 3);
17
18 //Declaraciones para el modulo acelerometro
19 MPU6050 acelerometro;
20
21 int16_t ax, ay, az;
22
23 #define OUTPUT_READABLE_ACCELGYRO
24
25 //Declaraciones para SD CARD
26 File archivo;
27
28 void setup() {
29 // put your setup code here, to run once:
30 //ACCELEROMETRO-----
31 Serial.begin(9600);
32
33 #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
34 Wire.begin();
35 #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
36 Fastwire::setup(400, true);
37 #endif
38
39 acelerometro.initialize();
40
41 //SHIELD GPS-----
42 ss.begin(4800);
43
44 //SD CARD-----
45 const int chipSelect = 10;
46 SD.begin(chipSelect);
47 archivo = SD.open("DATOS_MEDICIONES.txt", FILE_WRITE);
48
49 for (int i=1; i < 100; i++){
50 bool datosnuevos = false;
51 unsigned long chars;
52 unsigned short sentences, failed;
53
54 for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
55 {
56 while (ss.available())
57 {
58 char c = ss.read();
59 if (gps.encode(c))
60 datosnuevos = true;
61 }
62 }
63
64 if (datosnuevos)
65 {
66 float flat, flon, vel;
67 unsigned long age;
68
69 gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
```

```

70
71     archivo.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat,6);
72     archivo.print("\t");
73     archivo.print(flon == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon,6);
74     archivo.print("\t");
75     archivo.print(gps.f_speed_kmph());
76     archivo.print("\t");
77 }
78 //Modulo acelerometro-----
79 acelerometro.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
80 archivo.print(ax);
81 archivo.print("\t");
82 archivo.print(ay);
83 archivo.print("\t");
84 archivo.println(az);
85 }
86 archivo.close()
87
88 void loop() {
89     // put your main code here, to run repeatedly:
90     //SHIELD GPS-----
91     bool datosnuevos = false;
92     unsigned long chars;
93     unsigned short sentences, failed;
94
95     for (unsigned long start = millis(); millis() - start < 1000;)
96     {
97         while (ss.available())
98         {
99             char c = ss.read();
100             if (gps.encode(c))
101                 datosnuevos = true;
102         }
103     }
104
105     if (datosnuevos)
106     {
107         float flat, flon, vel;
108         unsigned long age;
109
110         gps.f_get_position(&flat, &flon, &age);
111
112         archivo.print(flat == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flat,6);
113         archivo.print("\t");
114         archivo.print(flon == TinyGPS::GPS_INVALID_F_ANGLE ? 0.0 : flon,6);
115         archivo.print("\t");
116         archivo.print(gps.f_speed_kmph());
117         archivo.print("\t");
118     }
119 //Modulo aceLerometro-----
120 acelerometro.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
121 archivo.print(ax);
122 archivo.print("\t");
123 archivo.print(ay);
124 archivo.print("\t");
125 archivo.println(az);
126 }

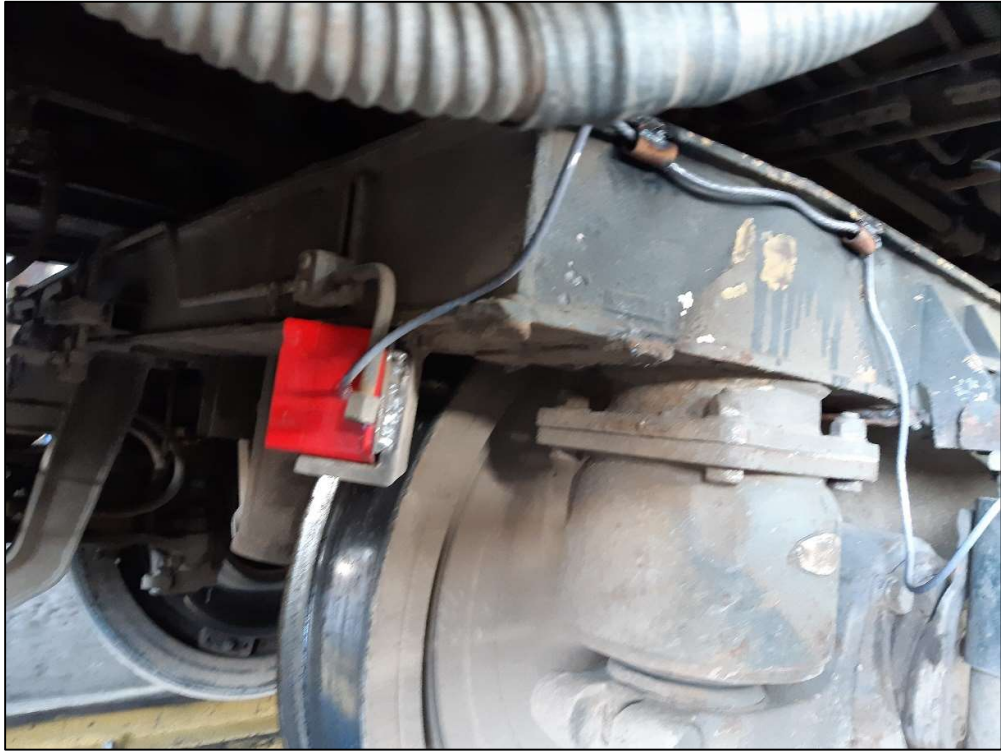
```

Fotografías de prototipo











ANEXO 4. Análisis técnico - financiero

Costos anuales de ABA y DAS (preliminares, solo salidas de efectivo)

ABA									
Año	Hardware			Software		Empleados	Total	Valor Actual	VAC (14%)
	Inversión inicial	Mantenimiento	Operación	Inversión Inicial	Mantenimiento				
2020	\$ 100.00	\$ 15.00	\$ 20.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 135.00	\$ 135.00	\$78,176.27
2021	\$ 150.00	\$ 22.50	\$ 30.00	\$ -	\$ -	\$ 6,716.11	\$ 6,918.61	\$ 5,442.06	
2022	\$ 1,000.00	\$ 150.00	\$ 30.00	\$ 1,000.00	\$ 100.00	\$ 6,716.11	\$ 8,996.11	\$ 16,049.71	CAUE
2023	\$ -	\$ 150.00	\$ 30.00	\$ -	\$ 100.00	\$ 13,432.21	\$ 13,712.21	\$ 29,761.93	\$18,230.11
2024	\$ 5,000.00	\$ 750.00	\$ 1,000.00	\$ 2,000.00	\$ 200.00	\$ 13,432.21	\$ 22,382.21	\$ 52,144.14	
2025	\$ -	\$ 750.00	\$ 1,000.00	\$ -	\$ 200.00	\$ 26,864.43	\$ 28,814.43	\$ 80,958.57	
2026	\$ 500.00	\$ 800.00	\$ 1,000.00	\$ -	\$ 200.00	\$ 26,864.43	\$ 29,364.43	\$110,323.00	
2027	\$ -	\$ 750.00	\$ 1,000.00	\$ -	\$ 200.00	\$ 33,580.54	\$ 35,530.54	\$145,853.54	

DAS									
Año	Hardware			Software		Empleados	Total	Valor Actual	VAC
	Inversión inicial	Mantenimiento	Operación	Inversión Inicial	Mantenimiento				
2020	\$ 11,200.00	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ 4,000.00	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 60,016.64	\$ 60,016.64	\$246,472.69
2021	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$86,076.21	
2022	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$115,543.88	CAUE
2023	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$141,167.94	\$35,210.38
2024	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$163,449.73	
2025	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$182,825.20	
2026	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$199,673.44	
2027	\$ -	\$ 1,680.00	\$ 2,240.00	\$ -	\$ 600.00	\$ 40,296.64	\$ 44,816.64	\$214,324.08	

Cálculos mediante AHP

Comparación de pares de criterios						
	E	T	II	C	M	V
E	1.000	2.000	5.000	0.500	2.000	4.000
T	0.500	1.000	6.000	0.500	1.000	2.000
II	0.200	0.167	1.000	0.111	0.111	0.200
C	2.000	2.000	9.000	1.000	4.000	1.000
M	0.500	1.000	9.000	0.250	1.000	3.000
V	0.250	0.500	5.000	1.000	0.333	1.000
Total	4.450	6.667	35.000	3.361	8.444	11.200

Cálculo de vector de prioridad para cada criterio								
	E	T	II	C	M	V	Total	Vector Prioridad
E	0.225	0.300	0.143	0.149	0.237	0.357	1.410	0.235
T	0.112	0.150	0.171	0.149	0.118	0.179	0.880	0.147
II	0.045	0.025	0.029	0.033	0.013	0.018	0.163	0.027
C	0.449	0.300	0.257	0.298	0.474	0.089	1.867	0.311
M	0.112	0.150	0.257	0.074	0.118	0.268	0.980	0.163
V	0.056	0.075	0.143	0.298	0.039	0.089	0.700	0.117

Cálculo de Radio de Consistencia (CR)	
CI	0.128
RI	1.240
CR	0.104

Cálculo de pesos para cada alternativa					
E		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	0.143	9.000	0.237
	ABA	7.000	1.000	9.000	0.711
	Actual	0.111	0.111	1.000	0.052

T		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	0.250	7.000	0.280
	ABA	4.000	1.000	7.000	0.654
	Actual	0.143	0.143	1.000	0.066

II		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	0.500	9.000	0.368
	ABA	2.000	1.000	9.000	0.579
	Actual	0.111	0.111	1.000	0.052

C		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	4.000	9.000	0.664
	ABA	0.250	1.000	9.000	0.284
	Actual	0.111	0.111	1.000	0.052

M		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	5.000	7.000	0.658
	ABA	0.200	1.000	9.000	0.281
	Actual	0.143	0.111	1.000	0.061

V		DAS	ABA	Actual	Promedio
	DAS	1.000	5.000	9.000	0.685
	ABA	0.200	1.000	9.000	0.263
	Actual	0.111	0.111	1.000	0.052

Cálculo del porcentaje de conveniencia de cada alternativa						
Criterio	Alternativa			Producto		
	DAS	ABA	Actual	DAS	ABA	Actual
E	0.237	0.711	0.052	0.0557	0.1672	0.0121
T	0.280	0.654	0.066	0.0411	0.0959	0.0096
II	0.368	0.579	0.052	0.0100	0.0157	0.0014
C	0.664	0.284	0.052	0.2065	0.0885	0.0162
M	0.658	0.281	0.061	0.1075	0.0458	0.0100
V	0.685	0.263	0.052	0.0799	0.0307	0.0061
Suma				50%	44%	6%

Apéndices

Frauscher Sensonic Unit Specification

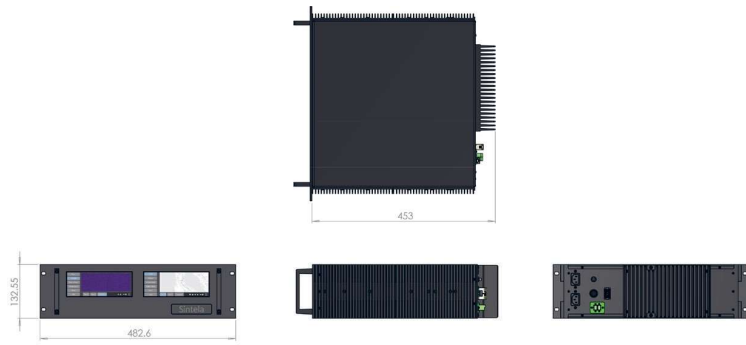
Frauscher Sensonic system represents the next step in the evolution of Distributed Fibre Sensing. It provides distributed acoustic data over long fibre lengths with a high detection sensitivity in a compact, low power unit.

Sensonic generates valuable real-time data on train journeys, asset and infrastructure condition – all based on a single technology and without the need for additional on-board or trackside components.

Functional specification

Number of Sensing Fibres	2		
Sensing range @ 6.5m gauge length	Up to 40 km per fibre (80 km in total)		
Standard operating wavelength	1550 nm		
Measurement type	Quantitative		
Acoustic Frequency Range	Min	<1mHz [Arbitrarilyselectable]	
	Max	Nyquist -> 10 kHz @ 5 km	Nyquist -> 1 kHz @ 50 km
Standard fibretypes	SMF-28e ITU-T G.652, G.654 or G.655		
Fibre attenuation for given specs	0.2 dB / km at 1550 nm		
Maximum acceptable loss budget	20 dB (e.g. 50 km x 2 x 0.2 dB / km)		
Maximum acceptable back reflection	< 2 %		
Laser Safety Class	Class 1 (IEC 60825-1, 21CFR1040.10)		





Processing capability

Built-in processing	GPU:	32 Terra OPS 512 core Volta with Tensor Cores
	CPU:	8 core ARM v8.2 64 bit
	Memory:	16GB 137 GB/s
	DLAccelerator:	2 x NVDLAEngines

Interfaces

Optical connectors		2 x E2000 APC
Data Interface	Electrical	SFP, 1GBASE-T, 100 m, Cat6 or 7 twisted pair
	Optical	SFP, 1000BASE-ZR, 100 km, single mode fiber

Data accessibility	Via USB-C 2 x 2 TB removable SSD
---------------------------	-------------------------------------

Power

Power supply	100-240 VAC at 50-60 Hz Dual redundant power supplies
---------------------	--

Power consumption	<100 W
--------------------------	--------

Size andWeight

Size	Format	19-inch 3U Enclosure
	Height x Width x Depth	132 mm x 483 mm x 453 mm

Weight	17kg
---------------	------

Environmental

Heat management	Passive cooling (for high reliability)
------------------------	--

Storage temperature range	-20 °C – 70 °C
----------------------------------	----------------

Operating temperature range	-5 °C – 50 °C
------------------------------------	---------------

Operating humidity (max)	85% non-condensing
---------------------------------	--------------------

Ingress Protection	IP50 [Protected against dust]
---------------------------	-------------------------------

Revolution in Railway Operations

Frauscher Group at a glance

MORE than

30 years

of successful
Wheel Sensor and ACS R&D

200,000

DP's in operation

>30

FOS installations



25,000

DP's implemented per year

Main Lines
Urban & mass Transit
Industrial & Mining



Business Volume

100 MioEuro

Installed in

80+

countries

13

locations



Employees

470

worldwide

65

in Sensoric



FOS in Frauscher

2011

- First contact with FOS at WDF

2014

- Decision to build new business unit focusing on FOS

2017

- Add rail specific logic and algorithms to existing Technology
- Develop unique Rail FOS platform based on a new generation (true phase)

2019

- Frauscher joins Delachaux
- Spin off of Frauscher Sensoric

2012-
2013

- Investigation and comparison of various technologies

2016

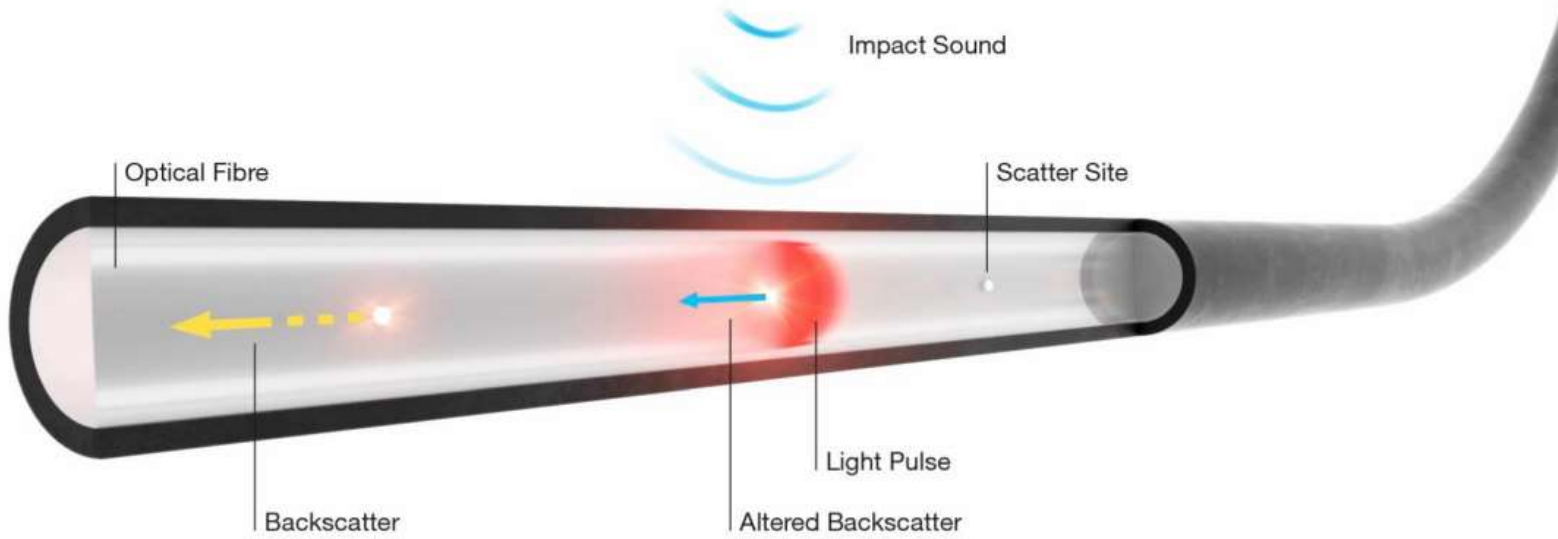
- Frauscher Tracking Solutions (FTS) launch at InnoTrans

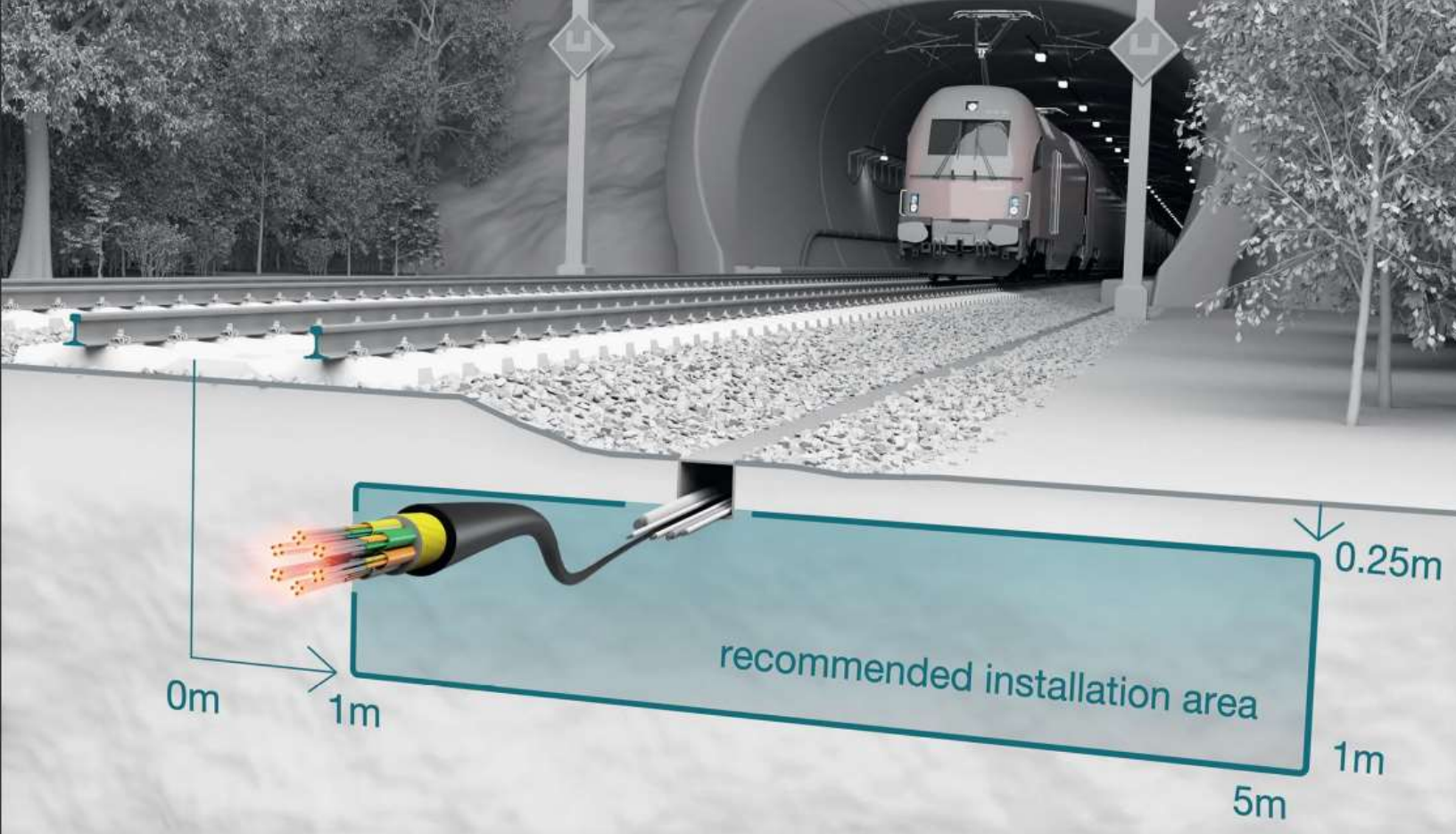
2018

- >25 installations worldwide
- First commercial contracts
- Evaluation of Next Generation Sensor

2020

- First quantitative rail specific FOS solution

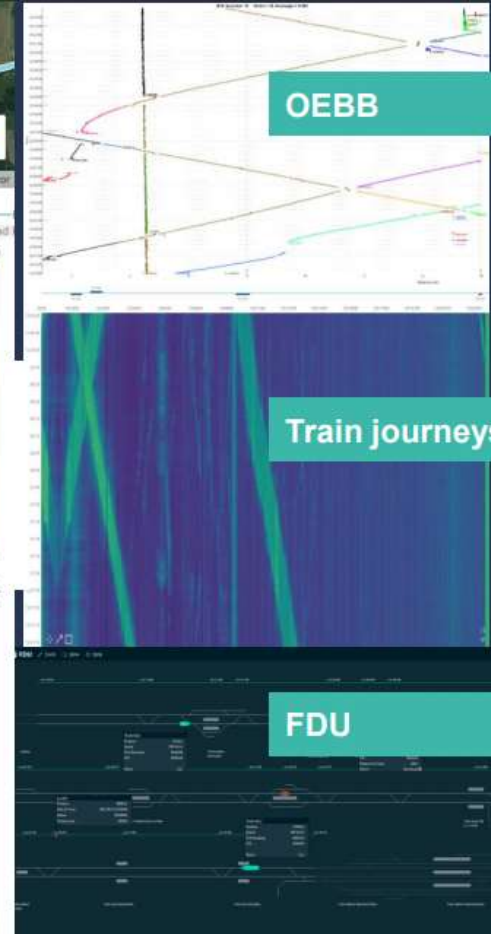
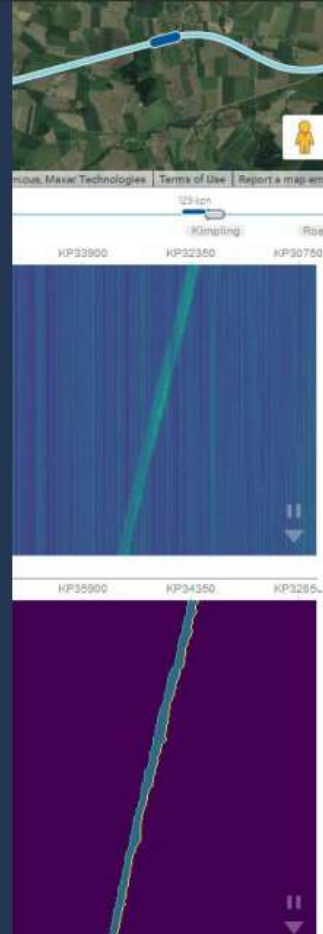




Sensonic Train Tracking

Current status

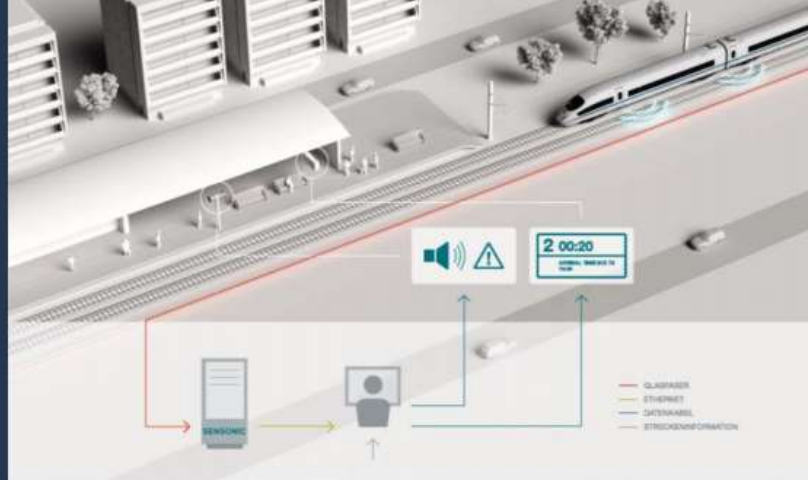
- Train Tracker works
 - Based on machine learning
 - Requires no tuning phase
 - Large feature pool with additional functionalities e.g. Track selectivity, axle pattern
- Train Tracker Quality (< 8 m accuracy on 95% of track, rest no adequate fibre laying)
- Integration
 - Fully connected with HMI
 - Integrated at 3 customer sites
 - Interface to match customer Train IDs



Sensonic Train Tracking – Use Cases

Non-Vital with current Technology

- Train location in 'dark' territories
- Accurate location in large block sections.
- Time of arrival – e.g. announcements
- Supplementary warning systems
- Information for planning/timetabling
- Traffic Management
- Train speed monitoring & profiling
- An Enabler for other applications



Many Operators see the potential for DAS to integrate into new digital train detection & traffic management systems.

A few selected operators already make extensive use of the **DAS information**.

Sensonic CTM

Current status

- Notify changes on track in real time
- Relative approach
- Global threshold and robust results
- Mission critical information
- Real-time Track Defect Detector working in several installations

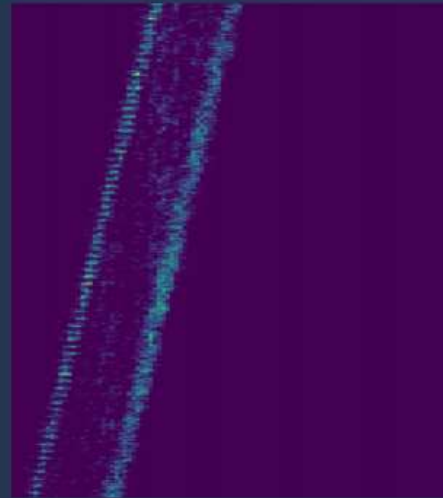
The screenshot displays the Sensonic CTM interface. At the top, a map shows a track with a yellow diamond marker indicating a detected defect. Below the map is a spectrogram showing track condition data over time, with a yellow diamond marker on a bright green line. On the right, an 'Event Detail' panel is open, showing the following information:

Track condition change	
Event Type	Track condition change
Comment	
Severity	Medium
Detector	/changeDetector
Description	A sever change was detected in the infrastruc
First Detected	29/10/2020, 15:37:09
Last Detected	29/10/2020, 15:37:09
Channel	1,612
Custom Scale	KP745.420
Speed	Speed
Coordinate	25.167112, 82.480338

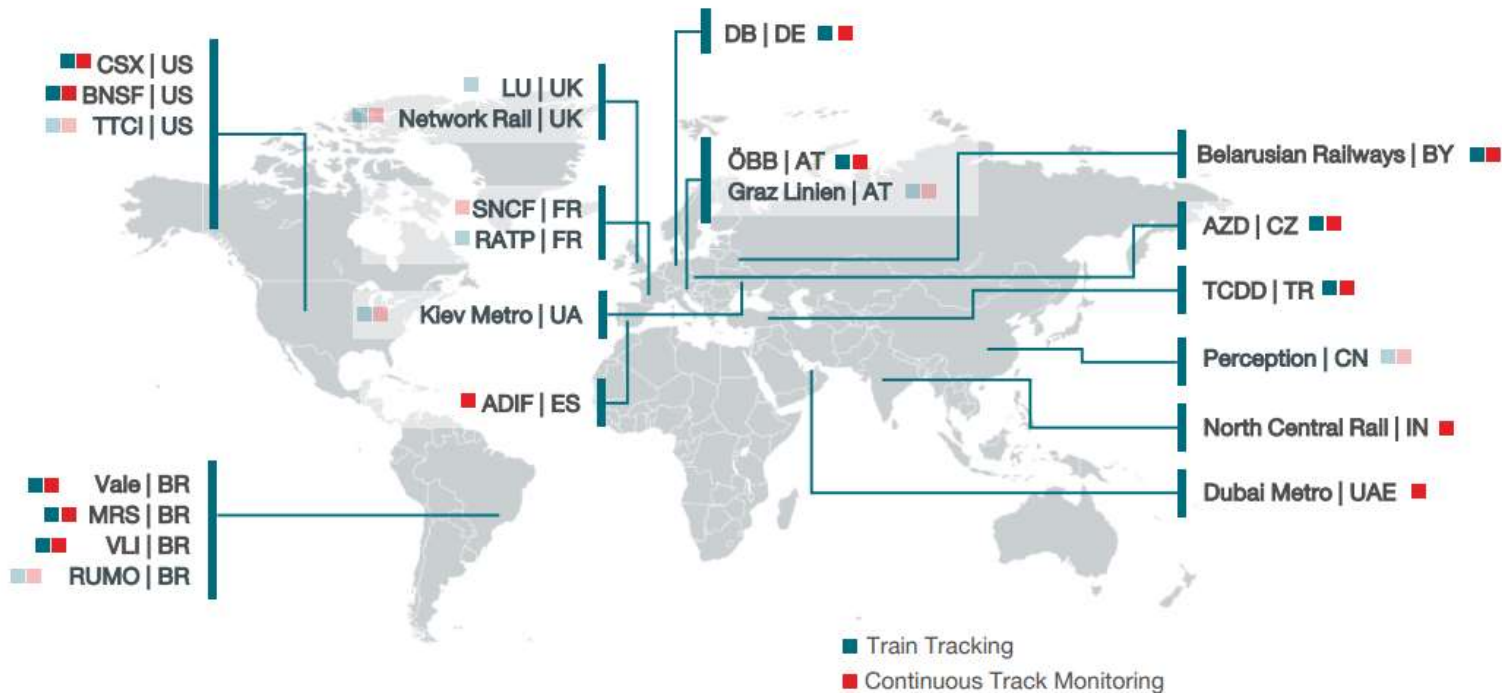
Continuous Wheel Monitoring

Current Status

- Built infrastructure to train and test model
- Basic Wheel Flat detector tested in real time
- Trains with large defects are detected
- Solution works real-time
- Real-time Wheel Defect Detector working in several installations



Global Footprint



Roadmap

technical performance

2016

2019

2021

FTS

SENSONIC

Tech

Qualitative
DAS

Quantitative
DAS

DFS

Solutions

25 PoC

18 operators

13 countries

12 applications

Selected
partnerships

TTR

CTM

CWM

MVP (Minimum Viable
Product)

TTR

CTM

CWM

Security

Platform with
Various apps
based on next
gen of sensor

TTR: Train Tracking, CTM: Continuous Track Monitoring, CWM: Continuous Wheel Monitoring, DFS: Distributed Fibre Sensing