



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ESTUDIO Y PROPUESTA DE HERRAMIENTAS PARA EL MONITOREO DE CONDICIÓN DE CAJAS DE GRASA EN BOGIES DE LOCOMOTORAS

TRABAJO FINAL DEL:

Máster Universitario en Ingeniería del Mantenimiento

REALIZADO POR:

D. Ricardo Benítez Cortés

TUTORIZADO POR:

Dr. D. Javier Carballeira Morado

FECHA: Valencia, diciembre, 2019

Contenido

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 MOTIVACIÓN..... | 1 |
| 1.2 OBJETIVOS | 1 |
| 1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO | 2 |
| 2. ANTECEDENTES | 3 |
| 2.1 ESTADÍSTICAS DE DESCARRILAMIENTOS CAUSADOS POR FALLOS EN LAS CAJAS DE GRASA DE LOS BOGIES..... | 3 |
| 2.2 COMPONENTES DEL BOGIE LA LOCOMOTORA..... | 7 |
| 2.2.1 Eje montado | 8 |
| 2.2.2 Cajas de grasa | 9 |
| 2.2.3 Transmisión motor de Tracción - Reductor | 9 |
| 2.2.4 Motores de tracción. | 10 |
| 2.2.5 Sensores utilizados actualmente en las ruedas de los bogies de la locomotora.. | 10 |
| 2.2.6 Monitorización de los datos de telemetría | 11 |
| 2.3 HERRAMIENTAS DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN LAS CAJAS DE GRASA DE LOS BOGIES | 12 |
| 2.3.1 Adquisición de datos..... | 13 |
| 2.3.2 Procesamiento de datos: técnicas de aislamiento y detección de fallos..... | 14 |
| 2.3.3 Técnicas de monitoreo de condición..... | 14 |
| 2.4 APLICACIONES COMERCIALES DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN CAJAS DE GRASA DE BOGIES | 17 |
| 2.5 APLICACIONES DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN LÍNEA EN OTROS SECTORES INDUSTRIALES..... | 17 |
| 3. METODOLOGÍA | 19 |
| 3.1 ESTABLECER EL/LOS OBJETIVOS DEL PLAN DE MANTENIMIENTO | 19 |
| 3.2 RECOLECTAR INFORMACIÓN SOBRE EL COMPONENTE | 19 |
| 3.3 CALCULAR LA TASA DE FALLOS DEL COMPONENTE | 19 |
| 3.4 EVALUAR AMFE Y AAF DEL COMPONENTE..... | 24 |
| 3.5 CALCULAR EL COSTE ECONÓMICO DEL FALLO..... | 24 |
| 3.6 DESARROLLO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO | 25 |
| 3.7 IDENTIFICAR LOS PUNTOS DE INSPECCIÓN..... | 25 |
| 3.8 DETERMINAR LOS SÍNTOMAS A INSPECCIONAR | 25 |
| 3.9 FRECUENCIAS DE FALLO A EVALUAR | 27 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.10 | ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 28 |
| 3.10.1 | Información a guardar por cada medición..... | 28 |
| 3.10.2 | Selección de sensores..... | 30 |
| 3.10.3 | Instalación de sensores..... | 30 |
| 3.10.4 | Transmisión de señales..... | 31 |
| 3.11 | ANÁLISIS DE SEÑAL..... | 31 |
| 3.11.1 | Análisis de datos..... | 31 |
| 3.11.2 | Configuración de alarmas..... | 31 |
| 3.11.3 | Tratamiento digital de la señal de emisiones acústicas y vibración..... | 32 |
| 3.11.4 | Técnicas basadas en la detección de impactos..... | 35 |
| 3.15 | CONTENIDO DE INFORMES A ENTREGAR..... | 35 |
| 3.16 | PLAN DE ACCIONES CORRECTIVAS..... | 37 |
| 3.17 | RETROALIMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS..... | 37 |
| 4. | RESULTADOS..... | 39 |
| 4.1 | ESTABLECER EL/LOS OBJETIVOS DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO..... | 39 |
| 4.2 | DATOS TÉCNICOS DE LA LOCOMOTORA-CASO DE ESTUDIO..... | 39 |
| 4.3 | CALCULAR LA TASA DE FALLOS DEL COMPONENTE..... | 41 |
| 4.4 | RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN AMFE..... | 46 |
| 4.5 | ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLOS..... | 46 |
| 4.6 | CALCULAR EL COSTE ECONÓMICO DEL FALLO..... | 46 |
| 4.7 | PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO..... | 48 |
| 4.8 | PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO..... | 48 |
| 4.9 | IDENTIFICAR LOS PUNTOS DE INSPECCIÓN..... | 48 |
| 4.10 | DETERMINAR LOS SÍNTOMAS A INSPECCIONAR..... | 52 |
| 4.11 | CALCULO DE FRECUENCIAS DE FALLO EN LOS RODAMIENTOS DE LAS CAJAS DE GRASA..... | 53 |
| 4.12 | ADQUISICIÓN DE DATOS..... | 54 |
| 4.12.1 | Información a guardar por cada medición..... | 54 |
| 4.12.2 | Selección de sensores..... | 54 |
| 4.12.3 | Instalación de sensores..... | 58 |
| 4.12.4 | Transmisión de señales..... | 59 |
| 4.13 | ANÁLISIS DE SEÑAL..... | 60 |
| 4.13.1 | Análisis de datos..... | 60 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.13.2 | Configuración de alarmas..... | 62 |
| 4.14 | INFORMES A ENTREGAR..... | 64 |
| 4.15 | ANÁLISIS ECONÓMICO | 66 |
| 4.15.1 | Costo inversión inicial | 66 |
| 4.15.2 | Costo del plan de mantenimiento preventivo | 67 |
| 4.15.3 | Costo del plan de mantenimiento predictivo | 68 |
| 4.15.4 | Costo económico del fallo..... | 69 |
| 5. | CONCLUSIONES | 70 |
| 5.1 | TRABAJO A FUTURO | 72 |
| 6. | BIBLIOGRAFÍA | 73 |
| 7. | ANEXOS | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Número de damnificados reportado en accidentes en India entre 2006-2017(Kundu, Darpe, & Singh, 2018) | 3 |
| Figura 2 Accidentes ferroviarios considerados en el proyecto D-RAIL FP7 por causas(Kundu et al., 2018)..... | 4 |
| Figura 3 Descarrilamientos en principales vías férreas canadienses por causas reportadas (Kundu et al., 2018) | 5 |
| Figura 4. Porcentajes de accidentes ferroviarios por tipo en India (Kundu et al., 2018) | 6 |
| Figura 5 Bogie de una locomotora (Rodriguez, 2006)..... | 7 |
| Figura 6 Bogie tipo Co' Co' (Technical, n.d.)..... | 7 |
| Figura 7 Montaje eje tracción..... | 8 |
| Figura 8 Caja de grasa para locomotora (Schaeffler, n.d.)..... | 9 |
| Figura 9 reductor sistema de tracción (Technical, n.d.)..... | 10 |
| Figura 10 Distribución de sensores en bogies..... | 11 |
| Figura 11 Sistema de Unidad de Control del Vehículo (EKE electronics, n.d.-b)..... | 12 |
| Figura 12 Distribución de averías en cajas de grasa de vagones de carga de la compañía Lithuanian Railway (Lunys et al., 2015)..... | 16 |
| Figura 13 Factor axial dinámico (SKF, 2012)..... | 20 |
| Figura 14 Factor dinámico de tracción (SKF, 2012)..... | 20 |
| Figura 15 Factor radial dinámico (SKF, 2012)..... | 20 |
| Figura 16 Factor de carga útil (SKF, 2012)..... | 20 |
| Figura 17 Caja de grasa soportado simétricamente(SKf, 2012)..... | 21 |
| Figura 18 Factor a_{iso} para rodamientos radiales de rodillos (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018) | 23 |
| Figura 19 Diagrama de componentes a inspeccionar por cada herramienta de monitoreo ... | 26 |
| Figura 20 Componentes del rodamiento de una locomotora (Gerdun, Sedmak, Šinkovec, Kovše, & Cene, 2007)..... | 28 |
| Figura 21 Tipo de montaje de los acelerómetros | 30 |
| Figura 22 Señal temporal y digitalizada (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018) | 33 |
| Figura 23 Efecto de aliasing (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)..... | 34 |
| Figura 24 Factor axial dinámico (SKF, 2012)..... | 41 |
| Figura 25 Factor dinámico de tracción (SKF, 2012)..... | 41 |
| Figura 26 Factor radial dinámico (SKF, 2012)..... | 41 |
| Figura 27 Factor de carga útil (SKF, 2012)..... | 41 |
| Figura 28 Caja de grasa soportado simétricamente (SKF, 2012)..... | 42 |
| Figura 29 Factor a_{iso} para rodamientos radiales de rodillos (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018) | 45 |
| Figura 30 Esquema cinemático de la ubicación de los puntos de inspección en el sistema de tracción..... | 48 |
| Figura 31 Acelerómetro y temperatura Wi-care 130..... | 55 |
| Figura 32 Acelerómetro y sensor de temperatura AC207-1D (CTConline, n.d.-b)..... | 57 |
| Figura 33 Sensor de ultrasonido Wi-CARE 150 (UE system Ultra-Trak 750) (“Wi-care 150,” n.d.) | 58 |
| Figura 34 Esquema de ubicación de sensores en la caja de grasa..... | 58 |
| Figura 35 Montaje de almohadilla aislada para sensores(CTConline, n.d.-a)..... | 59 |
| Figura 36 Protector de sensor(CTConline, n.d.-a)..... | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 37 Espectro de vibración tipo software I-SEE (I-care, n.d.) | 61 |
| Figura 38 Grafica de cascada obtenida por el software I-SEE (I-care, n.d.)..... | 61 |
| Figura 39 Parámetros de aceleración en la dirección vertical, RMS(x) vs tiempo. Muestra relacion del reemplazo del rodamiento con fallo potencial. (Symonds et al., 2015)..... | 63 |
| Figura 40 Daño en pista externa del rodamiento encontrado después del desmontaje del rodamiento detectado por las mediciones de vibración mostradas en la Figura 39 (Symonds et al., 2015)..... | 64 |
| Figura 41 Coste anual del mantenimiento preventivo..... | 67 |
| Figura 42 Coste acumulado del mantenimiento preventivo..... | 67 |
| Figura 43 Coste anual del mantenimiento predictivo..... | 68 |
| Figura 44 Coste acumulado del mantenimiento predictivo | 68 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Elementos rodantes relacionados con accidentes en el proyecto por causas D-RAIL FP7 (Kundu et al., 2018)..... | 6 |
| Tabla 2 Accidentes relacionados con el material rodante en Irán entre 2001-2004 (Kundu et al., 2018)..... | 6 |
| Tabla 3 Factor de fiabilidad a_1 (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)..... | 22 |
| Tabla 4 Factor de contaminación (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)..... | 23 |
| Tabla 5 Nivel de criticidad del informe | 37 |
| Tabla 6 Características generales de la locomotora | 39 |
| Tabla 7 Características generales del rodamiento | 40 |
| Tabla 8 Características técnicas de la caja de engranes | 40 |
| <i>Tabla 9 Características técnicas del motor eléctrico de tracción</i> | 40 |
| Tabla 10 Factor de fiabilidad a_1 (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)..... | 43 |
| Tabla 11 Factor de contaminación (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)..... | 44 |
| Tabla 12 Valores de vida corregida en km..... | 45 |
| Tabla 13 Causas de descarrilamiento por categorías de elementos rodantes: parte del número de descarrilamientos como un porcentaje, y costo promedio por descarrilamiento. (Schöbel et al., 2013)..... | 46 |
| Tabla 14 Calculo de frecuencias de fallo a velocidad promedio constante de 70 km/h de los rodamientos de las cajas de grasa..... | 53 |
| Tabla 15 Calculo de frecuencias de fallo a velocidad máxima constante de 120 km/h en los rodamientos de las cajas de grasa..... | 53 |
| Tabla 16 Descripción técnica acelerómetro y temperatura Wi-care 130("Wi-Care 130," n.d.)55 | |
| Tabla 17 Características técnicas del acelerómetro y temperatura AC207-1D..... | 56 |
| Tabla 18 Sensor de ultrasonido Wi-care 150 | 57 |
| Tabla 19 Costo de inversión del sistema de monitoreo de condición | 66 |
| Tabla 20 resumen de coste económico del fallo (<i>Schöbel et al., 2013</i>)..... | 69 |

Tabla de Anexos

| | |
|--|------------|
| Anexo 1. Análisis AMFE para el rodamiento de los bogies de la locomotora..... | 77 |
| Anexo 2. Análisis de árbol de fallos | 97 |
| Anexo 3. Plan de mantenimiento preventivo para el sistema de tracción de un bogies con monitoreo de condición | 98 |
| Anexo 4. Plan de mantenimiento predictivo para el sistema de tracción de un bogie con monitoreo de condición. | 101 |

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de recibir nuevos conocimientos y haber vivido esta experiencia.

Agradezco a mi esposa por apoyarme con su amor incondicional y ser mi coequipera de sueños.

Agradezco a nuestra familia que a la distancia nos alientan a seguir luchando por nuestros sueños.

Agradezco a mi tutor por haberme guiado durante este trabajo, por haber compartido el tiempo y el conocimiento para llevar a cabo este trabajo.

Agradezco a los profesores por haber compartido todo su conocimiento y experiencia durante las clases impartidas.

Agradezco a la Universitat Politècnica de València la oportunidad de haberme aceptado en el master y por brindarnos este espacio invaluable de desarrollo profesional.

Agradezco a mis compañeros de clases por apoyarme y compartir a mi lado esta experiencia.

RESUMEN

En la industria ferroviaria existe la necesidad de monitorear variables físicas que indiquen la condición de los rodamientos en los bogies, disminuyendo la probabilidad de un fallo inesperado en los rodamientos que causen pérdidas humanas, materiales, económicas, de reputación para el fabricante, el operario y la percepción del usuario final.

El estudio sobre las principales causas del descarrilamiento de locomotoras y sus efectos, ha impulsado a la publicación de artículos e investigaciones referentes a herramientas de monitoreo de la condición de diversas variables físicas generadas por el funcionamiento de las locomotoras. Así como la publicación de normativas internacionales que buscan estandarizar técnicas y metodologías en el ámbito del mantenimiento predictivo y preventivo.

En este trabajo se presenta una alternativa de herramientas de monitoreo de condición por vibración, ruido y temperatura de los rodamientos ubicados en las cajas de grasa, con el cual se podría detectar condiciones anormales que causan el descarrilamiento de las locomotoras.

Palabras clave: Industria 4.0, Mantenimiento Basado en Condición (CBM), Predictivo, Locomotora, vehículo inteligente.

ABSTRACT

In the railway industry there is a need to monitor physical variables that indicate the condition of the bearings in the bogies, reducing the probability of an unexpected failure in the bearings that cause human, material, economic, reputational losses for the manufacturer, the operator and the perception of the end user.

The study about the main causes of derailment of locomotives and their effects, has driven the publication of articles and research concerning to tools for monitoring the condition of various physical variables generated by the operation of the locomotives. As well as the publication of international regulations that seek to standardize techniques and methodologies in the field of predictive and preventive maintenance.

This work presents an alternative of monitoring tools for vibration condition, noise and temperature of the bearings located in the grease boxes, which could detect abnormal conditions that cause the derailment of the locomotives.

Key words: Industry 4.0, Condition Based Maintenance (CBM), Predictive, Locomotive, intelligent vehicle

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Cuando llegue al aeropuerto de Madrid en el vuelo procedente de Cali (Colombia), tomamos la conexión del AVE para llegar a Valencia e iniciar el Master de Ingeniería del Mantenimiento en la Universitat Politècnica de València. De acuerdo a mi experiencia profesional en el campo del mantenimiento predictivo en industria, al observar la velocidad del tren AVE, aproximadamente de 300 km/h, me surgieron varias inquietudes, entre ellas:

- ¿Qué tipo de rodamiento soportara las ruedas del bogie?
- ¿Cómo monitorizarán la condición de los rodamientos?
- ¿Será viable monitorizar remotamente la condición de los rodamientos utilizando herramientas de medición de ruido, vibración y temperatura al mismo tiempo?

Las respuestas a estas preguntas me han motivado para desarrollar este Trabajo Final de Master.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es proponer una aplicación de monitoreo de condición en las cajas de grasa en bogies de locomotora. Para el desarrollo se tienen como objetivos específicos los siguientes:

- Exponer los resultados del estudio realizado sobre la influencia del fallo de los rodamientos en el descarrilamiento de los trenes.
- Investigar la viabilidad de monitorear la condición de los rodamientos utilizando las herramientas de análisis de vibración, ruido y temperatura.
- Realizar un Análisis de Modo de Fallo, Efectos y Causas, y un Análisis de Árbol de Fallos del rodamiento para una caja de grasa monitorizada.
- Evaluar la viabilidad económica de implementar la aplicación de monitoreo de condición propuesta.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En el primer capítulo se desarrollan los antecedentes, en los cuales se expone las estadísticas de vehículos ferroviarios descarrilados, las causas potenciales y los costos para la sociedad. A partir de esta información se expone los principales componentes del bogie enfocándose en el sistema de tracción, los sensores genéricos instalados en los bogies de locomotoras, la estructura de monitorización de datos y cómo funciona el sistema de telemetría, los tipos de herramientas de monitoreo de condición desarrollados para cajas de grasa en bogies. Se realizó una búsqueda de la oferta comercial de equipos de monitoreo de condición para cajas de grasa que se pueden encontrar actualmente en el mercado, y para otros sectores industriales.

En el segundo capítulo se expone la metodología propuesta para el monitoreo de condición de las cajas de grasas de locomotoras, referenciando el paso a paso de la implementación. Se presenta una jerarquización de síntomas a inspeccionar por cada herramienta de monitoreo de condición.

En el tercer capítulo se presenta la propuesta de implementación abordando los resultados de los cálculos de frecuencia de un rodamiento utilizado para un bogie de una locomotora. De acuerdo al cálculo de frecuencias de los componentes del rodamiento se seleccionan los posibles sensores a utilizar, teniendo en cuenta la oferta comercial. Se evaluaron las posibles técnicas de monitoreo disponibles en el mercado. Se realizó el cálculo teórico de la tasa de fallo para el rodamiento, el Análisis de Modos de Fallo, Efecto y Causa (AMFEC), el Análisis de Árbol de Fallos (AAF) para un rodamiento.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones del trabajo y propuestas de trabajo a futuro.

2. ANTECEDENTES

2.1 ESTADÍSTICAS DE DESCARRILAMIENTOS CAUSADOS POR FALLOS EN LAS CAJAS DE GRASA DE LOS BOGIES

La industria ferroviaria es la red de medio de transportes masivos más larga que el hombre ha desarrollado y juega un rol vital en el crecimiento económico de cualquier país. Con el tiempo el transporte ferroviario está siendo más utilizado. De acuerdo a la norma UNE-EN 15437-2:2012 “Los rodamientos de las ruedas del material rodante que presenten anomalías generan un peligro para la operación segura de la vía férrea. Si un rodamiento falla cuando el material rodante está en servicio, existe la posibilidad de una situación catastrófica. Una situación catastrófica puede provocar víctimas, graves daños al material rodante y/o la infraestructura y el riesgo de que el material rodante pueda descarrilar y/o que se pueda producir un incendio.”(UNE-EN 15437-2, 2013)

Recientes reportes de seguridad muestran que la seguridad en la industria ferroviaria es un tema muy importante en la las políticas de los países usuarios. De acuerdo al reporte del ministro de vías férreas del gobierno de India, en el 2011, el descarrilamiento del tren de Kalka causó la muerte de 71 pasajeros y 264 pasajeros heridos. La Figura 1 muestra el número de damnificados entre los años 2006 – 2017 reportados en India causados por accidentes en vías férreas.

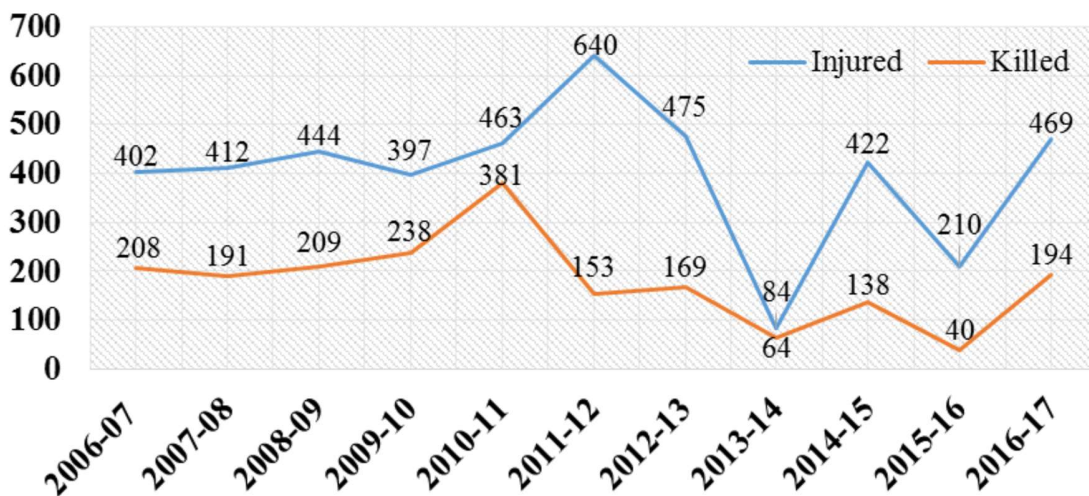


Figura 1 Número de damnificados reportado en accidentes en India entre 2006-2017(Kundu, Darpe, & Singh, 2018)

Globalmente, los vehículos férreos han seguido las instrucciones indicadas en el plan de mantenimiento preventivo: el equipo es intervenido durante intervalos de tiempo preestablecidos independientemente de la condición de los componentes. Generalmente, inspecciones basadas en Ensayos No Destructivos (END) son realizadas a través del tiempo de funcionamiento, las cuales son de muy costosas, poco eficientes por el tiempo de paro de la máquina y dispendiosas. En algunas ocasiones no se ha detectado el defecto el cual podría

causar fallos catastróficos. Otro inconveniente mayor es que el tren debe estar estacionario durante la inspección. Hoy en día, el Mantenimiento Basado en Condición (CBM) es preferido por brindar la posibilidad de obtener mediciones durante el servicio y en tiempo real de los componentes del vehículo ferroviario. Con esta tecnología, los fallos potenciales pueden ser detectados mientras el vehículo se encuentre en servicio. Este procedimiento hace que el mantenimiento sea más rápido e incremente la disponibilidad del número de vagones y coches para la operación del día a día. Con estas tecnologías se puede identificar los defectos de los componentes, que de otra manera sería encontrado durante las inspecciones programadas de acuerdo al plan de mantenimiento preventivo y predictivo establecido por cada vehículo. Por ejemplo, la empresa ferroviaria South-Eastern reemplazo 160 rodamientos debido al reporte de ruidos sobre el periodo de 2011-2013, mientras su expectativa de vida de servicio no había expirado. Esto muestra la importancia del Mantenimiento Basado en Condición en vehículos ferroviarios donde el fallo potencial fue detectado en una etapa temprana y fue reparado en la oportunidad más temprana.

Muchos tipos de fallos podrían darse durante el servicio del vehículo ferroviario, pero pocos de ellos solamente afectan la operación del tren. La figura 2 muestra el número de accidentes reportados a través de 23 países en los últimos años. La información muestra que el 37% de los accidentes son por causa del material rodante ferroviario. De este 37% de accidentes, casi el 60% son por causa de fallos del conjunto de ruedas del sistema de tracción.

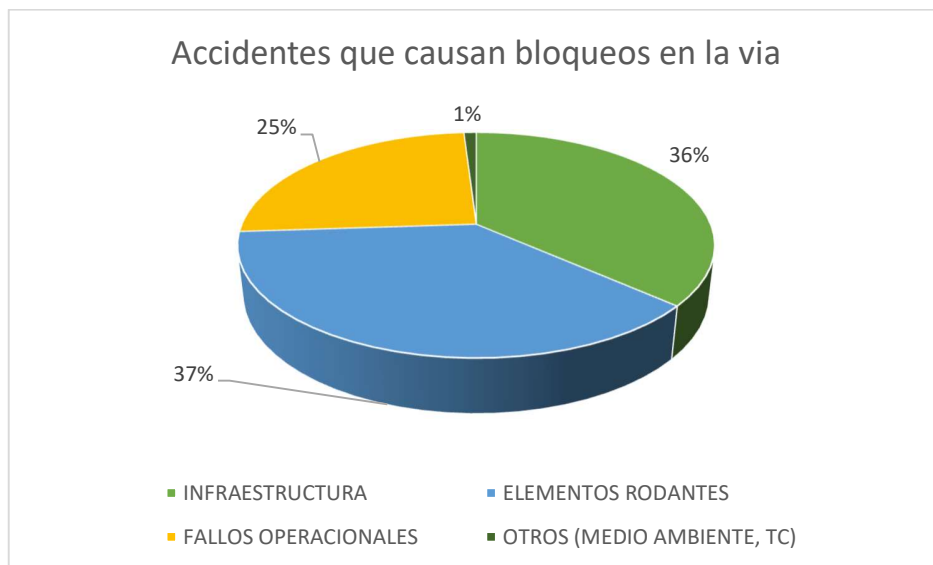


Figura 2 Accidentes ferroviarios considerados en el proyecto D-RAIL FP7 por causas (Kundu et al., 2018)

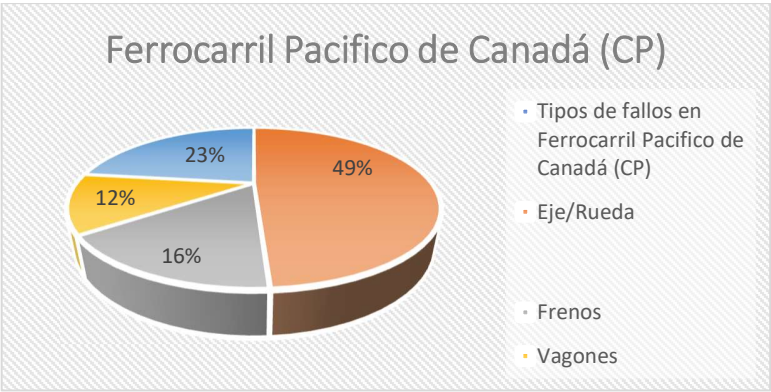
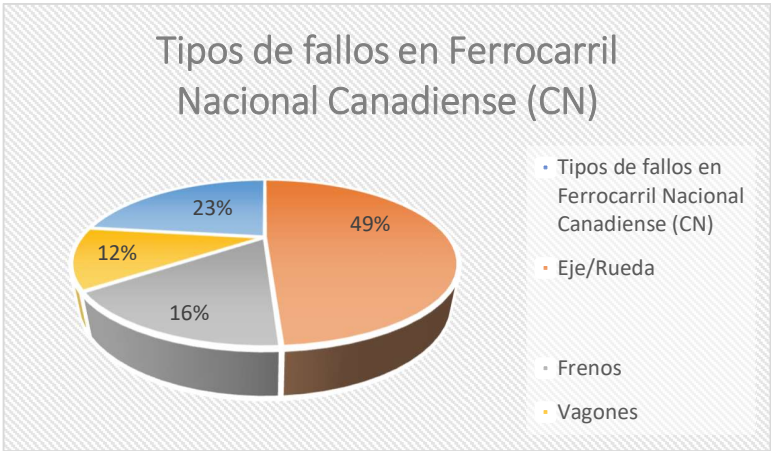
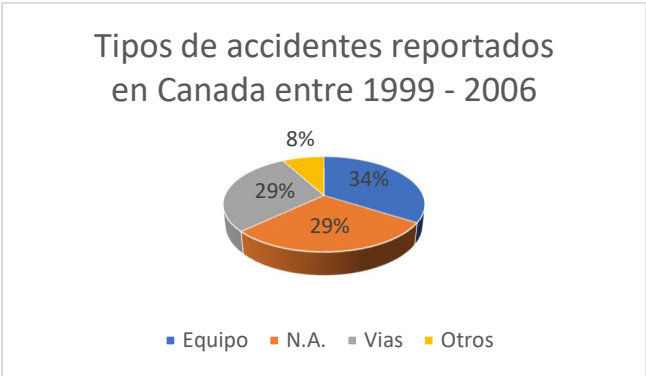


Figura 3 Descarrilamientos en principales vías férreas canadienses por causas reportadas (Kundu et al., 2018)

La figura 3 muestra el número de accidentes reportados en Canadá entre 1999 – 2006. La mayoría de fallos son causados por el eje/rueda (49% del 34% fallos de equipos en todo el Ferrocarril Nacional Canadiense (CN), y 54% del 34% fallos de equipos en todo el Ferrocarril Pacifico de Canadá (CP)). La figura 4 muestra los números de fallos en el Ferrocarril de la India en el periodo del 2009 – 2014. Los elementos rodantes tienen un mayor impacto en las operaciones del tren y son responsables por más del 35% del total de fallos en el tren. En Irán, el 76.34% de los fallos del equipo ferroviario se encontró debido a los fallos del juego de ruedas

basado en los datos del historial de fallos de 2001-2004 proporcionados por la compañía de trenes Raja de Irán.

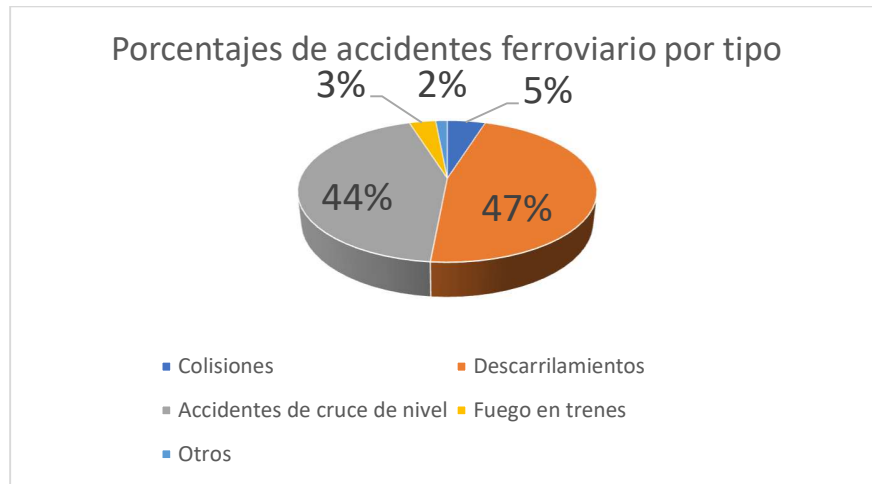


Figura 4. Porcentajes de accidentes ferroviarios por tipo en India (Kundu et al., 2018)

La tabla 1 muestra los fallos relacionados con elementos rodantes reportados a través de 23 países en los últimos años. Las ruedas corresponden al 19% de fallos mientras que el 41% son causados por fallos en los ejes en el cual la mayoría son causados debidos a rodamientos.

| TIPO DE FALLO | FRECUENCIA DE FALLO |
|----------------------------------|---------------------|
| Ejes | 41,00% |
| Ruedas | 19,00% |
| Suspensión de bogie y estructura | 22,00% |
| Otros y desconocidos | 18,00% |

Tabla 1 Elementos rodantes relacionados con accidentes en el proyecto por causas D-RAIL FP7 (Kundu et al., 2018)

La tabla 2 muestra los datos de fallos en elementos rodantes en el periodo del 2001-2004 dado por la compañía de trenes Raja de Irán. En Irán ha sido reportados el 40.70% de fallos por causa de rodamientos y el 19.56% de fallos reportados por ruedas. (Kundu et al., 2018)

| TIPO DE FALLO | FRECUENCIA DE FALLO |
|----------------------------------|---------------------|
| Rodamiento de eje | 40,70% |
| Ruedas | 19,56% |
| Corrosión de cubierta | 16,08% |
| Suspensión de bogie y estructura | 9,15% |
| Otros y desconocidos | 14,51% |

Tabla 2 Accidentes relacionados con el material rodante en Irán entre 2001-2004 (Kundu et al., 2018)

2.2 COMPONENTES DEL BOGIE LA LOCOMOTORA



Figura 5 Bogie de una locomotora (Rodríguez, 2006)

La locomotora dispone de dos bogies idénticos, puede ser tipo Co' Co' de tres ejes, o tipo Bo' Bo' de dos ejes. La función de los bogies es la de asegurar el guiado del vehículo a lo largo de toda la vía en las condiciones requeridas de seguridad, estabilidad y de confort.

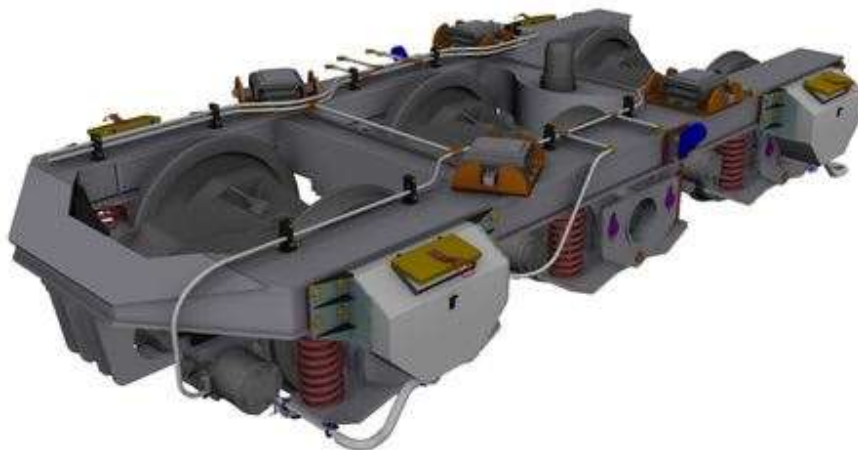


Figura 6 Bogie tipo Co' Co' (Technical, n.d.)

La caja de la locomotora descansa sobre los bogies a través de la suspensión secundaria formada por cuatro resortes de caucho-metal en cada bogie y se complementa con dos

amortiguadores transversales, que amortiguan los movimientos transversales entre la caja y el bogie. Las oscilaciones entre la caja y los bogies se limitan mediante dos topes verticales y dos topes horizontales en cada bogie.

Resumidamente, las funciones de los bogies son las siguientes:

- Soportar el peso de la caja.
- Guiado del vehículo.
- Enlace caja-bogie.
- Filtrado a través de la suspensión / amortiguadores.
- Frenado de disco
- Restauración de la adherencia (arenado).
- Detección de patinaje de rueda (antibloqueo).
- Transmisión del par motor.
- Medida de la velocidad de los ejes.

2.2.1 Eje montado

El eje montado junto con las cajas de grasa, tiene las funciones propias del rodaje: transmitir a la vía el peso del vehículo y permitir la rodadura del eje. Cada bogie incorpora dos o tres ejes montados idénticos dependiendo del tipo.

El eje montado está conformado por:

- Un cuerpo de eje hueco, diseñado con diámetros para el calado de ruedas, de la corona dentada del reductor, de los rodamientos de apoyo del canon-box, y de los rodamientos de las cajas de grasa.
- Un par de ruedas enterizas, que dispone de agujeros para el montaje de los discos de freno.
- La corona dentada del reductor calado en el eje.
- Un canon-box formado por dos rodamientos calados en el eje y un cuerpo exterior que sirve de apoyo al motor de tracción.
- Dos discos de freno montados en cada rueda.

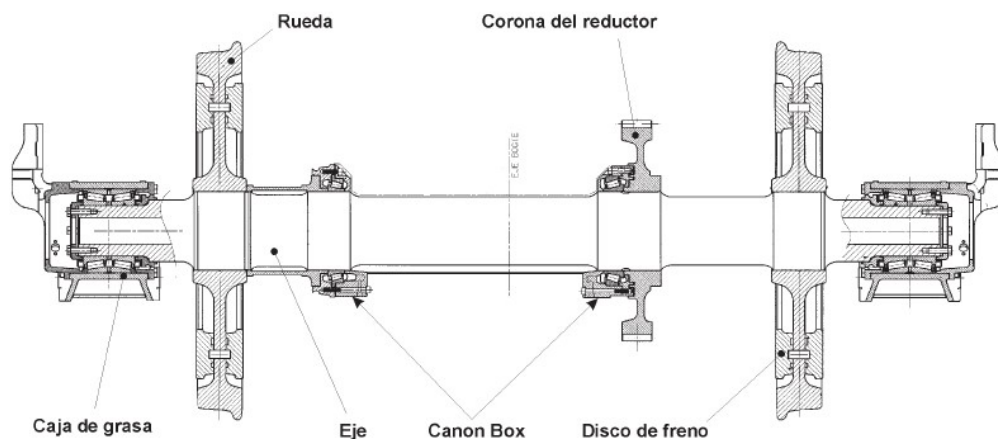


Figura 7 Montaje eje tracción

2.2.2 Cajas de grasa

Las cajas de grasa, realizan la función de enlace entre un elemento de rotación, (eje) y el resto del vehículo. Tienen la función de permitir el giro de los ejes, mediante los rodamientos calados en las manguetas del eje, y la función de soportar el peso de los bogies, a través de la suspensión primaria. Básicamente las cajas de grasa se componen de los siguientes elementos:

- De un cuerpo de caja de grasa que aloja el rodamiento en su interior y sirve de soporte a los elementos de la suspensión primaria.
- Un rodamiento tipo cartucho, que contiene dos hileras de rodillos cónicos, compactos, preensamblados, prelubricados y estancos.
- Una tapa delantera atornillada al cuerpo de la caja de grasa, que sirve de soporte a los sensores montados en las cajas de grasa.
- Una tapa trasera atornillada al cuerpo de la caja de grasa, que junto a la tapa delantera fijan el cuerpo de la caja de grasa.
- Un disco final atornillado a la mangueta del eje que evita el decalado del rodamiento.
- Caja de grasa con dispositivo de puesta a tierra (en todos los ejes).
- Caja de grasa con sensor antibloqueo (en todos los ejes).
- Caja de grasa con sensor de la velocidad angular.



Figura 8 Caja de grasa para locomotora (Schaeffler, n.d.)

2.2.3 Transmisión motor de Tracción - Reductor

Cada bogie cuenta con tres motores de tracción de corriente continua que transmiten los esfuerzos de tracción / frenado eléctrico de forma independiente a cada uno de los ejes a través del reductor.

El conjunto de la transmisión en cada eje lo componen:

- Un motor de tracción.
- Un reductor.

El motor de tracción está apoyado en el eje a través del cannon-box y suspendido del bastidor del bogie a través de una biela de reacción. La fijación del motor al cuerpo del cannon box se realiza mediante tornillos. La biela de reacción incorpora articulaciones elásticas en sus extremos para amortiguar los movimientos de reacción del motor de tracción. Un soporte anticaída evita la caída del motor de tracción en caso de que se suelte la biela de reacción. El reductor está formado por una corona calada en el eje, un piñón calado en el eje del motor de tracción y de un carter, en algunos casos los reductores pueden tener ejes intermedios dependiendo de los requerimientos de relación de engrane de la locomotora.

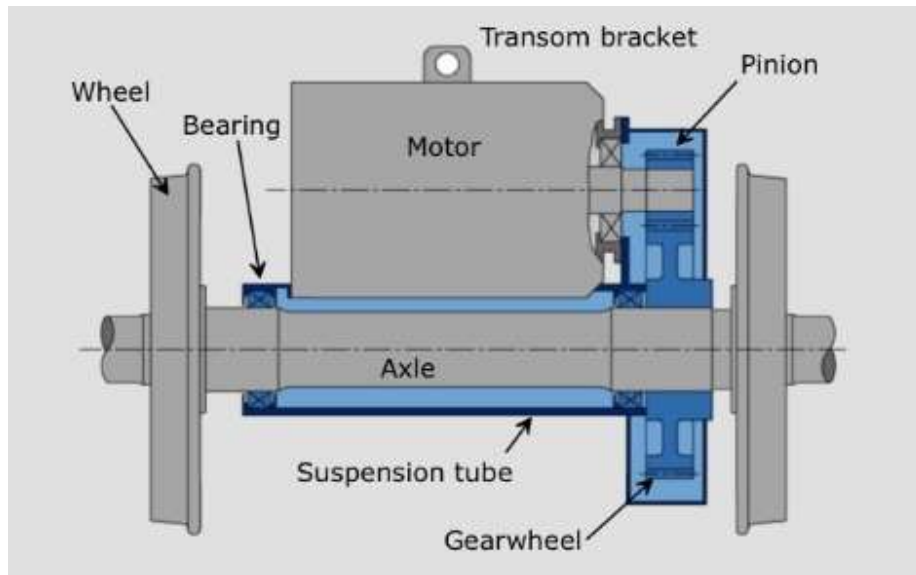


Figura 9 reductor sistema de tracción (Technical, n.d.)

2.2.4 Motores de tracción.

Los motores de tracción modelo son de corriente continua, cada motor de tracción acopla directamente con un eje a su reductor (piñón-corona). Los motores están refrigerados por aire forzado, suministrado por un soplador separado montado en la caja.

La potencia eléctrica procedente del generador principal se distribuye a los motores de tracción a través de los contactores de potencia situados en el armario eléctrico.

2.2.5 Sensores utilizados actualmente en las ruedas de los bogies de la locomotora

El sensor de antibloqueo es un transmisor de impulsos montado en todos los ejes, que proporciona una señal al equipo antibloqueo proporcional a la velocidad de giro del eje donde va montado. En uno de los ejes del bogie se monta un segundo sensor del equipo taquimétrico TELOC, que se utiliza para la medida e indicación en el pupitre de la velocidad de la locomotora. Consta de un sensor inductivo atornillado en la tapa delantera de la caja de grasa y de una rueda fónica atornillada a la mangueta del eje.

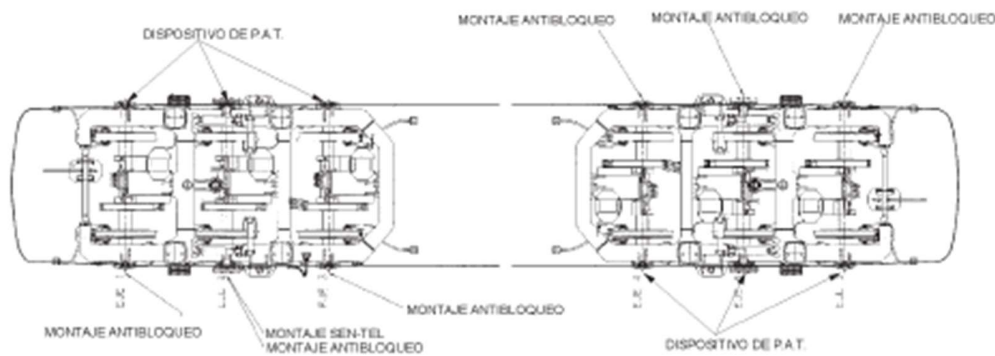


Figura 10 Distribución de sensores en bogies

2.2.6 Monitorización de los datos de telemetría

El Train Control & Management System (TCMS) es un sistema de control distribuido en tren. Comprende dispositivos y software de computador, interfaces humano-maquina (HMI), entradas y salidas análogas y digitales las redes de datos para conectar todo esto de una forma segura y fiable.

Los componentes del TCMS son:

- **Computer Control Units (CCS) o también conocidos como Vehicle Control Unit (VCU)**
El VCU centraliza las funciones del vehículo. El control es logrado utilizando algoritmos implementado en el intercambio de datos a través de las redes internas entre sistemas específicos del vehículo. El VCU es el responsable de procesar los requerimientos del conductor, transmitiendo a los procesos en la arquitectura del sistema y verificando su apropiada ejecución.
Adicionalmente, el VCU diagnostica el vehículo, prepara y muestra los datos apropiados al conductor a través del Driver Display Unit (DDU).
- **Dispositivos modulares de entrada y salida (Modular Input/Output (MIO))**
Proveen una combinación flexible de conexiones digitales y análogas que permiten expandir a más módulos requeridos en el futuro facilitando una gran variedad de soluciones en control y monitorizado.
- **Compuertas de Comunicación Mobile (Mobile Communication Gateways (MCG))**
Proveen capacidades combinadas de redes GSM-P, WiFi y GPS, disminuyendo los costos de utilizar redes de telecomunicaciones usando canales de bajo costo y alto ancho de banda cuando se requiera, y haciendo disponible la ubicación del tren para los servicios a bordo y en tierra.

Uno de los principales beneficios del TCMS es que entrega un diagnostico integrado y brinda la capacidad de prognosis en el vehículo permitiendo visualizar el desempeño del vehículo, problemas y sugerencias de acciones correctivas que asisten la labor del conductor y el personal de mantenimiento. El diagnostico de eventos y los datos de soporte pueden ser

transmitidos al personal de mantenimiento en tierra facilitando el soporte técnico al conductor en el vehículo, realizar intervenciones de mantenimiento prontamente y proveyendo una vista holística del desempeño del vehículo anticipando interrupciones en el servicio de la flota y por lo tanto minimizando o eliminando fallos en los sistemas.

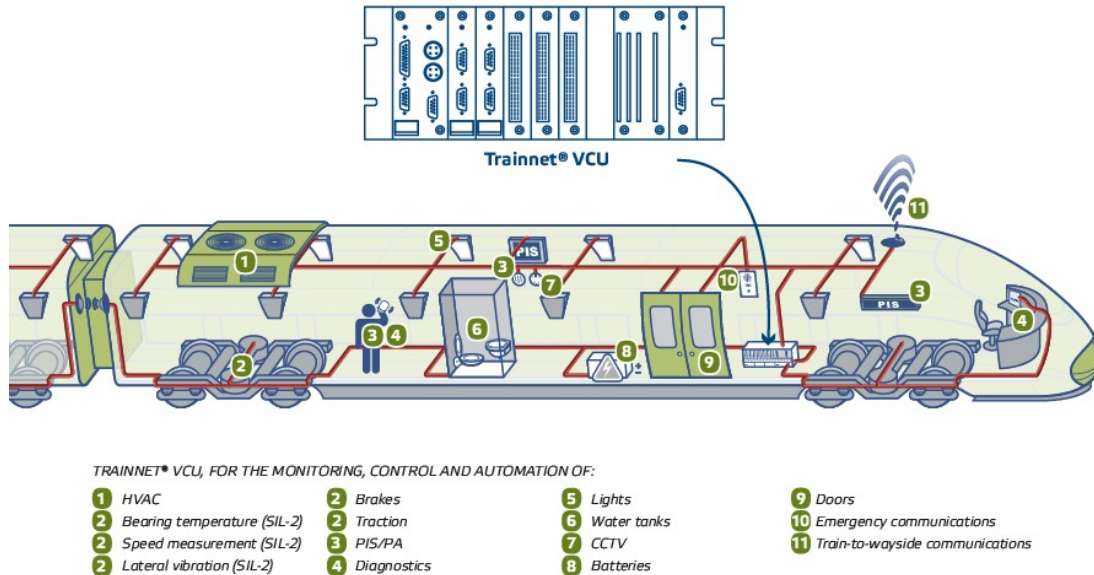


Figura 11 Sistema de Unidad de Control del Vehículo (EKE electronics, n.d.-b)

2.3 HERRAMIENTAS DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN LAS CAJAS DE GRASA DE LOS BOGIES

El Mantenimiento Basado en Condición (o CBM por sus siglas en inglés Condition Based Maintenance) ha probado ser una estrategia efectiva para obtener mejores beneficios de un activo. En el caso de las locomotoras, este enfoque podría mejorar la seguridad y disponibilidad por medio de la detección de componentes con fallas. Una aplicación de CBM podría extender la vida útil de los componentes y reducir los tiempos de paradas de maquina no programados generados por fallos repentinos en los rodamientos. También permite a los operadores/mantenedores obtener el máximo provecho de cada pieza reemplazable en una condición operativa específica. Las partes nos son reemplazadas en base del plan de mantenimiento preventivo, el tiempo de operación o de fallo, pero cuando el componente monitoreado alcanza una predeterminada condición indicando que debe ser reemplazado. Durante su tiempo de vida útil, cada componente experimenta una única combinación de ciclos de carga, condiciones climatológicas, influencia por contaminantes externos, retornos de corriente eléctrica, etc. El monitoreo de condición permite a los operadores/mantenedores ejecutar el reemplazo programado a un único componente garantizando el máximo beneficio para cada componente bajo su condición operativa específica. (Bernal, Spiryagin, & Cole, 2019)

Un programa de CBM consiste de 3 pasos: adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones de mantenimiento. Las decisiones de mantenimiento pueden ser tomadas basadas en las tendencias de la información en línea. No obstante, es imposible tomar una decisión basada en las tendencias todo el tiempo, teniendo en cuenta que los datos obtenidos de los sensores podrían estar asociados a ruido de la señal. Algoritmos de procesamiento de datos de señales son utilizados para procesar los datos y extraer la información útil. Después de un procesamiento de señal adecuado, los algoritmos de diagnóstico y pronosis son utilizados para la clasificación y predicción del fallo respectivamente. El diagnóstico detectaría la presencia del fallo, mientras la pronosis predeciría cuando va a ocurrir el fallo con cierto nivel de exactitud. (Kundu et al., 2018)

Los sensores usados en el monitoreo de condición de vehículos ferroviarios pueden ser en tierra (a un lado de la vía) o abordo de la locomotora.

2.3.1 Adquisición de datos

2.3.1.1 *Tecnología de medición a un lado de la vía*

El sistema de monitorización a un lado de la vía es instalado sobre o a un lado de los rieles. Están divididos en dos categorías: reactivo y predictivo. Los sistemas reactivos detectan fallos en los vehículos ferroviarios y no proveen ninguna información de trazabilidad. Un ejemplo de dichos sistemas son los detectores de cajas y ruedas calientes, y detectores de carga e impacto en las ruedas (conocidos por sus siglas en inglés como Wheel Impact Load Detector (WILD)). Los sistemas predictivos pueden predecir los posibles fallos que podrían ocurrir. Estos sistemas pueden medir, registrar y marcar tendencia del desempeño de componentes específicos. Detectores de emisión acústica y detectores de perfiles de rueda son ejemplos de este tipo de detectores. El beneficio de sistemas de monitorización a un lado de la vía es que una vez que se instala, medirá la condición de todos los trenes que pasan sobre ese carril. Pero estos sistemas, el ruido y diversas interferencias también se registran junto con los datos, lo que dificulta la estimación de fallas. El uso de algoritmos avanzados de procesamiento de señales puede superar este tipo de inconvenientes.

2.3.1.2 *Tecnología de medición a bordo del vehículo.*

En esta tecnología, los sensores de monitoreo de condición son instalados en el bogie. Su localización depende de su aplicación específica. Esta tecnología mejora la calidad y la eficiencia del diagnóstico de fallos porque las mediciones del sensor provienen del contacto directo con los componentes. Esto elimina el efecto del ruido ambiental y otros factores ambientales. El principal inconveniente de esta tecnología es que los sensores deben instalarse en cada rueda del bogie, lo que aumenta considerablemente el costo del sistema dependiendo del tipo de conexión entre el sensor y el módulo de procesamiento de datos.

2.3.2 Procesamiento de datos: técnicas de aislamiento y detección de fallos

Como parte de las técnicas de CBM, las técnicas de aislamiento y detección de fallos (FDI Fault Detection and Isolation) es un enfoque ampliamente utilizado aplicable a sistemas que se degradan con el tiempo. FDI consiste en la adquisición de señales (aceleración, desplazamiento, acústicos, etc.) relacionados con los parámetros de operación o comportamiento de componentes, estableciendo la ausencia o presencia de un fallo parcial emergente, e identificando la severidad antes de convertirse en un fallo funcional. Cuando la relación entre las señales de entrada/salida pueden ser establecidas, es usado el enfoque basado en modelos; de otra manera, cuando solo está disponible las señales de salida, un método basado en señales puede ser implementado.

2.3.2.1 Métodos basados en modelos

Estos métodos se basan en la comparación de los valores de salida esperados y medidos del sistema. El parámetro obtenido de esta comparación se conoce como residual, y es el indicador de la presencia o ausencia de una falla. El valor residual esperado para un sistema sin defectos es cero. Las desviaciones de cero pueden indicar que existe una posible falla en el sistema. Se utilizan métodos como la estimación de parámetros, la ecuación de paridad y el filtro de observador / Kalman para la IED basada en modelos.

2.3.2.2 Métodos basados en señales

Cuando solo las señales de salida están disponibles en el sistema, un método basado en señales es la forma de lograr la FDI. El método de evaluación normalmente se limita a analizar amplitudes y frecuencias, o para correlacionar diferentes señales de salida. (Bernal et al., 2019)

2.3.3 Técnicas de monitoreo de condición

El rodamiento ferroviario permite el movimiento sin fricción a lo largo del riel. La caja de grasa aloja el lubricante sea grasa o aceite el cual mantiene unas condiciones de mínima fricción entre elementos rodantes óptimas para su funcionamiento. Cualquier defecto en los elementos rodantes o deficiencia en el lubricante provoca fricción y calienta la caja de grasa, este fenómeno es conocido como "Hot Box" (Caja caliente) el cual podría ser detectado por detectores de cajas calientes (conocidos por sus siglas en inglés Hot box Detector (HBD)). El HBD detecta defectos en una etapa avanzada. Por tal razón, se requiere de tecnología avanzada para detectar defectos en una etapa temprana. Por ejemplo, un rodamiento defectuoso generalmente produce sonidos de rozamiento y golpeteo dependiendo del tipo de fallo y un sensor acústico puede ser útil para determinar la condición del rodamiento. Adicionalmente, un defecto en el rodamiento puede producir altos niveles de vibración y un acelerómetro también es utilizado para monitorear la condición del rodamiento. Los datos obtenidos de estos sensores están contaminados por ruido e interferencias, para lo cual se utilizan avanzados algoritmos de procesamiento de señales para detectar un fallo prematuro.

2.3.3.1 Análisis de vibración

El análisis de la señal de vibración es probablemente la técnica más importante y popular que se utiliza para el monitoreo de rodamientos. Estos métodos pueden clasificarse en tres categorías de acuerdo con la característica, llamado método de dominio de tiempo, método de dominio de frecuencia y método de dominio de tiempo-frecuencia. El método del dominio del tiempo consiste en medir los parámetros estadísticos de la señal del dominio del tiempo, por ejemplo, varianza, valor pico a pico y kurtosis. Los métodos de dominio de frecuencia, incluida la transformación de Fourier, la transformación rápida de Fourier y el espectro de potencia, etc., pueden bloquear ciertos rangos de frecuencia que nos interesa. El método de dominio de tiempo y dominio de frecuencia puede conducir a resultados falsos cuando se aplica a señales no estacionarias, porque estos métodos se basan en el supuesto de que el proceso que genera las señales es estacionario y lineal.

En diversos artículos publicados se ha comprobado la viabilidad técnica de realizar un seguimiento a la condición de los rodamientos en locomotoras y tomar decisiones basados en tendencias y características espectrales hallando fallos potenciales que podrían ocasionar un descarrilamiento de la locomotora (Corni, Symonds, Wood, Wasenczuk, & Vincent, 2015; Symonds, Corni, Wood, Wasenczuk, & Vincent, 2015).

2.3.3.2 Emisiones acústicas (ruido en rodamientos)

El uso de la tecnología de emisiones acústicas (Acoustic Emissions) ha surgido como un enfoque de diagnóstico prometedor. AE se desarrolló originalmente como herramienta de Ensayos No Destructivos (END) de estructuras estáticas, sin embargo, en los últimos tiempos su aplicación se ha extendido al monitoreo de condición de máquinas rotativas y rodamientos. En aplicaciones de monitoreo de maquinaria, los AE se definen como ondas elásticas transitorias producidas por la interacción de dos componentes o más en movimiento relativo. Las fuentes de emisiones acústicas incluyen impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fuga, etc. Proporciona el beneficio de la detección temprana de fallas en comparación con el análisis de vibración y el análisis de aceite debido a la alta sensibilidad a la fricción que ofrece las emisiones acústicas. (Elasha, Greaves, Mba, & Addali, 2015)

De acuerdo a artículos publicados se ha comprobado la efectividad de las emisiones acústicas en la detección en una etapa más temprana de defectos en los elementos rodantes de rodamientos que utilizando las señales obtenidas por vibraciones, realizando un apropiado tratamiento de las señales obtenidas por emisiones acústicas y una correcta selección de los sensores (Elasha et al., 2015) (Van Hecke, Yoon, & He, 2016). A su vez, en estudios se ha determinado que las emisiones acústicas se obtienen señales más apropiadas para determinar la condición de los rodamientos a bajas velocidades de rotación (Kaewkongka, 2002).

2.3.3.3 Temperatura

El método de detección de cajas calientes es comúnmente usado en la práctica. El método consiste en monitorear la condición del rodamiento detectando la temperatura de la caja de grasa. Existen dos tipos de sistemas de detección. El sistema abordo a tiempo real con sensores de temperatura instalados en cada caja de grasa de los bogies. El otro es un sistema instalado al lado de la vía, conocido como sistema HBD (Hot Box Detector). Los sistemas emiten una alarma si la temperatura de funcionamiento del rodamiento excede el umbral preestablecido por el usuario. Pero la temperatura no varía significativamente en las fallas tempranas. El incremento excesivo de temperatura provoca la falla catastrófica del rodamiento de rodillos, esto ocurre muy rápidamente y puede provocar la evaporación del lubricante y su combustión en la caja de grasa, lo que puede provocar la pérdida de propiedades del material de los elementos interno y generar un posible descarrilamiento siendo un factor crítico para la seguridad de los trenes.

Después de una investigación realizada en la empresa Lituania Railways, en el periodo de 2011-2013 debido a las lecturas del HABD (Hot Axle Box Detector) en 97 vagones de carga, fueron desacoplados donde se habían registrado altas temperaturas en la caja de grasa. Para identificar la razón exacta del calentamiento de las cajas de grasa, las 97 cajas de grasa fueron desarmadas, los datos obtenidos son los de la figura 12 (Lunys, Dailydka, & Bureika, 2015).

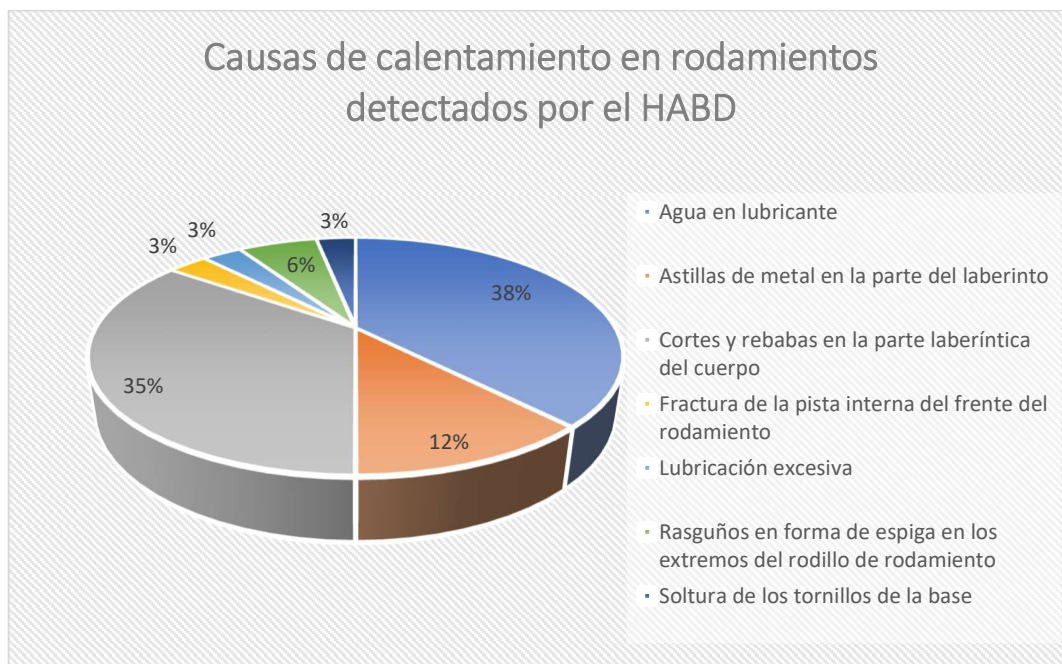


Figura 12 Distribución de averías en cajas de grasa de vagones de carga de la compañía Lithuanian Railway (Lunys et al., 2015)

2.4 APLICACIONES COMERCIALES DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN CAJAS DE GRASA DE BOGIES

- Perpetuum: Es una empresa británica creada en 2004 en la Universidad de Southampton, ellos han desarrollado una tecnología de generación de energía convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica con la cual alimenta los sensores inalámbricos de monitoreo de condición con los cuales miden vibración y temperatura en los rodamientos de los bogies, por ende, los sensores inalámbricos no requieren de baterías. Esta tecnología ha sido probada en las vías férreas de Inglaterra, Australia obteniendo óptimos resultados en la detección de fallos potenciales en rodamientos. (Bernal et al., 2019)(Perpetuum, n.d.) (Symonds et al., 2015)
- SKF multilog online system for railway condition monitoring: La empresa SKF ha desarrollado un módulo de monitoreo de condición de vibración, temperatura y velocidad en las cajas de grasa de los bogies para determinar la condición de los rodamientos, de las ruedas y los rieles, A su vez ofrecen la plataforma web para acceder a las aplicaciones de Machine learning y de análisis de vibraciones. (SKF, n.d.)
- HABD (Hot Axle Box Detector): Es un equipo fabricado por la empresa EKE electronics (EKE electronics, n.d.-a) utilizado para medir la temperatura de los rodamientos a bordo del vehículo o a un lado de la vía. Los equipos han sido diseñados de acuerdo a la norma UNE-EN 15437 (UNE-EN 15437-2, 2013).
- Railway Bearing Acoustic Monitoring (RailBAM) TRACK IQ: Es un Sistema de medición de ultrasonido instalado al lado de la vía para detectar rodamientos defectuosos en los bogies con el tren en movimiento, el sistema ha sido desarrollado por la compañía Wabtec. (Wabtec Company, n.d.)

2.5 APLICACIONES DE MONITOREO DE CONDICIÓN EN LÍNEA EN OTROS SECTORES INDUSTRIALES

- SDT Online4US ACM: Es un módulo de monitoreo de condición inalámbrica de vibración y ultrasonido de rodamientos, engranes, maquinas a baja velocidad, fugas de aire, etc. utilizado en el ámbito industrial, el módulo ha sido desarrollado por la empresa SDT (SDT ultrasounds, n.d.) .
- RONDS: Es una empresa que ha desarrollado sistemas de monitoreo de condición inalámbrica de vibración y temperatura en rodamientos utilizados en el ámbito industrial de aerogeneradores, petroquímica, metalúrgica, cementos, minería, entre otros. (“RONDS,” n.d.)

- WI-CARE: Es una empresa que ha desarrollado sistemas de monitoreo de condición inalámbrica de vibración, ultrasonido y temperatura en rodamientos utilizados en el ámbito industrial en Europa, a su vez permite medir otras variables físicas inalámbricamente. (Wi-care, n.d.)

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se expone una metodología para implementar el monitoreo de condición de los rodamientos de las cajas de grasa de los bogies.

3.1 ESTABLECER EL/LOS OBJETIVOS DEL PLAN DE MANTENIMIENTO

Se deben establecer unos objetivos de acuerdo a las políticas de mantenimiento establecidas por el usuario/mantenedor del equipo, las cuales tracen el camino para una correcta implementación y permita obtener los resultados esperados, se debe tener en cuenta que las herramientas que se emplean como puede ser el análisis de vibraciones no es el objetivo final de este proceso sino el medio para lograr controlar las condiciones de trabajo de la máquina, mejorar la calidad de su trabajo, reducir los costes de mantenimiento” (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018), y por ende incrementar la fiabilidad del componente.

3.2 RECOLECTAR INFORMACIÓN SOBRE EL COMPONENTE

Se debe recolectar la mayor cantidad de información técnica posible no solo del componente, sino del sistema al que pertenece, es importante realizar esquemas cinemáticos identificando la posición de los rodamientos, obtener información de rodamientos como (diámetros de bolas/rodillos, diámetros de pista interna y externa, ancho del rodamiento, cantidad de elementos rodantes), velocidad rotacional de ejes, numero de dientes de engranes, referencia de rodamientos de la caja de engranes, potencia eléctrica del motor de tracción, potencia mecánica del motor de tracción, etc.

3.3 CALCULAR LA TASA DE FALLOS DEL COMPONENTE

La tasa de fallos está definida por la norma UNE 13306 como el “número de fallos de un elemento durante un intervalo de tiempo dado dividido por el intervalo de tiempo”. Por ende, para nuevos sistemas que no se tiene experiencia o histórico de datos se puede obtener de la siguiente manera: estudio matemático de tasa de fallo según MTBF (Main Time Between Failure) o MKBF (Mean Kilometers between failure) por cada componente, por datos recogido durante ensayos de degradación realizados por el fabricante, aproximaciones probabilísticas. En el caso de equipos que se encuentran en funcionamiento se puede obtener del histórico de fallos por cada componente realizando una explotación matemática de fallo utilizando Weibull o un estudio del entorno.(González, 2015)

En este caso vamos a utilizar las fórmulas recomendadas por un fabricante de rodamientos reconocido para determinar la vida útil del rodamiento con una fiabilidad del 90% (L_{10}) (SKF, 2012) y las fórmulas para determinar la vida útil corregida de acuerdo los criterios de fiabilidad y lubricación. (L). Estos valores se utilizarán en el AMFE y en el AAF para determinar el MTBF y el MKBF de los componentes del rodamiento.

1. Hallar la carga del eje

$$G = \frac{G_{00} - G_r}{2}$$

Ecuación 1 Carga del eje (G)

2. Hallar la carga radial equivalente del eje (K_r)

$$K_r = f_0 * f_{rd} * f_{tr} * G$$

Ecuación 2 Carga radial equivalente del eje

| Payload factor f_0 | Vehicle type |
|------------------------|---|
| 0,8 to 0,9 0,9 to 1 | Freight cars Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles |
| 1 | Locomotives and other vehicles having a constant payload |

The pay load factor f_0 is used for variation in the static loading of the vehicle, e.g. goods for freight and passengers incl. baggage for coaches.
A locomotive has no significant variation in the static load; that's why a full static axlebox load needs to be applied.

Figura 16 Factor de carga útil (SKF, 2012)

| Dynamic radial factor f_{rd} | Vehicle type |
|--------------------------------|--|
| 1,2 1,1 to 1,3 | Freight cars, adapter application Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles |
| 1,2 to 1,4 | Locomotives and other vehicles having a constant payload |

The dynamic radial factor f_{rd} is used to take into account quasi-static effects like rolling and pitch as well as dynamic effects from the wheel rail contact.

Figura 15 Factor radial dinámico (SKF, 2012)

| Dynamic traction factor f_{tr} | Vehicle type |
|----------------------------------|--|
| 1,05 | Powered vehicles with an elastic drive system, e.g. hollow shaft drive with elastic coupling |
| 1,1 | Powered vehicles with a non-elastic drive system, e.g. axle hung traction motors |
| 1 | Non-powered vehicles |

The dynamic traction factor is used to take into account additional radial loads caused by the drive system.

Figura 14 Factor dinámico de tracción (SKF, 2012)

| Dynamic axial factor f_{ad} | Vehicle type |
|-------------------------------|---|
| 0,1 0,08 | Freight cars Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles, max speed 160 km/h |
| 0,1 | Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles > 160 km/h |
| 0,12 | Locomotives, tilting trains or other concepts leading to higher lateral acceleration |

Figura 13 Factor axial dinámico (SKF, 2012)

3. Hallar la carga axial equivalente del eje (K_a)

$$K_a = f_0 * f_{ad} * G$$

Ecuación 3 Carga axial equivalente del eje

4. Hallar la carga del rodamiento (F_r) para cajas de grasa donde la carga del rodamiento actúa simétricamente en la parte superior o en ambos lados.

$$F_r = K_r + 2f_c K_a$$

Ecuación 4 Carga axial equivalente del eje

$$f_c = \frac{hD_a}{l}$$

Ecuación 5 Factor de carga axial para cajas de grasa soportadas simétricamente

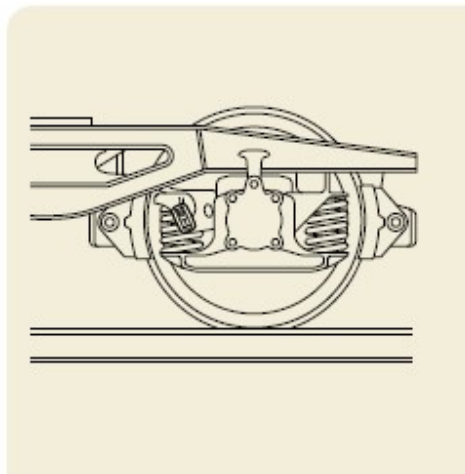


Figura 17 Caja de grasa soportado simétricamente(SKF, 2012)

5. Hallar la carga dinámica equivalente del rodamiento (P)

$$P = F_r + Y * F_a$$

Ecuación 6 Carga dinámica equivalente del rodamiento

6. Vida de calificación básica (L_{10}) para rodamientos de rodillos

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3}$$

Ecuación 7 Vida de calificación básica para rodamientos de rodillos

7. Vida de calificación básica en kilómetros (L_{10s})

$$L_{10s} = \pi * L_{10} * D_w * \frac{1km}{1000m}$$

Ecuación 8 Vida de calificación básica en kilómetros

8. Factor de corrección de Vida (L_s)

$$L_s = a_1 * a_{iso} * L_{10s}$$

Ecuación 9 Factor de corrección de Vida

| Fiabilidad % | a_1 |
|--------------|-------|
| 90 | 1 |
| 95 | 0.64 |
| 96 | 0.55 |
| 97 | 0.47 |
| 98 | 0.37 |
| 99 | 0.25 |
| 99.2 | 0.22 |
| 99.4 | 0.19 |
| 99.6 | 0.16 |
| 99.8 | 0.12 |
| 99.9 | 0.093 |
| 99.92 | 0.087 |
| 99.94 | 0.080 |
| 99.95 | 0.077 |

Tabla 3 Factor de fiabilidad a_1 (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Para determinar el valor de a_{iso} el cual tiene en cuenta las condiciones de trabajo del rodamiento, deberemos hallar la viscosidad relativa para el rodamiento:

$$V_1 = \frac{45000}{\sqrt{d_m \cdot n^{1.667}}} \quad \text{para } n < 1000 \text{ rpm}$$

Ecuación 10 Viscosidad relativa

Para hallar la viscosidad del aceite a temperatura de trabajo se debe utilizar la viscosidad cinemática del aceite base de la grasa a 40°C y a 100°C.

$$\log(\log(v + 0,7)) = A - B \cdot \log(T)$$

T en Kelvin, A y B constantes

$$v = 10^{10(A - B \cdot \log(T))} - 0,7$$

Ecuación 11 ASTM D341: Ecuación Walther de relación entre viscosidad y temperatura (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Hallamos el cociente de viscosidades:

$$k = \frac{\nu}{\nu_1}$$

El factor de contaminación del lubricante n_c se obtiene de la tabla cuatro.

| Condición | $d_m < 100$ | $d_m \geq 100$ |
|---|-------------|----------------|
| Limpieza extrema Condiciones de laboratorio | 1 | 1 |
| Gran limpieza Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino Típico de los rodamientos engrasados de por vida y obturados | 0,8 ... 0,6 | 0,9 ... 0,8 |
| Limpieza normal Aceite filtrado a través de un filtro fino Rodamientos engrasados de por vida y con placas de protección | 0,6 ... 0,5 | 0,8 ... 0,6 |
| Contaminación ligera | 0,5 ... 0,3 | 0,6 ... 0,4 |
| Contaminación típica Típico de los rodamientos sin obturaciones integrales, filtrado grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas del exterior | 0,3 ... 0,1 | 0,4 ... 0,2 |
| Contaminación alta Entorno muy contaminado y obturación inadecuada | 0,1 ... 0 | 0,1 ... 0 |
| Contaminación muy alta n_c puede estar fuera de la escala produciendo una reducción mayor de la vida útil de lo establecido por la ecuación Ec. 4 | 0 | 0 |

Tabla 4 Factor de contaminación (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Para calcular la relación contaminación-carga $n_c(P_u/F_{eq})$ se requiere el valor de límite de fatiga del rodamiento (P_u), y dado que este valor no es publicado por ningún fabricante de rodamientos, se halla el rango de P_u a partir de los valores de n_c obtenidos en la figura 18, y el valor de carga dinámica equivalente del rodamiento (P) hallado en el punto 5.

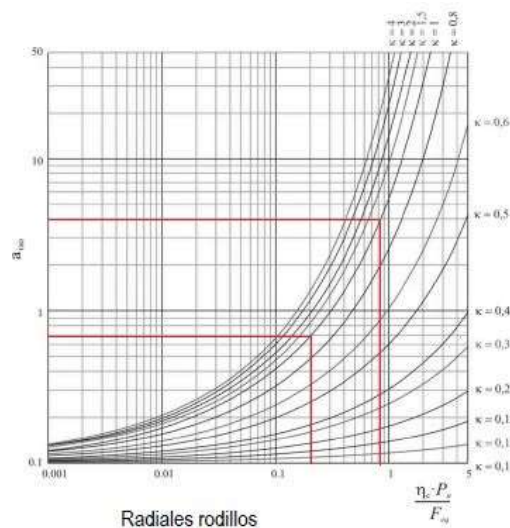


Figura 18 Factor a_{100} para rodamientos radiales de rodillos (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

De acuerdo a los valores calculados, se obtiene el valor de vida corregido:

$$L_s = a_1 * a_{100} * L_{10s}$$

3.4 EVALUAR AMFE Y AAF DEL COMPONENTE

Para evaluar los modos, causas y efectos del fallo del componente se recurre a la herramienta AMFE (Análisis de Modos de Fallo y sus Efectos) de acuerdo a la norma UNE-EN 60812:2008, en la cual definen el AMFE como “un procedimiento sistemático de análisis de un sistema para identificar los modos de fallos potenciales, sus causas y sus efectos en el funcionamiento del sistema.

Se considera el AMFE como un método para identificar la severidad de modo de fallos potenciales y proporcionar información para tomar medidas que reduzcan el riesgo. Sin embargo, en algunas aplicaciones, el AMFE incluye también una estimación de la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo. Esto mejora el análisis proporcionando una medida de la probabilidad del modo de fallo ” (60812, 2009)

A su vez se puede utilizar la herramienta de Análisis de Árbol de Fallos (AAF) de acuerdo a la norma UNE-EN 61025:2007 la cual define un árbol de fallo como “una representación gráfica organizada de las condiciones que causan o contribuyen a la ocurrencia de un resultado no deseado definido, denominado como “Suceso superior”. La representación se hace en una forma que sea claramente comprensible, analizable y, si es necesario, modificada para facilitar la identificación de:

- Factores que afecten la fiabilidad y a otras características de funcionamiento del sistema. Estos factores incluyen, por ejemplo, deficiencias del diseño, esfuerzos ambientales u operacionales, modos de avería de componentes, etc.
- Sucesos comunes que pueden contribuir a más de un resultado de sucesos intermedios en un árbol de fallos.” (UNE-EN 61025, 2011)

3.5 CALCULAR EL COSTE ECONÓMICO DEL FALLO

De acuerdo al informe sobre descarrilamiento evaluación de impacto económico presentado por el Consorcio D-RAIL(Schöbel, Zarembski, Palese, & Maly, 2013). Para cada descarrilamiento el costo total puede ser calculado usando las siguientes categorías:

- a) Costo directo de infraestructura.
- b) Material rodante directo y costos de activos
- c) Costos humanos en términos de fatalidades e injurias.
- d) Disrupción de otros servicios, por ejemplo, pasajeros y cargo (específicamente minutos de retraso).
- e) Costos legales y litigaciones.
- f) Daños a terceros, por ejemplo, propiedad y negocios.
- g) Servicios de emergencia (ambulancias, bomberos, policía, etc)
- h) Costos medioambientales – Podría incluir: Operación de limpieza post-accidente; peligros públicos (carga de materiales peligrosos).
- i) Pérdida de clientes de carga y carga.

El estudio no incluye los costos de decrecimiento económico o pérdida de producción.

- Los costos intangibles por reputación para el fabricante, el operario/mantenedor y la percepción del usuario final.

3.6 DESARROLLO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO

El plan de mantenimiento en cada sistema de la locomotora debe ser desarrollado de acuerdo a la norma EN 17023:2018 en el cual indica “Los vehículos deberían estar en un estado seguro de funcionamiento por medio de un sistema de mantenimiento. Parte de este sistema de mantenimiento es el plan de mantenimiento el cual contiene la descripción de actividades y procedimientos para ser ejecutados durante el mantenimiento programado con el objetivo de asegurar que el vehículo cumple con las condiciones objetivas.” (EN 17023:2018, 2004).

En el plan de mantenimiento se debe definir los indicadores clave de rendimiento del mantenimiento para la locomotora de acuerdo a las recomendaciones de la norma UNE-EN 15341:2007, la cual indica que hay tres grupos de indicadores: económicos, técnicos y organizacionales. La norma indica que la selección de los indicadores debe estar alineados con los objetivos del plan de mantenimiento. (UNE-EN 15341, 2007)

3.7 IDENTIFICAR LOS PUNTOS DE INSPECCIÓN

Se debe identificar el código de los componentes del sistema de tracción de acuerdo a la norma UNE-EN 15380-2 SISTEMA DE DESIGNACIÓN PARA VEHÍCULOS FERROVIARIOS – PARTE 2: GRUPOS DE PRODUCTOS (UNE-EN 15380-2, 2007), a su vez los sensores ubicados en la caja de grasa, identificándolos en un esquema cinemático iniciando por el motor eléctrico de tracción, el cual acopla a la caja de engranes y luego transmite por medio del cannon box a las ruedas. Cada punto de inspección se refiere a la ubicación de los rodamientos en los componentes, cada ubicación debe ser identificada en la maquina e indicar los sensores a instalar, en el caso de acelerómetros para medir vibraciones debe indicar la dirección de medición (vertical, horizontal, axial o triaxial).

3.8 DETERMINAR LOS SÍNTOMAS A INSPECCIONAR

Basándose en los objetivos planteados, en la información recolectada de la máquina, y de acuerdo a los modos de fallo y sus respectivas causas encontradas en el AMFE, se debe determinar cuáles son los síntomas físicos que se deben controlar, poder ver velocidad rotacional, temperatura, vibración, emisiones acústicas, torsión del eje, potencia eléctrica del motor, etc., de esta manera se procede a seleccionar los sensores adecuados para cada síntoma y su alcance.

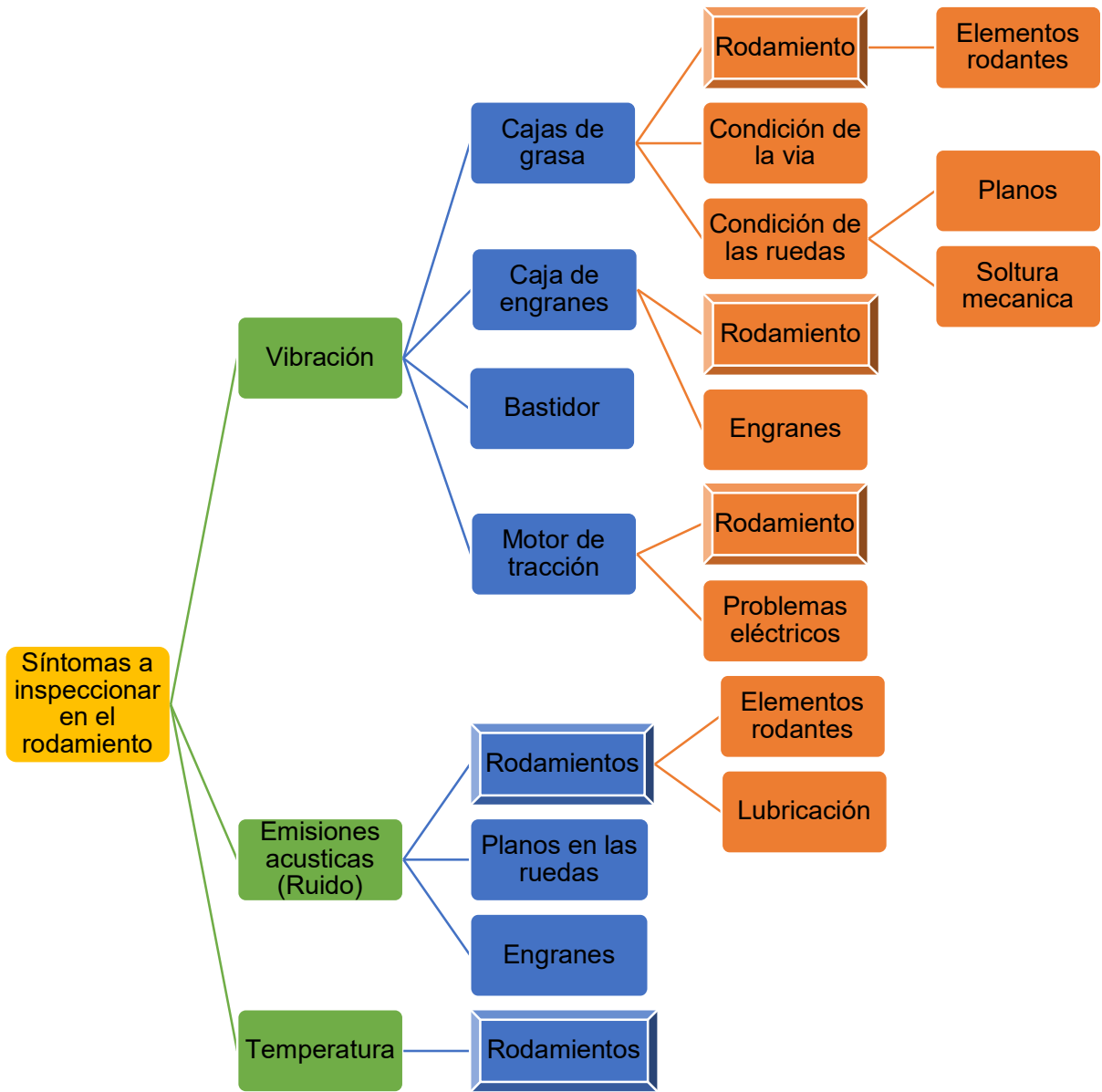


Figura 19 Diagrama de componentes a inspeccionar por cada herramienta de monitoreo

3.9 FRECUENCIAS DE FALLO A EVALUAR

Cuando un rodamiento gira a una velocidad constante, su señal de emisión acústica y de vibración puede ser teóricamente caracterizada por una propiedad periódica. Generalmente, existen cuatro frecuencias fundamentales de defectos que describen dicha propiedad. Las cuatro frecuencias son:

$$FTF = \left(\frac{\omega}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{D_e}{D_p}\right) \cos \beta\right]$$

Ecuación 12 Frecuencia de defecto en jaula de elementos rodantes (Fundamental Train Frequency (FTF))

$$BSF = \left(\frac{\omega * D_p}{2D_e}\right) \left[1 - \left(\left(\frac{D_e}{D_p}\right) \cos \beta\right)^2\right]$$

Ecuación 13 Frecuencia de defecto en elementos rodantes (Ball Spin Frequency (BSF))

$$BPFO = \left(\frac{\omega * Z}{2}\right) \left[1 - \left(\frac{D_e}{D_p}\right) \cos \beta\right]$$

Ecuación 14 Frecuencia de paso de bolas por defecto en pista externa (Ball Pass Frequency Outer (BPFO))

$$BPFI = \left(\frac{\omega * Z}{2}\right) \left[1 + \left(\frac{D_e}{D_p}\right) \cos \beta\right]$$

Ecuación 15 Frecuencia de paso de bolas por defecto en pista interna (Ball Pass Frequency Inner (BPFI))

Donde D_e es el diámetro de elementos rodantes, D_p es el diámetro promedio del rodamiento, Z es el número de elementos rodantes, β es el ángulo de contacto en grados, y ω es la velocidad rotacional del eje en Hertz (Hz).

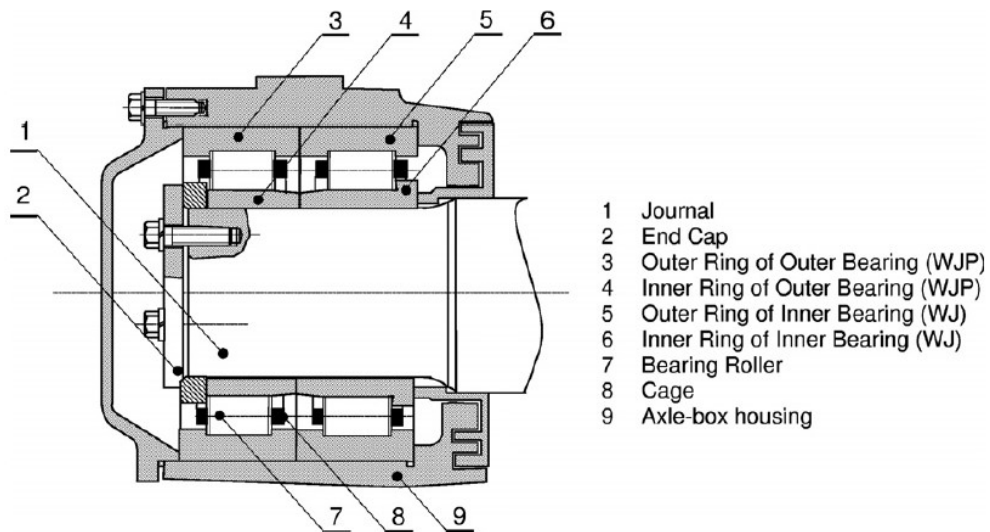


Figura 20 Componentes del rodamiento de una locomotora (Gerdun, Sedmak, Šinkovec, Kovše, & Cene, 2007)

Frecuencias de la caja de engrane:

$$f_e = \omega_e * z_e \text{ (Hz)}$$

Ecuación 16 Frecuencia de engrane

z_e : Numero de dientes por engrane/piñón.

ω_e : Velocidad angular del eje donde está montado el engrane.

Las frecuencias de la caja de engrane es importante definirlas porque es posible que se exciten en los rodamientos de las cajas de grasa debido a que el movimiento mecánico de la caja de engranes es transmitido al eje por interferencia al igual que los rodamientos.

3.10 ADQUISICIÓN DE DATOS

3.10.1 Información a guardar por cada medición

Se debe almacenar los valores adquiridos por las señales dinámicas:

- Vibración
- Emisiones acústicas
- Temperatura
- Velocidad de giro

La información adicional que se debe guardar por cada medida es:

- Código de identificación UIC de la locomotora, que un código de 12 dígitos que identifica cada vehículo matriculado.
- Código del punto de inspección en las cajas de grasa de acuerdo a la norma UNE-EN 15380-2
- Velocidad de la locomotora
- Fecha y hora de la medida
- Ubicación GPS (Global Positioning System)
- Dirección de viaje (Hacia cabina 1 o 2)
- Temperatura ambiente
- Tipo de transductor (velocidad, temperatura, etc)
- Modelo y número de serie del transductor
- Unidades de la medida (g's, mm/s, °C, Db, RPM)
- Tipo de montaje del transductor (imán, pegado, roscado, etc)
- Situación y orientación del transductor
- Amplitud medida (valor pico, pico-pico, RMS, etc.)
- Datos de la FFT (frecuencia de filtrado, número de líneas, promedios, etc.)

3.10.1.1 Datos de vibraciones

Generalmente son tres los parámetros de la vibración a examinar, amplitud, frecuencia y fase. La magnitud de la amplitud caracteriza el estado de deterioro de la máquina, la frecuencia permite determinar la causa del fallo, y el desfase permite analizar los modos de vibración. Se debe tener en cuenta que los acelerómetros se deben instalar en una posición radial a la caja de grasa, preferiblemente en la posición horizontal.

3.10.1.2 Datos de emisiones acústicas

Generalmente son dos los parámetros de las emisiones acústicas a examinar, amplitud y frecuencia. La magnitud de la amplitud caracteriza el estado de deterioro de la máquina y la frecuencia permite determinar la causa del fallo, la fase no es utilizada como en el caso de vibraciones. La ventaja del sensor acústico es que se puede instalar en una posición radial o axial respecto al eje (paralela al eje) sobre la caja de grasa.

3.10.1.3 Datos de temperatura

En el sensor de temperatura se obtiene solamente la magnitud. Generalmente se instala uno solo por cada caja de grasa en una posición radial.

3.10.2 Selección de sensores

De acuerdo a los cálculos de frecuencias de fallo a evaluar realizados en la sección 2.9, se debe realizar el cálculo de para la selección de los sensores. Teniendo en cuenta los siguientes pasos:

1er paso: cálculo de la frecuencia de la señal a medir.

2do paso: seleccionar la sensibilidad más adecuada.

3.10.3 Instalación de sensores

Para cajas de grasa ya fabricadas, se recomienda instalar soportes adhesivos en una posición horizontal, aunque lo ideal es tener en cuenta en el diseño y fabricación de la caja de grasa añadir una rosca para montar el acelerómetro con perno de anclaje (Stud mount), así se obtendría la máxima respuesta del sensor, los tipos de montaje se pueden observar en la Figura 21.

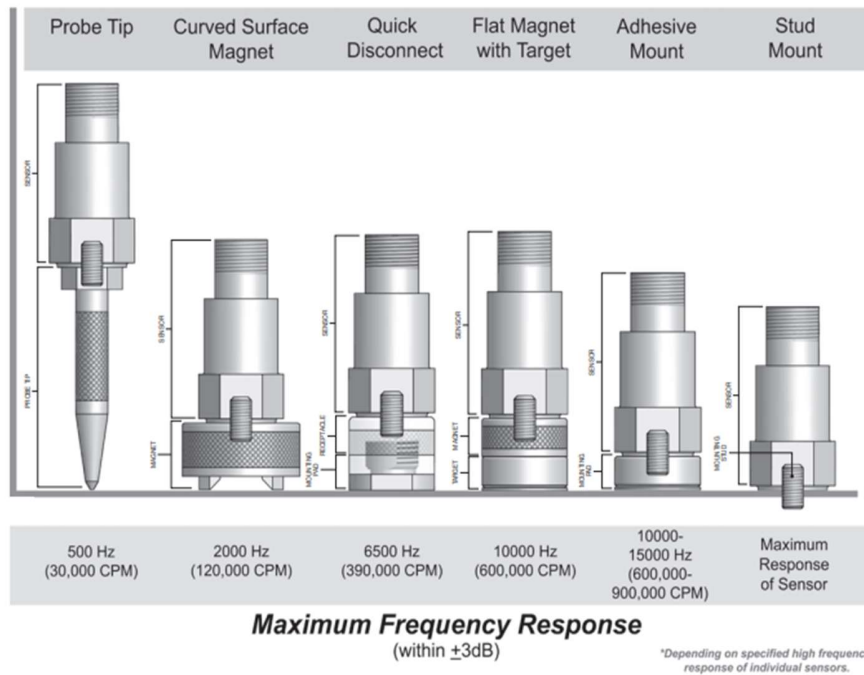


Figura 21 Tipo de montaje de los acelerómetros

3.10.4 Transmisión de señales

Se debe determinar cuál es la manera más óptima de transmitir las señales desde el sensor hasta el Gateway y al VCU, puede ser por medio de cableado para maquinas recién fabricadas o inalámbricamente para maquinas ya fabricadas. Cuando se instale los sensores es necesario comprobar el correcto funcionamiento de los cables de comunicación o transmisores inalámbricos, a su vez que los sensores instalados estén calibrados. Se debe evaluar cuál es el sistema de comunicación (cableado o inalámbrico) más adecuado teniendo en cuenta que para cableado:

- En cables no apantallados, puede interferir con otros equipos por la radiación de ondas electromagnéticas.
- La instalación en un vehículo ya fabricado tiene los inconvenientes de instalación en tiempo y coste. (García, 2007)

3.11 ANÁLISIS DE SEÑAL

En esta fase se establecerá una sistemática definitiva para la toma de medidas simplificando en lo posible el proceso, de tal modo que se realicen solo aquellas que aporten información válida para el mantenimiento.

3.11.1 Análisis de datos

El análisis de las señales registradas puede ir desde lo más elemental (medida directa en el dominio del tiempo de la amplitud y del periodo en el caso de una señal de amplitud constante) a la aplicación de sofisticados métodos matemáticos de análisis a señales aleatorias en los dominios del tiempo y de la frecuencia. El tipo de análisis necesario depende de las características de las vibraciones a analizar. Entre los métodos aplicativos a vibraciones y emisiones acústicas se puede encontrar:

- Análisis de tendencias.
- Valor pico o pico-pico
- Valor medio
- Valor eficaz o RMS
- Kurtosis, esta técnica se emplea en el control del estado de rodamientos.

3.11.2 Configuración de alarmas

Para configurar las alarmas para cada tipo de medición, se puede hacer dos maneras: basado en la medida de la amplitud de la vibración en condiciones óptimas de funcionamiento, o por los cambios producidos en la amplitud de las señales durante el funcionamiento en condiciones de carga y velocidad similares en el caso de locomotoras.

Para el análisis de vibraciones se puede utilizar como referencia las normativas internacionales ISO 20816 “Vibraciones mecánicas – Medida y evaluación de la vibración de máquinas” la cual irá sustituyendo con su publicación a los grupos de normas ISO 7919 y la ISO 10816. A su vez se debe tener en cuenta las recomendaciones y magnitudes de la norma UNE-EN 61373 “Aplicaciones ferroviarias – Material rodante – Ensayos de choque y vibración”

Para la medición de temperatura es importante tener en cuenta la norma UNE-EN 15437:2 “Aplicaciones ferroviarias – Monitorización de la condición de las cajas de grasa – Requisitos de interfaz y diseño – Parte 2: Requisitos de funcionamiento y diseño de los sistemas a bordo para la monitorización de temperaturas”, en la cual indica que “El requisito esencial es que el sistema de monitorización embarcado debe determinar el estado de la temperatura de las cajas de grasa e indicar que se ha superado la temperatura aceptable. Los sistemas de monitorización avanzados embarcados deben determinar la temperatura de la caja de grasa y entregar información sobre la temperatura, lista para una posterior comunicación y diagnosis.”(UNE-EN 15437-2, 2013)

Es importante fijar el límite máximo de vibración, emisión acústica y temperatura. Estos límites se suelen fijar bajo el nombre de “nivel de alerta”, “nivel de alarma” y “nivel de disparo.

- **Alerta:** Este nivel se da si se genera un cambio significativo en el nivel de vibración, ruido y/o temperatura registrado en una condición preestablecida de funcionamiento, por ejemplo, velocidad de locomotora 70km/h, puede hacer aconsejable una revisión de los espectros de vibración y ruido o una intervención sobre el rodamiento detectado, aun cuando el nivel alcanzado no esté en el nivel de alarma o disparo. Si no se tiene experiencia en concreto, se puede considerar un cambio significativo de amplitud superior a 25% respecto a un tiempo determinado o un número de medidas determinado evaluando la repetibilidad del valor obtenido.
- **Alarma:** Si se alcanza este nivel la maquina puede continuar trabajando mientras se realiza la investigación de las causas que han producido ese incremento en la vibración, ruido y/o temperatura, y se evalúan las medidas a adoptar para reducir los niveles a una condición optima de funcionamiento.
- **Emergencia o Disparo:** Es un nivel de vibración, ruido y/o temperatura que puede generar un fallo catastrófico en el rodamiento, si se alcanza ese nivel se deberá adoptar una medida preventiva de forma inmediata, y una medida correctora en el menor tiempo posible sin que se genere un fallo catastrófico.

3.11.3 Tratamiento digital de la señal de emisiones acústicas y vibración

En La actualidad, el procesamiento de las señales obtenidas en la medida de vibraciones y emisiones acústicas se hace de forma digital, es decir, se muestrea la señal temporal en una serie de instantes consecutivos de tiempo y estos datos se procesan digitalmente para obtener las características de la señal medida.

Cuando se analiza una señal, en primer lugar, hay que indicar que solo se considera una parte de la señal, es decir dispondremos de una señal temporal de longitud finita. En segundo lugar,

si se digitaliza, lo que hacemos es muestrear la señal en una secuencia de instantes de tiempo. Como consecuencia, la Transformada de Fourier de la señal muestreada no coincide con la correspondiente a la de la señal original y deberemos tomar las precauciones necesarias para que estas discrepancias sean lo menores posibles. A continuación, listaremos las técnicas utilizadas para corregir los defectos introducidos:

a) Efecto de la longitud finita - Ventanas temporales

Disminuir el error de leakage, se puede considerar que este error está asociado a que no coincide la concatenación de la señal al inicio y al final del tiempo de medida y se está considerando periódica de periodo T. Por tal razón, para reducir el error de leakage se utilizan ventanas temporales, las cuales dependen del tipo de señal original, estas pueden ser: ventanas exponenciales, ventanas de fuerza, ventanas Hanning, flat top, etc. Las características importantes de las ventanas son el error en amplitud que introducen y la resolución en frecuencia.

b) Efecto de la digitalización de la señal temporal

Cuando digitalizamos una señal, es como si la multiplicáramos por una función tipo peine, que toma valor unidad en los instantes de muestreo y cero en los restantes. En la figura se representa una señal $x(t)$ y una secuencia de escalones bajo el área de una curva lo cual correspondería a la digitalización de la señal. Si el tiempo de registro T suponemos que se han realizado N muestras, el tiempo entre muestras (Δt) y la frecuencia de muestreo (ω_s) serán:

$$\Delta t = \frac{T}{N} \text{ seg} ; \omega_s = \frac{1}{\Delta t} \text{ muestras/seg}$$

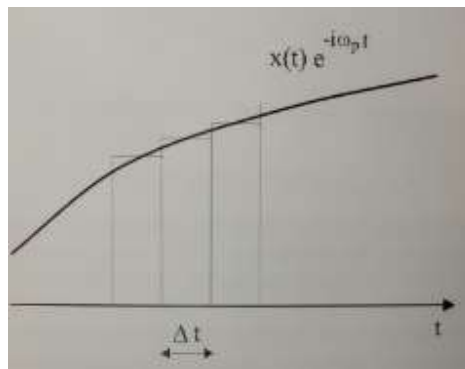


Figura 22 Señal temporal y digitalizada (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Como aproximación de la Transformada de Fourier de la señal original $x(t)$, podemos calcular la transformada de Fourier considerando la secuencia de escalones de anchura Δt , obteniendo una Transformada Discreta de Fourier. (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

$$\Delta\omega = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

Ecuación 17 Separación entre componentes en frecuencia

$$\omega_{max} = \frac{N}{2} \Delta\omega = \frac{N}{2T} [Hz]$$

$$\omega_{max} = \frac{N}{2T} = \frac{\omega_s}{2}$$

Ecuación 18 Frecuencia máxima analizable

Se debe tener en cuenta el efecto de aliasing en el dominio de frecuencia. Si la frecuencia de la señal (ω_1), mayor que la frecuencia máxima del análisis ($\omega_{max} = 0.5 \omega_s$) en la Transformada Discreta de Fourier esto aparecerá como una componente de frecuencia no real (frecuencia alias = $2 \omega_{max} - \omega_1$). Este defecto no puede corregirse digitalmente, por lo que debe solucionarse antes de la digitalización, filtrando analógicamente la señal real (filtro antialiasing).

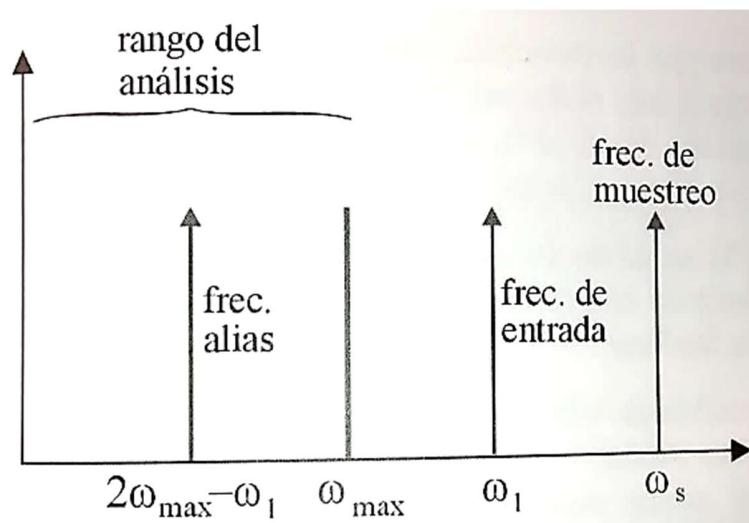


Figura 23 Efecto de aliasing (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Para poder realizar una correcta identificación del estado de los componentes de una maquina a partir del estudio del espectro en frecuencia, el equipo de medida debe ser capaz de registrar correctamente una banda de frecuencia desde 0,2 veces la frecuencia mínima de excitación hasta al menos 3,5 veces la máxima frecuencia de excitación. Esa frecuencia máxima de excitación puede ser desde un armónico de la velocidad de un eje (2° o 3°), al producto del número de dientes de un engranaje.

Al realizar una medida de vibraciones o de emisiones acústicas siempre tendremos ruido añadido a la señal que realmente queremos medir. Como en general, el ruido puede considerarse como una señal aleatoria de media nula, para eliminarlo podemos utilizar el promediado de diversas medidas.

Por último, se debe indicar que existe un algoritmo para realizar la Transformada Discreta de Fourier de forma muy eficaz que se denomina Transformada Rápida de Fourier (FFT), que exige que el número de muestras sea potencia de 2. El cálculo de la FFT de una señal es un proceso por lotes. Esto significa que son necesarias 1024 muestras para calcular un espectro

de 400 líneas. Este cálculo supone que la señal se repite en forma continua fuera de esos 1024 puntos medidos.

- c) Suma de señales
- d) Modulación de amplitud
- e) Modulación de frecuencia

3.11.4 Técnicas basadas en la detección de impactos

Son técnicas desarrolladas para detectar las frecuencias naturales excitadas por el impacto entre elementos metálicos como son los rodamientos y los engranes. La aparición de un defecto en uno de los elementos rodantes excita la resonancia de la frecuencia dependiendo de cada elemento, por tal razón se utilizan las siguientes herramientas para determinar la fuente de excitación de la vibración.

3.12 Análisis de señal temporal

Requiere emplear una frecuencia de muestreo suficientemente elevada, para observar los picos de impactos generados por elementos rodantes como rodamientos y engranes especialmente.

3.13 Amplitud pico (PeakVue) y método de envolvente (Enveloping)

Evitar el enmascaramiento que sufren frecuencias de fallo a altas frecuencias y de baja amplitud ocultas por las vibraciones generadas por desbalanceo, desalineación que son de baja frecuencia y alta amplitud.

3.14 Dominio de la Frecuencia. Cepstrum.

El Cepstrum se emplea para la detección de frecuencias ocasionadas por fallos en cajas de engranajes y en sistemas expertos para diagnosticar fallos en rodamientos.

3.15 CONTENIDO DE INFORMES A ENTREGAR

Por cada condición anormal encontrada se debe entregar un informe técnico en un formato estandarizado, que contenga por lo menos la siguiente información:

Encabezado:

- Fecha de entrega del informe.
- Código alfanumérico del informe.
- Código de identificación UIC de la locomotora.
- Nombre de la compañía a la que pertenece el vehículo
- Código de acuerdo a la norma UNE-EN 15320:2 del componente que está siendo evaluado.
- Nombre y código de la persona que detecto la anomalía.
- Nombre y código de la persona que realizo el análisis y el informe.

Objeto: de forma muy esquemática se exponga los motivos por el cual se ha elaborado el informe, debe ser corto y conciso.

Antecedentes: donde se aporten datos históricos del componente analizado, tendencias de las mediciones de vibración, emisiones acústicas y temperatura, intervenciones realizadas antes de la fecha de la última medición, referencia de informes anteriores, referencia de normativas utilizadas.

Desarrollo técnico:

- Esquema de la maquina inspeccionada.
- Foto del rodamiento detectado.
- Fecha, hora y ubicación de las mediciones informadas.
- Velocidad de locomotora en el momento de la medición.
- Velocidad rotacional del eje en el momento de la medición.
- Criticidad del informe, evaluado según la tabla cinco del nivel de criticidad del informe.
- Gráfico de tendencias de vibración, emisiones acústicas y temperatura, indicando el valor de las alarmas establecidas por cada herramienta de monitoreo.
- Grafica comparativa con la tendencia de los otros rodamientos de la locomotora.
- Presentar el espectro base de vibración y emisiones acústicas del componente.
- Espectros de vibración en velocidad, aceleración y/o envolvente indicando en frecuencia la resonancia de los componentes del rodamiento.
- Espectros de emisiones acústicas indicando en frecuencia la resonancia de los componentes del rodamiento.

| Nivel de criticidad | Descripción del nivel de criticidad | Recomendación de acuerdo a la criticidad |
|---------------------|--|---|
| 1 | ALTO Una de las variables (VIBRACIÓN, SONIDO Y/O TEMPERATURA) está por encima del nivel de ALARMA y presenta incremento mayor al 25% respecto a la última medida | Programar intervención lo más pronto posible |
| 2 | MEDIO ALTO Una de las variables (VIBRACIÓN, TEMPERATURA Y/O SONIDO) están por encima del nivel de ALERTA y se encuentran estables SIN incremento | Programar correctivo en un tiempo no mayor a 30 días y/o monitorear periódicamente el nivel de vibración, sonido y temperatura hasta que se realice la intervención requerida |
| 3 | MEDIO BAJO Las variables han incrementado, pero no han alcanzado el nivel de ALERTA. | Monitorear periódicamente niveles de vibración, temperatura y sonido |

| | | | |
|----------|-------------|--|---|
| 4 | BAJO | Las variables de VIBRACIÓN, TEMPERATURA Y SONIDO son adecuadas para su funcionamiento y se encuentran estables | Las variables de vibración, temperatura y sonido son óptimas para su funcionamiento |
|----------|-------------|--|---|

Tabla 5 Nivel de criticidad del informe (Benitez, 2012)

Conclusiones: este apartado debe ser corto, concreto y objetivo. Debe ser un resumen de los conocimientos adquiridos a través del apartado de desarrollo técnico. Se deben recoger todos los problemas detectados, si bien en ocasiones las conclusiones no pueden ser definitivas debido a falta de información o precisión de los datos que se poseen. Por ende, se recomienda ser muy objetivo y no generar conclusiones sin bases sólidas de la información, si en la conclusión requiere obtener más datos es preferible informarlo.

Propuestas y recomendaciones: las recomendaciones pueden ir orientadas a indicar lo que se puede hacer para mejorar el estado de la máquina, por ejemplo, “Cambiar el rodamiento”, “verificar ajuste de la pista externa respecto a la caja de grasa”, “Evaluar condición del lubricante”, etc. O bien que sean más complejas y requieran una serie de pasos para lograr la condición óptima del componente. Este apartado no debe ser muy extenso.

Anexos:

- Certificado de calibración de los sensores.
- Certificado de aptitud de la persona quien realiza el análisis y el informe.
- Espectros requeridos por el interesado (Espectros en cascada, formas de onda, espectrogramas)

3.16 PLAN DE ACCIONES CORRECTIVAS

En esta fase se repasan las recomendaciones, se evalúa el impacto económico que pueda tener y se traza un plan de acción a corto, mediano y largo plazo, determinando el recurso humano, material, y disponibilidad de la locomotora en un taller apropiado para ejecutar el plan de acción correctiva

3.17 RETROALIMENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS ACCIONES CORRECTIVAS

En esta fase se recomienda documentar los resultados de las acciones correctivas y retroalimentar a las personas involucradas en el suceso, desde el conductor, pasando por el ingeniero de mantenimiento predictivo, gerencia de mantenimiento hasta el técnico que ha intervenido el componente. A su vez enriquece los indicadores de gestión del departamento de mantenimiento por medio del soporte documentado de las acciones correctivas. Además, beneficia los siguientes puntos:

- Evaluar veracidad y fiabilidad de las conclusiones y recomendaciones por parte del ingeniero de mantenimiento predictivo.
- Afinar niveles de alarma y criticidad del informe.

- Desarrollar una estadística por causas del modo de fallo evaluado.
- Formar a las personas involucradas en el área de mantenimiento a partir de la experiencia documentada en las acciones correctivas
- Mejora la toma de decisiones cuando se evalué el plan de acciones correctivas a futuro.
- Enriquece la experiencia en el diseño de los fabricantes de los componentes y de la locomotora.

4. RESULTADOS

4.1 ESTABLECER EL/LOS OBJETIVOS DE LA POLÍTICA DE MANTENIMIENTO

Controlar la condición de los rodamientos de los bogies para evitar el fallo catastrófico de la locomotora.

4.2 DATOS TÉCNICOS DE LA LOCOMOTORA-CASO DE ESTUDIO

En las tablas 6,7,8 y 9 se muestran las características generales de la locomotora.

| Características generales de la locomotora | |
|--|----------------------|
| DESCRIPCIÓN | VALOR |
| Disposición de ejes | Co' Co' |
| Potencia nominal | 2954 kW (4000 HP) |
| Carga por eje de locomotora | 22,5 +/- 2% Tn |
| Peso aproximado con abastecimientos | 125 +/- 3% Tn |
| Velocidad máxima | 120 km/h |
| Velocidad promedio | 70 km/h |
| Esfuerzo tracción máximo (arranque) | aprox. 400 kN |
| Esfuerzo tracción en régimen continuo | aprox. 244 kN |
| Esfuerzo a tracción a 120 km/h | 79,3 kN |
| Potencia máxima en rueda | 1500 kW |

Tabla 6 Características generales de la locomotora

| Características técnicas del rodamiento de las cajas del eje | |
|--|-------------------------------------|
| DESCRIPCIÓN | VALOR |
| Tipo de rodamiento | CTBU (Compact Tapered Bearing Unit) |
| Referencia rodamiento de rodillos cónicos en cajas de grasa | TBU 160X280 |
| Diámetro interno del rodamiento | 160mm |
| Diámetro externo del rodamiento | 280mm |
| Ancho del rodamiento | 180mm |

| | |
|--|-----------------------------|
| Diámetro promedio del rodamiento (Dp) | 220mm |
| Numero de rodillos por fila (Z) | 21 |
| Numero de filas por rodamiento | 2 |
| Diámetro de rodillo (De) | 18mm |
| Angulo de contacto de elementos rodantes en grados (β) | 10 |
| Carga dinámica [C] | 1320 kN |
| Carga estática soportada por el eje (G00) | 22,5 Tn (220,73 kN) |
| Peso del eje con ruedas (Gr) | 2,88 Tn (28,25 kN) |
| Grasa lubricante | Shell GadusRail S3 EUDB [5] |
| Viscosidad Cinemática del aceite base @ 40°C | 100 mm ² /s |
| Viscosidad Cinemática del aceite base @ 100°C | 11 mm ² /s |
| Velocidad rotacional a 120 km/h | 596 RPM |
| Velocidad rotacional a 70 km/h | 346.8 RPM |

Tabla 7 Características generales del rodamiento

| Características técnicas de la caja de engranes | |
|---|-----------|
| DESCRIPCIÓN | VALOR |
| Numero de dientes eje de entrada al reductor | 18 |
| Numero de dientes eje de salida al reductor | 71 |
| Torque máximo de tracción | 10350 N.m |
| Velocidad rotacional eje de salida a velocidad máxima de 120km/h | 596 RPM |
| Velocidad rotacional eje de entrada a velocidad máxima de 120km/h | 2350 rpm |
| Relación de engrane | 3.94 : 1 |

Tabla 8 Características técnicas de la caja de engranes

| Características técnicas del motor eléctrico de tracción | |
|--|----------|
| DESCRIPCIÓN | VALOR |
| Referencia rodamiento lado libre | NU 1024 |
| Referencia rodamiento lado acople | 6322 M |
| Velocidad rotacional eje de salida a velocidad máxima de 120km/h | 2350 rpm |

Tabla 9 Características técnicas del motor eléctrico de tracción

4.3 CALCULAR LA TASA DE FALLOS DEL COMPONENTE

En los cálculos se ha utilizado la información del rodamiento disponible en las tablas de información del componente de la sección 4.3.

9. Hallar la carga del eje

$$G = \frac{G_{00} - G_r}{2} = \frac{220.73kN - 28.25kN}{2} = 96.24 kN$$

Ecuación 19 Carga del eje (G)

10. Hallar la carga radial equivalente del eje (K_r)

$$K_r = f_0 * f_{rd} * f_{tr} * G$$

Ecuación 20 Carga radial equivalente del eje

$$K_r = 1 * 1.3 * 1.05 * 96.24kN = 131.36kN$$

| Payload factor f_0 | Vehicle type |
|------------------------|---|
| 0,8 to 0,9 0,9 to 1 | Freight cars Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles |
| 1 | Locomotives and other vehicles having a constant payload |

The payload factor f_0 is used for variation in the static loading of the vehicle, e.g. goods for freight and passengers incl. baggage for coaches. A locomotive has no significant variation in the static load; that's why a full static axlebox load needs to be applied.

Figura 27 Factor de carga útil (SKF, 2012)

| Dynamic radial factor f_{rd} | Vehicle type |
|--------------------------------|--|
| 1,2 1,1 to 1,3 | Freight cars, adapter application Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles |
| 1,2 to 1,4 | Locomotives and other vehicles having a constant payload |

The dynamic radial factor f_{rd} is used to take into account quasi-static effects like rolling and pitch as well as dynamic effects from the wheel rail contact.

Figura 26 Factor radial dinámico (SKF, 2012)

| Dynamic traction factor f_{tr} | Vehicle type |
|----------------------------------|--|
| 1,05 | Powered vehicles with an elastic drive system, e.g. hollow shaft drive with elastic coupling |
| 1,1 | Powered vehicles with a non-elastic drive system, e.g. axle hung traction motors |
| 1 | Non-powered vehicles |

The dynamic traction factor is used to take into account additional radial loads caused by the drive system.

Figura 25 Factor dinámico de tracción (SKF, 2012)

| Dynamic axial factor f_{ad} | Vehicle type |
|-------------------------------|---|
| 0,1 0,08 | Freight cars Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles, max speed 160 km/h |
| 0,1 | Multiple units, passenger coaches and mass transit vehicles > 160 km/h |
| 0,12 | Locomotives, tilting trains or other concepts leading to higher lateral acceleration |

Figura 24 Factor axial dinámico (SKF, 2012)

11. Hallar la carga axial equivalente del eje (K_a)

$$K_a = f_0 * f_{ad} * G = 1 * 0,12 * 96,24kN = 11,54kN$$

Ecuación 21 Carga axial equivalente del eje

12. Hallar la carga del rodamiento (F_r) para cajas de grasa donde la carga del rodamiento actúa simétricamente en la parte superior o en ambos lados.

$$F_r = K_r + 2f_c K_a = 131.36kN + (2 * 0.301 * 11,54kN) = 138.22kN$$

Ecuación 22 Carga axial equivalente del eje

$$f_c = \frac{hD_a}{l} = \frac{0.25 * 160mm}{132.60mm} = 0.301$$

Ecuación 23 Factor de carga axial para cajas de grasa soportadas simétricamente

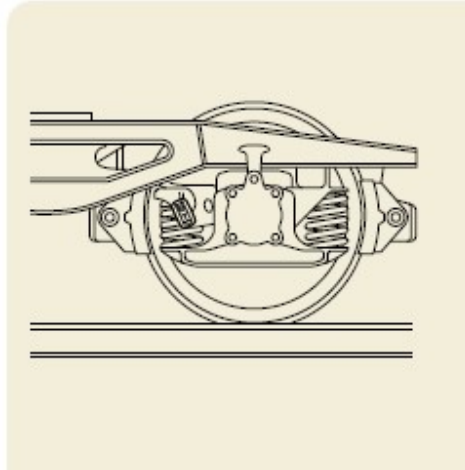


Figura 28 Caja de grasa soportado simétricamente (SKF, 2012)

13. Hallar la carga dinámica equivalente del rodamiento (P)

$$P = F_r + Y * F_a = 138.32kN + (2.55 * 11.54kN) = 167.74kN$$

Ecuación 24 Carga dinámica equivalente del rodamiento

14. Vida de calificación básica (L_{10}) para rodamientos de rodillos, siendo (C) la capacidad de carga dinámica definida para rodamiento

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^{10/3} = \left(\frac{1320kN}{167.74kN}\right)^{10/3} = 969,12 * 10^6 \text{ revoluciones}$$

Ecuación 25 Vida de calificación básica para rodamientos de rodillos

15. Vida de calificación básica en kilómetros (L_{10s})

$$L_{10s} = \pi * L_{10} * D_w * \frac{1km}{1000m} = \frac{\pi * 969.12 \times 10^6 rev * 1.06m * 1km}{1000m} = 3.227.255 km$$

Ecuación 26 Vida de calificación básica en kilómetros

16. Factor de corrección de Vida (L_s)

$$L_s = a_1 * a_{iso} * L_{10s}$$

Ecuación 27 Factor de corrección de Vida

| Fiabilidad % | a_1 |
|--------------|-------|
| 90 | 1 |
| 95 | 0.64 |
| 96 | 0.55 |
| 97 | 0.47 |
| 98 | 0.37 |
| 99 | 0.25 |
| 99.2 | 0.22 |
| 99.4 | 0.19 |
| 99.6 | 0.16 |
| 99.8 | 0.12 |
| 99.9 | 0.093 |
| 99.92 | 0.087 |
| 99.94 | 0.080 |
| 99.95 | 0.077 |

Tabla 10 Factor de fiabilidad a_1 (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

De acuerdo a la tabla diez, para el análisis tomaremos $a_1=0,25$ para un 99% de fiabilidad.

Para determinar el valor del factor de las condiciones de trabajo a_{iso} , deberemos hallar la viscosidad relativa para el rodamiento:

$$v_1 = \frac{45000}{\sqrt{d_m \cdot n^{1.667}}} \quad \text{para } n < 1000 \text{ rpm}$$

Ecuación 28 Viscosidad relativa

Para $d_m=220\text{mm}$ y $n=347 \text{ RPM}$ a una velocidad promedio de 70km/h

$$v_1 = 23.15 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Para hallar la viscosidad del aceite a temperatura de trabajo $T_a= 70 \text{ }^\circ\text{C}$, se ha utilizado la viscosidad cinemática del aceite base de la grasa a 40°C y a 100°C que se encuentran en la sección 2.1 del documento.

$$\log(\log(v + 0,7)) = A - B \cdot \log(T)$$

T en Kelvin, A y B constantes

$$v = 10^{10(A - B \cdot \log(T))} - 0,7$$

Ecuación 29 ASTM D341: Ecuación Walther de relación entre viscosidad y temperatura (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

$$v_{@40^{\circ}C} = 100 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_{@100^{\circ}C} = 11 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_{@70^{\circ}C} = 22.98 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Hallamos el cociente de viscosidades:

$$k = \frac{v}{v_1} = \frac{22.98}{23.15} = 0.992$$

Lo cual concuerda con el hecho de que la grasa Shell GadusRail S3 tiene aditivos de extrema presión y el nivel de contaminación no es muy alto ($n_c > 0.2$). Por tal razón se asume que $a_{ISO} \leq 3$.

El factor de contaminación del lubricante n_c se obtiene de la Tabla 11.

| Condición | $d_m < 100$ | $d_m \geq 100$ |
|--|-------------|----------------|
| Limpieza extrema Condiciones de laboratorio | 1 | 1 |
| Gran limpieza Aceite filtrado a través de un filtro extremadamente fino Típico de los rodamientos engrasados de por vida y obturados | 0,8 ... 0,6 | 0,9 ... 0,8 |
| Limpieza normal Aceite filtrado a través de un filtro fino Rodamientos engrasados de por vida y con placas de protección | 0,6 ... 0,5 | 0,8 ... 0,6 |
| Contaminación ligera | 0,5 ... 0,3 | 0,6 ... 0,4 |
| Contaminación típica Típico de los rodamientos sin obturaciones integrales, filtrado grueso, partículas de desgaste y entrada de partículas del exterior | 0,3 ... 0,1 | 0,4 ... 0,2 |
| Contaminación alta Entorno muy contaminado y obturación inadecuada | 0,1 ... 0 | 0,1 ... 0 |
| Contaminación muy alta n_c puede estar fuera de la escala produciendo una reducción mayor de la vida útil de lo establecido por la ecuación Ec. 4 | 0 | 0 |

Tabla 11 Factor de contaminación (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

Para calcular la relación contaminación-carga $n_c(P_u/F_{eq})$ se requiere el valor de límite de fatiga del rodamiento (P_u), y dado que este valor no es publicado por ningún fabricante de rodamientos, se halla el rango de P_u a partir de los valores de n_c obtenidos en la figura 18, y el valor de carga dinámica equivalente del rodamiento (P) hallado en el punto 5.

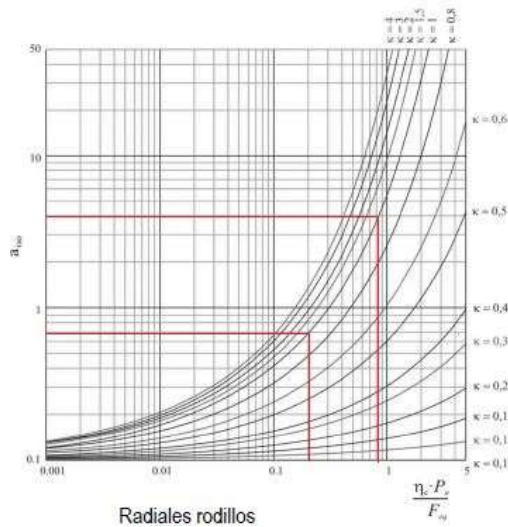


Figura 29 Factor a_{iso} para rodamientos radiales de rodillos (Besa, Antonio ; Carballeira, 2018)

$$0.7 \leq a_{iso} \leq 3$$

$$0.2 \leq \frac{n_c * P_u}{F_{eq}} \leq 0.7$$

$$146.77 \text{ kN} \leq P_u \leq 587 \text{ kN}$$

De acuerdo a los valores calculados, se obtuvo el valor de vida corregido de acuerdo al valor de a_{iso} siendo $a_1=0,25$ (99% fiabilidad) ; $P_u= 147,77 \text{ kN}$; $F_{eq}=P=167,74 \text{ kN}$

$$L_s = a_1 * a_{iso} * L_{10}$$

| Condición lubricante | n_c ($d_m > 100 \text{ mm}$) | $(n_c * P_u) / F_{eq}$ | a_{iso} | a_1 | L_{10s} (km) | L_s (km) |
|----------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------|-------|----------------|------------|
| Gran limpieza | 0,8 | 0,70 | 3 | 0,25 | 3.227.255 | 2.420.441 |
| Limpieza normal | 0,7 | 0,61 | 2 | 0,25 | 3.227.255 | 1.613.628 |
| Contaminación ligera | 0,6 | 0,52 | 1,8 | 0,25 | 3.227.255 | 1.452.265 |
| Contaminación típica | 0,4 | 0,35 | 1 | 0,25 | 3.227.255 | 806.814 |
| Contaminación alta | 0,1 | 0,08 | 0,4 | 0,25 | 3.227.255 | 322.726 |

Tabla 12 Valores de vida corregida en km

Para el caso práctico del Análisis de Modo de Fallos, Causa y Efectos y el Análisis de Árbol de Fallos se utilizará como MKBF el valor del caso 1 de 2.420.441 km/fallo.

4.4 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN AMFE

Ver en Anexos 5.1.

4.5 ANÁLISIS DE ÁRBOL DE FALLOS

Ver en anexos 5.2

4.6 CALCULAR EL COSTE ECONÓMICO DEL FALLO

De acuerdo a los resultados presentados en el informe sobre descarrilamiento evaluación de impacto económico presentado por el Consorcio D-RAIL (Schöbel et al., 2013) el costo promedio de descarrilamiento generado por caja de eje caliente y ruptura del eje es de 1,285,575€. El cual se puede evidenciar en la Tabla 13.

| Causes DNV Rolling Stock Subcategory | Derailment share | Cost per derailment |
|--|------------------|---------------------|
| Hot axle box and axle journal rupture | 12.00% | 1,282,575 € |
| Axle shaft rupture | 2.55% | 265,531 € |
| Axle rupture, location not known | 0.64% | 1,057,385 € |
| Rupture of monoblock wheel | 2.55% | 1,625,541 € |
| Failure of composite wheel with rim and tyre | 5.41% | 2,133,400 € |
| Excessive flange or wheel tread wear (wrong wheel profile) | 2.34% | - |
| Failure of bogie structure and supports | 1.91% | 154,061 € |
| Spring & suspension failure | 4.03% | 1,865,570 € |
| Other bogie or suspension failure | 1.59% | - |
| Twisted or broken wagon structure/frame | 1.27% | 617,741 € |
| Wagon too high twist stiffness in relation to length | 0.21% | 88,752 € |
| Brake component failure | 1.91% | 346,144 € |
| Other or unknown rolling stock derailment cause | 1.80% | 1,079,510 € |

Tabla 13 Causas de descarrilamiento por categorías de elementos rodantes: parte del número de descarrilamientos como un porcentaje, y costo promedio por descarrilamiento. (Schöbel et al., 2013)

De acuerdo a la conclusión del análisis “el costo promedio de un descarrilamiento severo es estimado en 600,000€. El costo humano y el costo medio ambiental son independientes del tipo de descarrilamiento, equivalente, en promedio, a 24,700€ por descarrilamiento, asumiendo 500 descarrilamientos en línea por año” (Schöbel et al., 2013).

El coste económico de cada fallo por rodamiento varía en cada caso, y en este trabajo se pueden exponer varios ejemplos de cifras que se han presentado en diversos medios.

- Los costes por rescate del vehículo en la vía: en el caso del descarrilamiento del tren en Station Square en agosto del 2018 en Pittsburgh – EEUU, servicios de policía, bomberos y servicios médicos fueron desplegados, el periódico ha reportado que se han invertido recursos públicos por alrededor de €58.000, a la fecha del reporte era que las expectativas eran mayores. (WPXI, n.d.)
- Los costes de materiales si se da un fallo catastrófico, debido cambio de ejes, rodamientos, cajas de ejes, etc: de acuerdo al costo estimado en el AMFE del **Anexo 1**, se estima que el cambio de rodamientos y ejes en un bogie tipo Co' Co' sea alrededor de €33.000 incluyendo materiales y mano de obra. No se ha estimado el costo del cambio de otros elementos que se puedan ver afectados como la rueda, la suspensión primaria, la caja de grasa, la suspensión secundaria, entre otros.
- Los costes de bienes tangibles, materiales tóxicos y/o peligrosos transportados por vagones: el 6 de enero del 2005 un tren en Graniteville se descarrilo liberando 160.000 lb de cloro al aire. El descarrilamiento y choque en Graniteville el costo a la compañía administradora del tren por lo menos usd\$58 millones.(Pugliese, n.d.)
- Los costos por indemnización si la vía sufre daño: en el caso del descarrilamiento de un tren de pasajeros en la estación de Britomart en Auckland – Nueva Zelanda, estimaron que el costo de reparación de la vía, señalización, inspección de la vía y seguridad fue de alrededor de \$44000 dólares neozelandés (alrededor de €26.000), el cual la compañía operadora del tren asumió en su presupuesto. (Lawton, n.d.)
- Los costos por indemnización si hay víctimas mortales si se presenta descarrilamiento de la locomotora: en el caso del descarrilamiento del tren de pasajeros Amtrak Cascades 501 el 18 de diciembre del 2017, se reportó que tres personas a bordo murieron y 76 personas resultaron heridas a raíz del hecho (“Descarrilamiento de tren de Washington de 2017,” n.d.), “El caso busca un pago aún no revelado para incluir la pérdida de ingresos, gastos médicos, gastos de rehabilitación, atención domiciliaria y sufrimiento. Por ley federal, la responsabilidad de Amtrak está limitada a \$ 295 millones combinados para todos los casos que surjan de un solo accidente de tren de pasajeros.”(Lindblom, 2018). De acuerdo al reporte de D-RAIL (Schöbel et al., 2013) de costos por descarrilamiento, el costo por fatalidad es de 1,500,000€ y por heridas graves 200,000€.
- Los costos de las penalizaciones por obstrucción de la vía: El costo depende del pliego de condiciones y de la administración ferroviaria.

- Los costos por tiempo muerto del tren o no disponibilidad del vehículo para satisfacer el servicio requerido: el costo depende del pliego de condiciones y de la administración ferroviaria.
- Los costos intangibles por reputación para el fabricante, el operario/mantenedor y la percepción del usuario final.

4.7 PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En el anexo tres se podrá encontrar el desarrollo del **Anexo 3. Plan de mantenimiento preventivo para el sistema de tracción de un bogies con monitoreo de condición** con su respectivo análisis de costo.

4.8 PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

En el anexo cuatro se encuentra el desarrollo del **Anexo 4. Plan de mantenimiento predictivo para el sistema de tracción de un bogie con monitoreo de condición.** su respectivo análisis de costo.

4.9 IDENTIFICAR LOS PUNTOS DE INSPECCIÓN

De los puntos a inspeccionar son el 7 y el 8 ubicados en las cajas de grasa 1 y 2 como muestra el esquema de la Figura 30.

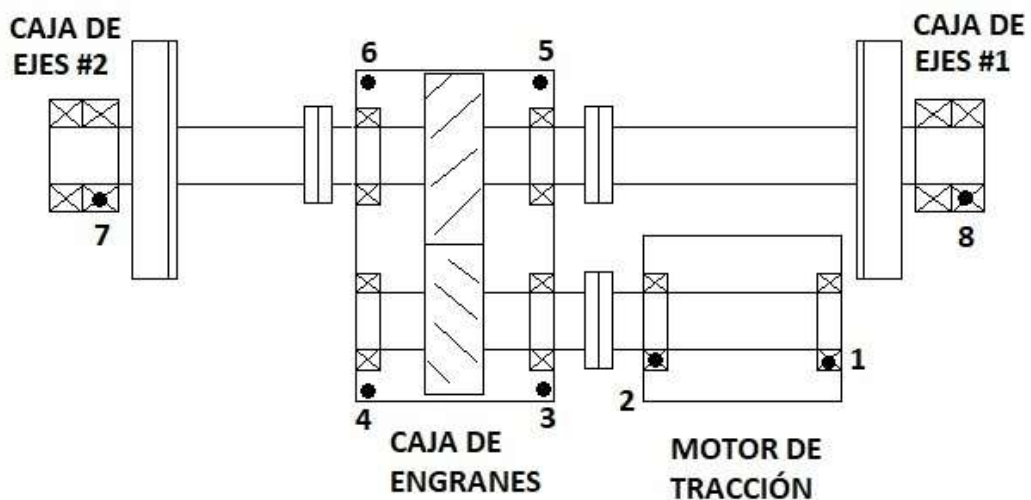


Figura 30 Esquema cinemático de la ubicación de los puntos de inspección en el sistema de tracción

De acuerdo a la norma UNE-EN 15380-2 la codificación de cada punto sería:

1. Código UIC locomotora

1.1. EA01: Bogie tractor 1 lado cabina 1

1.1.1. EA01-EA01ORGROD: Órgano rodadura 01

1.1.1.1. FD01MOT: Motor tracción 01

1.1.1.2. FD01RED: Caja de engranes 01

1.1.1.3. EC01EJE: Eje montado 01

1.1.1.3.1. EC01COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 01

1.1.1.3.1.1. GE01TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo

1.1.1.3.1.2. GE01VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo

1.1.1.3.1.3. GE01EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo

1.1.1.3.2. EC02COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 01

1.1.1.3.2.1. GE02TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho

1.1.1.3.2.2. GE02VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho

1.1.1.3.2.3. GE02EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho

1.1.2. EA01-EA02ORGROD: Órgano rodadura 02

1.1.2.1. FD02MOT: Motor tracción 02

1.1.2.2. FD02RED: Caja de engranes 02

1.1.2.3. EC02EJE: Eje montado 02

1.1.2.3.1. EC03COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 02

1.1.2.3.1.1. GE03TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo

1.1.2.3.1.2. GE03VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo

1.1.2.3.1.3. GE03EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo

1.1.2.3.2. EC04COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 02

1.1.2.3.2.1. GE04TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho

1.1.2.3.2.2. GE04VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho

1.1.2.3.2.3. GE04EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho

1.1.3. EA01-EA03ORGROD: Órgano Rodadura 03

1.1.3.1. FD03MOT: Motor tracción 03

1.1.3.2. FD03RED: Caja de engranes 03

1.1.3.3. EC03EJE: Eje montado 03

1.1.3.3.1. EC05COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 03

- 1.1.3.3.1.1. GE05TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo
- 1.1.3.3.1.2. GE05VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo
- 1.1.3.3.1.3. GE05EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo
- 1.1.3.3.2. EC06COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 02
 - 1.1.3.3.2.1. GE06TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho
 - 1.1.3.3.2.2. GE06VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho
 - 1.1.3.3.2.3. GE06EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho

1.2. EA02: Bogie tractor 2 lado cabina 2

- 1.2.1. EA02-EA04ORGROD: Órgano rodadura 04
 - 1.2.1.1. FD04MOT: Motor tracción 04
 - 1.2.1.2. FD04RED: Caja de engranes 04
 - 1.2.1.3. EC04EJE: Eje montado 04
 - 1.2.1.3.1. EC07COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 04
 - 1.2.1.3.1.1. GE07TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo
 - 1.2.1.3.1.2. GE07VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo
 - 1.2.1.3.1.3. GE07EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo
 - 1.2.1.3.2. EC08COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 01
 - 1.2.1.3.2.1. GE08TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho
 - 1.2.1.3.2.2. GE08VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho
 - 1.2.1.3.2.3. GE08EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho
- 1.2.2. EA02-EA05ORGROD: Órgano rodadura 05
 - 1.2.2.1. FD05MOT: Motor tracción 05
 - 1.2.2.2. FD05RED: Caja de engranes 05
 - 1.2.2.3. EC05EJE: Eje montado 05
 - 1.2.2.3.1. EC09COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 05
 - 1.2.2.3.1.1. GE09TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo
 - 1.2.2.3.1.2. GE09VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo
 - 1.2.2.3.1.3. GE09EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo
 - 1.2.2.3.2. EC10COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 05
 - 1.2.2.3.2.1. GE10TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho

- 1.2.2.3.2.2. GE10VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho
- 1.2.2.3.2.3. GE10EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho

1.2.3. EA02-EA06ORGR0D: Órgano Rodadura 06

- 1.2.3.1. FD06MOT: Motor tracción 06
- 1.2.3.2. FD06RED: Caja de engranes 06
- 1.2.3.3. EC06EJE: Eje montado 06
 - 1.2.3.3.1. EC11COJIZQ: Cojinete lado izquierdo eje montado 06
 - 1.2.3.3.1.1. GE11TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado izquierdo
 - 1.2.3.3.1.2. GE11VIB: Acelerómetro cojinete lado izquierdo
 - 1.2.3.3.1.3. GE11EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado izquierdo
 - 1.2.3.3.2. EC12COJDER: Cojinete lado derecho eje montado 06
 - 1.2.3.3.2.1. GE12TEMP: Sensor de temperatura cojinete lado derecho
 - 1.2.3.3.2.2. GE12VIB: Acelerómetro cojinete lado derecho
 - 1.2.3.3.2.3. GE12EA: Sensor de Emisiones Acústicas cojinete lado derecho

4.10 DETERMINAR LOS SÍNTOMAS A INSPECCIONAR

Se propone combinar datos de la integración de tres sensores de tres variables físicas diferentes, vibración, emisiones acústicas (ultrasonido) y temperatura. El síntoma a inspeccionar por medio de análisis de vibración, análisis de emisiones acústicas y temperatura es el estado de los componentes del rodamiento. Por medio de vibraciones también se puede evaluar la influencia de la condición de la vía y la condición de las ruedas en el comportamiento vibracional del rodamiento.

La medición de temperatura en las cajas de grasa es una medición avalada por una norma en la industria ferroviaria, la UNE-EN 15437-2:2013 (UNE-EN 15437-2, 2013), la cual puede ser utilizada como aviso al conductor del vehículo si se trata de un sistema de control embarcado como sería este caso, y al centro de mando.

El análisis de vibraciones en la cajas de grasa se utilizaría porque es una herramienta de monitoreo de condición avalada por una norma internacional ISO 20816 y la ISO 10816 que permite determinar la condición de los elementos rodantes, a su vez permite evaluar la condición de las vías y la condición de las ruedas (Kundu et al., 2018).

La medición de emisiones acústicas o también llamado ruido o ultrasonido generado por el paso de defectos en los componentes del rodamiento, es una técnica que se ha demostrado en otros sectores industriales como el aeronáutico (Elasha et al., 2015) su eficiencia para encontrar fallos incipientes en rodamientos de bajas velocidades (Van Hecke et al., 2016).

Debido a la variación de velocidad de la locomotora se propone medir las tres variables físicas para obtener una mayor fiabilidad de los resultados, precisión en la interpretación, a su vez por incrementar la robustez debido a la redundancia del sistema de monitoreo de condición y la conveniencia en el momento de tomar decisiones de la intervención a realizar.

4.11 CALCULO DE FRECUENCIAS DE FALLO EN LOS RODAMIENTOS DE LAS CAJAS DE GRASA

De acuerdo a las fórmulas de frecuencias de fallo en rodamientos se halla los valores de frecuencia suponiendo que se toma una medida a velocidad constante durante un intervalo de tiempo, los cuales se podrán observar en un espectro de una Transformada de Fourier (FFT).

| REF. RODAMIENTO | CTBU 160X280 | | A velocidad promedio 70km/h | | | | | | | |
|----------------------|--------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------------|--|------------|-------------------|--------------------|----------|----------|
| Diam. (mm) | Int. (mm) | Diam. Ext. (mm) | N bolas (Z) | Diam. Bolas (mm) (D _e) | Diam. Pitch (mm) (D _p) | cos (beta) | Vel. angular (Hz) | Vel. angular (RPM) | | |
| 160 | | 280 | 21 | 18 | 220 | 0,9848 | 5,78 | 346,8 | | |
| CALCULO POR FORMULAS | | | | | CALCULO APROXIMADO POR NUMERO DE BOLAS | | | | | |
| BPFI (Hz) | BPFO (Hz) | BSF (Hz) | FTF (Hz) | | | | BPFI (Hz) | BPFO (Hz) | BSF (Hz) | FTF (Hz) |
| 63,4 | 57,9 | 32,2 | 2,76 | | | | 67,6 | 53,8 | 30,2 | 2,6 |

Tabla 14 Calculo de frecuencias de fallo a velocidad promedio constante de 70 km/h de los rodamientos de las cajas de grasa

| REF. RODAMIENTO | CTBU 160X280 | | A máxima velocidad 120km/h | | | | | | | |
|----------------------|-----------------|-------------|------------------------------------|------------------------------------|--|-------------------|-------------------|-----------|----------|----------|
| Diam. Int. (mm) | Diam. Ext. (mm) | N bolas (Z) | Diam. Bolas (mm) (D _e) | Diam. Pitch (mm) (D _p) | cos (beta) | Vel. angular (Hz) | Vel angular (RPM) | | | |
| 160 | 280 | 21 | 18 | 220 | 0,9848 | 9,93 | 595,8 | | | |
| CALCULO POR FORMULAS | | | | | CALCULO APROXIMADO POR NUMERO DE BOLAS | | | | | |
| BPFI (Hz) | BPFO (Hz) | BSF (Hz) | FTF (Hz) | | | | BPFI (Hz) | BPFO (Hz) | BSF (Hz) | FTF (Hz) |
| 109,0 | 99,5 | 55,3 | 4,74 | | | | 116,2 | 92,3 | 51,8 | 4,4 |

Tabla 15 Calculo de frecuencias de fallo a velocidad máxima constante de 120 km/h en los rodamientos de las cajas de grasa

Se debe tener en cuenta que la velocidad rotacional es directamente proporcional a la velocidad lineal de la locomotora, por lo cual el valor de las frecuencias de los elementos rodantes cambia, esto lo debe tener en cuenta el software que administre las frecuencias y el analista de vibraciones que interprete los espectros, la medida del taquímetro instalado en las ruedas.

4.12 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se propone hacerla con el módulo de monitoreo de condición Wi-Care 240 (“WiCare 240,” n.d.), por medio de este módulo se puede adquirir datos de tacómetros, vibración, temperatura, ultrasonido entre otros.

4.12.1 Información a guardar por cada medición

La información adicional que se debe guardar por cada medida es:

- Código de identificación UIC de la locomotora, que un código de 12 dígitos que identifica cada vehículo matriculado.
- Código del punto de inspección en las cajas de grasa según denominación de la sección 3.9.
- Velocidad de la locomotora medida por el sensor taquimétrico en la rueda.
- Fecha y hora de la medida
- Ubicación GPS (Global Positioning System)
- Dirección de viaje (Hacia cabina 1 o 2)
- Temperatura ambiente
- Modelo y número de serie del transductor
- Unidades de la medida (g's, °C, Db, RPM)
- Amplitud y tiempo de la señal obtenida por los transductores.

4.12.1.1 Datos de vibraciones y temperatura

Se obtendrá la señal de vibración y temperatura obtenida por el acelerómetro, el tiempo de obtención depende del análisis de datos que se configure en el equipo. El acelerómetro estaría en posición horizontal respecto al soporte de la chumacera.

4.12.1.2 Datos de emisiones acústicas

Se obtendrá la señal de ultrasonido del sensor de altas frecuencias, el cual se instalaría en la posición vertical

4.12.2 Selección de sensores

De acuerdo a los cálculos de frecuencias de fallo a evaluar realizados en la sección 2.9, se debe realizar el cálculo de para la selección de los sensores. Teniendo en cuenta los siguientes pasos:

De acuerdo a la Tabla 15 Calculo de frecuencias de fallo a velocidad máxima constante de 120 km/h en los rodamientos de las cajas de grasa, la frecuencia más alta sería el BPFI de

109 Hz y sus armónicos, por tal razón se utilizaría el acelerómetro Wi-Care 130 (“Wi-Care 130,” n.d.) El cual es un sensor inalámbrico de vibración Triaxial (Vertical, Horizontal, Axial) y sensor de temperatura, a continuación en la Tabla 16 y Tabla 17 se expone las características técnicas de dos sensores de similares características técnicas el Wi-care 130 y el AC207-1D, en la Tabla 18 se describe las características técnicas del sensor de ultrasonido:

4.12.2.1 Vibración y temperatura

| Descripción técnica acelerómetro y temperatura Wi-care 130 | |
|--|--|
| DESCRIPCIÓN | VALOR |
| Numero de ejes | Triaxial (Vertical, horizontal, axial) |
| Sensibilidad (+/- 10%) | 100 mV/g |
| Rango de amplitud de vibración | +/-25 a +/-50g pico |
| Frecuencia de respuesta | 1 Hz a 10 kHz |
| Frecuencia de muestreo | 256 a 80 kHz |
| Tiempo de forma de onda | 512 a 32,000 puntos |
| Resolución FFT | 800 a 16,000 líneas |
| Límite de vibración | 5,000 g pico |
| Rango de medición de temperatura | -40 °C a 375 °C +/- 1°C |
| Montaje | M6 o magnético |

Tabla 16 Descripción técnica acelerómetro y temperatura Wi-care 130 (“Wi-Care 130,” n.d.)



Figura 31 Acelerómetro y temperatura Wi-care 130

| Características técnicas del acelerómetro AC207-1D | | |
|--|-------------------------|-------------------|
| DESCRIPCIÓN | VALOR | |
| Numero de ejes | Mono axial | |
| Vibración | | |
| Sensibilidad (+/- 10%) | 100 mV/g | |
| Frecuencia de respuesta (+/- 3 dB) | 30 CPM a 750 kCPM | 0,5 Hz a 12,5 kHz |
| Frecuencia de respuesta (+/- 10%) | 120 CPM a 360 kCPM | 2 Hz a 6 kHz |
| Rango dinámico | +/- 80 g, pico | |
| Electrico | | |
| Tiempo de establecimiento | < 2,5 segundos | |
| Fuente de voltaje | 18 Vdc a 30 Vdc | |
| Ruido espectral @ 10 Hz | 8 µg/√Hz | |
| Ruido espectral @ 100 Hz | 0,82 µg/√Hz | |
| Bias voltaje de salida | 10 Vdc a 14 Vdc | |
| Rango de medición de temperatura | -50 °C a 162 °C | |
| Máxima protección de choque | 5 kg, pico | |
| Sensibilidad electromagnética | CE | |
| Sellado | Soldado, hermético | |
| Físico | | |
| Elemento sensor | Piezoeléctrico cerámico | |
| Material de carcasa | 316L Acero inox. | |
| Rosca de montaje | 1/4 - 28 | M6x1 |
| Conector | 2 pin MIL - C -5015 | |
| Frecuencia de resonancia | 1380kCPM | 23 kHz |
| Certificado de calibración | CA10 | |

Tabla 17 Características técnicas del acelerómetro y temperatura AC207-1D

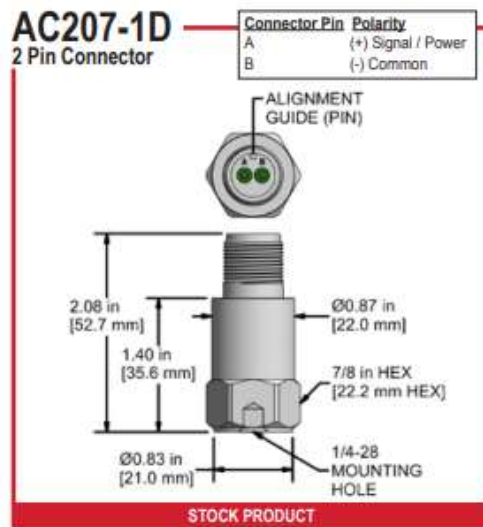


Figura 32 Acelerómetro y sensor de temperatura AC207-1D (CTConline, n.d.-b)

| Descripción técnica transductor ultrasonido Wi-care 150 | |
|---|--|
| DESCRIPCION | VALOR |
| Rango de amplitud | 40 dB a 120 dB |
| Rango de temperatura de operación | 0 °C a 50 °C |
| Fuente de alimentación | 18 Vdc a 30 Vdc |
| Corriente de salida | 30mA max |
| Consumo | 4-20 mA proporcional a la señal de ultrasonido detectada |
| Frecuencia de detección | 40 kHz (+/- 2 kHz) |
| Cable | apantallado RF 3m (10°) |
| Método de sujeción | Rosca hembra de montaje 10/32 |
| Carcasa | Acero inox. IP64 |
| Salida | Demodulada / heterodina |

Tabla 18 Sensor de ultrasonido Wi-care 150



Figura 33 Sensor de ultrasonido Wi-CARE 150 (UE system Ultra-Trak 750) (“Wi-care 150,” n.d.)

4.12.3 Instalación de sensores

Para cajas de grasa ya fabricadas, se recomienda instalar soportes adhesivados en una posición vertical para el acelerómetro y para el sensor de ultrasonido, aunque lo ideal es tener en cuenta en el diseño y fabricación de la caja de grasa añadir una rosca para montar el acelerómetro con perno de anclaje (Stud mount). De acuerdo a la Figura 17 Caja de grasa soportado simétricamente(SKF, 2012), se recomienda instalar los sensores de acuerdo a la Figura 34.

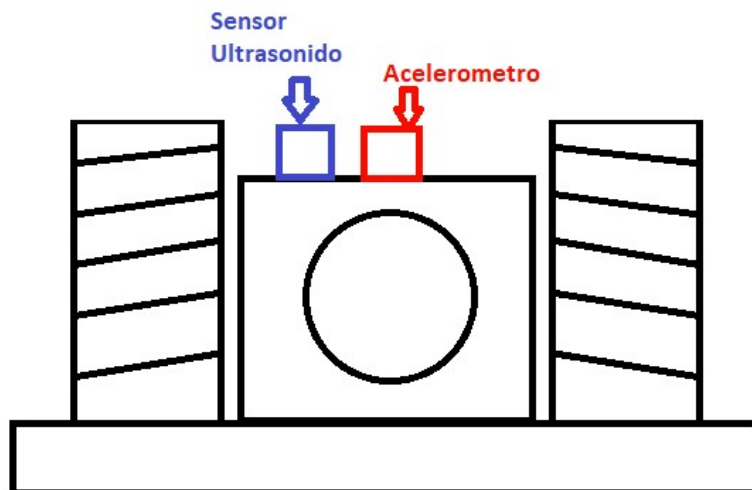


Figura 34 Esquema de ubicación de sensores en la caja de grasa

datos vía GSM a la nube. Con un Gateway es posible conectar los 24 sensores (12 acelerómetros y 12 sensores de ultrasonido) conectados en el vehículo.

4.13 ANÁLISIS DE SEÑAL

En esta fase se establecerá una sistemática definitiva para la toma de medidas simplificando en lo posible el proceso, de tal modo que se realicen solo aquellas que aporten información válida para el mantenimiento.

4.13.1 Análisis de datos

El software procesador de datos se llama I-SEE el cual ofrece herramientas de análisis de datos como:

- Análisis de forma de onda (g's)
- Espectro de velocidad en RMS (mm/s), se puede observar un ejemplo en la Figura 37.
- Espectro de aceleración (g)
- Gráficos en cascada, se puede observar en la Figura 38.
- I-DNA es una técnica que utiliza algoritmos de PeakVue para analizar impactos generados por rodamientos y engranes.
- Envolverte

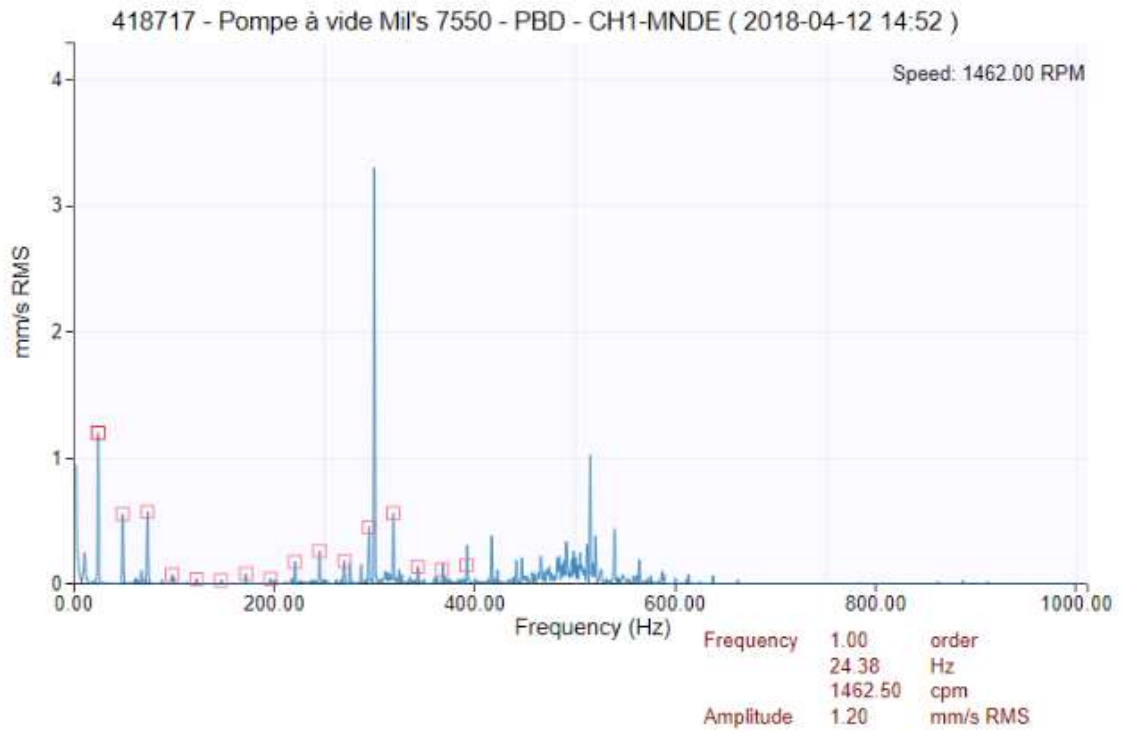


Figura 37 Espectro de vibración tipo software I-SEE (I-care, n.d.)

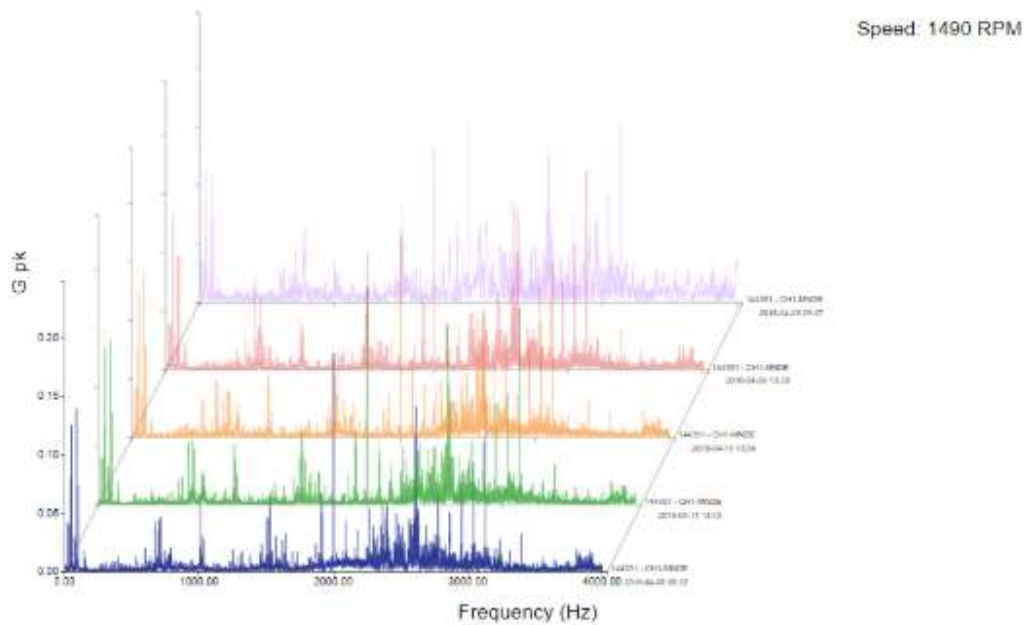


Figura 38 Grafica de cascada obtenida por el software I-SEE (I-care, n.d.)

4.13.2 Configuración de alarmas

Se debe tener en cuenta que los valores de alarma asignados son dinámicos y pueden cambiar de acuerdo a los registros históricos obtenidos en cada vehículo, los valores dados son recomendaciones basados en normativas y experiencias publicadas en artículos técnicos.

4.13.2.1 Temperatura

La configuración de alarmas para las mediciones de temperatura se tomas de las recomendaciones de la norma UNE-EN 15437:2, el cual indica que “Para un sistema de monitorización básico embarcado basado en un fusible mecánico, donde le fusible está diseñado para ser activado cuando una de las cajas de grasa supera una temperatura de 95 °C, debería activarse con una temperatura de las cajas de grasa entre 90 °C y 100 °C.”(UNE-EN 15437-2, 2013), a su vez en experiencias con el sistema HABD en la cual indica que los niveles de alerta es mayor a 100 °C, a 120 °C o 140°C. (Lunys et al., 2015)

Por tal razón los niveles de alarma se asumen a una velocidad del vehículo menor o igual a 70 km/h como:

- **ALERTA:** Si alcanza una temperatura mayor a 70 °C o presenta un incremento en la tendencia del 25% respecto a la temperatura promedio en funcionamiento de todas las cajas de grasa en el vehículo.
- **ALARMA:** Si alcanza una temperatura mayor a 90 °C.
- **DISPARO:** Si alcanza una temperatura mayor a 120 °C

4.13.2.2 Vibración

De acuerdo a la norma ISO 10816-1:1995 se toma como referencia los las zonas de evaluación para maquinas “clase IV: Motores principales grandes y otras máquinas grandes con masas giratorias montadas sobre cimientos que son relativamente suaves en la dirección de las mediciones de vibración (por ejemplo, conjuntos de turbogeneradores y turbinas de gas con salidas superiores a 10 MW)”(ISO, 1995), siendo esta clase de máquinas con mayor similitud al montaje de las cajas de grasa en la locomotora. Los niveles de alarma para los valores de velocidad RMS en mm/s para valores medidos a una velocidad en la locomotora de 70km/h serian:

- **ALERTA:** Si alcanza valores entre 8 mm/s y 10 mm/s en velocidad o presenta un incremento en la tendencia del 25% respecto a la vibración promedio de la caja de grasa a una velocidad de 70 km/h.
- **ALARMA:** Si alcanza valores entre 10mm/s y 18mm/s en velocidad.
- **EMERGENCIA:** Si alcanza valores mayores a 18mm/s en velocidad.

A su vez se estima la zona de evaluación en la variable de aceleración pico RMS (g's) en dirección vertical (Y) de acuerdo a la publicación de un artículo relacionado con condiciones anormales en rodamientos detectado por un equipo comercial (Symonds et al., 2015), en el cual indica que el valor promedio de 1,5g alcanzando un valores mayores a 5g (Figura 39) antes de que se interviniera el rodamiento y se hallara defectos en la pista externa (Figura). De acuerdo a esto las zonas de evaluación serian:

- ALERTA: Si alcanza valores entre 2g's y 3g's en aceleración o presenta un incremento en la tendencia del 25% respecto a la vibración promedio de la caja de grasa a una velocidad de 70 km/h.
- ALARMA: Si alcanza valores entre 3g's y 4,5g's en aceleración
- EMERGENCIA: Si alcanza valores mayores a 4,5g's en aceleración.

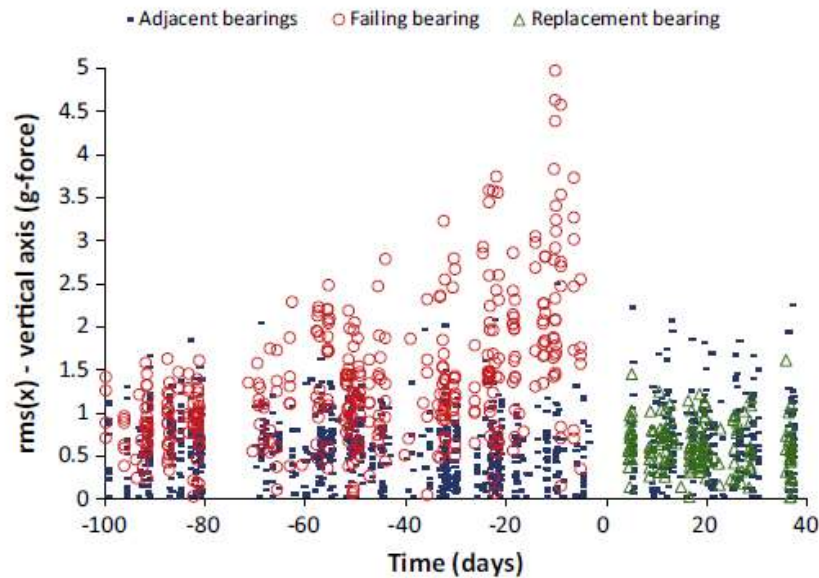


Figura 39 Parámetros de aceleración en la dirección vertical, $RMS(x)$ vs tiempo. Muestra relación del reemplazo del rodamiento con fallo potencial. (Symonds et al., 2015)



Figura 40 Daño en pista externa del rodamiento encontrado después del desmontaje del rodamiento detectado por las mediciones de vibración mostradas en la Figura 39 (Symonds et al., 2015)

4.13.2.3 Emisiones acústicas (ruido)

Ya que no hay datos registrados por este método, se propone evaluar por variación en el comportamiento de la tendencia, a su vez comparando los valores críticos encontrados por temperatura y vibración. En emisiones acústicas se puede evaluar los espectros en PeakVue y envolvere a las frecuencias de fallo de los componentes de los rodamientos, y realizar un seguimiento de la amplitud de los picos. (Elasha et al., 2015)

4.14 INFORMES A ENTREGAR

I-care ofrece una plataforma web llamada I-see (I-care, n.d.), en la cual se integran múltiples opciones de herramientas de monitoreo de condición incluyendo vibraciones, ultrasonido, temperatura y velocidad rotacional.

La plataforma permite realizar la gestión de los datos recolectados por cada herramienta de monitoreo de condición permitiendo visualizar el estado de la máquina, a su vez permite comparar las mediciones respecto a Indicadores de gestión (KPI's), y elabora reportes de diagnósticos.

Para acceder a las herramientas de la plataforma web se puede acceder por medio de un usuario y contraseña por medio de un navegador de internet permitiendo el acceso desde cualquier dispositivo.

La plataforma web ofrece las siguientes herramientas:

- Autodiagnóstico (Machine learning): el software está habilitado para aprender y analizar el comportamiento monitorizado de la máquina.
- Gestión de la condición de los activos: como resultado de la realización de un AMFE, la plataforma garantiza la centralización de la estrategia completa de mantenimiento de los equipos que incluye las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo basado en los actuales modos de fallo y fallos potenciales que se están experimentando.
- Sala de control – Mantenimiento predictivo: esta es una herramienta que permite observar de una manera global la condición de los puntos monitoreados por medio de un código de colores. Este monitorizado se hace en tiempo real y se actualiza automáticamente durante las 24 horas del día.
- Mensajes instantáneos a móviles (SMS): envía mensajes instantáneos cuando alguna variable ha excedido uno de los niveles de alarma configurados.
- Indicadores claves de rendimiento (KPI'S): la plataforma mejora la gestión de mantenimiento y la comunicación efectiva a través de los indicadores de gestión, el cual permite observar el comportamiento de la maquina por medio de estos tres indicadores:
 - a. Criticidad de rodamiento / número de equipos inspeccionados
 - b. Indicadores financieros: Costos ahorrados por corrección anticipada del fallo
 - c. MTBF (Tiempo Medio Entre Fallos)

4.15 ANÁLISIS ECONÓMICO

4.15.1 Costo inversión inicial

El costo de la inversión inicial se describe en la tabla 17.

Tabla 19 Costo de inversión del sistema de monitoreo de condición

| Inversión Sistema Wi-care Condition Monitoring System (Valores estimados) | | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | Cantidad | Precio (€) | Total (€) |
| Sensor ultrasonido Wi-care 150 | 8 | 300 | 2.400 |
| Sensos de vibracion y temperatura Wi-care 130 | 8 | 600 | 4.800 |
| Gateway Wi-care 920 | 1 | 2.500 | 2.500 |
| Instalación | 1 | 8.000 | 8.000 |
| INVERSION TOTAL EQUIPOS (€) | | | 17.700 |
| CURSOS DE CAPACITACION PARA ANALISIS DE VIBRACIONES | | | |
| DESCRIPCION | Precio unitario (€) | Personas a capacitar | Precio total (€) |
| Vibraciones Nivel 1 | 1700 | 2 | 3.400 |
| Vibraciones Nivel 2 | 1700 | 2 | 3.400 |
| Vibraciones Nivel 3 | 3000 | 2 | 6.000 |
| Emisiones acusticas nivel 1 | 2000 | 2 | 4.000 |
| Emisiones acusticas nivel 2 | 2000 | 2 | 4.000 |
| Total costes de capacitacion | | | 20.800 |
| TOTAL INVERSION INICIAL (€) | | | 38.500 |

4.15.2 Costo del plan de mantenimiento preventivo

En la figura 41 se muestra el comportamiento del coste anual del plan de mantenimiento preventivo y en la figura 42 se muestra el costo acumulado del respectivo plan realizado en el **Anexo 3**. Cabe anotar que en el costo del mantenimiento preventivo está incluido la calibración anual de los sensores del vehículo.

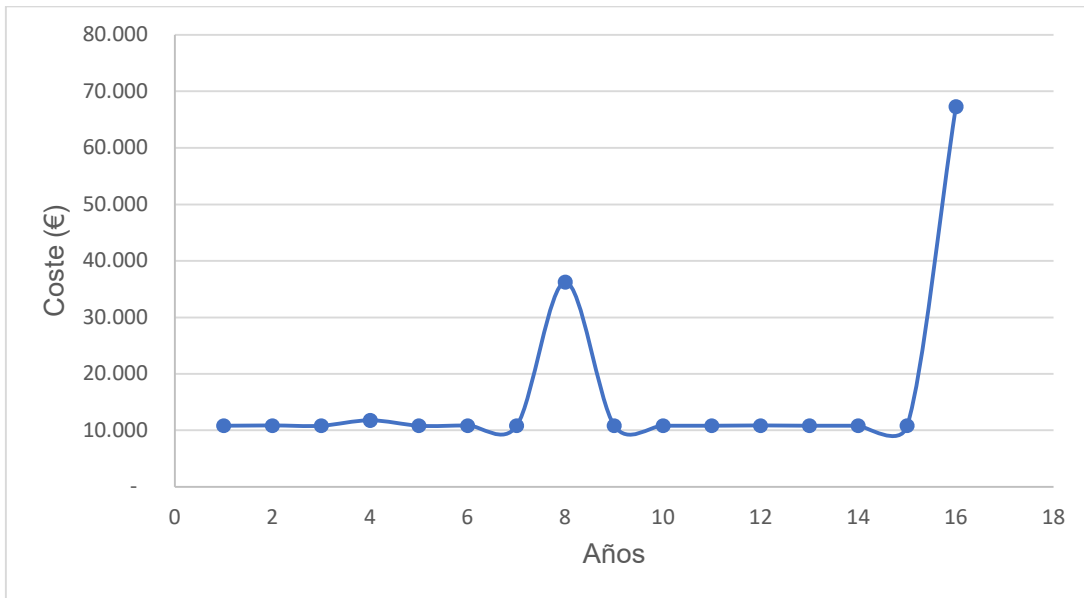


Figura 41 Coste anual del mantenimiento preventivo

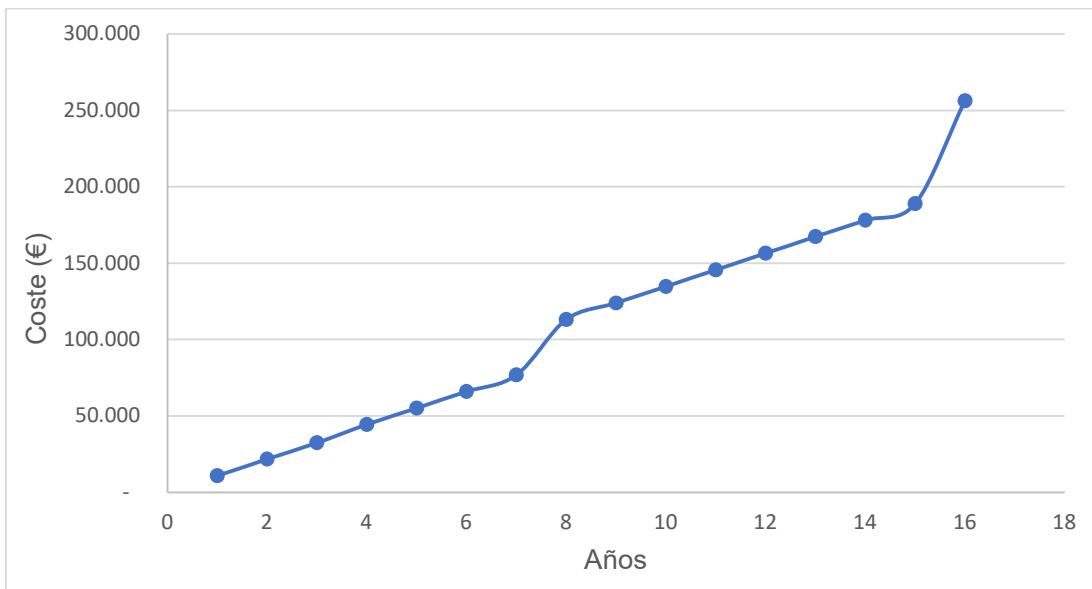


Figura 42 Coste acumulado del mantenimiento preventivo

4.15.3 Costo del plan de mantenimiento predictivo

En la figura 43 se muestra el comportamiento del coste anual del plan de mantenimiento predictivo y en la figura 44 se muestra el costo acumulado del respectivo plan, realizado en el **Anexo 4**. Teniendo en cuenta que por cada locomotora se puede pagar anualmente 3000€ por servicio de centro de diagnóstico remoto y administración de bases de datos al suministrador del equipo de monitoreo de condición, como soporte al personal que haya recibido la capacitación en planta del mantenedor.

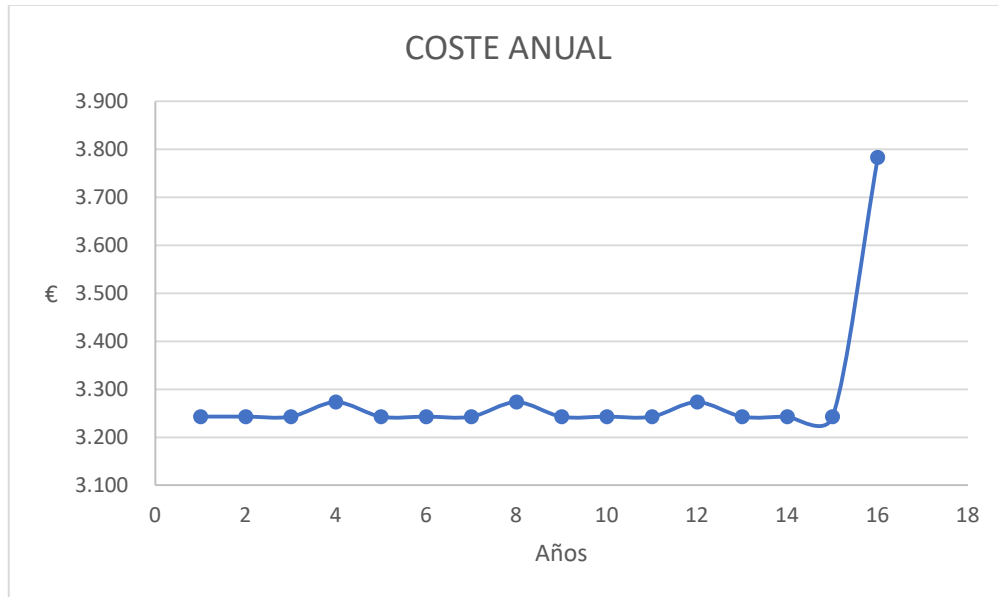


Figura 43 Coste anual del mantenimiento predictivo



Figura 44 Coste acumulado del mantenimiento predictivo

4.15.4 Costo económico del fallo

El costo económico del fallo por las diferentes actividades que se pueden presentar se encuentra desglosado en la tabla 18.

| Costo económico del fallo | |
|---|--------------------------------|
| Descripción de actividades | Costes (€) |
| Costo promedio de descarrilamiento generado por caja de eje caliente y ruptura del eje | 1.282.575 |
| Coste por rescate de vehículo en la vía | 60.000 |
| Coste por materiales (rodamiento, eje, ruedas) | 33.000 |
| Coste por bienes tangibles, materiales tóxicos y/o peligrosos | 64.000.000 (Pugliese, n.d.) |
| Costos por indemnización si la vía sufre daño | 44.000 |
| Costos por indemnización si hay víctimas mortales | 1.500.000 |
| Costo por heridas graves | 200.000 |
| Costo por penalizaciones por obstrucción en la vía | |
| Costos por tiempo muerto del tren o no disponibilidad del vehículo | |
| Costos por reputación para el fabricante, operario/mantenedor y la percepción del usuario final | |

Tabla 20 resumen de coste económico del fallo (Schöbel et al., 2013)

5. CONCLUSIONES

Un rodamiento con alguna anomalía representa un peligro para la integridad del vehículo, la carga, los pasajeros y las vías. A través del tiempo se han reportado casos en los cuales por un descarrilamiento se presentan cuantiosas pérdidas humanas, económicas y ambientales. De acuerdo a los resultados de estudios publicados en países como Canadá, India, Irán durante periodos de entre 3 y 5 años se ha evidenciado que alrededor del 37% son por causa de elementos rodantes ferroviarios, y que de este valor el 60% son por causa del fallo del conjunto de las ruedas. En investigaciones publicadas han demostrado que, aun cumpliendo con los planes de mantenimiento preventivo y predictivo, se presentan casos de fallos en rodamientos en las vías.

Para realizar un Análisis de Modos de Fallos, Efectos y Causas (AMFE) y un Análisis de Árbol de Fallos (AAF), es importante determinar la tasa de fallos. En este trabajo se determinó la tasa de fallos para un rodamiento de la industria ferroviaria por medio de un estudio matemático. Al desarrollar las fórmulas matemáticas se pudo evidenciar factores determinantes en el resultado final, cuando se realiza el factor de corrección de vida (L_s), como son el factor de fiabilidad (a_1) y el factor de las condiciones de trabajo (a_{iso}). El valor de a_{iso} depende del valor límite de fatiga del rodamiento (P_u) el cual es dado por el fabricante, para este caso no está disponible en los catálogos ni en la página web de los fabricantes de rodamientos. Se asumió un rango dependiendo del factor de contaminación del lubricante (n_c), siendo determinante en el resultado del cálculo de vida corregida.

El factor a_{iso} es un elemento determinante en el factor de vida (L_s), debido a que si aumenta la contaminación del lubricante puede disminuir en un 70 % la expectativa de vida del rodamiento. Y si llegase a suceder que la contaminación del lubricante es extrema podría disminuir a más del 70% de la vida útil calculada en condiciones óptimas de funcionamiento.

En el AMFEC se observó que la mayoría de los modos de fallo pueden ser avería, siempre y cuando se monitoricen, de esta manera se evita que el efecto en el vehículo sea socorrerlo en las vías. El único modo de fallo que no se puede detectar es la fractura de la jaula o uno de los elementos rodantes, los cuales pueden ser causados por impacto, precarga del rodamiento durante el montaje, o soltura mecánica.

El análisis del AAF muestra que uno de los factores para que se bloquee el rodamiento es el desconchamiento de al menos uno de los elementos rodantes. El desconchamiento es causado principalmente por problemas de lubricación, entre el 70% y el 80% dependiendo del modo de fallo.

Utilizar múltiples sensores para medir diferentes variables físicas monitoreando un mismo síntoma, permite representar internamente la condición del rodamiento de una manera coherente, con precisión, fiabilidad, robustez y conveniencia. Por esta razón,

se propuso monitorear la condición de los rodamientos de las cajas de grasa en los bogies utilizando las herramientas de análisis de vibración, emisiones acústicas y temperatura ampliando el rango de monitorización por variación de velocidad y carga en el vehículo. A su vez se hace énfasis en utilizar la medición de Emisiones Acústicas en rodamiento por la efectividad de la técnica en determinar fallos a temprana edad en rodamientos de baja y alta velocidad, así como la deficiencia de lubricación del rodamiento, complementando el uso del análisis de vibraciones para tal fin.

El costo estimado de la inversión del sistema de monitoreo de condición y capacitación del ingeniero es de 28.100€. Si se presenta un fallo en un solo rodamiento en la vía sin que genere descarrilamiento implica incurrir en los costos por materiales, mano de obra y rescate de la locomotora lo cuales serían alrededor de 100.000€. Si se presenta descarrilamiento por daño de rodamiento y/o fractura del eje el costo promedio es de 1.285.575€. Si debido al descarrilamiento se presenta una víctima mortal el costo por indemnización es de 1.500.000€. Y si en la locomotora se presentara un fallo de uno de los rodamientos y estuviese transportando carga o materiales peligrosos el coste podría depender del valor económico de la carga y los daños causados al medio ambiente y a terceros, se ha presentado casos en los que el coste ha alcanzado los 64.000.000€.

Al invertir en la monitorización de la condición de los rodamientos de locomotoras incrementa la fiabilidad del sistema de tracción del bogie, debido a que se controla con anticipación el momento en el que se puede presentar el fallo. De esta manera se evitan sucesos catastróficos que implican cuantiosas pérdidas económicas, se reducen acciones innecesarias de mantenimiento programado y el consumo de repuestos. El monitoreo de condición permite realizar análisis de pronosis de los datos actuales e históricos, con el fin de predecir fallos a futuro en el sistema y programar acciones correctivas sin interrupción del servicio.

5.1 TRABAJO A FUTURO

- Implementar la metodología en una locomotora y determinar la viabilidad de los resultados obtenidos.
- Evaluar la viabilidad de monitorizar el motor Diesel y generador, soplador de refrigeración, compresor, motor de tracción eléctrico y caja de engranes.
- Con el sensor de ultrasonido instalado se podría evaluar la viabilidad de detectar fugas en el sistema de freno de la locomotora.
- Normativa con los niveles de alarma para detección de fallos en rodamientos por ultrasonido para locomotoras.
- Normativa con los niveles de alarma para detección de fallos en rodamientos por vibraciones para locomotoras.
- Desarrollar algoritmos de machine learning para determinar la condición de los rodamientos que sea de soporte en la evaluación de los datos obtenidos para ingeniero predictivo.
- Determinar la viabilidad de la locomotora como vehículo inteligente auscultor de la condición de las vías.
- Evaluar la viabilidad de que la locomotora sea un nodo de conexión para vagones de carga instalando sensores inalámbricos de vibración y temperatura en las cajas de grasa, evaluando la criticidad de los valores obtenidos por comparación.(Bernal et al., 2019)
- De acuerdo a los datos obtenidos del sistema de monitoreo de condición, se puede desarrollar métodos de prognosis del fallo estimando o prediciendo el tiempo de vida remanente de los rodamientos.(Sino-German Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing & Standardisation Sub-Working Group, 2018)

6. BIBLIOGRAFÍA

- 60812, U.-E. *española*. , (2009).
- Benitez, A. (2012). Criticidad informes de monitoreo de condición. Retrieved December 9, 2019, from www.mecanalis.com
- Bernal, E., Spiriyagin, M., & Cole, C. (2019). Onboard Condition Monitoring Sensors, Systems and Techniques for Freight Railway Vehicles: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 19(1), 4–24. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2875160>
- Besa, Antonio; Carballeira, J. (2018). *Diagnóstico y corrección de fallos de componentes mecánicos* (U. P. de València, Ed.). Valencia.
- Corni, I., Symonds, N., Wood, R. J. K., Wasenczuk, A., & Vincent, D. (2015). Real-time on-board condition monitoring of train axle bearings. *Stephenson Conference Research for Railways 2015, 2015-April(17)*, 477–489.
- CTCOnline. (n.d.-a). Adhesive mounting pads. Retrieved from https://www.ctconline.com/adhesive_mounting_pads.aspx
- CTCOnline. (n.d.-b). Datasheet acelerometro AC207 SERIES. Retrieved December 4, 2019, from https://www.ctconline.com/fileup/2018/PDF_DATASHEETS/SENSORS/AC207/AC207.pdf
- Descarrilamiento de tren de Washington de 2017. (n.d.). Retrieved December 2, 2019, from https://es.wikipedia.org/wiki/Descarrilamiento_de_tren_de_Washington_de_2017
- EKE electronics. (n.d.-a). HABD system. Retrieved December 6, 2019, from <https://www.eke-electronics.com/hot-axle-box-detection-system-habd>
- EKE electronics. (n.d.-b). VCU. Retrieved November 9, 2019, from <https://www.eke-electronics.com/vehicle-control-unit-vcu>
- Elasha, F., Greaves, M., Mba, D., & Addali, A. (2015). Application of Acoustic Emission in Diagnostic of Bearing Faults within a Helicopter Gearbox. *Procedia CIRP*, 38, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.042>
- EN 17023:2018. *Railway applications - railway vehicle maintenance - Creation and modification of maintenance plan.* , (2004).
- García, D. C. R. (2007). *Modelado y validación de un sistema digital de comunicaciones de gran ancho de banda de aplicación en vehículos de transporte.*
- Gerdun, V., Sedmak, T., Šinkovec, V., Kovše, I., & Cene, B. (2007). Failures of bearings and axles in railway freight wagons. *Engineering Failure Analysis*, 14(5), 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.044>
- González, F. (2015). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado* (5ta ed.).
- I-care. (n.d.). I-SEE™: THE FASTEST AND EASIEST WAY TO MAINTENANCE 4.0. Retrieved December 4, 2019, from <https://www.icareweb.com/en-gb/i-see/the-fastest-and-easiest-way-to-maintenance-40/>

- ISO. (1995). *ISO 10816-1:1995. 995*. Retrieved from www.iso.org
- Kaewkongka, T. (2002). *Bearing Condition Monitoring using Acoustic Emission and Vibration - The system approach* -. Brunel University.
- Kundu, P., Darpe, A., & Singh, S. P. (2018). *A Review on Condition Monitoring Technologies for Railway Rolling Stock*. (July), 1–15.
- Lawton, N. (n.d.). Britomart train derailment cost KiwiRail \$44,000. Retrieved November 2, 2019, from <https://www.stuff.co.nz/auckland/104677972/britomart-train-derailment-cost-kiwirail-44000>
- Lindblom, M. (2018). Injured conductor, passenger sue over fatal Amtrak derailment onto I-5 south of Tacoma. Retrieved November 2, 2019, from Seattle Times website: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/transportation/injured-conductor-sues-amtrak-over-fatal-train-derailment-onto-i-5-in-south-of-tacoma/>
- Lunys, O., Dailydka, S., & Bureika, G. (2015). Investigation on features and tendencies of axle-box heating. *Transport Problems*, 10(1), 105–114. <https://doi.org/10.21307/tp-2015-011>
- Perpetuum. (n.d.). Perpetuum. Retrieved December 6, 2019, from <https://perpetuum.com/about/>
- Pugliese, L. (n.d.). Bartow train derailment happens exactly 14 years after deadly Graniteville derailment. Retrieved December 2, 2019, from 12 WRDW website: <https://www.wrdw.com/content/news/Bartow-train-derailment-happens-exactly-14-years-after-deadly-Graniteville-derailed-503997951.html>
- Rodriguez, M. A. (2006). Locomotora diesel. Retrieved December 7, 2019, from http://ferropedia.es/mediawiki/index.php/Archivo:Locomotora_diesel.jpg
- RONDS. (n.d.). Retrieved December 6, 2019, from <http://en.ronds.com/en/sensor/>
- Schaeffler. (n.d.). Caja de grasa. Retrieved December 10, 2019, from <https://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/productos-y-soluciones/industria/soluciones-sectoriales/ferrocarril/rodamientos-cajas-grasa-vagones-pasajeros-y-locomotoras/index.jsp>
- Schöbel, A., Zarembski, A., Palese, J., & Maly, T. (2013). *Report on analysis of derailment causes, impact and prevention assessment. D-RAIL - Development of the Future Rail Freight System to Reduce the Occurrences and Impact of Derailment*. 1–33. Retrieved from http://d-rail-project.eu/IMG/pdf/DR-D3-1-F1-Analysis_of_derailment_causes_impact_and_prevention_assessment-v3.pdf
- SDT ultrasounds. (n.d.). Online4US. Retrieved December 6, 2019, from <https://sdtultrasound.com/es/productos-y-soluciones/productos/online4us>
- Sino-German Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing, & Standardisation Sub-Working Group. (2018). *The Standardisation Roadmap of Predictive Maintenance for Sino-German Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing*. 27. Retrieved from <https://www.dke.de/resource/blob/1711308/ad04db2c91a6749c86e7311c1a294644/the-standardisation-roadmap-of-predictive-maintenance-for-sino-german-industrie-4-0-data.pdf>
- SKF. (n.d.). SKF Multilog Online System IMx-R for railway condition monitoring.

- SKF. (2012). Bearing calculation. *Railway Technical Handbook*, 1, 106–121. Retrieved from <http://www.skf.com/binary/49-62749/RTB-1-05-Bearing-calculation.pdf>
- Symonds, N., Corni, I., Wood, R. J. K., Wasenczuk, A., & Vincent, D. (2015). Observing early stage rail axle bearing damage. *Engineering Failure Analysis*, 56, 216–232. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.008>
- Technical, R. (n.d.). Informacion tecnica bogie. Retrieved December 10, 2019, from <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/bogies.html>
- UNE-EN 15341. *UNE-EN 15341:2007. Mantenimiento - Indicadores clave de rendimiento del mantenimiento.* , (2007).
- UNE-EN 15380-2. *Aplicaciones ferroviarias - Sistema de designacion para vehiculos ferroviarios - Parte 2: Grupos de productos.* , (2007).
- UNE-EN 15437-2. *Aplicaciones ferroviarias - Monitorizacion de la condición de las cajas de grasa - Requisitos de interfas y diseño - Parte 2: Requisito de funcionamiento y de diseño de los sistemas a bordo para la monitorizacion de temperaturas.* , (2013).
- UNE-EN 61025. *Analisis por Arbol de Fallos (AAF).* , (2011).
- Van Hecke, B., Yoon, J., & He, D. (2016). Low speed bearing fault diagnosis using acoustic emission sensors. *Applied Acoustics*, 105, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.10.028>
- Wabtec Company. (n.d.). RailBAM. Retrieved December 6, 2019, from <http://www.railbam.com.au/>
- Wi-care. (n.d.). Wi-care. Retrieved December 6, 2019, from <https://www.icareweb.com/en-gb/>
- Wi-Care 130. (n.d.). Retrieved December 3, 2019, from <https://www.icareweb.com/en-gb/monitoring-tools-catalog/wi-care-130/>
- Wi-care 150. (n.d.). Retrieved December 3, 2019, from <https://www.icareweb.com/en-gb/monitoring-tools-catalog/wi-care-150/>
- WiCare 240. (n.d.). Retrieved December 3, 2019, from <https://www.icareweb.com/en-gb/monitoring-tools-catalog/wi-care-240/>
- WPXI, N. (n.d.). How much did the cleanup for train derailment at Station Square cost? Retrieved December 2, 2019, from 3 october 2018 website: <https://www.wpxi.com/news/top-stories/how-much-did-the-cleanup-for-train-derailment-at-station-square-cost-/845590480>

7. ANEXOS

Anexo 1. Análisis AMFE para el rodamiento de los bogies de la locomotora

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componente por sistema | Cantidad de componente por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------------------|-------------|---------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|----------------------------------|---|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | Sistema de tracción | Eje montado | Rodamiento | 1 | 6 | | | | | | | | | | | | | | 34.578 | 2.420.441 | 4,13148 E-07 | 2,89203 E-05 | 0,04 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desconchamiento de pista interna | - Fatiga (vida útil, exceso de vibración por condición de rueda y/o vías) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 15% | 686.441 | 48.050.884 | 2,08113 E-08 | 1,45679 E-06 | 0,002809522 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desconchamiento de pista interna | - Deficiencia de lubricación. - Contaminación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 75% | 137.288 | 9.610.177 | 1,04056 E-07 | 7,28395 E-06 | 0,014047608 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desconchamiento de pista interna | - Manipulación inadecuada durante el montaje del rodamiento. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desconchamiento de pista interna | - Selección de rodamiento no apropiada (Peso excesivo soportado por el rodamiento) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desgaste de pista interna | Desgaste abrasivo por deficiencia de lubricante | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 90% | 331.119 | 23.178.328 | 4,31437 E-08 | 3,02006 E-06 | 0,0058244 06 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desgaste de pista interna | Montaje: Desgaste adhesivo por sobrecalentamiento de rodamiento por precarga excesiva | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,000323578 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Desgaste de pista interna por soltura mecánica respecto al eje | - Desgaste adhesivo en la pista interna por pérdida de ajuste con el eje. - Desplazamiento axial del rodamiento sobre el eje | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desplazamiento axial del rodamiento sobre el eje | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,000323578 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Corrosión de pista interna | - Corrosión por ingreso de agua. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 60% | 211.217 | 14.785.207 | 6,76352 E-08 | 4,73446 E-06 | 0,009130748 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Corrosión de pista interna | - Corrosión por degradación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Corrosión de pista interna | - Corrosión por fricción debido a combinaciones de altas cargas y vibración. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Pitting por erosión eléctrica de pista interna | - Voltaje excesivo - Fallo del dispositivo de puesta a tierra y retorno corriente. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 10% | 100% | 350.815 | 24.557.039 | 4,07215 E-08 | 2,85051 E-06 | 0,005497405 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Deformación plástica de pista interna | - Sobrecarga por cargas estáticas. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 1% | 32.965.860 | 2.307.610.170 | 4,33349 E-10 | 3,03344 E-08 | 5,85021E-05 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Deformación plástica de pista interna | - Sobrecarga por impactos | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 25% | 1.318.634 | 92.304.407 | 1,08337 E-08 | 7,5836E-07 | 0,001462552 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Deformación plástica de pista interna por contaminación de partículas internas | Contaminación de la grasa por partículas solidas desprendidas de los elementos internos. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 30% | 1.098.862 | 76.920.339 | 1,30005 E-08 | 9,10032 E-07 | 0,001755062 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Deformación plástica de pista interna por indentación de contaminantes externos | La grasa se contamina con material sólido externo al rodamiento (madera, agua, arena, etc.) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 40% | 824.146 | 57.690.254 | 1,7334E-08 | 1,21338E-06 | 0,00234083 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Deformación plástica de pista interna por precarga excesiva durante el montaje | -Factor humano: No se realizó el montaje adecuadamente -Manejo inadecuado del rodamiento durante el montaje | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 4% | 8.241.465 | 576.902.542 | 1,7334E-09 | 1,21338E-07 | 0,00023408 |
| | | | Pista interna | 1 | 6 | Acoplar por interferencia al eje móvil | Fractura/agrietamiento de pista interna | - Fractura forzada por impactos. - Fractura forzada por precarga excesiva durante el montaje. - Fractura por fatiga debido a soltura de la pista interna. - Fractura por fatiga debido a soltura del manguito de sujeción al eje. - Agrietamiento térmico en pista interna debido a soltura mecánica respecto al manguito de sujeción. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Grietas visibles en la pista interna | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Socorro | Si | No | Si | Si | 94% | 1% | 100% | 6.104.178 | 427.292.483 | 2,34032E-09 | 1,63822E-07 | 0,000315943 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|---|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desconchamiento de pista externa | - Fatiga (vida útil, exceso de vibración por condición de rueda y/o vías) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 15% | 686.441 | 48.050.884 | 2,08113 E-08 | 1,45679 E-06 | 0,0028095 22 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desconchamiento de pista externa | - Deficiencia de lubricación. - Contaminación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 75% | 137.288 | 9.610.177 | 1,04056 E-07 | 7,28395 E-06 | 0,0140476 08 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desconchamiento de pista externa | - Manipulación inadecuada durante el montaje del rodamiento. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desconchamiento de pista externa | - Selección de rodamiento no apropiada (Peso excesivo soportado por el rodamiento) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desgaste de pista externa | Desgaste abrasivo por deficiencia de lubricante | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 90% | 331.119 | 23.178.328 | 4,31437 E-08 | 3,02006 E-06 | 0,0058244 06 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desgaste de pista externa | Desgaste adhesivo por sobrecalentamiento de rodamiento | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,0003235 78 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 2 | 12 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Desgaste de pista externa por soldadura mecánica | - Desgaste adhesivo en la pista externa por pérdida de ajuste con la caja de grasa. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soldadura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,000323578 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Corrosión de pista externa | - Corrosión por ingreso de agua. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 60% | 211.217 | 14.785.207 | 6,76352 E-08 | 4,73446 E-06 | 0,009130748 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Corrosión de pista externa | - Corrosión por degradación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Corrosión de pista externa | - Corrosión por fricción debido a combinaciones de altas cargas y vibración. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Pitting por erosión eléctrica de pista externa | - Voltaje excesivo - Fallo del dispositivo de puesta a tierra y retorno de corriente. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 10% | 100% | 350.815 | 24.557.039 | 4,07215 E-08 | 2,85051 E-06 | 0,005497405 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Deformación plástica de pista externa | - Sobrecarga por cargas estáticas. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 1% | 32.965.860 | 2.307.610.170 | 4,33349 E-10 | 3,03344 E-08 | 5,85021E-05 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Deformación plástica de pista externa | - Sobrecarga por impactos | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 25% | 1.318.634 | 92.304.407 | 1,08337E-08 | 7,5836E-07 | 0,001462552 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Deformación plástica de pista externa por contaminación de partículas externas | Contaminación de la grasa por partículas solidas desprendidas de los elementos internos. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 30% | 1.098.862 | 76.920.339 | 1,30005E-08 | 9,10032E-07 | 0,001755062 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Deformación plástica de pista externa por indentación contaminantes externos | La grasa se contamina con material solido externo al rodamiento (madera, agua, arena, etc.) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 40% | 824.146 | 57.690.254 | 1,7334E-08 | 1,21338E-06 | 0,002340083 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|---------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Deformación plástica de pista externa por precarga excesiva durante el montaje | - Factor humano: No se realizó el montaje adecuadamente - Manejo inadecuado del rodamiento durante el montaje | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Medición de diámetro de la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 4% | 8.241.465 | 576.902.542 | 1,7334E-09 | 1,21338E-07 | 0,00023408 |
| | | | Pista externa | 1 | 6 | Acoplar por interferencia a la caja de grasa, siendo la pista de rodadura estática | Fractura/agrietamiento de pista externa | - Fractura forzada por impactos. - Fractura forzada por precarga excesiva durante el montaje. - Fractura por fatiga debido a soltura de la pista externa. - Fractura por fatiga debido a soltura del manguito de sujeción al eje. - Agrietamiento térmico en pista externa debido a soltura mecánica respecto al manguito de sujeción. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Grietas visibles en la pista externa | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Socorro | Si | No | Si | Si | 94% | 1% | 100% | 6.104.178 | 427.292.483 | 2,34032E-09 | 1,63822E-07 | 0,000315943 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desconchamiento del rodillo | - Fatiga (vida útil, exceso de vibración por condición de rueda y/o vías) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en el rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de rodillo. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 15% | 686.441 | 48.050.884 | 2,08113E-08 | 1,45679E-06 | 0,002809522 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desconchamiento del rodillo | - Deficiencia de lubricación. - Contaminación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en el rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 75% | 137.288 | 9.610.177 | 1,04056 E-07 | 7,28395 E-06 | 0,0140476 08 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desconchamiento del rodillo | - Manipulación inadecuada durante el montaje del rodamiento. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en el rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desconchamiento del rodillo | - Selección de rodamiento no apropiada (Peso excesivo soportado por el rodamiento) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desconchamiento visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 36% | 5% | 2.059.324 | 144.152.651 | 6,93709 E-09 | 4,85596 E-07 | 0,0009365 07 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------|---|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desgaste del rodillo | Desgaste abrasivo por deficiencia de lubricante | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 90% | 331.119 | 23.178.328 | 4,31437 E-08 | 3,02006 E-06 | 0,0058244 06 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desgaste del rodillo | Desgaste adhesivo por sobrecalentamiento de rodamiento | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,0003235 78 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Desgaste del rodillo | - Desgaste adhesivo en los rodillos radial holgura inadecuada entre rodillos y pista externa. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Desgaste visible en la pista externa y/o rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 12% | 5% | 5.960.142 | 417.209.910 | 2,39687 E-09 | 1,67781 E-07 | 0,0003235 78 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Corrosión de rodillo | - Corrosión por ingreso de agua. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 60% | 211.217 | 14.785.207 | 6,76352 E-08 | 4,73446 E-06 | 0,009130748 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Corrosión de pista externa | - Corrosión por degradación del lubricante. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Corrosión de pista externa | - Corrosión por fricción debido a combinaciones de altas cargas y vibración. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Corrosión visible en los rodillos | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 29% | 20% | 633.652 | 44.355.621 | 2,25451 E-08 | 1,57815 E-06 | 0,003043583 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Pitting por erosión eléctrica de rodillos | - Voltaje excesivo - Fallo del dispositivo de puesta a tierra y retorno de corriente. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 10% | 100% | 350.815 | 24.557.039 | 4,07215 E-08 | 2,85051 E-06 | 0,0054974 05 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Deformación plástica de rodillo | - Sobrecarga por cargas estáticas. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 1% | 32.965.860 | 2.307.610.170 | 4,33349 E-10 | 3,03344 E-08 | 5,85021E-05 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Deformación plástica de rodillo | - Sobrecarga por impactos | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 25% | 1.318.634 | 92.304.407 | 1,08337 E-08 | 7,5836E-07 | 0,0014625 52 |

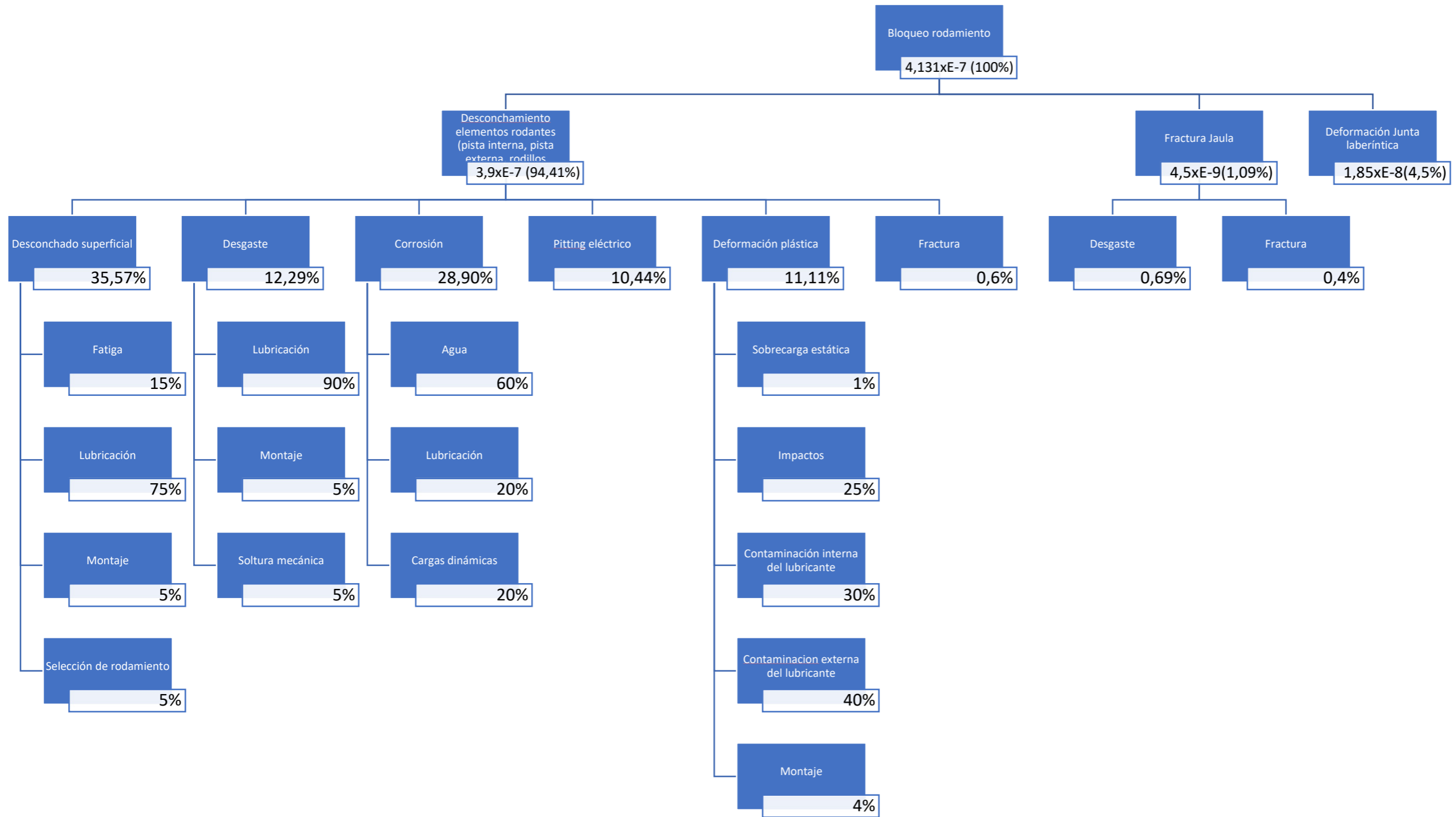
| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Deformación plástica de rodillos por contaminación de partículas externas | Contaminación de la grasa por partículas sólidas desprendidas de los elementos internos. | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 30% | 1.098.862 | 76.920.339 | 1,30005E-08 | 9,10032E-07 | 0,001755062 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Deformación plástica del rodillo por indentación de contaminantes externos | La grasa se contamina con material sólido externo al rodamiento (madera, agua, arena, etc.) | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 40% | 824.146 | 57.690.254 | 1,7334E-08 | 1,21338E-06 | 0,002340083 |
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Deformación plástica de rodillos por precarga excesiva durante el montaje | - Factor humano: No se realizó el montaje adecuadamente - Manejo inadecuado del rodamiento durante el montaje | - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Deformación superficial del rodillo | - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 94% | 11% | 4% | 8.241.465 | 576.902.542 | 1,7334E-09 | 1,21338E-07 | 0,000234008 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|--|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Rodillos | 42 | 252 | Transmitir el movimiento por contacto de la pista interna a la pista externa | Fractura/agrietamiento de rodillo | <ul style="list-style-type: none"> - Fractura forzada por impactos. - Fractura forzada por precarga excesiva durante montaje. - Fractura por fatiga debido a holgura excesiva entre rodillo y la pista externa. | <ul style="list-style-type: none"> - incremento de Vibración - Incremento de temperatura - incremento de Ruido - Grietas visibles en el rodillo | <ul style="list-style-type: none"> - Rodamiento bloqueado por fractura de pista interna. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Bloqueo de elementos rodante generando un posible Descarrilamiento de locomotora | Socorro | Si | No | Si | Si | 94% | 1% | 100% | 6.104.178 | 427.292.483 | 2,34032E-09 | 1,63822E-07 | 0,000315943 |
| | | | Jaula | 1 | 6 | Mantiene los rodillos (elementos rodantes) encarrilados y organizados entre la pista interna y la pista externa | Desgaste en la jaula y bolas | <ul style="list-style-type: none"> - Carga dinámica excesiva | <ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Incremento de temperatura - Ruido - Desgaste visible en la jaula | <ul style="list-style-type: none"> - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 1% | 1% | 60% | 766.248.473 | 53.637.393.077 | 1,86437E-11 | 1,30506E-09 | 2,5169E-06 |
| | | | Jaula | 1 | 6 | Mantiene los rodillos (elementos rodantes) encarrilados y organizados entre la pista interna y la pista externa | Desgaste en la jaula y bolas | <ul style="list-style-type: none"> - Lubricación inadecuada | <ul style="list-style-type: none"> - Vibración - Incremento de temperatura - Ruido - Desgaste visible en la jaula | <ul style="list-style-type: none"> - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 1% | 1% | 30% | 1.532.496.945 | 107.274.786.154 | 9,32185E-12 | 6,5253E-10 | 1,25845E-06 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Jaula | 1 | 6 | Mantiene los rodillos (elementos rodantes) encarrilados y organizados entre la pista interna y la pista externa | Desgaste en la jaula y bolas | - Precarga en el montaje inadecuada | - Vibración - Incremento de temperatura - Ruido - Desgaste visible en la jaula | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Avería | Si | No | Si | Si | 1% | 1% | 10% | 4.597.490.835 | 321.824.358.463 | 3,10728E-12 | 2,1751E-10 | 4,19483E-07 |
| | | | Jaula | 1 | 6 | Mantiene los rodillos (elementos rodantes) encarrilados y organizados entre la pista interna y la pista externa | Fractura/agrietamiento de jaula | - Fractura por fatiga de la jaula de elementos rodantes. | - Vibración. - Incremento de temperatura - Ruido - Grietas visibles en la jaula | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Socorro | Si | No | Si | Si | 1% | 0% | 50% | 1.586.134.338 | 111.029.403.670 | 9,00662E-12 | 6,30464E-10 | 1,21589E-06 |
| | | | Jaula | 1 | 6 | Mantiene los rodillos (elementos rodantes) encarrilados y organizados entre la pista interna y la pista externa | Fractura/agrietamiento de jaula | Deficiencia de lubricación | - Vibración. - Incremento de temperatura - Ruido - Grietas visibles en la jaula | - Rodamiento bloqueado por fractura de elementos. - Altas temperaturas en el rodamiento causando fuego y humo. - Soltura de elementos rodantes. - Descarrilamiento de locomotora | Socorro | Si | No | Si | Si | 1% | 0% | 50% | 1.586.134.338 | 111.029.403.670 | 9,00662E-12 | 6,30464E-10 | 1,21589E-06 |

| Proridad | Sistema | Subsistema | Componente | Cantidad de componentes por sistema | Cantidad de componentes por Vehículo | Función | Descripción del fallo | Causa raíz del fallo | Consecuencia de fallo a nivel componente | Consecuencia de fallo a nivel sistema/subsistema | Consecuencia de fallo a nivel vehículo | Diagnóstico/alarma habilitada (s/n) | Redundancia (s/n) | Fallo monitorizado en vehículo | Fallo control Monitorización remota | Ponderación por componente | Ponderación por tipo de modo | Ponderación por tipo de causa | MTBF | MKBF | Tasa de fallos (1/MKBF) | Tasa de fallos (1/MTBF) | Tasa anual promedio de fallos |
|----------|---------|------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--|----------------------------------|---|---|---|--|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| | | | Junta laberíntica | 2 | 12 | Da estanqueidad del lubricante protegiéndola de contaminantes externos | Deformación plástica de la junta | <ul style="list-style-type: none"> - Sobrecarga por cargas estáticas. - Sobrecarga por impactos - Indentación por partículas sólidas desprendidas de los elementos internos. - Indentación por contaminantes externos. - Precargas excesivas durante el montaje del rodamiento. - Indentación por factor humano. - Vida útil de la junta | <ul style="list-style-type: none"> - Al deformarse la junta se puede observar fuga de grasa por la tapa de la caja de grasa. | <ul style="list-style-type: none"> - Fuga visible de grasa. - Incremento de ruido - Incremento de temperatura. - Incremento de vibración. | Avería | Si | No | Si | Si | 5% | 100% | 100% | 768.394 | 53.787.578 | 1,85917 E-08 | 1,30142 E-06 | 0,002509873 |

Anexo 2. Análisis de árbol de fallos



Anexo 3. Plan de mantenimiento preventivo para el sistema de tracción de un bogies con monitoreo de condición

| SISTEMA | SUBSISTEMA | OPERACIÓN | CÓDIGO | PERIODO (Cada x km) | GAMA | REPUESTO | HERRAMIENTA | UNIDADES POR BOGIE | Nº ESPECIALIDAD OPERARIO | TIEMPO ASIGNADO (horas) | COSTE REPUESTO (€) | COSTE TOTAL REPUESTOS POR BOGIE REPUESTO (€) | COSTE M.O (30€ /hr) | COSTE TOTAL | OBSERVACIONES |
|---------|-------------------------------------|--|--------------|------------------------|------|----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|---------------------------|----------------|---|
| BOGIE | BOGIE | Limpiar los bogies. | BOG-02 | 12.500 | A | | | | 1 | 8 | | 0 | 240 | 240 | |
| BOGIE | EJE MONTADO | Efectuar reparación general del eje montado. | BOG-EJE-01 | 1.600.000 | H | EJE | | 3 | 2 | 24 | 2500 | 7500 | 1440 | 8940 | Recomendado cada cambio de rodaje. Máx. 1.600.000 Km |
| BOGIE | CAJA DE GRASA | Control de par de apriete de las tapas y del cuerpo de la caja de grasa. | BOG-CAJGR-01 | 12.500 | A | | Torquimetro y copas | | 2 | 4 | | 0 | 240 | 240 | |
| BOGIE | CAJA DE GRASA | Cambio de sensores de vibración, ruido y temperatura por calibración | BOG-CAJGR-02 | 100.000 | D | | Llaves mixtas | 12 | 1 | 6 | 300 | 3600 | 180 | 3780 | Cambio de sensores por unos recién calibrados, los que se retiran se enviarían a calibración. |
| BOGIE | RODAMIENTOS | Lubricar rodamientos. | BOG-ROD-01 | 400.000 | F | Grasa | | | 2 | 12 | 200 | 0 | 720 | 720 | |
| BOGIE | RODAMIENTOS | Reparación general | BOG-ROD-02 | 800.000 | G | Rodamientos y partes | | 6 | 3 | 72 | 3000 | 18000 | 6480 | 24480 | Cada cambio de rodaje. Máximo 1.000.000 Kms u 8 años. |
| BOGIE | CAJA DE ENGRANES | Cambio inicial de aceite del reductor | BOG-RED-01 | 12.500 | A | Aceite | | 26 | 1 | 1 | 11 | 286 | 30 | 316 | |
| BOGIE | CAJA DE ENGRANES | Cambiar aceite al reductor | BOG-RED-02 | 100.000 | D | Aceite | | 26 | 1 | 1 | 11 | 286 | 30 | 316 | |
| BOGIE | CAJA DE ENGRANES | Revisar caja de engranes | BOG-RED-03 | 1.600.000 | H | Acople | | 3 | 2 | 24 | 6000 | 18000 | 1440 | 19440 | |
| BOGIE | MOTOR DE TRACCIÓN | Limpieza externa del motor de tracción. | BOG-MOT-01 | 25.000 | B | | | | 1 | 0,2 | | 0 | 6 | 6 | |
| BOGIE | MOTOR DE TRACCIÓN | Lubricar rodamientos del motor de tracción. | BOG-MOT-02 | 100.000 | D | grasa | | 1 | 1 | 0,2 | 50 | 50 | 6 | 56 | |
| BOGIE | MOTOR DE TRACCIÓN | Efectuar reparación general del motor de tracción. | BOG-MOT-03 | 1.600.000 | H | | | 3 | 2 | 48 | 2300 | 6900 | 2880 | 9780 | |
| BOGIE | ACOPLAMIENTO ENTRE MOTOR Y REDUCTOR | Control de pares de apriete | BOG-ACOP-02 | 100.000 | D | | | | 1 | 0,2 | | 0 | 6 | 6 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------------|------------------|-------------|-----------|---|--------|--|---|---|-----|------|------|-----|------|
| BOGIE | ACOPLAMIENTO ENTRE MOTOR Y REDUCTOR | Lubricar acople | BOG-ACOP-03 | 200.000 | E | | | | 1 | 0,2 | | 0 | 6 | 6 |
| BOGIE | ACOPLAMIENTO ENTRE MOTOR Y REDUCTOR | Sustituir acople | BOG-ACOP-04 | 1.600.000 | H | Acople | | 3 | 2 | 3 | 2400 | 7200 | 180 | 7380 |

Relación de gamas del plan de mantenimiento preventivo

| RELACIÓN DE GAMAS DE MANTENIMIENTO | | | | | | | |
|------------------------------------|------|--------------|----------------------------------|---|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| PERIODO (cada x km) | GAMA | OPERACIONES | COSTE M.O. OPERACIONES (€) | COSTE REPUESTO OPERACIONES (€) | COSTE M.O. GAMA (€) | COSTE REPUESTO GAMA (€) | COSTE TOTAL GAMA (€) |
| 12.500 | A | BOG-02 | 240 | | 510 | 286 | 796 |
| | | BOG-CAJGR-01 | 240 | | | | |
| | | BOG-RED-01 | 30 | 286 | | | |
| 25.000 | B | BOG-MOT-01 | 6 | | 6 | 0 | 6 |
| | | | | | | | |
| 100.000 | D | BOG-RED-02 | 316 | 286 | 508 | 3936 | 4444 |
| | | BOG-MOT-02 | 6 | 50 | | | |
| | | BOG-CAJGR-02 | 180 | 3600 | | | |
| | | BOG-ACOP-02 | 6 | | | | |
| 200.000 | E | BOG-ACOP-03 | 6 | | 6 | 0 | 6 |
| | | | | | | | |
| 400.000 | F | BOG-ROD-01 | 720 | 200 | 720 | 200 | 920 |
| | | | | | | | |
| 800.000 | G | BOG-ROD-02 | 6480 | 18000 | 6480 | 18000 | 24480 |
| | | | | | | | |
| 1.600.000 | H | BOG-EJE-01 | 1440 | 2500 | 5850 | 25200 | 31050 |
| | | BOG-MOT-03 | 2880 | 2300 | | | |
| | | BOG-ACOP-04 | 90 | 2400 | | | |
| | | BOG-RED-03 | 1440 | 18000 | | | |

Para un kilometraje anual de 100.000km

Plan anual de mantenimiento preventivo para un kilometraje anual de 100.000km

| AÑO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------------------|---------|--------------|---------|----------------|---------|--------------|---------|------------------|---------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| km recorridos | 100.000 | 200.000 | 300.000 | 400.000 | 500.000 | 600.000 | 700.000 | 800.000 | 900.000 | 1.000.000 | 1.100.000 | 1.200.000 | 1.300.000 | 1.400.000 | 1.500.000 | 1.600.000 |
| GAMAS | 8A 4B D | 8A 4B D E | 8A 4B D | 8A 4B D E F | 8A 4B D | 8A 4B D E | 8A 4B D | 8A 4B D E F G | 8A 4B D | 8A 4B D | 8A 4B D | 8A 4B D E | 8A 4B D | 8A 4B D | 8A 4B D | 8A 4B D E F G H |
| COSTO REPUESTOS | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 6.424 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 24.424 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 6.224 | 49.624 |
| C. M.O. | 4.612 | 4.636 | 4.612 | 5.356 | 4.612 | 4.636 | 4.612 | 11.836 | 4.612 | 4.612 | 4.612 | 4.636 | 4.612 | 4.612 | 4.612 | 17.686 |
| C. ANUAL | 10.836 | 10.860 | 10.836 | 11.780 | 10.836 | 10.860 | 10.836 | 36.260 | 10.836 | 10.836 | 10.836 | 10.860 | 10.836 | 10.836 | 10.836 | 67.310 |
| C. ACUMU | 10.836 | 21.696 | 32.532 | 44.312 | 55.148 | 66.008 | 76.844 | 113.104 | 123.940 | 134.776 | 145.612 | 156.472 | 167.308 | 178.144 | 188.980 | 256.290 |

Anexo 4. Plan de mantenimiento predictivo para el sistema de tracción de un bogie con monitoreo de condición.

| SISTEMA | SÍNTOMA | CÓDIGO | PERIODO (CADA x km) | GAMA | EQUIPO DE MEDIDA | Nº OPERARIOS | TIEMPO INSPECCIÓN (horas) | COSTE M.O (30€/hr) | CRITERIO VALORACIÓN | ANOMALÍAS CAUSANTES |
|-------------------|---|------------------|------------------------|------|------------------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------|---|
| BOGIE | Inspeccionar visualmente todos los elementos del bogie, para comprobar su estado y fijación | BOG-01 | 12.500 | A | Visual | 1 | 0,1 | 3 | FABRICANTE | |
| BASTIDOR BOGIE | Inspeccionar posibles fisuras y deformaciones en el bastidor, anclajes y soportes. | BOG- BAST-01 | 100.000 | D | Tintas penetrantes | 1 | 2 | 60 | FABRICANTE | Fatiga. Impacto |
| BASTIDOR BOGIE | Efectuar control dimensional del bastidor (escuadrado y planitud) y control de fisuras por ensayos no destructivos en las zonas más solicitadas. | BOG- BAST-02 | 1.600.000 | H | Estación total / estación laser | 1 | 6 | 180 | FABRICANTE | Fatiga. Impacto |
| EJE MONTADO | Efectuar una inspección por ultrasonidos del cuerpo del eje. | BOG-EJE- 01 | 25.000 | B | Ultrasonido | 1 | 0,5 | 15 | FABRICANTE | Fatiga. Impacto |
| RUEDA | Inspeccionar visualmente las ruedas. Comprobar estado, desgaste anormal y defectos. | BOG-RUE- 01 | 12.500 | A | Visual | 1 | 0,2 | 6 | FABRICANTE | Fatiga. Impacto. Desgaste |
| RUEDA | Control de ruedas (medida qR, control geométrico de pestaña, diámetro, distancia entre caras internas, defectos). | BOG-RUE- 02 | 25.000 | B | metrología dimensional | 2 | 3 | 90 | FABRICANTE | Fatiga. Impacto. Desgaste |
| CAJA DE GRASA | Desmontar las tapas y comprobar: estado de los laberintos del rodamiento, que no hay perdidas de grasa, que no ha entrado agua, no hay zonas recalentadas, y par de apriete de la fijación de los platillos y dispositivos acoplados. | BOG- CAJGR-02 | 400.000 | F | Visual | 1 | 1 | 30 | FABRICANTE | Soltura de las tapas. Impacto. Fatiga de la junta |
| CAJA DE GRASA | Efectuar revisión general de la caja de grasa. | BOG- CAJGR-03 | 1.600.000 | H | Metrología dimensional | 1 | 8 | 240 | FABRICANTE | Fatiga. |

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|---------------|-----------|---|------------|---|-----|------|------------|---------------------------------------|
| CAJA DE GRASA | Análisis de datos de vibración, ruido y temperatura | BOG-CAJGR-04 | 100.000 | D | COMPUTADOR | 1 | | 3000 | | |
| CANON BOX | Inspeccionar visualmente su estado en una vía con foso. | BOG-CANBOX-01 | 100.000 | D | Visual | 1 | 0,5 | 15 | FABRICANTE | Impacto. Fractura |
| CAJA DE ENGRANES | Inspección visual del reductor. Verificar nivel de aceite. Agregar aceite si procede. | BOG-RED-01 | 12.500 | A | Visual | 1 | 0,5 | 15 | FABRICANTE | Fuga de aceite de la caja de engranes |
| CAJA DE ENGRANES | Inspeccionar piñón del motor de tracción. Sustituir si es requerido tras la inspección | BOG-RED-04 | 1.600.000 | H | Visual | 1 | 3 | 90 | FABRICANTE | Desgaste del piñón |
| ACOPLAMIENTO ENTRE MOTOR Y REDUCTOR | Inspección visual | BOG-ACOP-01 | 12.500 | A | Visual | 1 | 0,1 | 3 | FABRICANTE | Daño en el acople |

Relación de gamas de mantenimiento predictivo

| RELACIÓN DE GAMAS DE MANTENIMIENTO | | | | | | | |
|------------------------------------|------|---------------|----------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| PERIODO (cada x km) | GAMA | OPERACIONES | COSTE M.O. OPERACIONES (€) | COSTE REPUESTO OPERACIONES (€) | COSTE M.O. GAMA (€) | COSTE REPUESTO GAMA (€) | COSTE TOTAL GAMA (€) |
| 12.500 | A | BOG-01 | 3 | | 21 | 0 | 21 |
| | | BOG-RED-01 | 15 | | | | |
| | | BOG-ACOP-01 | 3 | | | | |
| 100.000 | D | BOG-BAST-01 | 60 | | 3075 | 0 | 3075 |
| | | BOG-CANBOX-01 | 15 | | | | |
| | | BOG-CAJGR-04 | 3000 | | | | |
| 200.000 | E | | | | 0 | 0 | 0 |
| 400.000 | F | BOG-CAJGR-02 | 30 | | 30 | 0 | 30 |
| | | | | | | | |
| 1.600.000 | H | BOG-BAST-02 | 180 | | 510 | 0 | 510 |
| | | BOG-CAJGR-03 | 240 | | | | |
| | | BOG-RED-04 | 90 | | | | |
| | | | | | | | |

Plan anual de mantenimiento predictivo para un kilometraje anual de 100.000km

| AÑO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| km recorridos | 100000 | 200000 | 300000 | 400000 | 500000 | 600000 | 700000 | 800000 | 900000 | 1000000 | 1100000 | 1200000 | 1300000 | 1400000 | 1500000 | 1600000 |
| GAMAS | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB); (1XF) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB); (1XF) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB); (1XF) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB) | (8XA); (1XB); (1XF); (1XH) |
| C. M.O. | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.783 |
| C. ANUAL | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.273 | 3.243 | 3.243 | 3.243 | 3.783 |
| C. ACUMULADO | 3.243 | 6.486 | 9.729 | 13.002 | 16.245 | 19.488 | 22.731 | 26.004 | 29.247 | 32.490 | 35.733 | 39.006 | 42.249 | 45.492 | 48.735 | 52.518 |