



UNIVERSIDAD
**SAN IGNACIO
DE LOYOLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial y Comercial

**Kilometraje recorrido, Desgaste de Ruedas y Frenos en Bogías
de Transmisión y Remolque en Trenes Eléctricos**

**Tesis para Optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial y
Comercial**

GUSTAVO DAVID VALERA MENDOZA

(0000-0002-4138-4552)

Asesor:

Ing. MBA. Dr (C) Zelada García, Gianni Michael

(0000-0003-2445-3912)

Lima – Perú

2020

JURADO DE LA SUSTENTACIÓN ORAL

..... **Presidente**

..... **Jurado 1**

..... **Jurado 2**

Entregado el:

Aprobado por:

.....

Graduando:

.....

Asesor de Tesis:

UNIVERSIDAD SAN IGNACIO DE LOYOLA
FACULTAD DE INGENIERIA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Gustavo David Valera Mendoza, identificado con DNI N° 73028836 Bachiller del Programa Académico de la Carrera de Ingeniería Industrial y Comercial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Ignacio de Loyola, presento mi tesis titulada:

**Kilometraje recorrido, Desgaste de Ruedas y Frenos en Bogies
de Transmisión y Remolque en Trenes Eléctricos**

Declaro en honor a la verdad, que el trabajo de tesis es de mi autoría; que los datos, los resultados y su análisis e interpretación, constituyen mi aporte. Todas las referencias han sido debidamente consultadas y reconocidas en la investigación.

En tal sentido, asumo que la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad u ocultamiento de la información aportada. Por todas las afirmaciones, ratifico lo expresado, a través de mi firma correspondiente.

Lima, junio del 2020.

.....
Valera Mendoza, Gustavo David

DNI N° 73028836

EPIGRAFE

“Con frecuencia las dificultades preparan a personas ordinarias para un destino extraordinario.” (**Lewis C.S.**)

INDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	iii
EPIGRAFE	iv
INDICE DE CONTENIDOS	v
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	10
Identificación del Problema	10
Formulación del Problema	12
Problema general	12
Problemas específicos	12
MARCO REFERENCIAL	13
Antecedentes	13
Nacionales	13
Internacionales	15
Estado del arte	18
Marco Teórico	20
Mantenimiento.	20

Mantenimiento Correctivo.	21
Mantenimiento Preventivo.	21
Mantenimiento Preventivo con Base en el Tiempo o en el Uso.	22
Mantenimiento Preventivo con Base a las Condiciones.	22
Mantenimiento de Mejora.	22
Mantenimiento de Oportunidad.	22
Fases para desarrollar un plan de Mantenimiento.	22
Terminología aplicable en el Mantenimiento de Vehículos.	23
Análisis de Correlación	24
Coeficiente de correlación de Pearson.	24
Regresión Lineal Simple	26
Transporte Ferroviario	28
Material Rodante	28
Material Motor	28
Material Autopropulsado	30
Material remolque	31
Elementos principales del material rodante	33
Caja	33
Bogie	34
Frenos Ferroviarios	35
Ejes	37

Ruedas	37
Sistema de Frenado	38
<i>Desgaste</i>	41
Tribología	41
Curva Tribológica	42
OBJETIVOS	43
Objetivo general	43
Objetivos específicos	43
JUSTIFICACIÓN	44
Teórica	45
Práctica	45
Social	46
ALCANCE	46
LIMITACIONES	46
HIPOTESIS	47
Hipótesis general	47
Hipótesis específicas	47
MATRIZ DE CONSISTENCIA	49
MARCO METODOLÓGICO	50
Metodología	50
Paradigma	50

Enfoque	50
Método	51
VARIABLES	52
Variable Independiente	52
Variable Dependiente	54
Indicadores de desgaste de la rueda:	54
POBLACIÓN Y MUESTRA	55
Población	55
Muestra	55
UNIDAD DE ANÁLISIS	56
INSTRUMENTOS Y TÉCNICAS	56
Cartillas de Medición de Discos de Freno	56
Reporte de Reperfilado de Discos de Freno	57
Registros de Medición de Ruedas	58
PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS	59
Medición de Ruedas:	59
Medición de Discos de Freno:	60
RESULTADOS	63
Resultados relacionados a las ruedas	63
Desgaste promedio por tipo de Bogíes:	63
Desgaste promedio por recorrido.	64

Resultados relacionados a los discos	67
DISCUSIÓN	69
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Intervalos de recorrido para frenos.	52
Tabla 2 Intervalos de recorrido para ruedas.	53
Tabla 3 Valores Iniciales y Límites de los Parámetros de una Rueda	54
Tabla 4 Prueba de Normalidad de datos, agrupados según su recorrido.	63
Tabla 5 Coeficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de rueda.	66
Tabla 6 Diámetro, desgaste y vida útil promedio de los frenos, por recorrido	67
Tabla 7 Espesor, desgaste y vida útil de los discos de freno, por tipo de bogíes	68
Tabla 8 Coeficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de discos de freno.	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema Típico de Mantenimiento	21
Figura 2: Diagrama de dispersión	24
Figura 3: Diagrama de dispersión con correlación negativa y positiva perfecta	25
Figura 4: Diagrama de dispersión con correlación nula, débil y fuerte	26
Figura 5: Fuerza y dirección del coeficiente de correlación R	26
Figura 6: Relación lineal, donde: β_0 : intersección y β_1 : pendiente	27
Figura 7: Clasificación de las locomotoras según el tipo de tracción	28
Figura 8: Locomotora a vapor.	29
Figura 9: Locomotora diésel.	29
Figura 10: Locomotora eléctrica.	30
Figura 11: Automotor eléctrico	30
Figura 12: Tren autopropulsado diésel	31
Figura 13: Tren autopropulsado eléctrico	31
Figura 14: Coche de pasajeros	32
Figura 15: Furgón	32
Figura 16: Furgón	33
Figura 17: Caja o carrocería del material rodante	33
Figura 18: Bogie	34
Figura 19: Conjunto motorización en bogie.	35
Figura 20: Timonería y cilindro de freno sin estacionamiento	36
Figura 21: Timonería y cilindro de freno con estacionamiento	36
Figura 22: Eje	37
Figura 23: Rueda	38
Figura 24: Disposición del equipo de freno neumático en bogie.	39

Figura 25: Timonería y cilindro de freno montado en bogie.	40
Figura 26: Timonería y cilindro de freno.	40
Figura 27: Curva tribológica	42
Figura 28: Parámetros de la rueda.	54
Figura 29: Cartilla de medición de discos de freno	56
Figura 30: Reporte de Reperfilado de Discos de Fren	57
Figura 31: Reporte Generado por el Miniprof con los Parámetros de la Rueda.	58
Figura 32: Miniprof	59
Figura 33: Reloj Comparador Mitutoyo	60
Figura 34: Vernier Digital	60
Figura 35: Muestra de la Base de Datos para las Medidas de Disco de Freno	61
Figura 36: Muestra de la Base de Datos para la Medición de Ruedas	61
Figura 37: Diámetro promedio de la rueda, por recorrido	64
Figura 38: Espesor de la pestaña promedio, por recorrido	65
Figura 39: Altura promedio de la pestaña, por recorrido	66
Figura 40: Diámetro, desgaste y vida útil de frenos por recorrido	68

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a mis padres, Elio y Kathia, a mi hermano, Matias, a mis tíos, Gilma e Yvees y a mi abuela Gladys con quienes estaré eternamente agradecido por sus sacrificios y apoyo incondicional brindados durante toda mi vida universitaria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a Dios por brindarme la oportunidad de seguir y culminar una carrera universitaria.

A mis padres, hermano, tíos y abuela por haberme apoyado de forma incondicional en cada paso que doy en la vida.

A mi asesor por haberme apoyado en la realización del presente trabajo de investigación.

RESUMEN

Han transcurrido poco más de 8 años desde el comienzo de la operación ferroviaria eléctrica en el país por lo que los elementos que componen el material rodante han ido desgastándose, este efecto no ha sido ajeno para piezas tan importantes como son las ruedas y discos de freno. Producto de este desgaste llegará el momento de recambio para estos componentes, la pregunta que surge naturalmente es cuándo se dará este cambio. Para dar respuesta a esta interrogante se planteó realizar el estudio correlacional que cuantifique la relación entre los kilómetros recorridos por cada tren y los milímetros de desgaste de estos elementos, de esta manera se podrá determinar una tasa media de desgaste y así estimar las fechas de reperfilado y/o recambio. Una vez realizado el análisis correlacional se determinó que para el caso del diámetro de ruedas el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.9552, la velocidad media de desgaste es de 3.1501 mm cada 75 000 km, además se pudo observar que la velocidad de desgaste en los bogies a tracción del tipo MA la velocidad de desgaste es de 3.6368 mm cada 75 000 km, para los bogies a tracción del tipo MB la velocidad de desgaste es de 2.8995 mm cada 75 000 km mientras que para los bogies del tipo remolque R la velocidad de desgaste es de 2.2547 mm cada 75 000 km. Para el caso de los discos de freno se determinó que el coeficiente de correlación de Pearson para el espesor es de 0.8946, la velocidad media de desgaste es de 0.90 mm cada 50 000 km, además se observó que los bogies a tracción del tipo MA y MB presentan una velocidad de desgaste de 0.91 y 0.88 mm cada 50 000 km respectivamente y los bogies del tipo remolque R presentan una velocidad de desgaste de 0.88 mm cada 50 000 km.

Palabras Clave:

Transporte ferroviario eléctrico, desgaste, material rodante, bogies, discos de freno y análisis correlacional.

ABSTRACT

Just over 8 years have passed since the beginning of the electrical railway operation in the country, so the elements that make up the rolling stock have been wearing out, this effect has not been alien to such important parts as wheels and brake discs. . As a result of this wear, it will be time to replace these components, the question that naturally arises is when this change will occur. To answer this question, it was proposed to carry out the correlational study to quantify the relationship between the kilometers traveled by each train and the millimeters of wear of these elements, in this way an average wear rate can be determined and thus estimate the reprofiling dates and / or replacement. Once the correlational analysis was carried out, it was determined that in the case of the diameter of wheels the Pearson's correlation coefficient is 0.9552, the average wear speed is 3.1501 mm every 75 000 km, and it was also observed that the wear speed in wear bogies of type MA wear speed is 3.6368 mm every 75 000 km, for pull bogies of type MB wear speed is 2.8995 mm every 75 000 km while for trailer type b bogies the wear speed is 2.2547 mm every 75 000 km. On the other hand, in the case of brake discs, it was determined that the Pearson's correlation coefficient for the thickness is 0.8946, the average wear speed is 0.90 mm every 50 000 km, and it was also observed that the traction bogies The MA and MB type have a wear speed of 0.91 and 0.88 mm every 50,000 km, respectively, and the R type trailer bogies have a wear speed of 0.88 mm every 50,000 km..

Keywords:

Electric rail transport, wear, rolling stock, preventive maintenance, bogies, brake discs and correlational analysis

INTRODUCCIÓN

Según cifras publicadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), poco más de medio millón de personas usan de forma diaria el transporte ferroviario eléctrico para trasladarse a distintos puntos de la capital, esto hace inferir que es uno de los principales medios de transporte en el país. Para mantener la regularidad del servicio, la satisfacción y seguridad de los pasajeros es necesario contar con la máxima cantidad operativa posible del material rodante de la empresa, por consiguiente, es muy importante contar con un buen plan de mantenimiento preventivo y así evitar paradas innecesarias por trabajos correctivos.

La buena gestión del mantenimiento preventivo de los bienes de una empresa no solo permite asegurar el funcionamiento adecuado de los equipos y en consecuencia la continuidad del servicio que brinda esta, sino que también se ve reflejado en un impacto económico positivo ya que evita el gasto en trabajos correctivos innecesarios (Gordo, 2016).

Según García, Acosta y Flores (2016), el sistema de frenado, en cualquier tipo de vehículo de transporte, es el componente más importante y resulta indispensable contar con un sistema de funcionamiento predecible bajo cualquier condición de trabajo ya que de estos depende la seguridad de los usuarios. Por tal motivo se debe mantener un control exhaustivo de cada una de las características de los componentes de este sistema y asegurar su correcto funcionamiento.

Actualmente la empresa no cuenta con un plan programado de recambio para ruedas y discos de freno ya que no se conoce con certeza en que fecha estos elementos rotativos cumplirán con su límite. La ausencia de este plan puede generar la detención de trenes de forma innecesaria e incrementando la posibilidad de que estos se encuentren circulando con medidas fuera de tolerancia, poniendo en riesgo la continuidad del servicio y la seguridad de los usuarios.

Cabe señalar que el objetivo de un estudio correlacional es analizar cómo se relacionan dos variables, es decir, si el aumento o disminución de una coincide con el aumento o disminución de la otra (Sidharth, 2016). Es por ello que se realizará un estudio de este tipo para cuantificar la relación entre el desgaste de ruedas y discos de freno y los kilómetros recorridos por el material rodante con el fin de poder determinar una nueva tasa de desgaste para los componentes mencionados anteriormente y así elaborar un nuevo plan de recambio.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Identificación del Problema

José Luis Gordo (8 de enero del 2018) en su publicación Importancia de un Plan de Mantenimiento Estratégico en la Gestión de Activos señala que un buen plan de mantenimiento preventivo no solo permite el ahorro de dinero para la empresa, sino que también permite asegurar la continuidad del servicio, mejora el rendimiento de los equipos además que ayuda a alargar la vida útil de los mismos.

García, Acosta y Florez (6 de abril del 2015) en su investigación Análisis del Comportamiento de los Frenos de Disco de los Vehículos a partir de la Aceleración del Proceso de Corrosión indican que el sistema de frenado es el componente más importante para la seguridad vial ya que de este depende la detención del vehículo y en consecuencia la seguridad de los usuarios por lo que el sistema de frenado debe trabajar de forma segura y predecible bajo cualquier escenario. Para una correcta operación de los discos de freno se deben considerar aspectos muy importantes como el tipo de material, resistencia mecánica y la geometría de estos, por lo que es necesario mantener un control de cada una de estas características y así asegurar el correcto funcionamiento del sistema de frenado.

La empresa en estudio cuenta con un plan de mantenimiento preventivo que se desarrolla según los kilómetros recorridos por los trenes, la fecha de ejecución para estos mantenimientos depende directamente de la tasa de recorrido diario del material rodante. El plan de mantenimiento recibido por parte de la empresa establece frecuencias para la atención de todo el equipo, no incluye un plan exacto para recambio de ruedas y discos de freno. Las fechas para reperfilado y/o recambio estimadas por las áreas de ingeniería y planeamiento no vienen cumpliéndose según lo establecido, muestra de ellos es que muchos de estos componentes necesitan ser resanados meses antes de lo previsto, lo que genera disminución en el número de

equipos operativos del material rodante. Dentro de los principales motivos para el incumplimiento de las fechas de reperfilado y/o rectificado se encuentra la falta de horas hombre en el taller de mantenimiento para llevar a cabo la labor y constantes fallas en el torno fosa (maquinaria con la que se realiza el reperfilado). Cabe señalar que los problemas señalados anteriormente ponen en riesgo el rendimiento del material rodante puesto que podrían estar operando con medidas fuera del límite permitido por el fabricante. Por estas razones, es necesario determinar la relación entre el kilometraje y el desgaste de estos componentes para definir una tasa de desgaste más precisa que permita desarrollar un nuevo plan de medición y recambio de ruedas y discos de freno, manteniendo así, la cantidad necesaria de equipos de material rodante para la operación.

Formulación del Problema

Problema general

¿Cuál es la relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos?

Problemas específicos

¿Cuál es la relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?

¿En cuánto difieren los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?

¿Cuál es la relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?

¿Cuál es la relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?

MARCO REFERENCIAL

Antecedentes

Nacionales

Antonio (2016) presentó la tesis titulada “Gestión de mantenimiento para mejorar la disponibilidad mecánica de la maquinaria de confitados en Industrias Alimentarias S.R.L” cuyo objetivo fue el de proponer un modelo de gestión de mantenimiento productivo total para mejorar la disponibilidad mecánica de la maquinaria de confitados de la empresa en estudio, para ello se realizó una investigación del tipo tecnológico y de nivel aplicado ya que se aplicó conocimiento científico para el diseño del nuevo modelo de gestión, además corresponde a un diseño pre experimental de un grupo previo a la aplicación de la nueva propuesta de gestión y otro posterior a este, cuya función es comparar dos mediciones y determinar que la diferencia no sea producto del azar. Para llevar a cabo la investigación fue necesario la recolección de reportes, tablas de datos referentes a la maquinaria, archivos electrónicos y especificaciones técnicas de la maquinaria. El estadístico de prueba empleado fue el de T-Student, usado para muestras relacionales, el cual permitió determinar que existe variación de la disponibilidad mecánica de la maquinaria antes y después de la aplicación del modelo de gestión de mantenimiento productivo total.

Caballero (2017) presento la tesis titulada “Relación entre desgaste de mantos y parámetros críticos de funcionamiento del chancador primario tipo NT de la Minera Chinalco Perú” cuyo objetivo fue el de identificar la relación entre el desgaste del manto y los parámetros críticos de funcionamiento del chancador primario. Los instrumentos empleados para la recolección de los datos fueron formatos de registro usados durante la entrevista a expertos y las cartillas de registro de nivel de dureza del material, la unidad de observación es el chancador primario tipo NT de la minera Chinalco. Como resultados de la investigación se obtuvieron que existe una alta relación entre el desgaste del manto y la velocidad angular del eje principal, temperatura

de los mantos, dureza del mineral que ingresa y el comportamiento eficiente del equipo chancador, por otro lado, también se pudo determinar que no existe ningún tipo de relación entre el espesor de los mantos y los parámetros críticos identificados en el equipo chancador.

Medina (2016) presentó la tesis titulada “Análisis y monitoreo del aceite lubricante en la anticipación de fallas de maquinaria pesada, como herramienta de mantenimiento proactivo” cuyo objetivo fue el de anticipar las fallas producidas en los equipos Volvo a través de la implementación de un programa de mantenimiento proactivo que controle la contaminación en la maquinaria y así aumentar la disponibilidad operativa y disminuir los costos de mantenimiento en los equipos de maquinaria pesada. Para llevar a cabo la investigación fue necesario codificar cada uno de los equipos de tal forma que se pueda contar con un registro de estos y así identificar cual es el que presenta más fallas y tomar las muestras de aceite que serán llevadas a un laboratorio para su análisis. Los resultados de laboratorio permiten determinar que agentes contaminantes ocasionan mayor desgaste en los motores y así poder planificar los mantenimientos preventivos y predictivos que permitan llevar el control del nivel de contaminación del aceite. Finalmente se realizó la evaluación económica donde se evidencian los beneficios del análisis de aceite donde se demuestra que la herramienta permite diagnosticar los problemas en los motores con anticipación, disminuyendo los costos por mantenimientos correctivos.

Quilca (2015) presentó la tesis titulada “Relación de las deformaciones de las juntas del piso de concreto con el desgaste prematuro de ruedas motrices de apiladores de carga en almacén SODIMAC, Lima, Perú 2015” cuyo objetivo fue el desarrollo de una propuesta de solución al desgaste prematuro de las ruedas motrices de los apiladores para lo cual fue necesario determinar la relación entre el estado de las ruedas y el de las juntas sobre las cuales transitan los equipos. El proyecto de investigación es del tipo correlacional y busca determinar el nivel de relación entre las variables descritas anteriormente. Los instrumentos empleados para la

recolección de datos son una cámara fotográfica y las cartillas de medición de desgaste de ruedas. La muestra seleccionada para el estudio corresponde a 300 metros lineales de juntas metálicas y 3 ruedas motrices. Como resultado de la investigación se obtuvo que la deformación de las juntas metálicas no está estrechamente relacionada con el desgaste prematuro de las ruedas motrices de los equipos apiladores ya que, al reducir las, el efecto generado en las ruedas no disminuyó ni aumentó, es decir, el desgaste prematuro aún se presenta.

Ramírez (2017) presentó la tesis titulada “Estudio experimental de la resistencia al desgaste abrasivo para depósitos con recubrimiento protector de soldadura, empleando el electrodo: E6-UM-60 (Clasificación DIN 8555), proceso SMAW” cuyo objetivo fue el de evaluar el comportamiento de resistencia al desgaste abrasivo de bajo esfuerzo y su correlación con la dureza y su microestructura en diferentes depósitos de recubrimiento protector aplicados por el electrodo revestido E6-UM-60, para lo cual fue necesario correlacionar la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo mediante un diseño experimental y así determinar cuál combinación de factores presenta un comportamiento que minimice la pérdida de volumen por desgaste abrasivo puro. Las variables seleccionadas para llevar a cabo el estudio son el amperaje, el número de capas de recubrimiento y la temperatura de precalentamiento. Luego de analizar los datos cuantitativos producto de los ensayos de dureza y desgaste se concluyó que el amperaje no es determinante en la obtención de una aleación con propiedades al desgaste abrasivo, por otro lado, los depósitos con tres capas de recubrimiento y una temperatura aplicada de 350°C permitió un buen desempeño de resistencia al desgaste abrasivo.

Internacionales

Cuervo Velásquez (2014) presentó la tesis titulada “Análisis experimental del efecto del proceso de re perfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín” cuyo objetivo fue el diagnóstico de las curvas de la línea

B del Metro de Medellín, para ello fue necesario determinar diferentes correlaciones entre las intervenciones de re perfilado de rieles, mecanismos de daño, forma de contacto rueda-riel, tipo de riel, peralte de la curva, radio de curvatura y materia que remueve, estas correlaciones permitieron establecer tipologías de daño y frecuencias de intervención y así realizar operaciones de re perfilado desde un mantenimiento preventivo, además de determinar estrategias para mejorar la calidad superficial después del proceso de re perfilado que permita disminuir el desgaste y fatiga de contacto.

Quintana y Preciado (2016) presentaron la publicación titulada “Estudio del desgaste de carriles en servicio y optimización de su mantenimiento”, donde estudian el desgaste de los rieles a lo largo del tiempo producido por el deslizamiento de las ruedas de los trenes que circulan sobre ellos, además también analizan el efecto que tienen las elevadas cargas soportadas en la estructura de acero de los rieles. Para llevar a cabo el estudio fue necesario analizar muestras de rieles con alto desgaste y otras muestras inducidas al desgaste acelerado mediante pruebas de laboratorio, donde los datos obtenidos fueron validados mediante el modelo teórico de Archard. Producto de este análisis se pudieron obtener relaciones satisfactorias entre las variables evaluadas, concluyendo que la presente investigación puede ser aplicada en la planificación del mantenimiento de los rieles, optimizando así los intervalos de mantenimiento preventivo.

Laín, Llamas, Pous y Laín (2018) presentaron la investigación titulada “Nueva metodología empírica para la estimación del desgaste de los cortadores de una tuneladora” cuyo objetivo fue crear una metodología nueva que sea más barata, de fácil uso y mucho más rápida que las existentes para la estimación del desgaste de los cortadores de una tuneladora operando en roca dura, utilizando un desarrollo estadístico y matemático que permitió determinar una fórmula empírica. Producto del estudio, se obtuvo el índice CLH que estima el desgaste de los

cortadores de la cabeza de corte de las tuneladoras TBM, logrando así prever la duración de estos.

Hernández (2018) presentó la tesis titulada “Efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas y estructurales de elastómeros comerciales: Estimación de la degradación del polímero a largo plazo tiene como objetivo estudiar el efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas y estructurales del caucho natural, neopreno y acrílico nitrilo”, con el fin de correlacionar ambas partes. Para llevar a cabo el estudio fue necesario elaborar probetas para someterlas a pruebas de envejecimiento térmico a 100 °C durante periodos de exposición de 48, 96 y 168 horas, luego se llevan a cabo ensayos mecánicos para evaluar la resistencia al desgarro y a la tracción, alargamiento máximo y dureza de estos materiales, finalmente se correlacionan los resultados mediante ajustes lineales. Los resultados obtenidos muestran que, en el material sometido a envejecimiento térmico durante mayor tiempo, sus características mecánicas como alargamiento máximo, resistencia al desgarro, y tracción disminuyeron, mientras que su dureza aumentó.

Coello y Guerrero (2016) presentaron la tesis titulada “Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido” cuyo objetivo fue correlacionar la degradación y contaminación del aceite de estos motores con los kilómetros recorridos, para lo cual se seleccionó una muestra de 22 vehículos a los cuales se les renovó el aceite y se comenzó a registrar el kilometraje de cada uno para ejecutar las evaluaciones de viscosidad, número básico total, dilución de combustible, contaminación con silicio y determinación del desgaste mediante la presencia de metales en las muestras tomadas. Para el análisis de estas muestras fue necesario realizar valoraciones en un laboratorio y con los resultados obtenidos se desarrolló un análisis estadístico que permitió determinar el kilometraje en el cual se recomienda realizar el cambio de aceite de los motores.

Estado del arte

La buena gestión del mantenimiento preventivo de los bienes de una empresa no solo permite asegurar el correcto funcionamiento de los equipos y en consecuencia la continuidad del servicio que brinda, sino que también se ve reflejado en un impacto económico positivo ya que evita el gasto en trabajos correctivos innecesarios (Gordo, 2016).

Según García, Acosta y Flores (2016), el sistema de frenado, en cualquier tipo de vehículo de transporte, es el componente más importante y resulta indispensable contar con un sistema de funcionamiento predecible bajo cualquier condición de trabajo ya que de estos depende la seguridad de los usuarios. Por tal motivo se debe mantener un control exhaustivo de cada una de las características de los componentes de este sistema y asegurar el correcto funcionamiento de este.

Es de gran relevancia garantizar un adecuado sistema de mantenimiento preventivo, sobre todo si éste involucra el transporte masivo de ciudadanos. Cabe indicar que, de acuerdo con data estadística recientemente publicada por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), el servicio ferroviario de Lima traslada poco más de medio millón de pasajeros diariamente, por lo que lleva a inferir que es uno de los principales medios de transporte en la ciudad. Al ser un medio de transporte importante, es necesario asegurar la continuidad del servicio y que el número de trenes operativos sea el máximo posible, siendo así la gestión de mantenimiento un rol fundamental en ello.

El objetivo de un estudio correlacional es analizar cómo se relacionan dos variables, es decir, si el aumento o disminución de una coincide con el aumento o disminución de la otra (Sidharth, 2016). Velásquez (2014) presentó la tesis titulada “Análisis experimental del efecto del proceso de re perfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín, mediante el análisis correlacional entre las intervenciones de re perfilado de rieles, mecanismos de daño, forma de contacto rueda-riel,

tipo de riel, peralte de la curva, radio de curvatura y materia que remueve”, logró determinar frecuencias de intervención y así realizar operaciones de re perfilado desde un mantenimiento preventivo.

Quintana y Preciado (2016) con la publicación titulada “Estudio del desgaste de carriles en servicio y optimización de su mantenimiento” estudia el desgaste de los rieles a lo largo del tiempo producido por el deslizamiento de la ruedas de los trenes además del efecto que tienen las elevadas cargas sobre estas estructuras para lo cual fue necesario realizar un análisis correlacional entre estas variables, llegando a la conclusión que su estudio puede ser aplicado a la planificación del mantenimiento de rieles optimizando la frecuencia de intervenciones de mantenimiento preventivo. Por otro lado, Laín, Llamas, Pous y Laín (2018) en su investigación titulada “Nueva metodología empírica para la estimación del desgaste de los cortadores de una tuneladora”, mediante el análisis estadístico y matemático lograron determinar una fórmula empírica que estima el desgaste de la cabeza de corte en las tuneladoras TBM.

Dentro principales problemas que presenta la empresa en estudio se encuentra que la planificación de reperfilado, rectificado y cambio para ruedas y discos de freno no se cumple según lo estipulado siendo necesario el recambio de discos de freno o ruedas hasta 6 meses antes de lo proyectado además de la falta de stock de estos componentes en el momento oportuno que genera el riesgo que los trenes se encuentren circulando con medidas fuera de los límites permitidos poniendo en riesgo la seguridad de los pasajeros y la continuidad del servicio, es por eso que es necesario realizar un estudio correlacional para cuantificar la relación entre los kilómetros recorridos por los trenes y el desgaste de las ruedas y discos de freno que permita determinar una nueva tasa de desgaste y proyectar de forma adecuada el recambio de estos componentes y asegurar el abastecimiento oportuno de los mismos para mantener la continuidad del servicio prestado al evitar paradas no planificadas.

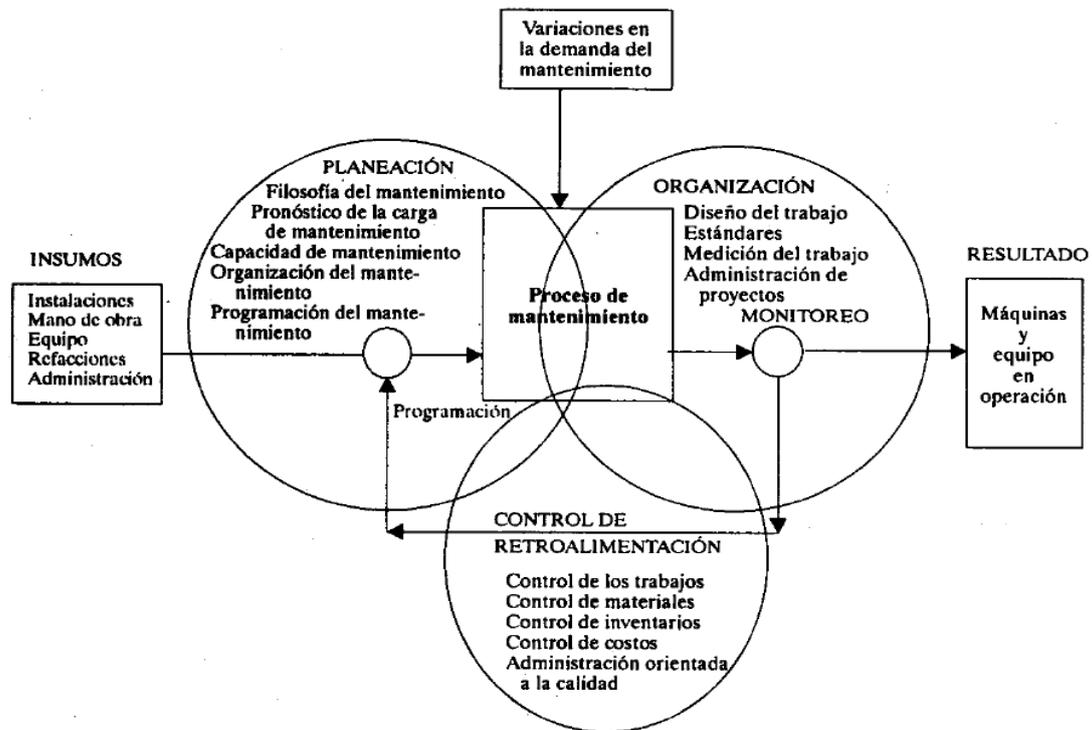
Marco Teórico

Mantenimiento.

Se define como mantenimiento al conjunto de actividades que permite mantener o restablecer un equipo o sistema a un estado en el cual este pueda desempeñar sus funciones con normalidad. Dentro de la empresa, se le considera como un factor importante en la calidad de los productos o servicios que esta produzca además de emplearse como principal estrategia competitiva para destacar ante las empresas rivales. Para elaborar productos u ofrecer un servicio de calidad es necesario que los equipos operen en óptimas condiciones, esto puede lograrse mediante acciones oportunas de mantenimiento. (Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.29)

Dentro de lo que mencionan Ballester, Olmeda, Macián y Tormos (2002), se considera que un plan de mantenimiento adecuado en una flota de transporte debe estar alineado a los objetivos principales del servicio, tales como la seguridad, comodidad, calidad y cumplimiento de horarios. Esto se puede lograr garantizando la disponibilidad de los vehículos, disminuyendo las averías imprevistas, aumentando la fiabilidad de los sistemas y componentes, con la optimización de los recursos empleados. Una adecuada gestión de lo anterior permite reducir los costes y contribuye a la eficiencia como empresa, con el debido respeto por el medio ambiente.

Figura 1: Sistema Típico de Mantenimiento



(Fuente: Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.31)

Mantenimiento Correctivo.

Es el tipo de mantenimiento que se realiza cuando ocurre algún fallo y el equipo se encuentra inoperativo (Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.33). Dada sus características, el mantenimiento correctivo es difícilmente programable y por sus repercusiones es una actividad que se pretende minimizar (Arques, 2009, p.46).

Mantenimiento Preventivo.

Es el tipo de mantenimiento que se realiza para evitar la aparición de algún fallo y se ejecuta de forma periódica. El mantenimiento preventivo mejora la fiabilidad del equipo y es programable (Arques, 2009, p.47). Se puede clasificar en dos tipos:

Mantenimiento Preventivo con Base en el Tiempo o en el Uso.

“Se lleva a cabo de acuerdo con las horas de funcionamiento o un calendario establecido. Requiere de un alto nivel de planeación. Las rutinas específicas que se realizan son conocidas, así como sus frecuencias.” (Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.33)

Mantenimiento Preventivo con Base a las Condiciones.

“Se lleva a cabo con base a las condiciones conocidas del equipo. La condición del equipo se determina vigilando los parámetros clave del equipo cuyos valores se ven afectados por la condición de este” (Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.33). A este tipo de mantenimiento también se le conoce como mantenimiento predictivo.

Mantenimiento de Mejora.

Es el tipo de mantenimiento que se realiza cuando el fallo en el equipo tiene consecuencias que afectan la seguridad de las personas o del medio ambiente es preciso realizarle mejoras al equipo para mantener la fiabilidad de este dentro de parámetros aceptables. La mejora por realizar no necesariamente tiene que ser técnica si no que pueden considerarse como tal la mejora en la formación de los empleados o la mejora de los procedimientos de mantenimiento (Arques, 2009, p.47).

Mantenimiento de Oportunidad.

“Como su nombre lo indica, se lleva a cabo cuando surge la oportunidad. Tales oportunidades pueden presentarse durante los periodos de paros generales programados de un sistema en particular.” (Duffuaa, Raouf & Dixon, 2000, p.33)

Fases para desarrollar un plan de Mantenimiento.

Para la planificación, control e integración del plan de mantenimiento, los procesos más importantes que se deben tener en cuenta son los siguientes (Cano, 2017):

- Identificar la estrategia y el objetivo a lograr (el qué) en la gestión del mantenimiento.
- Especificar la meta que se desea alcanzar, en términos concretos, cualitativos o cuantitativos (resultado esperado, indicadores). Hay diferentes formas de llevar esto, más adelante se detalla en la etapa del Control.
- Definir las tareas a realizar para desarrollar la estrategia (el cómo).
- Señalar o definir el tiempo necesario para el desarrollo (Cuándo), es importante los plazos para la buena gestión en el mantenimiento.
- Señalar el responsable de cada tarea o actividad (quién), dentro del organigrama de la empresa para las funciones de la gestión del mantenimiento.
- Especificar los recursos humanos, técnicos, tecnológicos, financieros y físicos necesarios (Con qué). Este paso es necesario para el alcance de lo que hará con recursos propios y lo que se tercerizará.
- Es importante revisar las posibles limitaciones de la ejecución del mantenimiento, esto permite establecer planes de contingencia.

Terminología aplicable en el Mantenimiento de Vehículos.

Según Guevara y Osorio (2014):

Mantener. Conjunto de acciones para que las instalaciones y máquinas de una industria funcionen adecuadamente.

Producción. Es un proceso mediante el cual se genera utilidades a la industria.

Falla o avería. Daño que impide el buen funcionamiento de la maquinaria o equipo.

Defecto. Suceso que ocurre en una máquina que no impide el funcionamiento.

Confiabledad. Buena funcionalidad de la maquinaria y equipo dentro de una industria en definitiva el grado de confianza que proporcione una planta

Disponibilidad. Porcentaje de tiempo de buen funcionamiento de una máquina o equipo por ende de toda la industria es decir producción óptima.

Entrenamiento. Preparar o adiestrar al personal del equipo de mantenimiento, para que sea capaz de actuar eficientemente en las actividades de mantenimiento.

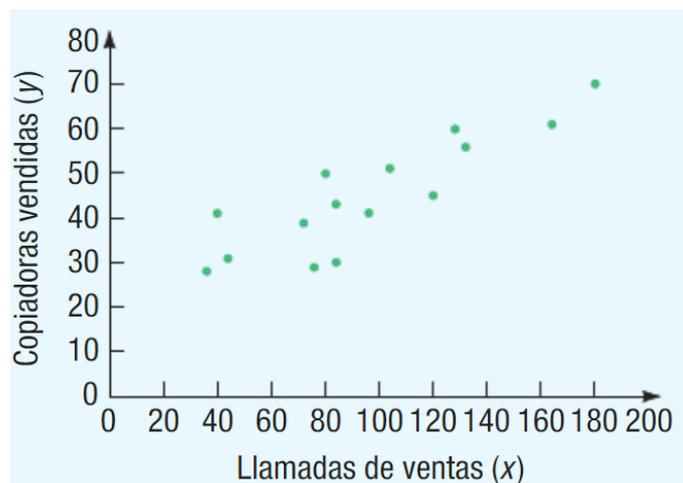
Seguridad. Asegurar el equipo y personal para el buen funcionamiento de la planta, para prevenir condiciones que afecten a la persona o la industria.

Prevención. Preparación o disposición que se hace con anticipación ante un riesgo de falla o avería de una máquina o equipo.

Análisis de Correlación

Se define como análisis de correlación al conjunto de técnicas estadísticas usadas para medir el grado de asociación entre dos variables. Para realizar este análisis se debe graficar un diagrama de dispersión. (Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.382)

Figura 2: Diagrama de dispersión



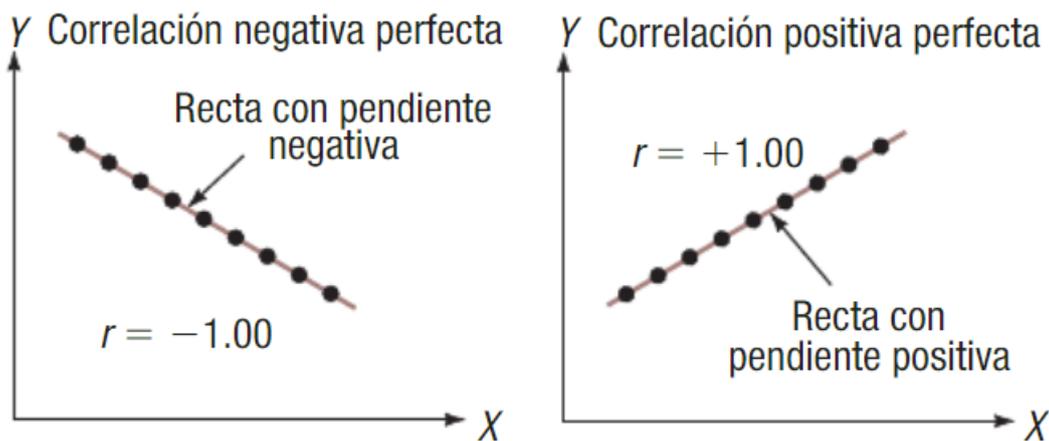
(Fuente: Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.383)

Coefficiente de correlación de Pearson.

Fue creado por Karl Pearson a mediados del año 1900, este coeficiente se encarga de describir el grado de relación entre dos variables. Para identificar este coeficiente se le designó la letra

“R” y su valor fluctúa entre el -1 y el +1. Si el coeficiente de correlación de Pearson obtiene exactamente estos valores (-1 o +1), se dice que la relación entre las variables es perfecta. En el caso que el valor de R sea igual a +1 significa que la relación entre la variable independiente (X) y la variable dependiente (Y) es positiva y directamente proporcional, es decir, el aumento de una se ve reflejado, de la misma manera, en el aumento de la otra. Por otro lado, si el valor de R es igual a -1, significa que la relación entre la variable independiente (X) y la variable dependiente (Y) es negativa e indirectamente proporcional, es decir, que el aumento o disminución del valor de la variable independiente tiene el efecto contrario en la variable dependiente. En el caso de no existir ninguna relación entre las variables, el valor de R será igual a 0. (Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.383)

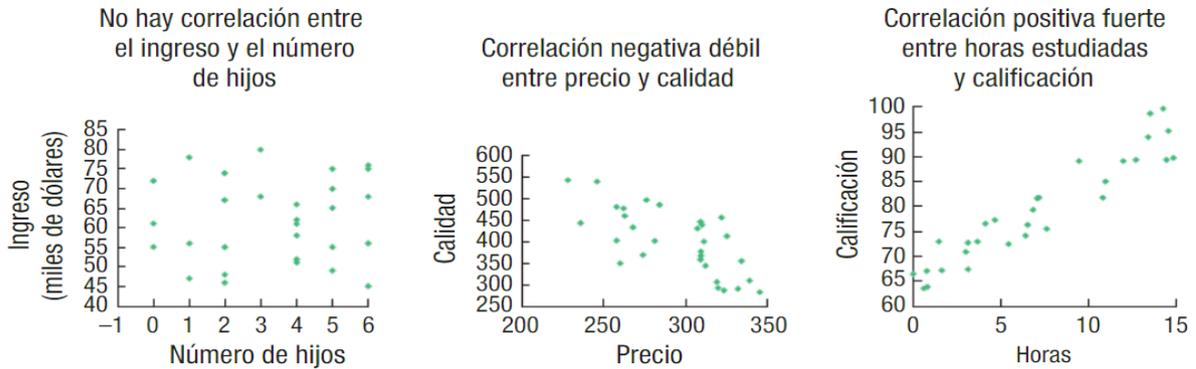
Figura 3: Diagrama de dispersión con correlación negativa y positiva perfecta



(Fuente: Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.383)

En el caso que el valor del coeficiente R sea cercano a 0, significa que la relación entre las variables es débil y si el valor del coeficiente es cercano a -1 o +1 significa que la relación entre las variables es fuerte.

Figura 4: Diagrama de dispersión con correlación nula, débil y fuerte



(Fuente: Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.384)

Figura 5: Fuerza y dirección del coeficiente de correlación R



(Fuente: Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.384)

Regresión Lineal Simple

El concepto de análisis de regresión alude a hallar la mejor relación entre las variables “x” e “y”, cuantificando la intensidad de esa relación y empleando métodos que permitan predecir los valores de la variable dependiente (Y) a partir de los valores de la variable independiente (X). (Walpole, Myers, Myers & Ye, 2012, p.389)

“Es considerada una técnica de dependencia y exploratoria partiendo de la ecuación de la línea recta, la cual se denomina modelo explicativo-predictivo.” (De la Puente, 2018, p.229)

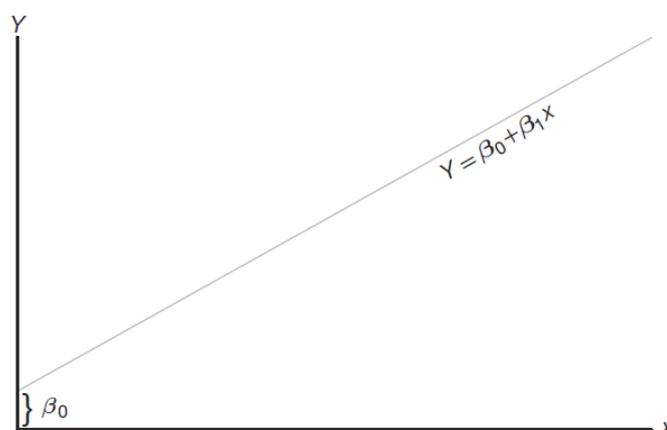
Se le denomina simple ya que solo se trabaja con una variable independiente, por otro lado, se dice que es un modelo predictivo ya que se intenta explicar o predecir el comportamiento de la variable dependiente a través de la variable independiente. Este tipo de análisis también admite una relación del tipo causa-efecto entre las variables. (De la Puente, 2018, p.229)

En este tipo de análisis se emplean los mismos principios que en el análisis correlacional, sin embargo, se obtiene más información al expresar la relación lineal de las variables mediante la ecuación de la recta, la cual ayudará estimar o predecir los valores de la variable dependiente. (Lind, Marchal & Wathen, 2015, p.392)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x$$

Ecuación general de la recta.

Figura 6: Relación lineal, donde: β_0 : intersección y β_1 : pendiente

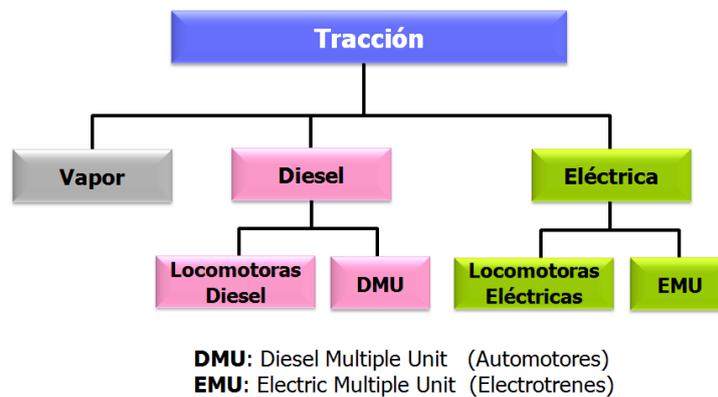


(Fuente: Walpole, Myers, Myers & Ye, 2012, p.390)

Transporte Ferroviario

Se define como transporte ferroviario o ferrocarril a aquel medio de transporte de personas o mercancías que se moviliza sobre una vía férrea. Según el tipo de tracción que posea la máquina se pueden clasificar de la siguiente manera:

Figura 7: Clasificación de las locomotoras según el tipo de tracción



(Fuente:Revista Prisma Tecnológico Vol. 4 Nro. 1 2013, p. 33)

Material Rodante

También conocido como material móvil, son todos aquellos vehículos dotados de ruedas capaces de poder circular sobre la vía férrea. Su principal objetivo es movilizar personas o mercadería. Se les puede clasificar principalmente en dos tipos:

Material Motor

Es todo aquel material rodante con capacidad de arrastre o tracción dentro de este grupo encontramos a las locomotoras, las cuales dentro de la formación del tren son las únicas que efectúan el remolque de los vagones o coches que conforman el mismo y no permiten llevar carga útil sobre sí mismo. Según el tipo de tracción pueden ser locomotoras a vapor (obsoletas actualmente), locomotoras diésel o locomotoras eléctricas.

Figura 8: Locomotora a vapor.



(Fuente: https://www.museodelferrocarril.org/coleccion/locomotoras_vapor.asp)

Figura 9: Locomotora diésel.



(Fuente: <https://www.flickr.com/photos/alcoalbe/12636030323>)

Figura 10: Locomotora eléctrica.



(Fuente: <https://fracademic.com/dic.nsf/frwiki/686722>)

Material Autopropulsado

Es aquel tipo de material rodante que tiene la capacidad de propulsarse por sí mismo, son empleados para el transporte de pasajeros y mercadería. Dentro de este grupo podemos encontrar a los automotores, cuya principal característica es que la formación de este tipo de material rodante está conformada por un solo coche, como los tranvías. Luego están los trenes autopropulsados, estos se diferencian de los automotores al estar formados por un conjunto de vehículos, usualmente fijados de forma permanente. Según el tipo de tracción se clasifican en tren autopropulsado diésel, unidades eléctricas y electrotrenes.

Figura 11: Automotor eléctrico



(Fuente: <http://ferropedia.es>)

Figura 12: Tren autopropulsado diésel



(Fuente: <http://ferropedia.es>)

Figura 13: Tren autopropulsado eléctrico



(Fuente: <http://www.renfe.com>)

Material remolque

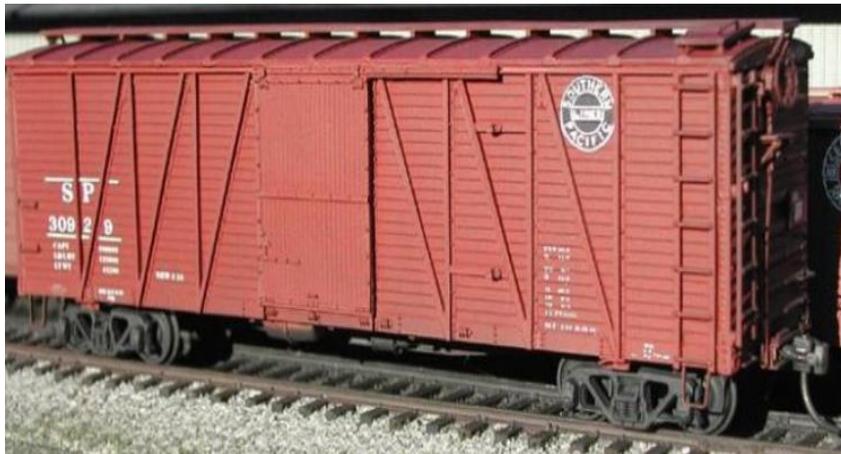
Aquí se encuentran todo aquel tipo de material rodante que no tiene la capacidad de desplazarse por sí solo, es decir, no poseen capacidad de tracción y necesitan de otro vehículo que los remolque (locomotoras). El material remolque está conformado principalmente por coches de pasajeros, furgones y vagones de mercancías.

Figura 14: Coche de pasajeros



(Fuente: <http://www.cubadebate.cu>)

Figura 15: Furgón



(Fuente: <http://metrointermodal.com>)

Figura 16: Furgón



(Fuente: <http://www.trensim.com>)

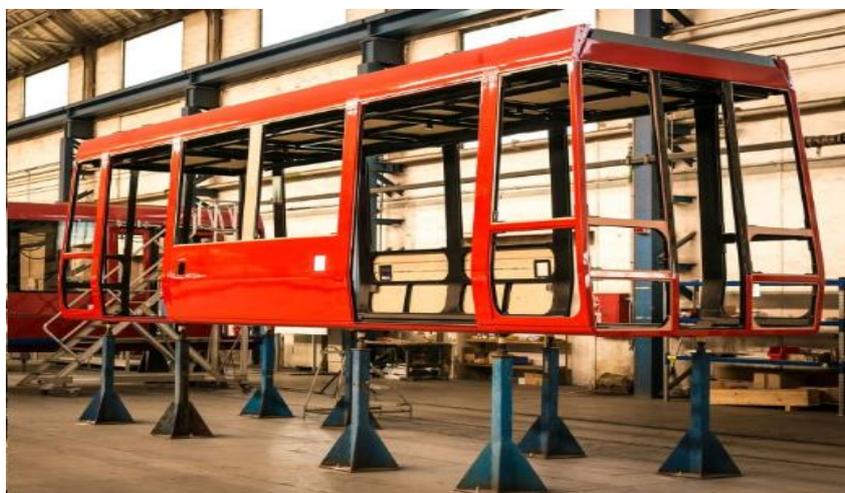
Elementos principales del material rodante

El material rodante está conformado principalmente de los siguientes elementos:

Caja

Se refiere a la carrocería del material rodante, esta va unida al bastidor del bogie. Los materiales empleados usualmente para la fabricación de estas son el acero al carbono, acero inoxidable o aluminio.

Figura 17: Caja o carrocería del material rodante



(Fuente: <https://www.molinari-rail.com/es/manufacturing/carroceria/>)

Bogie

Es aquel par montado de ruedas sobre el cual se apoya la carrocería del ferrocarril, se les clasifica en dos tipos importantes: Bogie motor o tracción, es aquel que posee capacidad de tracción y bogie remolque, es aquel que no posee capacidad de tracción.

Los bogies pueden estar conformados por dos o tres ejes, en los cuales se ubican dos ruedas por eje, dos cajas de grasa, sistema de frenado, sistema de suspensión y la caja reductora (solo en bogie motor) que es la que ponen en contacto el motor con los ejes del bogie.

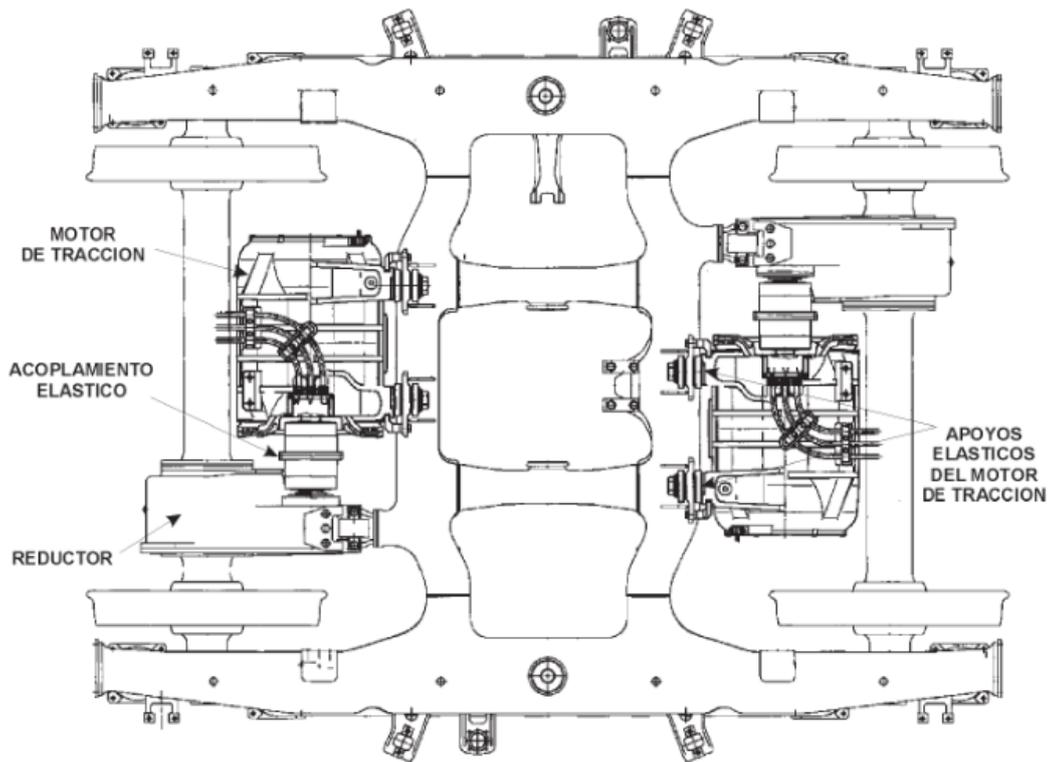
El bastidor del bogie es aquella estructura metálica donde se montan los ejes y el motor (en el caso del bogie motor) además, trabaja como unión entre la caja y el bogie.

Figura 18: Bogie



(Fuente <http://castulotechnology.com/>)

Figura 19: Conjunto motorización en bogie.

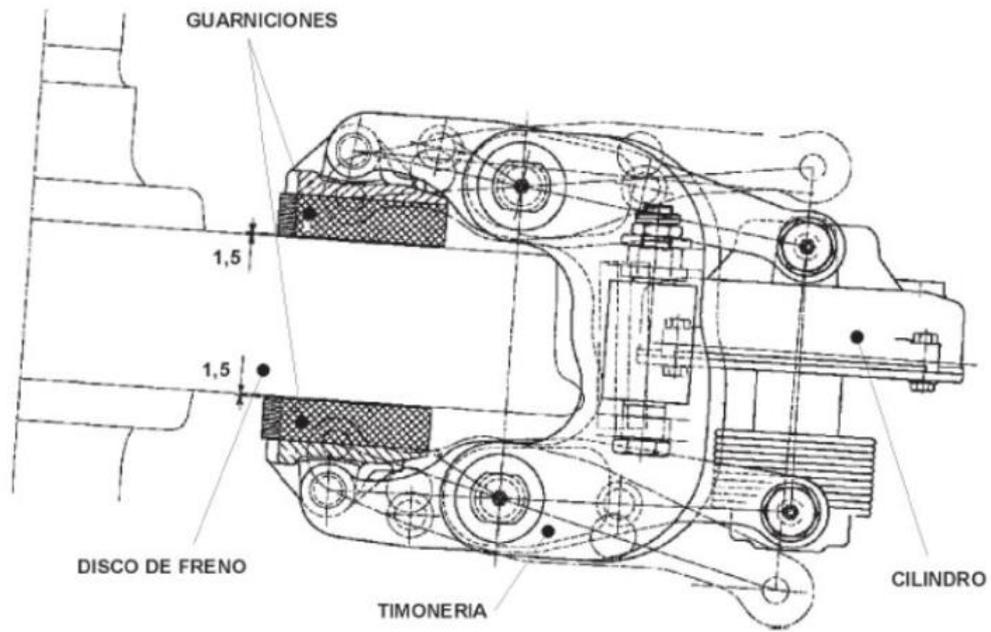


Miranda (2015)

Frenos Ferroviarios

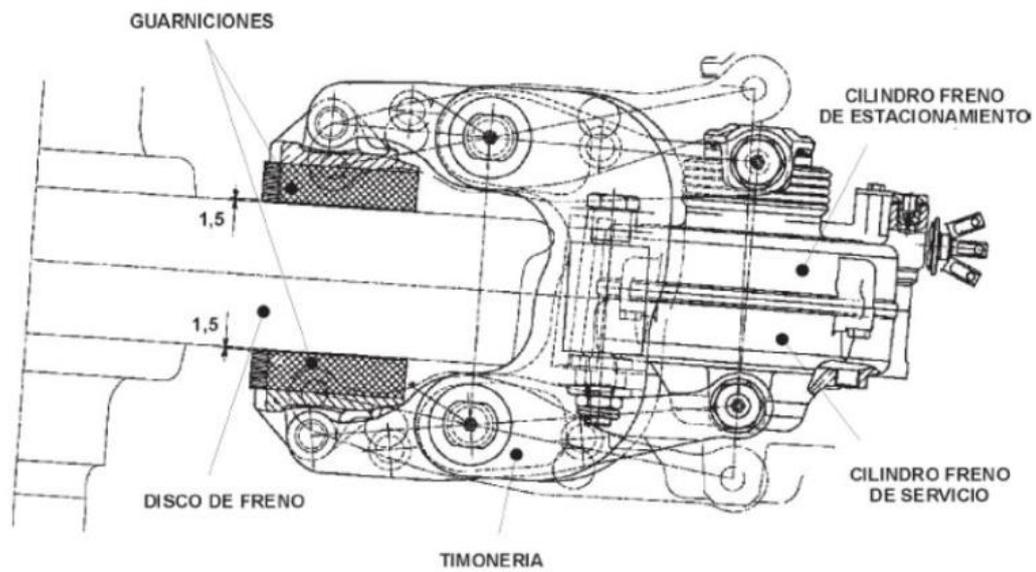
En lo investigado por Miranda (2015), los cilindros de freno empleados en trenes ferroviarios son dispositivos muy complejos. Se trata de elementos capaces de generar suficiente fuerza de frenado para detener un tren y corregir automáticamente el desgaste que sufren las guarniciones de freno. Su funcionamiento es totalmente mecánico, y esta corrección automática se da sin intervención de electrónica de ningún tipo. Existen modelos que únicamente equipan el freno de servicio y modelos que además incorporan el freno de estacionamiento. Así, se dispone de dos tipos de freno en el mismo equipo con un requerimiento de espacio similar. Esto se puede apreciar en las siguientes figuras:

Figura 20: Timonería y cilindro de freno sin estacionamiento



(Miranda, 2015)

Figura 21: Timonería y cilindro de freno con estacionamiento



(Miranda, 2015)

Ejes

Es aquel componente sobre los cuales se colocan las ruedas de los bogies, los elementos más importantes de los ejes son:

- Cuerpo del eje.
- Sección de calaje: Zona donde se encajan las ruedas.
- Manguetas.

Figura 22: Eje



(Fuente <http://www.cafmiira.com>)

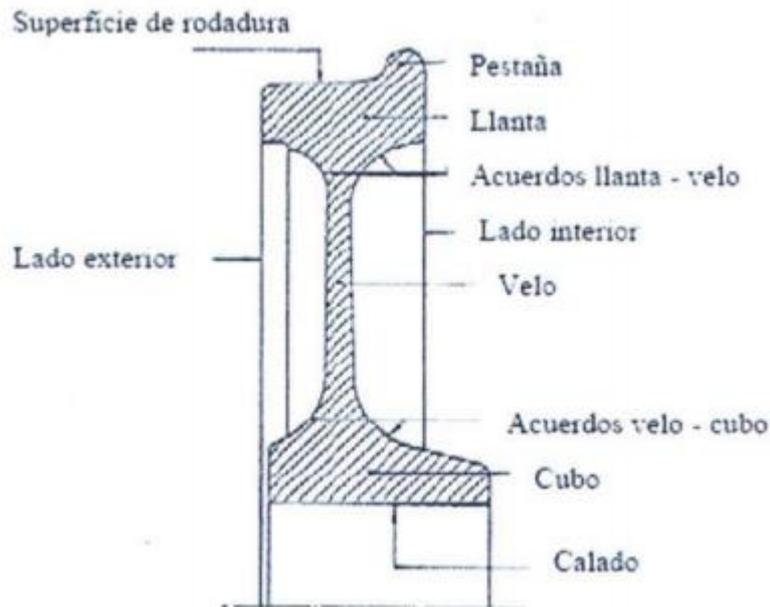
Ruedas

Son considerados el elemento más importante en cualquier tipo de vehículo ferroviario. Los elementos más importantes de las ruedas son:

- Pestaña: Parte saliente en los extremos de la rueda cuya principal función es impedir el descarrilamiento del ferrocarril. Tiene dos medidas importantes, las cuales deben ser controladas ya que indican el perfilado o cambio de la rueda, estos son el alto y ancho de pestaña.
- Superficie de rodadura: Superficie en contacto entre la rueda y la vía férrea.
- Cubo: Pieza metálica que trabaja como unión entre la rueda y el eje.

- Límite máximo de desgaste: Limite hasta el que se puede re perfilar una rueda.

Figura 23: Rueda



(Fuente:

<http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/18085/3/TFM%20Presencia%20de%20defectos.pdf>)

Sistema de Frenado

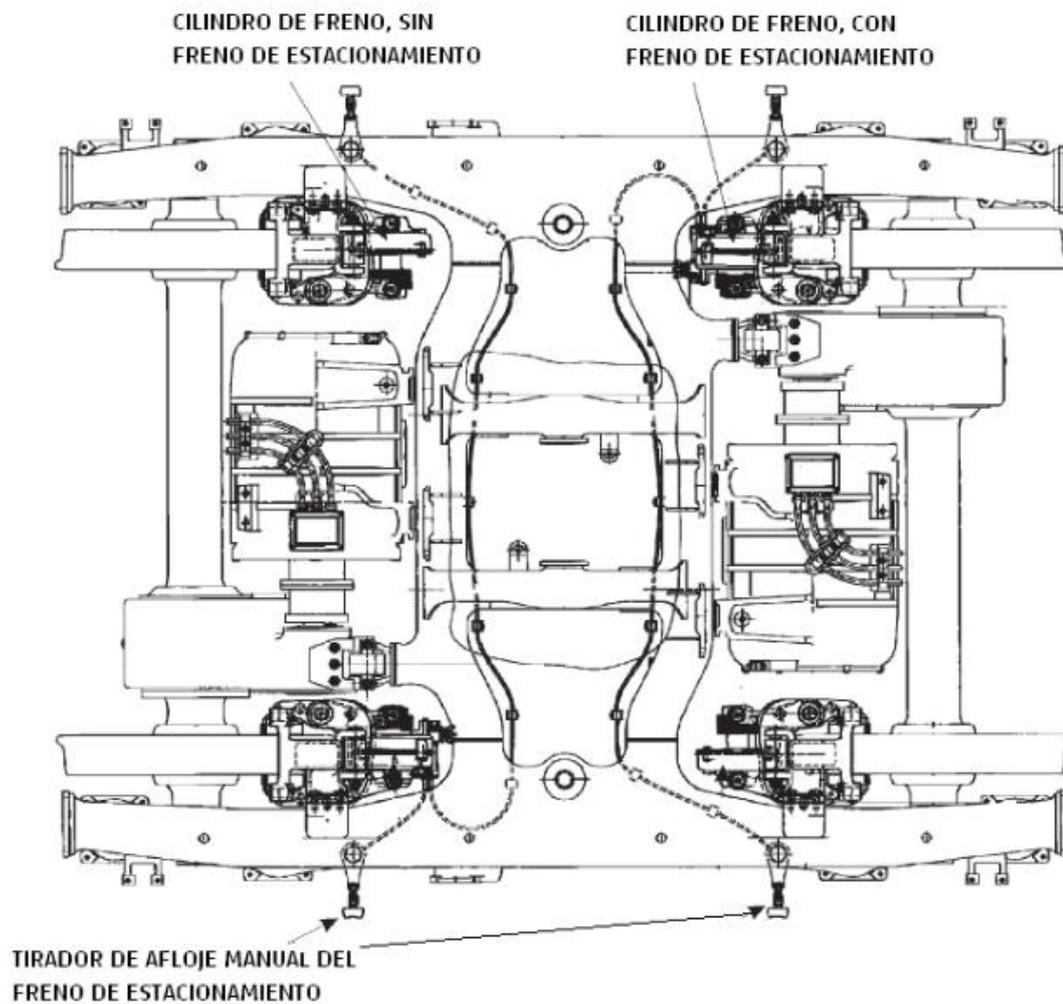
Según el estudio realizado por Miranda (2015), el freno de servicio se acciona por medios neumáticos con aire comprimido en la cámara del émbolo correspondiente. La presión desplaza el émbolo, al que está soldado el vástago, moviendo la timonería de freno y el frenado. Con esto se vence la oposición del resorte que permite el retorno del émbolo a su posición original una vez se retira el aire. El funcionamiento del freno de estacionamiento es opuesto al del freno de servicio, ya que, en este caso la acción de varios resortes mantiene el freno aplicado y con el aire comprimido se afloja.

La timonería de freno son dos mecanismos de palanca colocados simétricamente respecto de su eje longitudinal. Estando el cilindro de freno en un extremo, y en el otro las guarniciones

que actuarán sobre el disco. Es la relación entre los dos brazos de palanca que multiplican la fuerza ejercida por el cilindro, dando esta secuencia para el frenado:

- Posición de aflojamiento.
- Frenado, fase 1. Se aproximan las zapatas al disco. Se realiza el recorrido de aplicación.
- Frenado, fase 2 donde no hay desgaste del disco. Se recorre la distancia derivada de la elasticidad del freno y se efectúa el frenado.
- Frenado, fase 2 hay desgaste del disco. Se recorre la distancia causada por la elasticidad del freno más la originada por desgaste de la zapata y el disco y se efectúa el frenado.

Figura 24: Disposición del equipo de freno neumático en bogie.



(Miranda, 2015)

Figura 25: Timonería y cilindro de freno montado en bogie.



(Miranda, 2015)

Figura 26: Timonería y cilindro de freno.



(Miranda, 2015)

Desgaste

“El proceso de desgaste, puede definirse como una pérdida de material de la interfase de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza.” (Díaz Del Castillo, 2007). En la tecnología de la ingeniería, el desgaste implica el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales, habiéndose clasificado el desgaste según lo que lo produce: adherencia, abrasión, ludimiento, fatiga, erosión y corrosión.

Siendo el desgaste adhesivo las producidas cuando dos superficies se deslizan una contra otra bajo presión. Los puntos de contacto, en proyecciones microscópicas o la aspereza de la unión en la interfaz donde ocurre el deslizamiento debido a los altos esfuerzos localizados, llevan a que las fuerzas de deslizamiento fracturen la unión de los puntos, desgarrando al material de una superficie y transfiriéndolo a otra.

Tribología

La palabra Tribología proviene del término griego *tribos*, el cual significa “frotamiento o rozamiento”, por lo que la palabra completa hace referencia a “la ciencia del rozamiento”. En los diccionarios se encuentra a la Tribología como la ciencia y tecnología que estudia la interacción de las superficies en movimiento relativo, así como los temas y prácticas relacionadas.

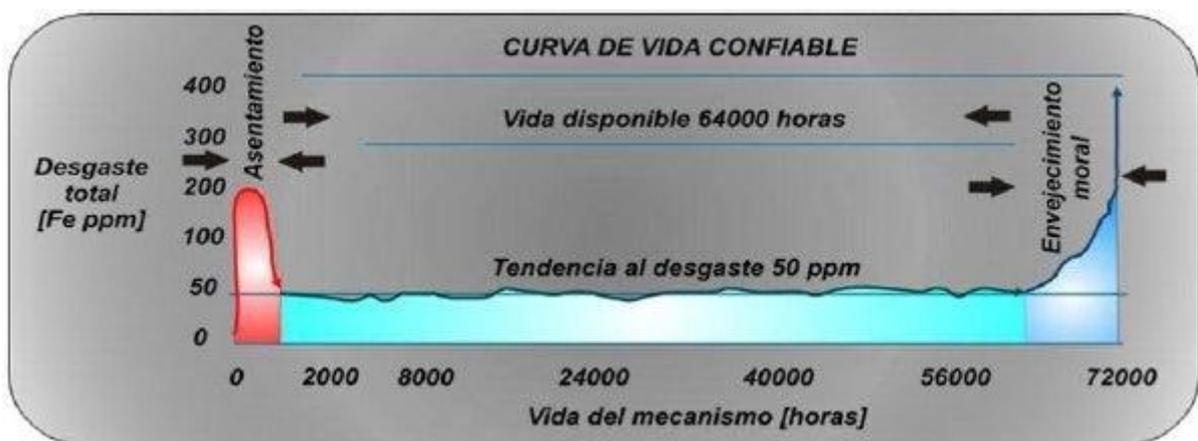
En la práctica, la Tribología es el arte de aplicar un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, dentro de la confiabilidad, mantenimiento, y desgaste del equipo técnico. Para el estudio de las interacciones superficiales en una interfase se requieren conocimientos en física, química, matemáticas aplicadas, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de materiales, reología, lubricación, diseño de máquinas, desempeño y confiabilidad, según expone Díaz Del Castillo (2007). Finalmente, la Tribología se centra en el estudio de tres fenómenos; la fricción entre dos

cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de este fenómeno y la lubricación como un medio para evitar el desgaste.

Curva Tribológica

Según Albarracín (s.f.), la curva tribológica de los componentes de una máquina es muy similar a la curva de la bañera de Davis (referida a las diferentes etapas en las que pueden fallar los componentes de las máquinas) y se conoce también como la curva de desgaste normal de cada uno de estos componentes a través del tiempo. Esta curva será característica para cada uno de los diferentes metales que constituyen la metalurgia de los mecanismos de la máquina, expresándose en partes por millón (ppm) que puede haber presentes en el aceite, analizado luego de su cambio. La curva tribológica tiene tres etapas fundamentales que son: improductiva ó asentamiento del componente, productiva ó vida a la fatiga y final ó vida remanente (envejecimiento moral). Ver figura a continuación.

Figura 27: Curva tribológica



Albarracín (s.f.)

OBJETIVOS

Objetivo general

Cuantificar la relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos.

Objetivos específicos

Cuantificar la relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

Cuantificar la diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

Cuantificar la relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

Cuantificar la relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

JUSTIFICACIÓN

Los fabricantes de ruedas y discos de freno no ofrecen tablas de desgaste por kilometraje, esa carencia es uno de los motores de la investigación.

Los fabricantes, por el contrario, proponen medidas iniciales y límites de rodado tanto para la rueda como para los discos de freno. Así mismo, estos sugieren realizar una inspección programada de los parámetros de rueda cada 75,000 kilómetros recorridos y para los parámetros del disco de freno cada 50,000 kilómetros recorridos. Dicha inspección consiste en medir las diferencias entre los diámetros de rueda pertenecientes al mismo eje y al mismo bogie. Además, señalan que con base a la experiencia acumulada se podrá determinar una tasa de consumo promedio y así estimar la frecuencia de recambio y/o reperfilado.

Como ya se indicó, los elementos rotativos (ruedas y discos de freno) poseen dimensiones límite por lo que es necesario controlar que estas no sean superadas, manteniendo así, alejado el riesgo que estos sistemas fallen, poniendo en alto riesgo la seguridad de los usuarios. Es decir, la medición como medida preventiva nos permite obtener información importante para el desarrollo de proyectos o procesos, cuando estas se realizan en el momento oportuno y de forma acertada permiten disminuir costos innecesarios y tomar decisiones mejor direccionadas. Para el presente caso de estudio, al ser las ruedas y discos de freno, componentes críticos dentro del material rodante ya que influyen directamente en la continuidad del servicio y seguridad de los pasajeros, su medición permite recolectar información valiosa para llevar un control sobre el deterioro de los mismos, además la obtención de esta información ayuda a realizar el análisis estadístico necesario para determinar una tasa de desgaste que permita proyectar un plan de reperfilado/rectificado y cambio oportuno.

Por otro lado, el tener un plan de rectificado y recambio otorga la posibilidad de abastecerse de ruedas y discos de freno en el momento requerido lo que conlleva a tener el 100% de la flota operativa evitando así costes innecesarios.

Es por ello que el presente trabajo de investigación tiene como objetivo realizar un análisis relacional para cuantificar la relación entre el kilometraje y el desgaste de ruedas y discos de frenos en trenes eléctricos y así determinar una tasa de desgaste más precisa que permita desarrollar un nuevo plan de reperfilado, rectificado y/o recambio de estos elementos.

Teórica

La presente investigación tiene relevancia dentro del campo de la Ingeniería Industrial ya que demostrará que por medio de un análisis relacional se logra determinar una tasa de desgaste de componentes que permita desarrollar un plan de reperfilado, rectificado y/o recambio de estos asegurando de esta manera la continuidad del servicio.

Práctica

Actualmente las fechas para el reperfilado, rectificado y/o recambio de ruedas y discos de freno estimadas por las áreas de ingeniería y planificación no viene cumpliéndose según lo previsto lo que genera disminución en el número de trenes operativos, falta de stock de estos componentes en el momento oportuno o que el material rodante opere con medidas fuera de tolerancia, lo que pondría en riesgo la seguridad de la operación. Por estas razones es necesario realizar un análisis relacional cuantificar la relación entre el kilometraje y el desgaste de ruedas y discos de freno para determinar una tasa de desgaste más precisa y de esta manera desarrollar

un plan de reperfilado, rectificado y/o recambio que permita asegurar la mayor cantidad de equipos operativos del material rodante.

Social

Determinar una tasa de desgaste de ruedas y discos de freno ayudará desarrollar un nuevo plan de medición y recambio de estos componentes, anticiparse oportunamente a situaciones inesperadas, asegurar el aprovisionamiento oportuno de los recursos necesarios para ejecutar las actividades de mantenimiento sin ningún contratiempo lo cual se deriva en el aumento la disponibilidad y confiabilidad operativa del material rodante. Finalmente, esto se verá reflejado en poder brindar el servicio de transporte sin ningún inconveniente logrando así satisfacer la demanda y mejorar la calidad del servicio.

ALCANCE

El presente trabajo de investigación se desarrollará en una empresa Ferroviaria de Lima Metropolitana, este abarcará desde la recopilación y análisis de data histórica hasta la elaboración de un plan de medición y recambio de ruedas y discos de freno. Cabe señalar que los datos a emplearse corresponden a los periodos comprendidos entre los años 2018 y 2019.

LIMITACIONES

Las cartillas de medición de desgaste para discos y ruedas suelen estar poco legibles, lo que dificulta el registro de los datos tomados. Los técnicos registran los datos de forma desordenada, lo que dificulta el análisis de los datos.

HIPOTESIS

Hipótesis general

H₀: No existe relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogies de transmisión y remolque de trenes eléctricos.

H₁: Sí existe relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogies de transmisión y remolque de trenes eléctricos.

Hipótesis específicas

H₀: No existe relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogies de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H₁: Sí existe relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogies de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H₀: No existe diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogies de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H₁: Sí existe diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogies de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H₀: No existe relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogies de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H₁: Sí existe relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogies de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H_0 : No existe relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

H_1 : Sí existe relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: KILOMETRAJE RECORRIDO Y DESGASTE DE RUEDAS Y FRENOS EN BOGÍES DE TRANSMISIÓN Y REMOLQUE EN TRENES ELÉCTRICOS		
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL
¿Cuál es la relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos?	Cuantificar la relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos.	H0: No existe relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos. H1: Sí existe relación entre el kilometraje recorrido y los desgastes en ruedas y frenos en bogíes de transmisión y remolque de trenes eléctricos.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVO ESPECÍFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICA
¿Cuál es la relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?	Cuantificar la relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.	H0: No existe relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019. H1: Sí existe relación entre el desgaste del diámetro de las ruedas y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.
¿En cuánto difieren los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?	Cuantificar la diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.	H0: No existe diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019. H1: Sí existe diferencia entre los valores del desgaste de los diámetros de la rueda respecto a los bogíes de remolque y los de tracción en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.
¿Cuál es la relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?	Cuantificar la relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.	H0: No existe relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019. H1: Sí existe relación entre el desgaste de la altura y espesor de la pestaña de los diámetros de la rueda y el recorrido en bogíes de trenes eléctricos en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.
¿Cuál es la relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019?	Cuantificar la relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.	H0: No existe relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019. H1: Sí existe relación entre el desgaste de los discos de freno y el recorrido para los bogíes tipo tracción y remolque en una empresa ferroviaria de Lima Metropolitana, año 2019.

Población: Todas las ruedas y discos de freno de los 39 trenes que operan en la Línea 1 del Metro de Lima, durante el año 2018 (1872 ruedas y 936 discos de freno).

Muestra: Poblacional

Criterios de inclusión: Se considera para el análisis todos aquellos registros de medición realizados antes del ingreso al torno y durante alguna inspección de rutina.

Criterios de exclusión: Se excluyen todas las mediciones realizadas después del mecanizado, es decir, todas aquellas realizadas a la salida del proceso de torneado.

Unidad de Análisis: Ruedas

Variable Independiente: Kilómetros recorridos.

Instrumento: El instrumento empleado es el odómetro de cada tren.

Variable dependiente: Desgaste (mm.)

Dimensiones:

- Desgaste de diámetro de rueda.
- Desgaste de alto de pestaña.
- Desgaste de ancho de pestaña.

Instrumento: Miniprof.

Unidad de Análisis: Discos de freno

Variable Independiente: Kilómetros recorridos.

Instrumento: El instrumento empleado es el odómetro de cada tren.

Variable dependiente: Desgaste (mm.)

Dimensiones:

- Desgaste de espesor.
- Desgaste lateral.

Instrumento:

- Vernier.
- Reloj comparador.

MARCO METODOLÓGICO

Metodología

El presente trabajo de investigación presenta un enfoque cuantitativo, bivariado, correlacional, no experimental con paradigma positivista.

Paradigma

El paradigma positivista tiene como objetivo el planteamiento de una hipótesis para luego comprobar si está es verdadera o no aplicando herramientas, técnicas o teorías que ayuden a esta demostración, obteniendo de esta manera conocimiento nuevo. Este tipo de paradigma da origen a un estudio de carácter cuantitativo. Por lo tanto, el paradigma de la presente investigación es positivista puesto que se desea comprobar una hipótesis aplicando herramientas estadísticas.

Enfoque

Sampieri (2014) señala que el enfoque cuantitativo es secuencial, es decir, que cada etapa del proceso de investigación precede a la otra y el orden debe ser riguroso. Dentro de las principales características del enfoque cuantitativo de la investigación se tiene:

- Evidencia la necesidad de medir y cuantificar las magnitudes de los problemas, fenómenos o eventos de investigación.
- El problema de estudio debe ser concreto y debidamente delimitado.
- Es necesario la revisión de la literatura pasada para poder determinar un marco teórico sólido del cual deriven las hipótesis.
- Las hipótesis deben ser generadas antes de la recolección de datos.

- Los datos recolectados al ser producto de mediciones son representados numéricamente y deben ser analizados con métodos estadísticos.

Según lo indicado por Sampieri se puede decir que el enfoque de la presente tesis es cuantitativo ya que será necesario la recopilación de data de forma estructurada y secuencial de las mediciones de desgaste de discos de freno y ruedas en trenes eléctricos para poder determinar la tasa de desgaste y estimar las fechas de rectificado o recambio de estos componentes.

Método

Sampieri (2014) explica que una investigación no experimental es aquella que se realiza sin que las variables independientes hayan sido manipuladas por el investigador para observar el comportamiento de las variables dependientes.

Según lo señalado por Sampieri, el método de la presente tesis es no experimental ya que las variables no serán manipuladas ni serán estimuladas para hacer que ocurra algún fenómeno, sino que se observará el comportamiento de cada una dentro de su contexto natural. Además, es del tipo transversal ya que la información del desgaste de ruedas y discos de freno será recopilada durante un periodo de tiempo establecido.

VARIABLES

Sampieri et ál (2014) define como variable a toda aquella propiedad o característica de seres vivos, objetos, hechos o fenómenos que pueda variar y que dicha variación pueda observarse o medirse. El autor también señala que las variables adquieren valor para la investigación científica cuando se relacionan con otras variables.

Variable Independiente

Se ha definido como variable independiente a los kilómetros recorridos por los trenes eléctricos. Asimismo, por ser una variable continua, se ha preferido hacerla de tipo discreta, teniendo como intervalos, los hitos de control. La lectura del kilometraje fue tomada del odómetro de los trenes.

Tabla 1
Intervalos de recorrido para frenos.

Intervalo	Tipo de Kilometraje	Rango de Kilómetros
I1	A	[0, 50 000] kilómetros
I2	B	<50 000, 100 000] kilómetros
I3	C	<100 000, 150 000] kilómetros
I4	D	<150 000, 200 000] kilómetros
I5	E	<200 000, 250 000] kilómetros
I6	F	<250 000, 300 000] kilómetros
I7	G	<300 000, 350 000] kilómetros
I8	H	<350 000, 400 000] kilómetros
I9	I	<400 000, 450 000] kilómetros
I10	J	<450 000, 500 000] kilómetros
I11	K	<500 000, 550 000] kilómetros
I12	L	<550 000, 600 000] kilómetros
I13	M	<600 000, 650 000] kilómetros
I14	N	<650 000, 700 000] kilómetros
I15	O	<700 000, 750 000] kilómetros
I16	P	<750 000, 800 000] kilómetros

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2
Intervalos de recorrido para ruedas.

Intervalo	Tipo de Kilometraje	Rango de Kilómetros
I1	A	[0, 75 000] kilómetros
I2	B	<75 000, 150 000] kilómetros
I3	C	<150 000, 225 000] kilómetros
I4	D	<225 000, 300 000] kilómetros
I5	E	<300 000, 375 000] kilómetros
I6	F	<375 000, 450 000] kilómetros
I7	G	<450 000, 525 000] kilómetros
I8	H	<525 000, 600 000] kilómetros
I9	I	<600 000, 675 000] kilómetros
I10	J	<675 000, 750 000] kilómetros

Fuente: Elaboración propia.

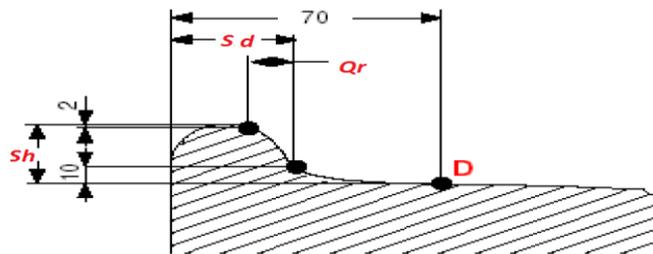
Variable Dependiente

Se ha definido como variable dependiente a los milímetros de desgaste lateral y espesor de discos de freno y diámetro, largo y ancho de pestaña de ruedas.

Indicadores de desgaste de la rueda:

- Diámetro: Es el diámetro de la rodadura.
- Círculo de Rodadura: Es el círculo sobre la superficie de rodadura ubicada a 70 mm (punto D de la figura) de la cara interna de la rueda.
- Espesor de Pestaña (Sd): Es la medida entre la cara interna de la rueda y el punto de la cara activa de la pestaña ubicado a 10 mm del círculo de rodadura.
- Altura de Pestaña (Sh): Es la distancia existente entre el vértice de la pestaña y su proyección sobre la horizontal que pasa por el círculo de rodadura.

Figura 28: Parámetros de la rueda.



Los parámetros que son medidos para el control del desgaste de la rueda son el diámetro, espesor de pestaña (Sd) y altura de pestaña (Sh). Las medidas para una rueda nueva y una desgastada son los siguientes:

Tabla 3
Valores Iniciales y Límites de los Parámetros de una Rueda

Parámetro	Valores Iniciales	Valores Límites
Diámetro	840 mm	770 mm
Altura de Pestaña (Sh)	29 mm	25 mm
Espesor de Pestaña (Sd)	31.11 mm	36 mm

Fuente: Elaboración propia.

POBLACIÓN Y MUESTRA

Población

Desde el punto de vista estadístico se denomina población al conjunto de elementos que serán motivo de estudio. Para efectos de esta tesis, la población está compuesta por los discos de freno y ruedas de los 39 trenes que conforman la flota ferroviaria. Cada tren está conformado por 6 coches (5 coches del tipo tracción y 1 remolcado), cada coche consta de 2 bogies (12 bogies por tren, 2 del tipo remolque y 10 del tipo tracción) y cada bogie tiene 4 ruedas y dos discos de freno (48 ruedas y 24 discos de freno por tren). En total la población se compone de 1872 ruedas y 936 discos de freno.

Muestra

Para efectos de este estudio la muestra será poblacional ya que se empleará a toda la población para realizar el análisis.

Registros de Medición de Ruedas

La herramienta con la cual se toman las medidas de las ruedas (Miniprof) emite archivos de texto con los parámetros de la rueda de la siguiente manera:

Figura 31: Reporte Generado por el Miniprof con los Parámetros de la Rueda.

```
ProgramName=MiniProf Pocket
ProgramVer=2.6.9.0
MPTypeNo=131
MPSerNo=1358
Date=18-09-2019
UserName=
EmplNum=
Time=13:29:52
Chars=utf-8
Stock=17
MPCalTime=8:21:31
MPCalDate=23-11-1793
ReferenceProfile=AlstomNewP.mpt
CarNo=145
AxleNo=1
WheelID=17-01
XYPoints=612
Sd=30.1139
Sd_AlarmStatus=3
Sh=31.2070
Sh_AlarmStatus=3
qR=10.2108
qR_AlarmStatus=3
DiameterFlange=871.9584
DiameterFlange_AlarmStatus=3
FlangeAngleMax=73.9061
FlangeAngleMax_AlarmStatus=3
FlangeAngleMaxPos=25.7797
FlangeAngleMaxPos_AlarmStatus=3
Hollowing=-0.2723
Hollowing_AlarmStatus=3
HollowingPos=79.4082
HollowingPos_AlarmStatus=3
DiameterTaperline=809.5444
DiameterTaperline_AlarmStatus=3
FlangeWidth=26.9142
FlangeWidth_AlarmStatus=3
ColumnDef=X,Y,A,N
```

PROCEDIMIENTOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Medición de Ruedas:

La medición de ruedas se realiza cada 75,000 kilómetros aproximadamente, para realizar la medición se emplea una herramienta llamada Miniprof.

Figura 32: Miniprof



(Fuente: <https://www.mbm-industrietechnik.com/Produkt%C3%BCbersicht/miniprof-wheel/>)

La medición de ruedas es realizada por el personal técnico de la empresa. Para realizar la medición, el técnico acopla el Miniprof a la rueda y desliza el pequeño bastón sobre la superficie de esta para que la herramienta realice las mediciones de los parámetros señalados anteriormente. El Miniprof emite unos archivos en formato de texto con las lecturas recolectadas durante la medición.

Medición de Discos de Freno:

La medición de discos de freno se realiza cada 50,000 kilómetros aproximadamente, para realizar la medición se emplea un vernier digital y un reloj comparador con base corrediza.

Figura 33: Reloj Comparador Mitutoyo



(Fuente: Imagen propia)

Figura 34: Vernier Digital



(Fuente: Imagen propia)

Los datos recolectados de los archivos emitidos por el Miniprof para la medición de ruedas, en las cartillas de medición y en los reportes de reperfilado de discos de freno fueron volcados en las siguientes bases de datos:

Figura 35: Muestra de la Base de Datos para las Medidas de Disco de Freno

N° TREN	FECHA	KILOMETRAJE	CLASE KILOMETRAJE	COCHE	BOGIE	SERIE_BOGIE	EJE	LADO	POSICION	OBSERVACION	TIPO MEDIDA	LECTURA
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB3	1	1	S	6-1	medicion	Espesor	7.4
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB3	1	1	D	6-2	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB3	1	2	S	6-3	medicion	Espesor	7.3
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB3	1	2	D	6-4	medicion	Espesor	6.9
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB4	1	1	S	6-5	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB4	1	1	D	6-6	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB4	1	2	S	6-7	medicion	Espesor	7.4
T06	5/06/2018	626350	M	Ma1	PB4	1	2	D	6-8	medicion	Espesor	7.1
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB6	1	1	S	6-9	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB6	1	1	D	6-10	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB6	1	2	S	6-11	medicion	Espesor	6.8
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB6	1	2	D	6-12	medicion	Espesor	6.7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB2	1	1	S	6-13	medicion	Espesor	6.7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB2	1	1	D	6-14	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB2	1	2	S	6-15	medicion	Espesor	6.8
T06	5/06/2018	626350	M	Mb1	PB2	1	2	D	6-16	medicion	Espesor	6.5
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB1	1	1	S	6-25	medicion	Espesor	7.1
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB1	1	1	D	6-26	medicion	Espesor	7.1
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB1	1	2	S	6-27	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB1	1	2	D	6-28	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB2	2	2	D	6-29	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB2	2	2	S	6-30	medicion	Espesor	7.2
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB2	2	1	D	6-31	medicion	Espesor	7.3
T06	5/06/2018	626350	M	R	TB2	2	1	S	6-32	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB2	2	2	D	6-33	medicion	Espesor	6.8
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB2	2	2	S	6-34	medicion	Espesor	6.8
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB2	2	1	D	6-35	medicion	Espesor	6.9
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB2	2	1	S	6-36	medicion	Espesor	6.6
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB6	2	2	D	6-37	medicion	Espesor	6.9
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB6	2	2	S	6-38	medicion	Espesor	6.9
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB6	2	1	D	6-39	medicion	Espesor	7
T06	5/06/2018	626350	M	Mb2	PB6	2	1	S	6-40	medicion	Espesor	6.8
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB4	2	2	D	6-41	medicion	Espesor	4.3
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB4	2	2	S	6-42	medicion	Espesor	4.1
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB4	2	1	D	6-43	medicion	Espesor	4.6
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB4	2	1	S	6-44	medicion	Espesor	4
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB3	2	2	D	6-45	medicion	Espesor	4.5
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB3	2	2	S	6-46	medicion	Espesor	4.1
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB3	2	1	D	6-47	medicion	Espesor	4.7
T06	5/06/2018	626350	M	Ma2	PB3	2	1	S	6-48	medicion	Espesor	4.8

(Elaboración propia)

Figura 36: Muestra de la Base de Datos para la Medición de Ruedas

N° TREN	FECHA	KILOMETRAJE	CLASE KILOMETRAJE	COCHE	BOGIE	SERIE_BOGIE	EJE	LADO	POSICION	OBSERVACION	TIPO MEDIDA	LECTURA
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB3	1	1	S	6-1	Ingreso al Torno	∅	818.95
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB3	1	1	D	6-2	Ingreso al Torno	∅	817.18
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB3	1	2	S	6-3	Ingreso al Torno	∅	814.74
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB3	1	2	D	6-4	Ingreso al Torno	∅	817.70
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB4	1	1	S	6-5	Ingreso al Torno	∅	823.76
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB4	1	1	D	6-6	Ingreso al Torno	∅	820.57
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB4	1	2	S	6-7	Ingreso al Torno	∅	821.11
T06	1/02/2018	590249	L	Ma1	PB4	1	2	D	6-8	Ingreso al Torno	∅	819.47
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB6	1	1	S	6-9	Ingreso al Torno	∅	824.04
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB6	1	1	D	6-10	Ingreso al Torno	∅	821.67
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB6	1	2	S	6-11	Ingreso al Torno	∅	822.47
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB6	1	2	D	6-12	Ingreso al Torno	∅	822.37
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB2	1	1	S	6-13	Ingreso al Torno	∅	822.92
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB2	1	1	D	6-14	Ingreso al Torno	∅	821.12
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB2	1	2	S	6-15	Ingreso al Torno	∅	821.19
T06	1/02/2018	590249	L	Mb1	PB2	1	2	D	6-16	Ingreso al Torno	∅	821.33
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB1	1	1	S	6-25	Ingreso al Torno	∅	824.37
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB1	1	1	D	6-26	Ingreso al Torno	∅	822.08
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB1	1	2	S	6-27	Ingreso al Torno	∅	820.80
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB1	1	2	D	6-28	Ingreso al Torno	∅	821.14
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB2	2	2	D	6-29	Ingreso al Torno	∅	820.73
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB2	2	2	S	6-30	Ingreso al Torno	∅	821.32
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB2	2	1	D	6-31	Ingreso al Torno	∅	824.00
T06	1/02/2018	590249	L	R	TB2	2	1	S	6-32	Ingreso al Torno	∅	819.61
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB2	2	2	D	6-33	Ingreso al Torno	∅	821.92
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB2	2	2	S	6-34	Ingreso al Torno	∅	820.63
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB2	2	1	D	6-35	Ingreso al Torno	∅	824.77
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB2	2	1	S	6-36	Ingreso al Torno	∅	821.91
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB6	2	2	D	6-37	Ingreso al Torno	∅	824.84
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB6	2	2	S	6-38	Ingreso al Torno	∅	823.37
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB6	2	1	D	6-39	Ingreso al Torno	∅	822.52
T06	1/02/2018	590249	L	Mb2	PB6	2	1	S	6-40	Ingreso al Torno	∅	821.84
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB4	2	2	D	6-41	Ingreso al Torno	∅	822.16
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB4	2	2	S	6-42	Ingreso al Torno	∅	819.65
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB4	2	1	D	6-43	Ingreso al Torno	∅	821.54
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB4	2	1	S	6-44	Ingreso al Torno	∅	819.86
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB3	2	2	D	6-45	Ingreso al Torno	∅	816.94
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB3	2	2	S	6-46	Ingreso al Torno	∅	815.91
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB3	2	1	D	6-47	Ingreso al Torno	∅	818.39
T06	1/02/2018	590249	L	Ma2	PB3	2	1	S	6-48	Ingreso al Torno	∅	815.30

(Elaboración propia)

Se especificó, además, el kilometraje en el que se encontraba cada tren al momento en el que se realizaron las mediciones. Luego se procedió a clasificar alfabéticamente los kilometrajes, según lo señalado en las tablas 1 y 2, para así poder incluirlos dentro de un rango determinado ya que no todas las medidas se realizaron al mismo kilometraje.

RESULTADOS

Resultados relacionados a las ruedas

Se tomaron 800 datos del diámetro de las ruedas de los diversos bogíes para cada intervalo de tiempo, hayan pasado o no a ser rectificadas al torno. Los resultados se muestran por tipo de bogíes y por recorrido. Según su recorrido, estos datos siguen una distribución normal, pues tienen un nivel de significancia mayor a 0.05 en la prueba de normalidad de Kolmogorov–Smirnov (para datos mayores a 30).

Tabla 4
Prueba de Normalidad de datos, agrupados según su recorrido.

	RECORRIDO	Kolmogorov-Smirnov		
		Estadístico	gl	Sig.
DESGASTE	l1	,034	278	,200*
	l2	,180	23	,050
	l3	,093	40	,200*
	l5	,059	77	,200*
	l6	,043	382	,083

El desgaste promedio cada 75,000 kilómetros es igual a 3.1519 mm. Este valor corresponde a la diferencia entre el diámetro de la rueda medido en el kilómetro 75,001, antes de ingresar al torno, y el diámetro de la rueda medido en el kilómetro 150,001, antes de ingresar al torno. Quiere decir que incluye el rectificado, se dé o no, y el desgaste natural del recorrido. La ecuación explicativa $Y = -4.1953 X + 846.01$, tiene un coeficiente de Pearson igual a 0.9773.

Desgaste promedio por tipo de Bogíes:

Tipo MA = 3.6368 mm/75 mil km

Tipo MB = 2.8995 mm/75 mil km

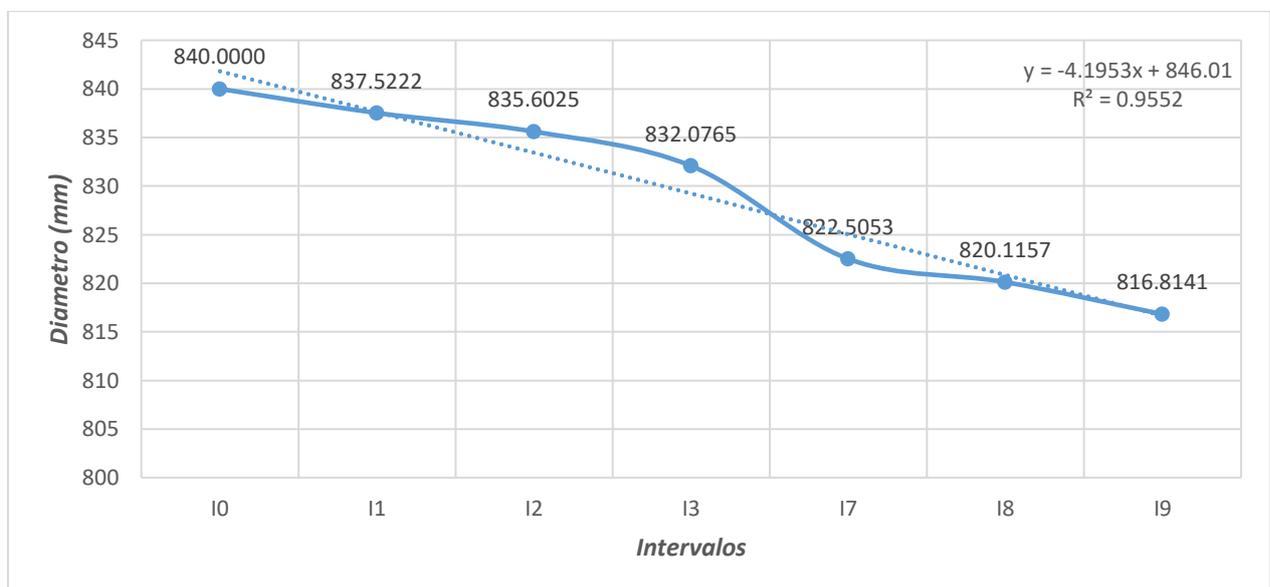
Tipo R = 2.5247 mm/75 mil km

Desgaste promedio por recorrido.

En los primeros 75,000 kilómetros =	2.4644 mm/75 mil km
Entre los 75,000 - 150,000 km =	2.5604 mm/75 mil km
Entre los 150,000 - 225,000 km =	3.9868 mm/75 mil km
Entre los 525,000 – 600,000 km =	3.2691 mm/75 mil km
Entre los 600,000 – 675,000 km =	3.4788 mm/75 mil km

El diámetro promedio por recorrido se encuentra representado en la figura 37, cuyo índice de correlación de es de 0.9773. La ecuación de correlación expresa en sí, la velocidad de desgaste de la rueda.

Figura 37: Diámetro promedio de la rueda, por recorrido



Fuente: Elaboración Propia

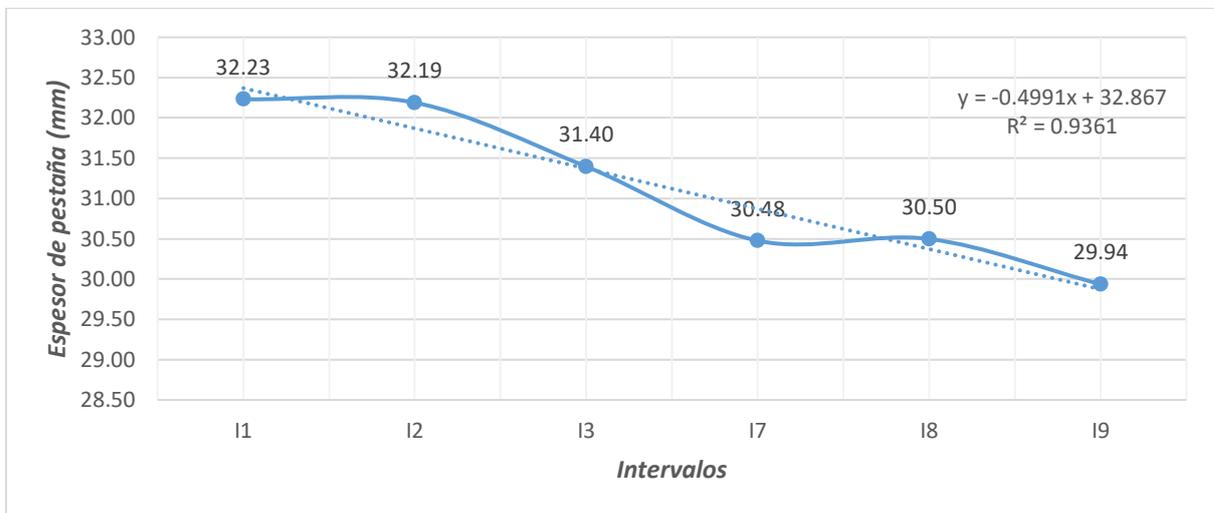
$$Y = - 4.1953 X + 846.01;$$

Donde “Y” es el diámetro promedio de la rueda en el instante “X”

“X” se expresa en intervalos de 75,000 kilómetros cada uno.

El espesor de la pestaña promedio por recorrido se encuentra representado en la gráfica 38, y en esta se representa una relación lineal con el recorrido, cuyo índice de correlación de 0.9675. La ecuación de correlación expresa en sí, la velocidad de desgaste del espesor de la pestaña.

Figura 38: Espesor de la pestaña promedio, por recorrido



Fuente: Elaboración Propia

$$Y = - 0.4991 X + 32.687;$$

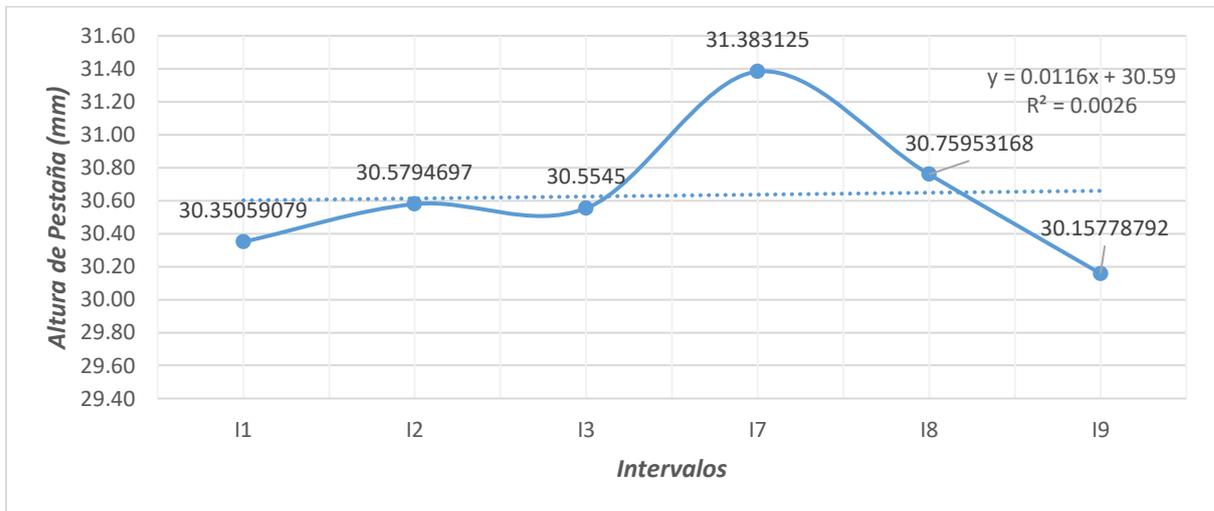
Donde “Y” es el espesor de la pestaña promedio en el instante “X”

“X” se expresa en intervalos de 75,000 kilómetros cada uno.

El índice de correlación R es igual a 0.9675

La altura de la pestaña promedio por recorrido se encuentra representado en la gráfica 39, y en esta no se representa una relación lineal con el recorrido, siendo el índice de correlación de 0.0509.

Figura 39: Altura promedio de la pestaña, por recorrido



Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente tabla se resumen los coeficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de rueda:

Tabla 5

Coefficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de rueda.

Parámetro	Coefficiente de Correlación (R)
Diámetro	0.9773
Altura de Pestaña (Sh)	0.0509
Espesor de Pestaña (Sd)	0.9675

Fuente: Elaboración propia.

Resultados relacionados a los discos

Se tomaron datos de los discos de freno para los diversos bogíes para cada intervalo de tiempo, hayan pasado o no a ser rectificadas al torno. Los resultados se muestran por tipo de bogíes y por recorrido, y en todos los casos se cumple la condición de: Espesor = desgaste + vida útil

Los valores de desgaste, en promedio, es de 0.96 mm por cada 50 mil kilómetros, Tal como se muestra en la tabla 06

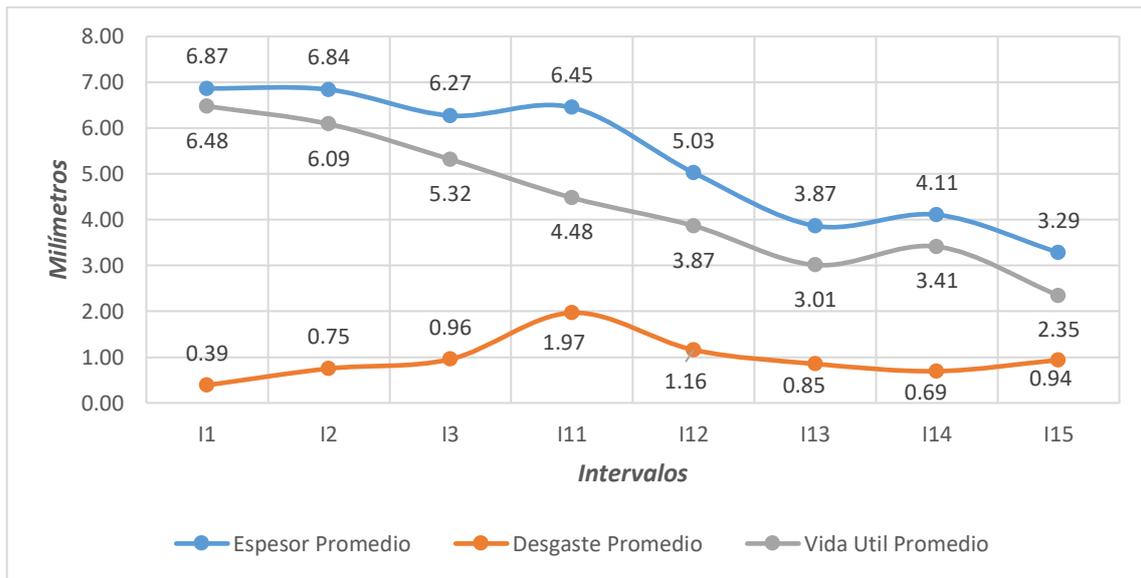
Tabla 6
Diámetro, desgaste y vida útil promedio de los frenos, por recorrido

<i>Tipo de Kilometraje</i>	<i>Promedio de ESPESOR</i>	<i>Promedio de DESGASTE</i>	<i>Promedio de VIDA UTIL</i>
<i>I1</i>	<i>6.87</i>	<i>0.39</i>	<i>6.48</i>
<i>I2</i>	<i>6.84</i>	<i>0.75</i>	<i>6.09</i>
<i>I3</i>	<i>6.27</i>	<i>0.96</i>	<i>5.32</i>
<i>II1</i>	<i>6.45</i>	<i>1.97</i>	<i>4.48</i>
<i>II2</i>	<i>5.03</i>	<i>1.16</i>	<i>3.87</i>
<i>II3</i>	<i>3.87</i>	<i>0.85</i>	<i>3.01</i>
<i>II4</i>	<i>4.11</i>	<i>0.69</i>	<i>3.41</i>
<i>II5</i>	<i>3.29</i>	<i>0.94</i>	<i>2.35</i>

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la gráfica 40, que el desgaste durante los primeros kilómetros es alrededor 0.39 mm; y luego este llega a un pico 1.97 mm, para luego, en sus últimos días, llegar a 0.94 mm.

Figura 40: Espesor, desgaste y vida útil de frenos por recorrido



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7

Velocidad de desgaste promedio para los discos de freno, por tipo de bogies

Tipo de Bogie	Desgaste
Bogies tipo MA	0.91
Bogies tipo MB	0.88
Bogies tipo R	0.95

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se resumen los coeficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de discos de freno:

Tabla 8

Coefficientes de correlación de Pearson identificados para los parámetros de discos de freno.

Parámetro	Coefficiente de Correlación (R)
Espesor	0.9536
Desgaste por concavidad	0.1533

Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Ha sido y es motivo de interés predecir el deterioro temprano de equipos y partes para proyectar los costos de reposición y los inventarios necesarios. Para ello, estos equipos y partes deben tener una característica medible de su deterioro, como, por ejemplo: Los forros de las chancadoras (Caballero, 2017); desgaste interno del motor (Medina, 2016); desgaste de ruedas motrices (Velásquez (2014), Quilca (2015), desgaste de rieles (Quintana & Preciado, 2016); desgaste de cortadoras de una tuneladora (Laín et ál, 2018); o la calidad del aceite de los motores (Coello & Guerrero, 2016).

En algunos casos las medidas de interés son de difícil acceso, por ello se busca una variable a la que esté correlacionada y que esta a su vez sea de fácil acceso, como es el caso: velocidad del eje angular, en el trabajo de Caballero (2017); cierto agentes contaminantes como el trabajo de Medina (2016); perfil de la rueda, el peralte y tipo de riel para la investigación de Velásquez (2014); la carga soportada (Quintana & Preciado, 2016); o finalmente en el kilometraje como es el caso de (Coello & Guerrero, 2016), y de este trabajo.

El trabajo se centra en investigar primero si existe relación entre el kilometraje recorrido y las variables de desgaste de frenos y ruedas, y segundo, estimar, si es posible, la velocidad de desgaste, para con ello, predecir la demanda de repuestos y maquinados. El trabajo, a nivel nacional, tiene la limitación de ser la única en su especie, toda vez que los equipos en estudio fueron puestos operativos en el mes de julio del 2011 en su primera fase, y en mayo del 2014 en su segunda fase.

En los resultados obtenidos, se identifica una diferencia entre las velocidades de desgaste de los trenes de transmisión y de remolque, también se identifica diferencias entre los intervalos de tiempo, que deben ser objeto de otras investigaciones.

CONCLUSIONES

A través de la recopilación y análisis de correlación lineal de los datos, se logró identificar que existe una fuerte relación lineal entre el desgaste de los diámetros de las ruedas y la distancia recorrida por el tren. Esta relación se muestra a través de un coeficiente de Pearson de 0.9773, considerado como una relación fuerte. Este resultado, nos permiten concluir que la velocidad media de desgaste es de 3.1519 mm / por cada 75,000 kilómetros. Asimismo, esta alta relación se explica con la ecuación lineal $Y = - 4.1935 X + 846.01$. Donde “Y” es el diámetro (mm) promedio de la rueda en el instante “X”, este último “X” se expresa en intervalos de 75,000 kilómetros cada uno.

En este estudio, se observa que los bogíes de tracción tipo MA tienen una velocidad de desgaste de 3.6368 mm, y los de tracción tipo MB tienen una velocidad de 2.8995 mm; mientras los de tipo remolque R, tienen una menor velocidad de desgaste de 2.5247 mm. Por otro lado se encuentra que el desgaste no es parejo a lo largo de la vida útil de la rueda, por ejemplo este, en los primeros 75,000 kilómetros es de 2.4644 mm/75 mil km; y entre los 75,000 – 150,000 km, es de 2.5604 mm/75 mil km; entre los 150,000 – 225,000 km, es de 3.9868 mm/75 mil km; entre los 225,000 – 300,000 km, es de 3.2961 mm/75 mil km; y finalmente entre los 300,000 – 375,000 km, es de 3.4785 mm/75 mil km.

En relación con el espesor de la pestaña, se logró identificar que existe una fuerte relación lineal con la distancia recorrida, que se muestra a través de un coeficiente de Pearson de 0.9675, considerado como una relación fuerte. Asimismo, esta alta relación se explica con la ecuación lineal $Y = - 0.4991 X + 32.867$. Donde “Y” es el espesor (mm) promedio de la pestaña de la rueda en el instante “X”, este último “X” se expresa en intervalos de 75,000 kilómetros cada uno. Sin embargo, la altura de la pestaña promedio por recorrido no se representa a través de una relación lineal con el recorrido, siendo el índice de correlación de 0.0509.

El valor de desgaste promedio de los discos de freno es de 0.96 mm por cada 50 mil kilómetros; asimismo este valor varía a lo largo del ciclo vida; por ejemplo, en los primeros kilómetros, la velocidad de desgaste es de 0.39 mm; luego este llega a un pico 1.97 mm, para luego, en sus últimos días, llegar a 0.94 mm por cada 50,000 kilómetros. Por otro lado, se puede observar que los bogíes de tracción tipo MA y MB, cuyas velocidades de desgaste es de 0.91 y 0.88 mm, resultan ser menor que la velocidad de desgaste de los discos de freno de los bogíes de remolque tipo R, igual a 0.95 mm.

Al culminar el trabajo de investigación, se observa que los bogíes de transmisión tipo MA, presenta un deterioro mayor al 20.27% mayor que los bogíes de transmisión tipo MB, y un 38.00% por ciento mayor que los bogíes tipo remolque. Condición que amerita considerar dentro de los planes de reemplazo de partes. En razón a los discos de freno, los bogíes tipo remolque son los que muestran mayor velocidad de desgaste, superando en 4.21% a los bogíes tipo MA, y en 7.36% más que los bogíes tipo R.

RECOMENDACIONES

Al evidenciarse niveles de desgaste desigual entre los coches Ma, R y Mb, este último que posee pantógrafo, se sugiere realizar investigaciones respecto al desgaste del pantógrafo y el desgaste de ruedas y discos de freno, por evidenciarse que existen ciertas variantes entre ellos detectadas en el taller de mantenimiento.

Con base a los resultados obtenidos, se sugiere ampliar la investigación respecto al desgaste de discos de freno relacionado con el rozamiento de las pastillas de freno ya que existe evidencia de niveles de desgaste desigual entre los coches del tipo tracción y tipo remolque.

Se sugiere realizar estudios relacionados a la disciplina mecánica, para medir la influencia del desgaste entre: el perfil del riel, el perfil de la rueda y la velocidad de rodadura. Cabe señalar que en el Perú no existe un laboratorio apropiado para ello, siendo Brasil uno de los países en la región el lugar donde se podrían realizar estos experimentos.

Con las tasas de desgaste determinadas para cada tipo de coche, se estima alcanzar los 70 mm de desgaste en el caso de los coches tipo Ma a los 1'443,577 kilómetros recorridos, en el caso de los coches tipo Mb a los 1'810,657 kilómetros recorridos y para los coches tipo R a los 2'328,469 kilómetros recorridos. Teniendo en cuenta estos kilometrajes, se recomienda incluir el cambio de ruedas para los coches del tipo Ma y Mb durante la ejecución del segundo mantenimiento del tipo IM2 y asegurar el abastecimiento oportuno de los componentes para ese momento. Respecto al cambio de ruedas en los coches R, estos sucederán dentro del mantenimiento OH3.

Respecto a los discos de freno, teniendo en cuenta las tasas de desgaste para los coches del tipo Ma, Mb y R; el reperfilado debe realizarse cada 105,000 kilómetros recorridos. Este valor, demuestra que las frecuencias de desgaste del material rodante tienen ritmo propio y no necesariamente coinciden con las frecuencias de medición señaladas por el fabricante. En mayor detalle al observarse tasas de desgaste distintas para diámetro de ruedas y discos de freno entre los coches tipo tracción y remolque, se sugiere realizar un análisis más detallado para determinar las posibles causas de este comportamiento.

Se recomienda sustituir el uso del vernier y reloj comparador para la medición del desgaste de discos de freno por la versión de la herramienta Miniprof para frenos, esto facilitará la emisión digital de los registros de medición en formato texto evitando así, incoherencias y falta de legibilidad al momento del llenar las cartillas de medición que actualmente se realiza de forma manual.

REFERENCIAS

- Albarracín, P. (s.f.) Seminario Tribología y Lubricación. Dictado a: Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA, Medellín – Colombia
- Antonio Armas, L. R. (2016). Gestión de mantenimiento para mejorar la disponibilidad mecánica de la maquinaria de confitados en Industrias Alimentarias S.R.L.
- Arques Patón, J. L. (2009) Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario. España. Ediciones Diaz de Santos.
- Ballester, S., Olmeda, P., Macián, V., Tormos, B. (2002) El mantenimiento de las flotas de transporte. En Revista Técnica Industrial, 247
- Caballero Alania, A. J. (2017). Relación entre desgaste de mantos y parámetros críticos de funcionamiento del chancador primario tipo NT de la Minera Chinalco Perú.
- Cano, C. (2017) La Administración y el Proceso Administrativo. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
- Coello Salcedo, M. y Guerrero Palacios, T. (2016). Determinación de la degradación y contaminación del aceite de motores Otto en función del kilometraje recorrido.
- Cuervo Velásquez, P. A. (2014) Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda riel en el Metro de Medellín
- De la Puente Viedma, C. (2018) Estadística descriptiva e inferencial. (1ª. Ed.). Madrid. Editorial IDT
- Díaz del Castillo, F. (2007) Laboratorio de Tecnología de Materiales: Tribología: Fricción, Desgaste y Lubricación, de La Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.
- Duffuaa, S., Raouf, A., Dixon, J. (2000). Sistemas de mantenimiento planeación y control (1ª. Ed.). México D.F: Editorial Limusa
- Guevara, R. y Osorio, P. (2014). Desarrollar un Plan de Mantenimiento Preventivo para una Empresa Prestadora de Servicio de Transporte Interdepartamentales. Proyecto de Grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla
- Lavalle, Andrea Lina, Micheli, Elda Beatriz, & Rubio, Natalia. (2006). Análisis didáctico de regresión y correlación para la enseñanza media. Revista latinoamericana de investigación en matemática educativa, 9(3), 383-406. Recuperado en 14 de julio de 2019, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-24362006000300004&lng=es&tlng=en.

- Lind, D., Marchal, W., & Wathen, S. (2015). Estadística aplicada a los negocios y a la economía (16a. ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- García León, R. A., Acosta Pérez, M. A., & Flórez Solano, E. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Revista Tecnura*, 19(45), 53-63. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a04
- Gordo, J. 2018. Importancia de un plan de mantenimiento estratégico en la gestión de activos. Recuperado de: <https://blogspanol.se.com/gestion-de-la-infraestructura/2018/01/08/importancia-plan-mantenimiento-estrategico-la-gestion-activos/>
- Hernández Ávila, F. (2018) Efecto de la temperatura sobre las propiedades mecánicas y estructurales de elastómeros comerciales: Estimación de la degradación del polímero a largo plazo.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación: Roberto Hernández Sampieri, Carlos Fernández Collado y Pilar Baptista Lucio (5ª. Ed.). México D.F: McGraw-Hill.
- Jauja Ramírez, M. A. (2017) Estudio experimental de la resistencia al desgaste abrasivo para depósitos con recubrimiento protector de soldadura, empleando el electrodo: E6-UM-60 (Clasificación DIN 8555), proceso SMAW.
- Laín, C., Llamas, B., Pous, J., Laín, R. (2018). Nueva metodología empírica para la estimación del desgaste de los cortadores de una tuneladora. *Informes de la Construcción*, 70(549): e242. <https://doi.org/10.3989/id.57716>.
- Medina Medina, J. H. (2016) Análisis y monitoreo del aceite lubricante en la anticipación de fallas de maquinaria pesada, como herramienta de mantenimiento proactivo.
- Miranda, F. (2015) Estudio y Análisis Mecánico de un Freno Ferroviario. Proyecto de Fin de Carrera en Ingeniería Técnica Industrial de la Universidad Carlos III de Madrid.
- MTC trasladó a más de medio millón de pasajeros en un día en la Línea 1 del Metro de Lima (13 de abril 2019). Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/27509-mtc-traslado-a-mas-de-medio-millon-de-pasajeros-en-un-dia-en-la-linea-1-del-metro-de-lima>
- Quilca Tito, E. J. (2015). Relación De Las Deformaciones De Las Juntas Del Piso De Concreto Con El Desgaste Prematuro De Ruedas Motrices De Apiladores De Carga En Almacén SODIMAC Lima Perú 2015.

- Quintana-Nicolás, A., Preciado-Calzada, M. (2016) “Estudio del desgaste de carriles en servicio y optimización de su mantenimiento”. Rev. Metal. 52(4): e080. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.080>
- Siddharth Kalla (2011). Estudio correlacional. Jun 30, 2019 Obtenido de Explorable.com: <https://explorable.com/es/estudio-correlacional>
- Tuesta Yliquin, J. M. (2014). Plan de mantenimiento para mejorar la disponibilidad de los equipos pesados de la Empresa Obrainsa.
- Walpole, R., Myers, R., Myers, S. & Ye, K. (2012) Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. (9ª. Ed.). México: Pearson.