UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

PROPUESTA DE MODELO DE DESGASTE EN FRENO DE SERVICIO PARA CAMIÓN DE ALTO TONELAJE.

DIEGO IGNACIO OÑATE RODRÍGUEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: INGENIERO LUIS GUZMÁN BONET
PROFESOR CORREFERENTE: INGENIERO MAURICIO EDWARDS ACKROYD

SEPTIEMBRE 2018

Resumen

En la presente memoria de título, se detalla un proyecto para la dirección de tecnología de una gran empresa de mantenimiento y equipos mineros, parte del holding que se encuentra en Chile, Latinoamérica y a gran escala a nivel internacional.

La empresa en cuestión es uno de los grandes proveedores de equipos, repuestos y servicios para minería en nuestro país, con una participación en el 83% del mercado. En su interés permanente de optimizar sus procesos de eficiencia productiva, busca realizar mantenimiento en sus equipos en base a la condición de sus componentes.

En base a las necesidades, se postula este proyecto que tiene como principal objetivo desarrollar una **propuesta de modelo de desgaste**, en base a condición para el freno de servicio de disco húmedo de los camiones de alto tonelaje.

Se escoge una faena minera en específico para realizar el proyecto de mantenimiento predictivo para este componente, ya que para la empresa es la faena minera con las situaciones más críticas. Incluye unas condiciones climáticas extremas, malas prácticas operacionales y un bajo porcentaje de cumplimiento del TBO para el componente.

Para la realización de este modelo, se necesita data a gran escala. Esto insumo se obtiene a través de software asociados a los camiones que se almacenan en una plataforma. A su vez, la data es producto de comportamientos en el camión, asociados a sensores con señales eléctricas, por ejemplo, activación del freno, sobrecarga, aceleración-desaceleración, elevación de temperatura, daños no reportados de algún componente.

Para este desarrollo, la metodología seleccionada contemplará una serie de pasos acumulativos. En primera instancia, se deben identificar los activos y parámetros. En este caso, en el componente seleccionado se deberá determinar el modo de falla; y, para esto serán necesarios los conocimientos de la teoría de falla respectiva. Luego, en segunda instancia, se deberá elegir la tecnología predictiva, es decir, cómo se debe comportar el modelo para tomar alguna decisión respecto a la data y establecer las reglas. Conforme a ello, luego se creará la base de datos y los parámetros a inspeccionar, y finalmente establecer los indicadores de gestión (KPI).

Como objetivo secundario, se realizará un informe de control operacional para analizar el comportamiento de los operarios al activar el freno de servicio.

Abstract

At this research report, a maintenance project is detailed for technology management in a big mining and maintenance company, who makes part from the holding companies located in Chile, Latin-America and in big scale internationally.

The company who keeps his name hidden for confidentiality politics, is one of the biggest equipment, spares and services suppliers for our country mining, with an 83% of participation in the market. At their constantly interest in optimizing the production efficiency processes is looking for equipment maintenance based in the components conditions.

Based in the needs, this project applies with the main objective in developing a proposed wear model, based in the 930E trucks wet disc service brake conditions for the mining company.

This mining chore is chosen specifically for the predictive maintenance project for this component because it's the mining chore with the most critical situations. It includes extreme weather conditions, bad operational practices and a low TBO compliance percentage for the component.

For this model development, a big scale data is needed. This input is obtained through the software associated with trucks that are stored in a platform. By the way, data is the output from the truck behaviors, associated to electrical signals sensors, e.g. brake activation, overload, acceleration and deceleration, wrong operational practices, temperature rising and non-reported damages in some component.

For this development the chosen methodology gaze at serial cumulative steps. Firstly the assets and parameters needs being identified. At this case, the selected component must determinate the fail mode, for this, the respective failure mechanical theory knowledge is needed. Then, at second instance, the predictive technology must be chosen, it means how the model behaviour must be for taking some decision about the data and define the rules. According to, the database and the parameters to inspect are created and finally establish the key performance indicators (KPI).

As secondary objective, a second operational control report is applied to analyse the operatives' behaviours when the service brake is activated.

Tabla de contenidos

RESUMEN ..... **II**

ABSTRACT ..... **III**

LISTA DE FIGURAS ..... **VI**

LISTA DE GRÁFICOS ..... **IX**

INTRODUCCIÓN ..... **XI**

OBJETIVOS ..... **XIII**

OBJETIVOS GENERALES: XIII

1. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO **1**

1.1 COMPONENTES Y ESPECIFICACIONES CAMIÓN 930E. 1
1.1.1 Retardo dinámico. *1*
1.1.2 Sistema de frenos. *2*
1.1.3 Ruedas motorizadas con tracción por inducción AC. *2*
1.2 FRENOS AXIALES DE FRICCIÓN DE CONTACTO. 5
1.3 CIRCUITO DE FRENOS DE SERVICIO. 6
1.4 OPERACIÓN DEL CONJUNTO DE FRENO DE SERVICIO. 8
1.5 INSPECCIÓN DE DESGASTE DEL DISCO DE FRENO. 10
1.6 CONSIDERACIONES SOBRE ENERGÍA. 12
1.7 AUMENTO DE TEMPERATURA. 12
1.8 MATERIALES DE FRICCIÓN. 13
1.9 CONFIABILIDAD Y DIAGRAMA DE BLOQUE (RBD) 13
1.9.1 Diagrama de bloques de confiabilidad (RBD). *17*
1.10 MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM). 17
1.11 DISTRIBUCIÓN NORMAL E INTERVALOS DE CONFIANZA. 18
1.11.1 Intervalos de confianza. *19*
1.12 CURVA PF. 20
1.13 ANÁLISIS PREDICTIVO 22
1.13.1 Modelos Predictivos. *22*
1.13.2 Aplicaciones relacionadas. *23*
1.14 PARÁMETROS DE MEDICIÓN. 26
1.14.1 KOMTRAX. *26*
1.14.2 MineCare de Modular Mining System. *29*
1.15 NORMATIVAS ASOCIADAS: ISO /WD 17359 30
1.16 SÍNTESIS DE MARCO TEÓRICO. 32

2. CAPÍTULO II: METODOLOGÍA **34**

2.1 INFORME DE CONTROL OPERACIONAL. 36
2.2 PROPUESTA DE MODELO PREDICTIVO PARA EL DESGASTE DEL DISCO DE FRENO DE SERVICIO. 42
2.2.1 Análisis de temperaturas. *46*

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS **48**

3.1 RESULTADOS INFORME DE CONTROL OPERACIONAL. 48
3.2 RESULTADOS PROPUESTA DE MODELO PREDICTIVO PARA EL FRENO DE SERVICIO. 53
3.2.1 Resultado de análisis de temperaturas. *55*

3.2.2 Propuesta final modelo predictivo de desgaste. 58
3.3 RESULTADOS ADICIONALES. 59

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61

OBJETIVOS GENERALES: 61
4.1 RECOMENDACIONES PROPUESTAS EN EL INFORME DE CONTROL OPERACIONAL. 62
4.2 RECOMENDACIONES PROPUESTA DE MODELO PREDICTIVO FRENO DE SERVICIO. 63
4.3 CONCLUSIONES ADICIONALES. 66
4.4 RECOMENDACIONES GENERALES A LA EMPRESA. 66

5. TRABAJOS CITADOS 68

6. ANEXOS 69

Lista de figuras

Figura 1-1: Dimensiones y cotas de camión 930E-4. 3
Figura 1-2: *Componentes principales del camión 930E-4.* 4
Figura 1-3: Vista en sección transversal de un freno de un solo plato, donde A es el elemento impulsor, B el elemento impulsado (sujedado con una cuña al eje) y C el actuador. 5
Figura 1-4: Elemento de disco de fricción..... 6
Figura 1-5: *Conjunto de freno de disco húmedo.* 8
Figura 1-6: *Conjunto de freno de disco húmedo. Se aprecia además la suspensión y el conjunto de la maza.* 9
Figura 1-7: *Conjunto de freno de disco húmedo, líneas de refrigeración de frenos y suministro de aceite.* 10
Figura 1-8: *Herramienta indicadora de desgaste para freno de servicio (EF9302).* 11
Figura 1-9: *Evaluación del desgaste de disco de freno delantero para camión 930E. Se aprecian espesores mínimos que pueden mantener los discos antes de su cambio.* 11
Figura 1-10: Composición de disco de freno de servicio. 13
Figura 1-11: Representación de un sistema en serie..... 15
Figura 1-12: Representación de un sistema en paralelo. 16
Figura 1-13: Representación de una configuracion “k-out-of-n”. 16
Figura 1-14: Ejemplo de diagrama de bloques RBD..... 17
Figura 1-15: Curva normal estandar para distribución normal..... 18
Figura 1-16: Modelo clásico CBM o curva PF. Desde el punto incial “P” hasta la falla “F”. 20
Figura 1-17: Bosquejo general del funcionamiento de un modelo predictivo. Fuente: Predictive Anaytics – The power to predict who will click, buy lie or die. 23
Figura 1-18: Modelo informático multi-objetivo desarrollado utilizando métodos de inteligencia artificial para completar análisis predictivo de los sistemas de frenado de camiones de transporte. Dr. Ali Soofastaei. 24
Figura 1-19: Mejora de disponibilidad de camiones de acarreo utilizando el modelo desarrollado. (Soofastaei, Aminossadati, Arefi, & Kizil, 2016). 25
Figura 1-20: *Tabla de parámetros asociados a códigos de falla para camión Komatsu 930E.* ... 27

Figura 1-21: *Tendencias al alza en la temperatura del aceite en freno de servicio, en el gráfico superior se aprecia una tendencia al alza del promedio de las temperaturas, mientras que en el gráfico inferior peaks de valores máximos de esta temperatura.* 28
Figura 1-22: *Tabla que relaciona los valores de presión y velocidad, mientras mayor es este valor, mayor será el daño provocado en los frenos.* 29
Figura 1-23: *Diagrama de flujo para un programa de monitoreo por condición.* Traducido desde norma ISO 17359 pag 3. 31
Figura 2-1: Esquema sobre la metodología a utilizar. 34
Figura 2-2: *Archivo CSV leído en Excel proveniente de manera cruda desde MineCare por Modular Mining System.* 38
Figura 2-3: *Archivo CSV reestructurado.* 38
Figura 2-4: *Archivo CSV proveniente de PLM. A través de este archivo se puede hacer la geo referenciación de las activaciones de freno de servicio.* 40
Figura 2-5: *Imagen a escala de la faena minera, donde serán geo referenciado los datos de activaciones de freno de servicio para un futuro informe de control operacional.* 40
Figura 2-6: *Mapa conceptual del Algoritmo ocupado para la construcción de los gráficos incluidos en el informe del control operacional.* 41
Figura 2-7: *Esquema de la vida útil del componente. Para el modelo es necesario tener SMR inicial y TBO.* 44
Figura 2-8: *Datos solicitados por el algoritmo para evaluar el desgaste del freno de servicio.* .. 45
Figura 3-1: *Tabla adjunta en informe de control operacional para la faena minera. Misma ventana temporal que los gráficos anteriores.* 52
Figura 6-1: Calculo de fricción en frenos. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Embragues, frenos, coples y volantes.* 69
Figura 6-2: Área del material de fricción según potencia de frenado dada. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. embragues, frenos, coples y volantes.* 69
Figura 6-3: Caracteristicas del material de fricción para frenos. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. embragues, frenos, coples y volantes.* 70
Figura 6-4: Histograma de la distribución de fallas de freno de servicio según el TBO alcanzado para los ultimos 4 años. 71

Figura 6-5: Histograma de la distribución de fallas de freno de servicio según el TBO alcanzado para los ultimos 4 años. Se separan en imprevistos y cambio programado..... 71
Figura 6-6: Histograma de fallas de freno de servicio separadas por año..... 72
Figura 6-7: Formato en Excel de la data obtenida en KOMTRAX antes de ser procesada por el algoritmo..... 72

Lista de gráficos

Gráfico 2-1: *Gráfico de la tendencia operacional y nominal para el modelo predictivo de desgaste. Las líneas en azul denotan las desviaciones estándar.* 45
Gráfico 2-2: *CA94, CA75 y CA70 antes de fallar para faena minera. Se aprecia tendencia al alza.* 46
Gráfico 2-3: *CA119 y CA80 en ventana temporal aleatoria en faena minera. No se aprecia tendencia aparente.* 46
Gráfico 2-4: *CA100, CA102, CA55 y CA93 antes de fallar en faena minera. Para el caso del camión CA55 y CA100 se aprecia un alza considerable antes de la falla. Se realiza una normalización entre [0,1] para hacer más visible los resultados.* 47
Gráfico 3-1: *Severidad de aplicación de freno de servicio, separado por umbrales. Cada color se atribuye a un umbral según la leyenda presente en el lado superior derecho. En este caso se tomó el mes de diciembre para todos los camiones disponibles.* 49
Gráfico 3-2: *Velocidad del camión al momento de activar el freno de servicio, se separa en 3 umbrales y se ocupa la misma ventana temporal que en el gráfico 1.* 50
Gráfico 3-3: *Promedio de la velocidad del camión por zona. Se consideran las zonas con mayor frecuencia de activación. La ventana temporal es la misma que en los gráficos anteriores.* 50
Gráfico 3-4: *Angulo de inclinación al momento de activar el freno de servicio. Geo referenciado en la faena para la misma ventana temporal que los gráficos anteriores.* 51
Gráfico 3-5: *Severidad por zona. Se calcula el promedio de la zona en razón al valor de 1516.81 [kW] (Criterio experto). Los datos son considerados en la misma ventana temporal que los gráficos anteriores.* 52
Gráfico 3-6: *Gráfico del comportamiento del camión 97, se aprecia la tendencia operacional y la tendencia nominal.* 53
Gráfico 3-7: *Camiones CA55 y CA110 con TBO programado de 14.000 horas para la faena minera. Se aprecia que ambos camiones tenían una alta probabilidad de fallar en corto plazo,* 54
Gráfico 3-8: *Camiones CA63 y CA101 con TBO programado en 14.000 horas para la faena minera especifica. Ambos camiones están muy por debajo de las curvas operacionales, su TBO podría haber sido mucho mayor.* 55

Gráfico 3-9: *Gráfico del comportamiento de las temperaturas del camión 100. En azul la temperatura RF, mientras que en rojo la temperatura LF.* 56
Gráfico 3-10: *Gráfico del comportamiento de las temperaturas del camión 100 en la faena. Arriba se aprecia la rueda superior izquierda, abajo la superior derecha.* 57
Gráfico 3-11: Propuesta final de visibilidad de modelo predictivo para freno de servicio. 59
Gráfico 3-12: *Histograma de distribución de carga para camiones de alto tonelaje en la faena minera. La línea azul horizontal (290 Ton) representa la carga máxima que debería tener el camión según fabrica.* 60
Gráfico 3-13: *Histograma de distribución de carga para camiones para camión CA123 en la faena minera por ciclo de carguío.* 60
Gráfico 4-1: *A la izquierda el gráfico del comportamiento del camión 97 al tener un TBO de 5000 horas y a la derecha el gráfico del comportamiento del camión 97 al mejorar su comportamiento operacional. El cuadro rojo señala las horas componentes ganadas.* 63
Gráfico 4-2: *CA101 con TBO programado en 14.000 horas para la faena minera. El rectángulo en rojo marca la diferencia de TBO que se pierde por programar el cambio de componente.* 64
Gráfico 4-3: *Tendencias de temperaturas para el camión CA85. El cuadro rojo representa el cambio de comportamiento atribuible a falla operacional. Se aprecia que la temperatura del aceite en RF es mayor a LF.* 65
Gráfico 4-4: Camiones con falta o vacios temporales en su Data. 67

Introducción

Hasta noviembre del año 2017, Chile es el primer productor mundial de cobre, con el 27%, así como también de yodo, renio, los segundos en el caso del litio y el sexto en la plata. Estas cualidades convierten al país en una real potencia internacional a nivel minero y en uno de los destinos favoritos para la inversión y exploración.

Existe un sólido aporte de la minería al desarrollo económico del país, por ejemplo, del total de exportaciones del año 2017, el 55% fueron mineras, mientras que los ingresos fiscales de esta actividad en promedio entre 2012 y 2016, alcanzó los US$ 4.601 millones, lo que equivale a un 8,4% del total de ingresos del país. (Ministerio de Mineria , 2017)

El grupo de empresas donde se realiza este trabajo es un *holding* compuesto por 5 empresas que operan en Chile[1], consolidándose como uno de los principales proveedores de equipos, repuestos y servicios para pequeñas, medianas y grandes mineras chilenas. Su participación en el mercado minero llegó en el año 2016, al 83% en unidades. Además, es la compañía con mayor experiencia en contratos de servicios de mantención de maquinarias mineras.

La empresa en cuestión, en su aspiración por seguir optimizando procesos productivos y de mantención, crea una división enfocada a atender las necesidades del negocio tomando decisiones de forma informada, a través de una transformación hacia una operación "Data Driven", es decir, conformar procesos de desarrollo de algoritmos que entreguen información e inteligencia sobre el estado de componentes involucrados en el negocio.

Una de las faenas mineras donde se desempeña la compañía concentra su mayor atención, tanto por la cantidad de equipos, como por la dificultad de las condiciones de trabajo, esta faena se ubica en el norte de Chile, a 180 km de Iquique. Su explotación de cobre, otros minerales y derivados, se realiza a tajo abierto, cubriendo el proceso de extracción y tratamiento del cobre. Actualmente, es el mayor proyecto minero del país, y tiene 90 camiones mineros en operación.

El camión de fabricación japonesa, es usado actualmente para transportar material dentro de las faenas mineras. Está definido como "un gigante japonés", con un peso de 210 toneladas, 7,36 metros de altura y 15,6 metros de largo. Puede transportar 300 toneladas de carga. Tiene un motor diésel y dos motores de tracción en las ruedas traseras, y puede alcanzar velocidades mayores a los 60 km/h.

[1] Komatsu Chile (KCH), Komatsu Cummins Chile Arrienda (KCCA), Komatsu Cummins Chile Ltda (KCC), Komatsu Reman Center Chile (KRCC), Distribuidora Cummins Chile (DCC).

Debido a las dimensiones y capacidad de carga, en este gran camión es estratégica la importancia del sistema de frenado. Este sistema de frenos se compone por diversos sub – sistemas. **Primero**, el freno de estacionamiento, asociado a cuando el vehículo se detiene completamente, como una especie de *parking* en un automóvil; el **segundo**, que corresponde al sistema de retardo dinámico, y que consiste en un torque de freno producto de generación eléctrica a través de los motores de tracción en las ruedas. Éste, se aplica automáticamente si la velocidad del camión alcanza una velocidad máxima programada por software, a través de un sistema de control. El **tercero**, objetivo de esta investigación, es el freno de servicio, el que se opera con el pie en el pedal; cuenta con "retardo dinámico", aunque con un mayor umbral de presión. Es decir, si se pasa cierto umbral en el pedal opera el freno de servicio. Este freno sólo se debe aplicar cuando el retardo dinámico requiera una fuerza de frenado adicional para disminuir rápidamente la velocidad del camión o detenerlo completamente. El freno en cuestión no debiese activarse a una velocidad mayor a las 8 mph, equivalente a unos 12 kph.

La compañia monitorea remotamente el sistema completo de frenado de cada uno de los camiones en operación. Utiliza el término llamado TBO (*Time Between Overhaul*), o "tiempo entre fallas", para referirse al valor de la decisión de cuándo retirar un componente de forma planificada a lo largo de un contrato. El TBO, sirve para encontrar el mejor compromiso entre fallas de los componentes y los recursos extra necesarios presupuestados (i.e. falla antes de lo presupuestado en horas efectivas de trabajo), para retirarlos del programa. Esto, además, debe estar respaldado por información y análisis, con correlato a validaciones técnicas y económicas.

Conforme a lo anterior, en esta memoria de titulo se presenta el análisis del problema del componente freno, dentro de la cadena de valor de las operaciones. El presupuesto es que el TBO esperado del freno de servicio en la faena específica, es de 19500 horas, pero el valor real de este se encuentra muy alejado de ese número. A lo que se suma, no sólo este valor negativo, sino que un freno de servicio dañado por imprevisto implica una serie de gastos considerables para las empresas mineras en cuanto a tiempo, disponibilidad de los equipos y la pérdida de la productividad de toneladas por hora.

En esta memoria de título, por protocolo y compromisos con el mandante, existirá información adicional que se mantendrá bajo resguardo de modo cautelar cuestiones estratégicas de funcionamiento de la Compañía.

Objetivos

En este punto se detallaron los objetivos generales y secundarios de este trabajo.

Objetivos generales:

- Propuesta de un modelo de análisis de desgaste en base a la condición para el freno de servicio de disco humedo, a través de la recopilación de data obtenida por los sensores instalados en el camión minero de alto tonelaje.

Objetivos específicos:

- Realizar un estudio estadístico de fallas para freno de servicio delantero, frente a los estándares o normas asociadas.
- Determinar las causas de falla del subsistema de frenos y establecer relación con data histórica para impacto en vida remanente.
- Entregar un consolidado de información respecto a las malas prácticas operacionales relacionadas con el uso indebido de freno de servicio para la faena minera especifica.
- Proporcionar información georreferenciada de las zonas con mayor aplicación de freno de servicio fuera de estándares.
- Entregar a la empresa un modelo analítico del estado del componente a partir de la información consolidada en su base de datos.
- Generar un plan de acción para mejorar las prácticas de mantenimiento para el freno de servicio en el camión de alto tonelaje.

1. Capítulo I: Marco Teórico

Este trabajo está enfocado en gestionar mejoras tanto para el control operacional, mantención y prevención de falla anticipada del freno de servicio del camión 930E. Para comenzar a entender donde está ubicada el área donde se enfoca específicamente este trabajo, es importante conocer como es el proceso general con el que se controla la operación de este camión y como están definidos actualmente sus procesos de mantención.

En el ítem 1.1 se describirán los componentes y especificaciones del camión 930E-4 de interés en este trabajo, no se nombrarán todas las componentes del camión. Más específicamente se verán los componentes y subcomponentes del freno de servicio en el ítem 1.2. En el ítem 1.3 se mencionará la operación del conjunto de freno de servicio, para dar paso en el ítem 1.5 a la recolección de la diversidad de data disponible con que se trabajará.

1.1 Componentes y especificaciones camión 930E.

El Camión Tolva 930E-4 es un camión tolva, para uso fuera de carretera, con Mando Eléctrico AC. El peso bruto del vehículo es de 1.100.000 lbs. (498.960 kg.) El motor es un SSDA16V160 de capacidad nominal @ 2700 HP (2014 kW). Las dimensiones del camión 930E-4 alcanzan los 15,6 [m] de largo, 7,37 [m] de alto y 8,33 [m] de ancho, esto se puede apreciar en mayor detalle en la Figura 1-1, mientras que los componentes principales se pueden apreciar con mayor detalle en la Figura 1-2.

(Komatsu America Corporation, 2007)

1.1.1 Retardo dinámico.

El retardo dinámico se usa para reducir la velocidad del camión durante una operación normal o para controlar la velocidad al bajar por una pendiente. La capacidad del retardo dinámico del sistema eléctrico es controlada por el operador activando el pedal retardador (o al operar una palanca en el volante de la dirección) en la cabina del operador y ajustando el RSC (Control de Velocidad del Retardador). El Retardo Dinámico se activa automáticamente si el camión excede el ajuste de sobre velocidad preestablecido.

1.1.2 Sistema de frenos.

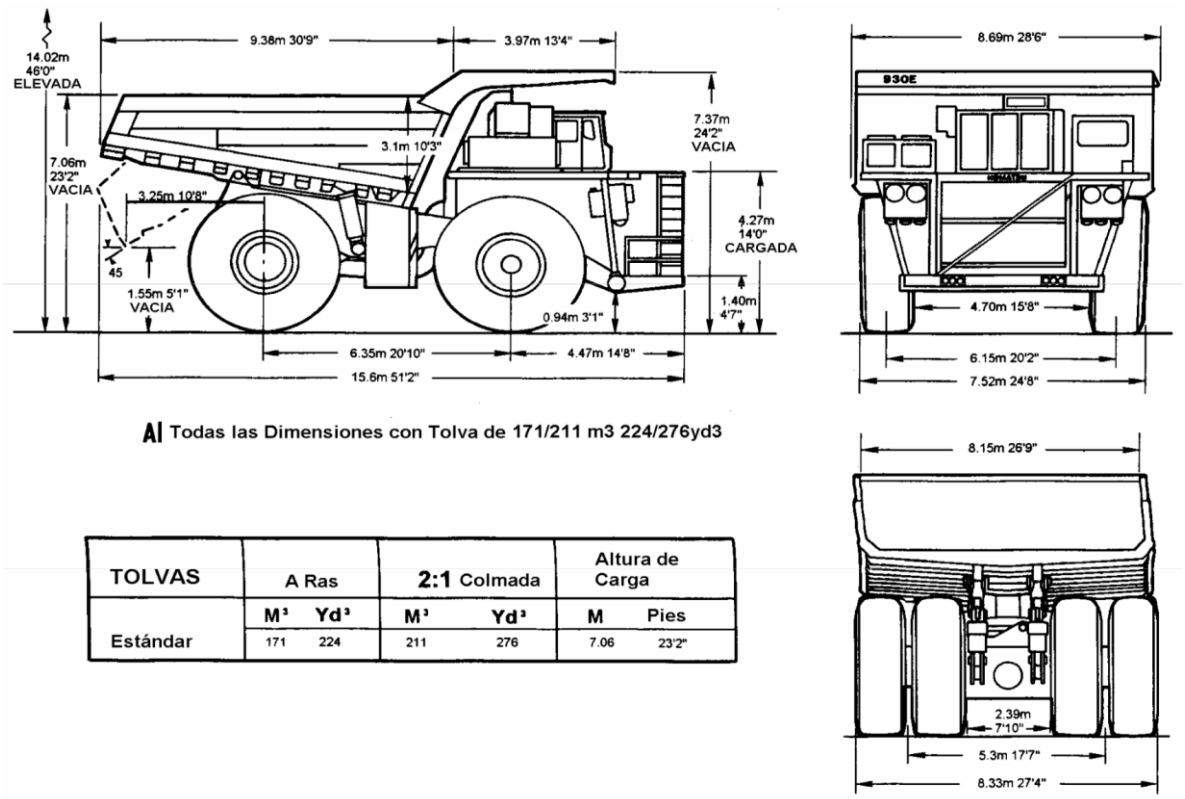
Los frenos de servicio son frenos de disco múltiples enfriados por aceite aplicados por un sistema de accionamiento completamente hidráulico. Al presionar el pedal del freno se accionan tanto los frenos delanteros como traseros, después de aplicar el retardador por primera vez. Todos los frenos de rueda se aplicarán automáticamente si la presión del sistema de frenos cae por debajo del mínimo preestablecido.

El freno de estacionamiento es del tipo disco seco, montado al interior de cada motor de rueda trasera, y se aplica por resorte y se libera hidráulicamente con protección de aplicación de velocidad de la rueda (no se aplicará con el camión en movimiento).

1.1.3 Ruedas motorizadas con tracción por inducción AC.

La salida del alternador suministra energía eléctrica a los dos motores de rueda que van en la caja del eje trasero. Las ruedas motorizadas utilizan motores de inducción AC trifásicos con energía AC de onda total.

Los dos motores de rueda convierten la energía eléctrica de vuelta a energía mecánica a través de trenes de engranaje incorporados dentro del conjunto del motor de la rueda. La dirección de los motores rueda es controlada por una palanca de control direccional ubicada en la consola central.



Al Todas las Dimensiones con Tolva de 171/211 m3 224/276yd3

TOLVAS	A Ras		2:1 Colmada		Altura de Carga	
	M³	Yd³	M³	Yd³	M	Pies
Estándar	171	224	211	276	7.06	23'2"

Figura 1-1: Dimensiones y cotas de camión 930E-4.

(Komatsu America Corporation, 2007)

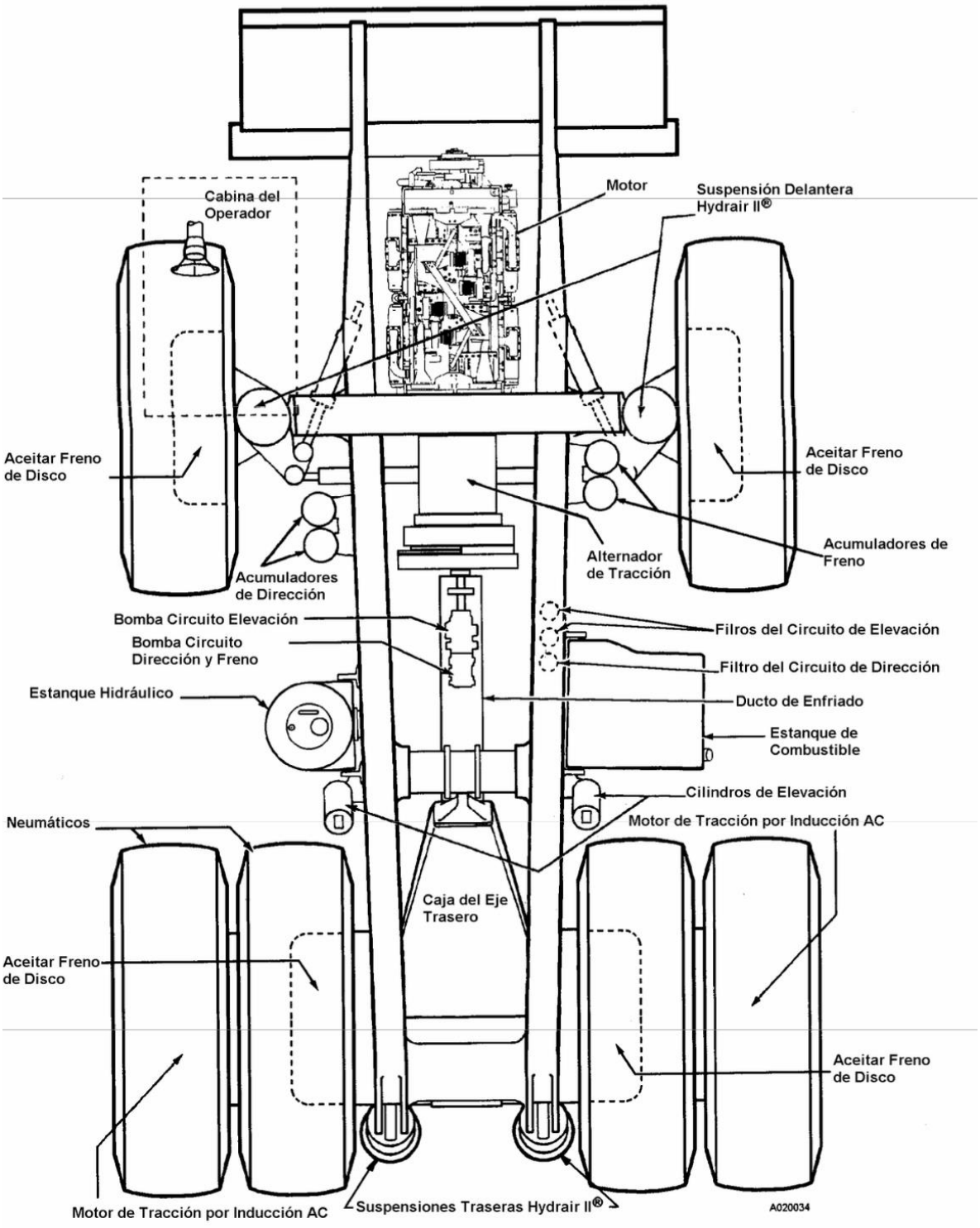


Figura 1-2: *Componentes principales del camión 930E-4.*

(Komatsu America Corporation, 2007)

1.2 Frenos axiales de fricción de contacto.

En los embragues o frenos axiales, los elementos de fricción de contacto se mueven en una dirección paralela al eje.
Un freno axial es el de disco, donde se emplean uno o más discos como elementos de operación. Una de sus ventajas es la libertad de los efectos centrífugos, un área de fricción grande que se instala en un espacio pequeño, superficies de calor más eficaces y una distribución favorable de presión. Esto se puede apreciar en mayor detalle a continuación en la Figura 1-3,

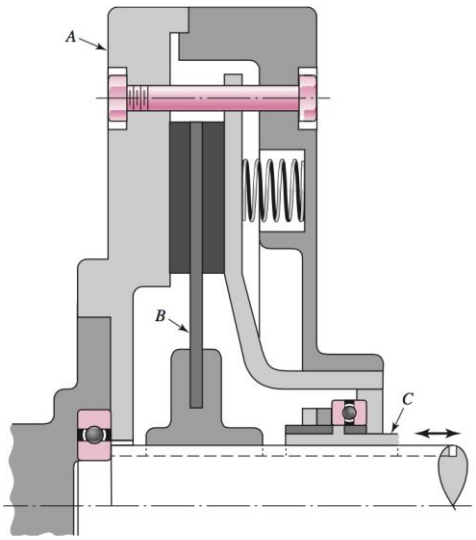


Figura 1-3: Vista en sección transversal de un freno de un solo plato, donde A es el elemento impulsor, B el elemento impulsado (sujedado con una cuña al eje) y C el actuador.

(Budynas & Nisbett, 2008)

Los frenos de aro o tambor se pueden diseñar para que sean auto energizantes, una característica importante para reducir el esfuerzo de frenado, pero esto tiene una desventaja, cuando se emplean como frenos de vehículos, un cambio ligero en el coeficiente de rozamiento causara un gran cambio en la fuerza del pedal que se necesita para frenar.

Un cambio en el coeficiente de fricción puede ser producto de cambios de temperatura o de humedad. El freno de disco no tiene auto energización y por ende no es susceptible a cambios de coeficiente de fricción.

Si, por ejemplo, se quiere describir el desgaste de un disco de fricción, como el de la Figura 1-4 a continuación:

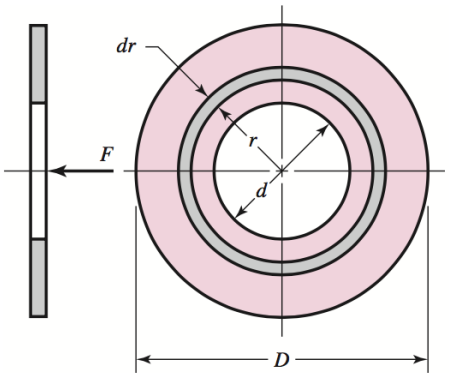


Figura 1-4: Elemento de disco de fricción.

El desgaste uniforme podria quedar modelado por,

$$w = f_1 \cdot f_2 \cdot KPVt$$

donde f_1 sería un factor de modificación dependiendo del tipo de movimiento carga y velocidad, mientras que f_2 toma en consideración las condiciones ambientales de temperatura y limpieza. K un factor de corrección según el laboratorio y secuencialmente P, V y t como presión, velocidad y tiempo.

(Budynas & Nisbett, 2008)

1.3 Circuito de frenos de servicio.

En este ítem se describirá en mayor detalle el conjunto de freno de servicio, el cuál es el principal componente en que se basara este trabajo.

El camión está equipado con un sistema de frenos de servicio del tipo de disco húmedo accionados hidráulicamente. El sistema de frenos utiliza aceite hidráulico Tipo C-4 proporcionado por la bomba de la dirección/freno, proveniente del estanque hidráulico principal para aplicación del freno. El enfriado del disco de freno durante la operación del camión es proporcionado por la bomba del circuito de elevación a través de la válvula de elevación. Hay un freno de estacionamiento de disco, ubicado en la caja del eje trasero, unido a cada motor de la rueda. La función fundamental del sistema de frenos es proporcionar al operador el control que necesita para detener el camión, tanto en forma lenta y modulada como en la distancia más corta posible.

Existen dos medios independientes para que el operador accione el freno; el pedal de freno de servicio/pedal de retardo y el interruptor de bloqueo de frenos. Además, los frenos se aplicarán en forma automática si el suministro del sistema de frenos cae por debajo de la presión predeterminada.

El circuito de frenos proporciona al operador el control preciso que necesita para modular la presión de freno para detener el camión lentamente, o desarrollar un esfuerzo de detención total para detenerlo lo más rápido posible. El corazón de este circuito es la válvula de pedal de circuito dual operada con el pie. Esta válvula permite al operador controlar la energía de presión relativamente alta que hay dentro de los acumuladores de los frenos y que es dirigida a los frenos. Hay dos válvulas en la válvula de freno dual. Una suministra presión a una válvula de relé dual para proporcionar la presión de aplicación a los frenos del eje delantero. La otra suministra presión a una válvula de relé dual para proporcionar la presión de aplicación a los frenos del eje trasero.

Esta parte del sistema proporciona al operador el control preciso que necesita para modular la presión de freno para detener el camión lentamente, o desarrollar un esfuerzo de detención total para detenerlo lo más rápido posible. El corazón de este circuito es la válvula de pedal de circuito dual operada con el pie. Esta válvula permite al operador controlar la energía de presión relativamente alta que hay dentro de los acumuladores de los frenos y que es dirigida a los frenos. Hay dos válvulas en la válvula de freno dual. Una suministra presión a una válvula de relé dual para proporcionar la presión de aplicación a los frenos del eje delantero. La otra suministra presión a una válvula de relé dual para proporcionar la presión de aplicación a los frenos del eje trasero.

Los conjuntos del freno de disco húmedo, enfriados por aceite, delanteros y traseros son similares en diseño. Los frenos de las ruedas traseras difieren de las delanteras sólo en su disposición de montaje. El conjunto del freno trasero requiere un adaptador de cubo (Figura *1-3*) para el montaje en el motor de la rueda. Cada conjunto de freno de disco consta de los siguientes componentes básicos:

- Diez discos de fricción
- Nueve placas separadoras
- Dos discos amortiguadores
- Conjunto del pistón
- Engranaje de corona estacionario
- Engranaje interior rotatorio
- Conjunto del sello de aceite del anillo flotante

El paquete completo de discos de freno es enfriado por medio de aceite hidráulico. El circuito de enfriado de baja presión está completamente aislado del circuito de aplicación del pistón a alta presión. El aceite de enfriado fluye desde el estanque hidráulico a la bomba de elevación, a través de los filtros de alta presión del circuito de elevación, a través de la válvula de elevación y hacia las cajas de los frenos. Un circuito paralelo desde la salida de la válvula de elevación está conectado a las válvulas de alivio del estanque hidráulico, el

cual limita la presión del circuito de enfriado de freno a 241 kPa (35 psi). El aceite dirigido a los frenos delanteros pasa a través del enfriador de aceite antes de entrar a las cajas del freno delantero. Además, el aceite de enfriado del freno proporciona la lubricación a los rodamientos de la rueda delantera. El aceite que sale de las cajas de los frenos vuelve al estanque hidráulico.

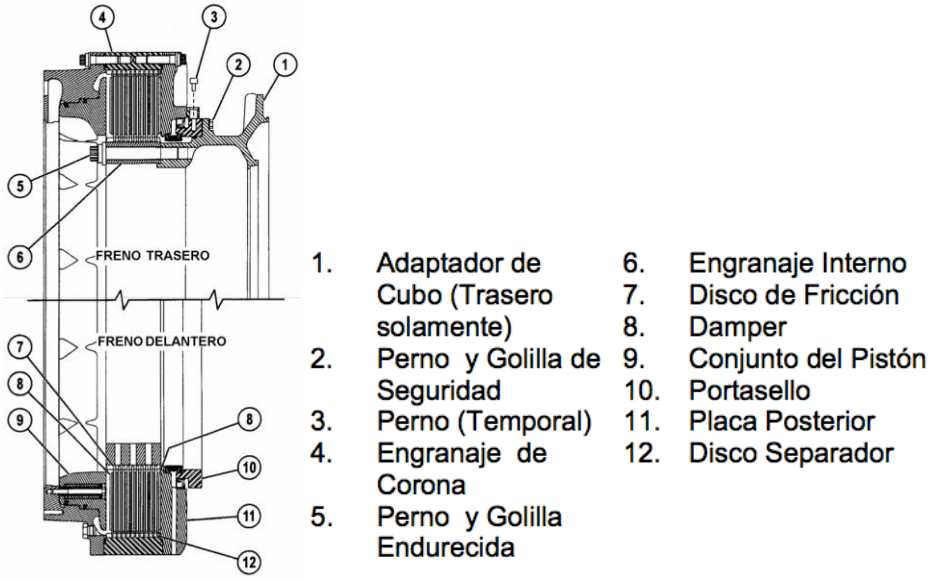


Figura 1-5: *Conjunto de freno de disco húmedo.*

(Komatsu America Corporation, 2007)

1.4 Operación del conjunto de freno de servicio.

De la Figura 1-5, se puede notar que el engranaje de corona está dividido internamente para retener los dampers (8) y las placas separadoras (12). Las placas separadoras están colocadas en forma alternada entre los discos de fricción (7), que son ranurados hacia el engranaje interior (6). El engranaje interior está montado directamente sobre el cubo de la rueda, en los frenos de la rueda delantera. En el freno trasero, el engranaje interior requiere de un adaptador de cubo el cual está montado en el cubo de la rueda. El costado interno del conjunto contiene el pistón (9), el cual es activado por medio de presión hidráulica proporcionada por las válvulas de relé dual (controladas por la válvula de freno). A medida que se aplica la presión hidráulica, se mueve el pistón para comprimir los discos de fricción de rotación contra los discos de acero estacionarios. Las fuerzas de fricción generadas resisten la rotación de las ruedas. A medida que aumenta la presión hidráulica, las fuerzas de fricción aumentan y la rotación disminuye hasta que se alcanza la fuerza máxima y se detiene la rueda.

El paquete completo de discos de freno es enfriado por medio de aceite hidráulico. El circuito de enfriado de baja presión está completamente aislado del circuito de aplicación del pistón a alta presión. El aceite de enfriado fluye desde el estanque hidráulico a la bomba de elevación, a través de los filtros de alta presión del circuito de elevación, a través de la válvula de elevación y hacia las cajas de los frenos. Un circuito paralelo desde la salida de la válvula de elevación está conectado a las válvulas de alivio del estanque hidráulico, el cual limita la presión del circuito de enfriado de freno a 241 kPa (35 psi). El aceite dirigido a los frenos delanteros pasa a través del enfriador de aceite antes de entrar a las cajas del freno delantero. Además, el aceite de enfriado del freno proporciona la lubricación a los rodamientos de la rueda delantera. El aceite que sale de las cajas de los frenos vuelve al estanque hidráulico.

Es importante mencionar y reiterar que los frenos de servicio se deben aplicar cuando el retardo dinámico requiera fuerza de frenado adicional para disminuir rápidamente la velocidad del camión. El freno de servicio no debiese activarse con una velocidad mayor a 8 kph.

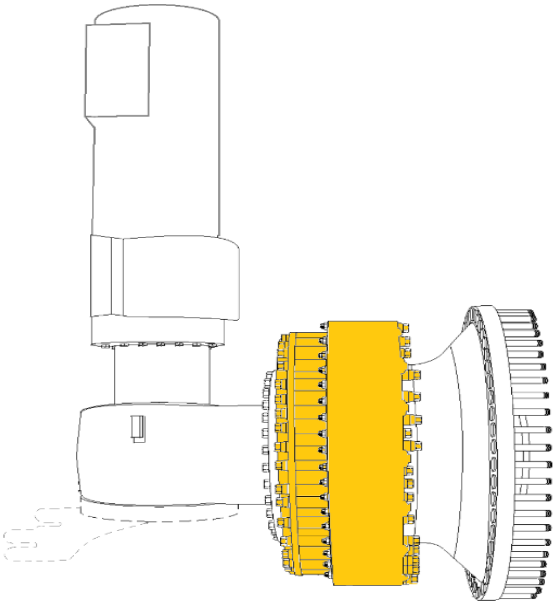


Figura 1-6: *Conjunto de freno de disco húmedo. Se aprecia además la suspensión y el conjunto de la maza.*

(Komatsu America Corporation, 2007)

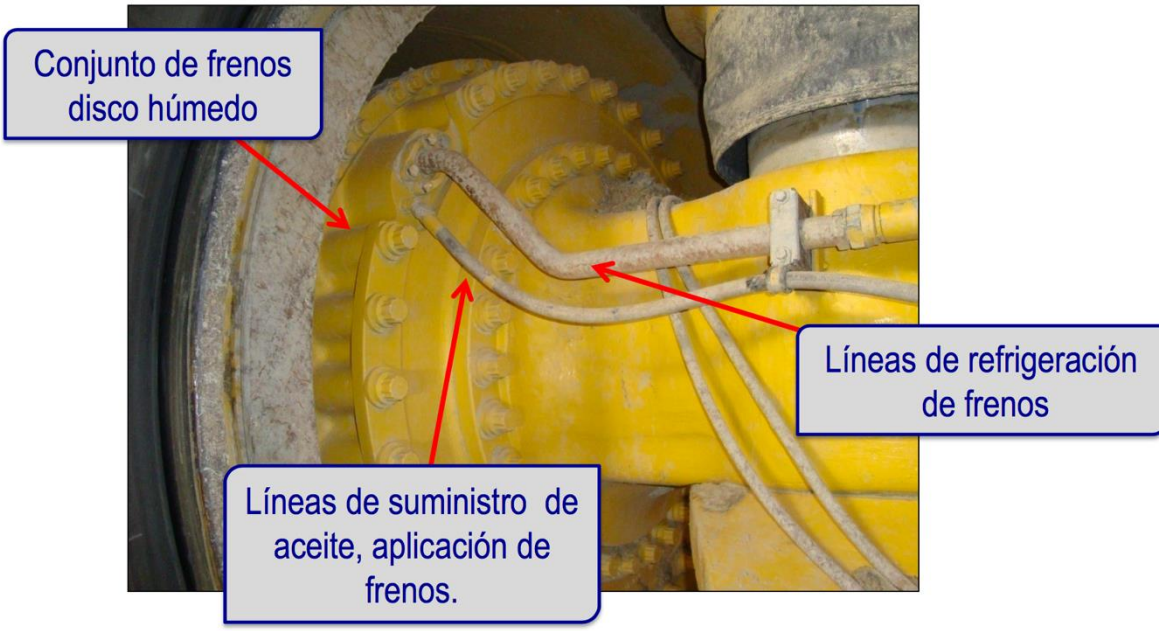


Figura 1-7: *Conjunto de freno de disco húmedo, líneas de refrigeración de frenos y suministro de aceite.*

1.5 Inspección de desgaste del disco de freno.

Las empresas recomiendan revisar el desgaste del disco de freno cada 1000 horas, así mantener un control del normal funcionamiento del freno de servicio.
Para esto se debe utilizar la herramienta indicadora de desgaste EF9302. Esta herramienta está incluida en el grupo de herramientas embarcadas con el camión.

La herramienta indicadora de desgaste del disco de freno está inserta en una lumbrera que se abre al aceite de enfriado. Al sacar el tapón del orificio de inspección para insertar el indicador de desgaste de disco de freno se perderá algo de este aceite. Se debe realizar una planificación anticipada para minimizar esta pérdida de aceite.

Las inspecciones de desgaste de disco de freno delantero se deben programar junto con el cambio de aceite hidráulico y filtros de las 1000 horas.

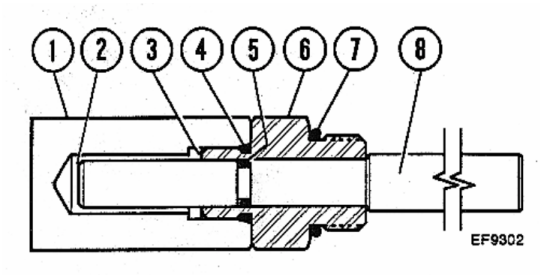


FIGURA 5-2. INDICADOR DE DESGASTE DE FRENO

1. Cubierta
2. Cara del Extremo del Pasador del Indicador
3. Cara de la Caja
4. Anillo de goma
5. Anillo de goma
6. Caja de la Herramienta
7. Anillo de goma
8. Pasador del Indicador

Figura 1-8: *Herramienta indicadora de desgaste para freno de servicio (EF9302).*

Se recomienda revisar el desgaste de los discos de todos los conjuntos de freno. El desgaste del disco de un conjunto de freno puede ser diferente al de otro debido a la operación diferente de las piezas y/o a las características de la carga, que requiere que se frene repetidamente mientras el camión opera en una sola dirección. La evaluación del desgaste queda sujeta a medidas entregadas por la fábrica. Estas medidas se pueden apreciar en la Figura 1-9.

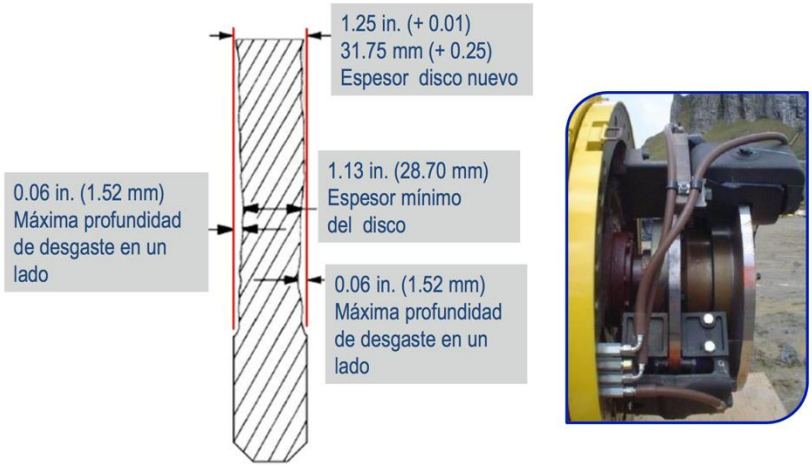


Figura 1-9: *Evaluación del desgaste de disco de freno delantero para camión 930E. Se aprecian espesores mínimos que pueden mantener los discos antes de su cambio.*

(Komatsu America Corporation, 2007)

1.6 Consideraciones sobre energía.

Cuando se detiene el movimiento de los elementos rotativos de una maquina por medio de un freno, este debe absorber la energía cinética de rotación. Esta energía se manifiesta en forma de calor. Esto queda representado por,

$$\Delta U = Q - W \ (1)$$

La ecuación de energía cinética viene dada por,

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \Delta v^2 (2)$$

De la misma manera, cuando los elementos de una máquina que al principio están en reposo se aceleran, ocurre un deslizamiento hasta que los elementos tengan la misma velocidad que el impulsor, la energía cinética se absorbe durante el deslizamiento del freno, esta energía también se manifiesta en forma de calor.

(Budynas & Nisbett, 2008)

1.7 Aumento de temperatura.

El aumento de temperatura del ensamble de embrague o freno se calculan de manera aproximada mediante la expresión clásica:

$$\Delta T = \frac{E}{C_p \cdot m} (3)$$

Donde,

ΔT: $Aumento\ de\ temperatura,$ ℃.
C_p: $Capacidad\ térmica\ específica. Calor\ especifico.$
m: $Masa\ del\ freno.$
E: $Energía\ disipada, Joules.$

(Budynas & Nisbett, 2008)

1.8 Materiales de fricción.

Un freno de fricción debe tener las siguientes características del material del recubrimiento, hasta un grado que depende de la intensidad del servicio (Ver Anexos):

- Un coeficiente de fricción alto y reproducible.
- Inalterabilidad ante condiciones del medio, como la humedad.
- Capacidad para soportar altas temperaturas, junto con una buena conductividad y difusividad térmicas, así como calor especifico elevado.
- Buena resilencia
- Alta resistencia al desgaste, rayado y raspadura.
- Flexibilidad: área de superficie de friccion que se requiere para varias potencias de frenado.

(Budynas & Nisbett, 2008)

Para identificar el material de fricción del disco para el freno de servicio, la empresa KCH hizo un análisis químico del disco de freno por espectrometría de fluorescencia de rayos X según la norma ASTME 572-06.

El ensayo determino la siguiente composición en porcentaje para el disco de freno.

Muestra	Composición (%)								
Disco de Fricción	C	SiO2	Fe2O3	ZnO	CaO	Al2O3	P2O5	S	K2O
	51,50	23,94	10,54	3,97	3,69	2,07	2,03	0,762	0,406
	MgO	Na2O	TiO2	CuO	Cl	MnO	Cr2O3	NiO	
	0,401	0,252	0,145	0,130	0,081	0,076	0,024	0,021	

Figura 1-10: Composición de disco de freno de servicio.

1.9 Confiabilidad y diagrama de bloque (RBD)

La confiabilidad tiene que ver con que un bien o componente funcione adecuadamente durante un periodo determinar, bajo condiciones operacionales específicas.

Un sistema es una colección de componentes (subsistemas) dispuestos según el diseño dado con el propósito de cumplir determinadas funciones con una confiabilidad deseable. El tipo de componente, su disposición, cantidad y calidad tienen efecto directo en la confiabilidad del sistema.

Para la mayoría de los casos industriales, es preferible y preferente aplicar mantenimientos preventivos antes que correctivos, se debe tomar esta decisión centrándose en los costos, considerando indisponibilidad de los equipos. El mantenimiento preventivo no entorpece la producción y evita imprevistos ocasionados por la rotura de un sistema. La idea es que se sustituya un dispositivo que funciona es que el costo de hacerlo es pequeño en comparación al costo de responder a una falla que ocurra durante el funcionamiento del dispositivo, es decir un fallo en la operación.

Una nueva medida de rendimiento incorporando los análisis anteriores seria *la disponibilidad.* Esta se entiende como la probabilidad de que un sistema o componente este funcionando en un tiempo "t". En minería, la disponibilidad de los equipos es fundamental para la firma de contratos y compromisos con las faenas.

La confiabilidad de los sistemas se puede analizar a través de modelos matemáticos que permiten analizar las características de estos con un esfuerzo, coste y riesgo menor que al analizar sobre el propio sistema. El desarrollo matemático para estudiar la confiabilidad de un sistema queda sujeto a una serie de hipótesis, es por esto que se debe conocer con exactitud la base del desarrollo de cualquier modelo y así ver como de veraces son los resultados.

La confiabilidad de un sistema depende de la confiabilidad individual de cada uno de sus componentes y el modo lógico en que están conectadas dichas componentes en relación con el funcionamiento o no del sistema, se supone que el estado o fallo de las componentes determina el estado del funcionamiento o fallo del sistema. Esta información se recoge en la llamada función estructura del sistema:

Si suponemos que el sistema está formado por n componentes y que el estado del componente i queda descrito por la variable $X_i$que puede tomar valor binario, es decir 1 si funciona o 0 si no. El estado del sistema $X_s$es una función de las variables X_i.

$$X_s = \Phi(X_1, \dots., X_n)$$

Donde Φ es la función estructura del sistema.

R_s: $Confiabilidad\ del\ sistema.$
R_i: $Confiabilidad\ del\ componente.$

Por lo tanto, $R_i = P\ (X_i = 1)$ y $Q_s = 1 - \ R_s$ como la probabilidad de fallo del sistema, de forma análoga $Q_i = 1 - \ R_i$.

1. Sistemas en serie: En una configuración en serie, el fallo de cualquier componente provoca el fallo del sistema. Si se considera un sistema completo y su

descomposición básica, en la mayoría de los casos de obtiene una ordenación lógica de sus componentes en serie, es decir, un sistema en serie es aquel en que todos los componentes deben funcionar adecuadamente para que funcione el sistema. La confiabilidad del sistema es la siguiente:

$$R_s = P\ (X_s = 1) = \ P\ (X_1 = 1, \dots, X_n = 1\ ) = P\ (X_1 = 1) * \dots * \ P\ (X_n = 1) = \ R_1 * \dots * R_n$$

Figura 1-11: Representación de un sistema en serie.

2. Sistemas en paralelo: En este caso se necesita que al menos una componente del sistema funcione para que el sistema funcione. Se dice que las componentes son redundantes. La confiabilidad del sistema es la siguiente:

$$R_s = 1 - \ (Q_s) = \ 1 - \ P\ (X_1 = 0, \dots, X_n = 0\ ) = (1 - \ R_1) * \dots * (1 - R_n)$$

En un sistema en paralelo, la componente más importante es la que tiene mayor confiabilidad. La característica inherente al modelo en paralelo se llama redundancia, es decir existe más de un componente para desempeñar una función dada. A su vez, la redundancia puede ser de dos clases:

- Redundancia activa: Todos los elementos redundantes están activos simultáneamente.

- Redundancia secuencial (Stand- By): En esta ocasión, el elemento redundante solo entra en juego cuando se le da la orden como consecuencia del fallo del elemento primario.

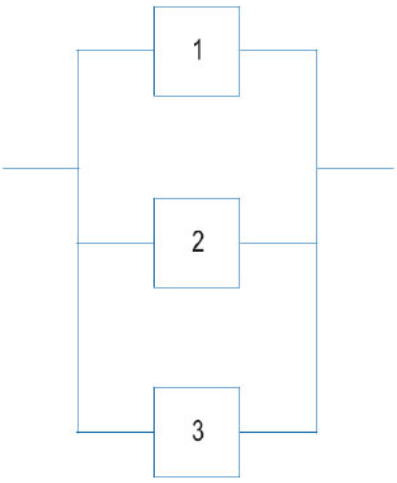


Figura 1-12: Representación de un sistema en paralelo.

3. Sistemas k-out-of-n: Consiste en una generalización del sistema en paralelo en la que se requiere el funcionamiento de al menos *k* de las *n* unidades para que el sistema funcione. La función confiabilidad es la siguiente:

$$R_s = \sum_{r=k}^{n} \binom{n}{r} R^r * (1-R)^{n-r}$$

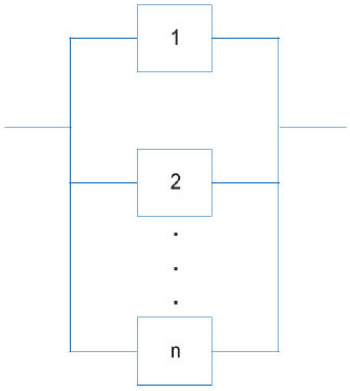


Figura 1-13: Representación de una configuracion “k-out-of-n”.

(Baldin, Furlanetto, A., & Turco, 1982)

1.9.1 Diagrama de bloques de confiabilidad (RBD).

Un diagrama de bloques o RBD por sus siglas “Reability Block Diagram” es una representación gráfica de los componentes/subsistemas del sistema, y de cómo se relacionan desde el punto de vista de la confiabilidad. En algunos casos esta representación es distinta a la relación física. Un ejemplo de diagrama de bloques de confiabilidad podría ser el siguiente:

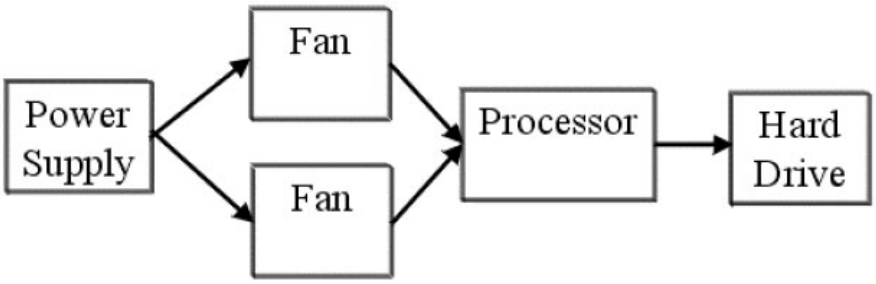


Figura 1-14: Ejemplo de diagrama de bloques RBD.

En la Figura 1-14 se puede ver un RBD de una CPU con un ventilador redundante. El RBD proporciona una representación visual del modo en que los bloques se relacionan. La idea es representar el efecto que tiene en el funcionamiento o falla de una componente sobre el sistema.

El primer paso es obtener la confiabilidad de cada uno de los bloques, esto permitirá a los ingenieros de confiabilidad caracterizar las distribuciones de vida de las componentes o bloques específicos. Los RBD se muestran útiles a la hora de determinar la función matemática de confiabilidad. (Baldin, Furlanetto, A., & Turco, 1982)

1.10 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).

RCM o *Reliability Centred Maintenance* es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento. RCM ha sido usado para ayudar a formular estrategias de gestión de activos físicos en prácticamente todas las áreas de la actividad humana organizada.

El objetivo principal de la implementación de un Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad es aumentar la confiabilidad de la instalación, es decir, disminuir el tiempo de parada de los equipos de la planta por averías imprevistas que impidan cumplir con los planes de producción. Los objetivos secundarios son aumentar la disponibilidad, es decir, la

proporción del tiempo en que los equipos están disponibles, además de disminuir los costos de mantenimiento.

Las industrias que aplican RCM, generalmente no lo aplican en todos los componentes. En general, seleccionan los más "críticos" y tratan de asegurar que estos no fallen. El estudio de fallos de cada uno de estos equipos se hace con un grado de profundidad que se identifican muchos modos de fallo. Además, se deben considerar atender las recomendaciones de los fabricantes y la experiencia de los técnicos y responsables del mantenimiento. (Baldin, Furlanetto, A., & Turco, 1982)

1.11 Distribución normal e intervalos de confianza.

La distribución de probabilidad normal es la más importante de las distribuciones estadísticas, por la cantidad de fenómenos que aplica. También se le puede denominar con el nombre de campana de Gauss, ya que, al representar su función de probabilidad, esta tiene forma de campana.

Si una variable aleatoria toma los valores x y tiene una distribución con media μ y varianza σ^2, la correspondiente variable aleatoria concentrada y reproducida toma los valores:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

y su distribución tiene como media cero y como varianza la unidad.

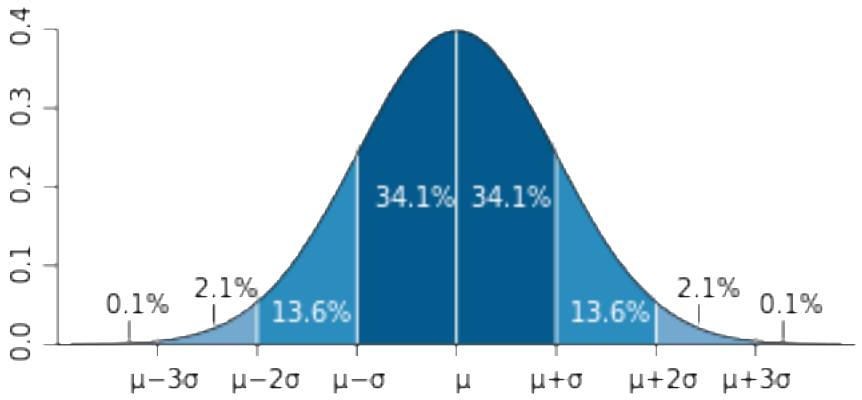


Figura 1-15: Curva normal estandar para distribución normal.

1.11.1 Intervalos de confianza.

Cuando se utiliza la media muestral para estimar la media de una población, sabemos que, aunque estamos empleando un método de estimación que tiene ciertas propiedades convenientes, las oportunidades de que la estimación sea igual a μ son muy pocas. Por lo tanto, parece deseable acompañar a un estimador puntal de μ. Así he de indicar que proximidad razonable se debe esperar entre el estimador y μ. El error, $\bar{x} - \mu$, es la diferencia entre el estimador y la cantidad que se supone que se estima.

Este estimador será calculado de la siguiente manera:

$$\frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}}$$

es un valor de una variable aleatoria que tiene aproximadamente una distribución normal tipificada.

De esta forma,

$$-z_{\propto/2} < \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} < z_{\propto/2}$$

donde $z_{\propto/2}$ es tal que el área de la curva normal a su derecha es igual a $\propto/2$. Si, ahora, hacemos E igual a $|\bar{x} - \mu|$, magnitud del error de estimación, tendremos,

$$E < z_{\propto/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}$$

con una probabilidad de 1- $\propto$. En otras palabras, si estimamos μ por medio de una muestra aleatoria de tamaño n, podemos asegurar con probabilidad 1- $\propto$ que el error, $|\bar{x} - \mu|$ es menor que $z_{\propto/2} \cdot \sigma/\sqrt{n}$.

Finalmente podríamos tener la siguiente relación,

$$\bar{x} - z_{\propto/2} \cdot s/\sqrt{n} < \mu < \bar{x} + z_{\propto/2} \cdot s/\sqrt{n}$$

(Miller & Freund, 1963)

1.12 Curva PF.

Cuando la capacidad funcional de un equipo cae por debajo de su capacidad requerida, consideramos que el activo ha "fallado". Con el fin de mitigar las consecuencias de fallas, los administradores del mantenimiento se inclinan hacia una política de mantenimiento denominada "mantenimiento basado en condiciones" o CBM.
El CBM puede hacer alusión al mantenimiento predictivo, monitoreo de condiciones, monitoreo de salud de equipos, etc.

Todo esto se refiere a la recolección, el procesamiento y análisis de informaciones y observaciones importantes, con el fin de tomar decisiones buenas y oportunas sobre si intervenir inmediatamente y hacer mantenimiento al equipo, plantear la ejecución de un mantenimiento dentro de un periodo de tiempo especificado o aplazar la decisión de mantenimiento hasta una próxima observación.

Cuando los administradores y gerentes seleccionan una tarea para tratar un particular modo de falla, siempre es buena opción considerar el mantenimiento basado en condiciones, de poder ser aplicable, es considerado menos costoso y menos entorpecedor que el mantenimiento preventivo. El gráfico de la Figura **1-16** a continuación define la detección de una falla potencial de manera oportuna. "P" es el punto inicial en el cual puede ser observada una falla en evolución utilizando la tecnología actual de detección.

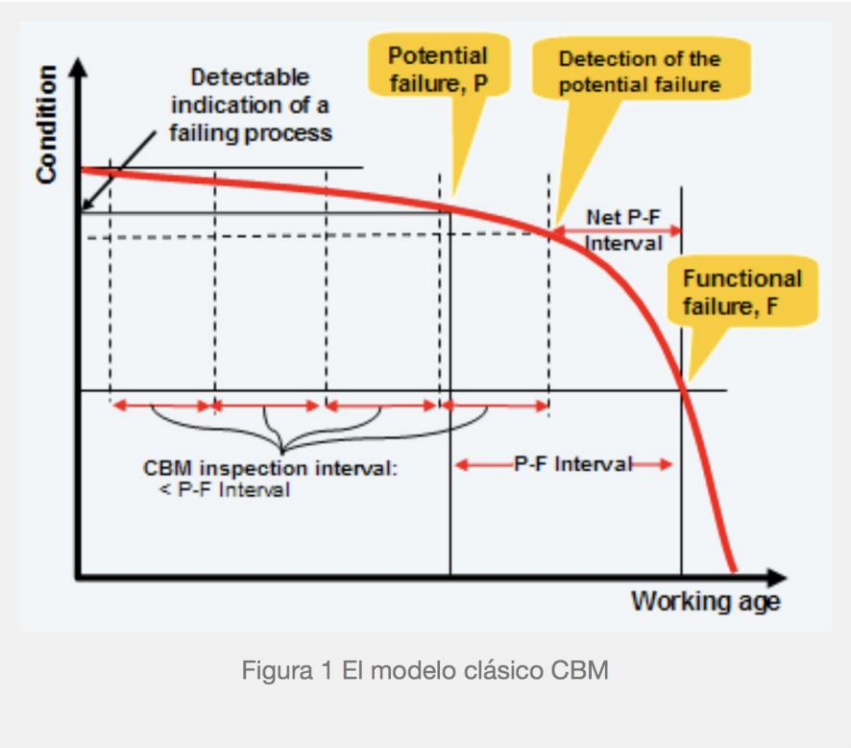


Figura 1-16: Modelo clásico CBM o curva PF. Desde el punto incial "P" hasta la falla "F".

El grafico de la **Figura 1-16**, ilustra las restricciones que debe tener en cuenta un ingeniero al diseñar o programar un mantenimiento por condición. El intervalo P-F debe proporcionar un periodo de tiempo adecuado para que la operación de mantenimiento pueda reaccionar a partir del momento en que se detecta la falla potencial. La frecuencia de monitoreo necesaria debe ser asociada a que tan practico es según el componente. (Vásques, 2011).

De la figura se puede asumir que:

- El punto en el que se declara una falla potencial, P, de una condición identificable es conocido.
- El intervalo P-F es conocido y es razonablemente consistente, o su rango de variación puede ser estimado.
- Resulta practico monitorear el ítem a intervalo más cortos de tiempo que el intervalo P-F.

Los obstáculos para la aplicación de la curva P-F podrían estar asociados a desconocer "P", o que si P-F no puede ser aproximado. En cualquiera de los dos casos no se podría aplicar mantenimiento basado en condición.
De ambos conceptos, "P" es el que representa un reto mayor, sin "P" el intervalo P-F resulta elusivo. Es por esto, que antes de tratar con la curva P-F se debe descubrir cuando y como declarar una falla potencial. El punto "P" dependerá netamente de cuando la tecnología actualmente disponible puede detectar la condición de falla, este debe ser señalado alcanzando algún valor especificado para algún indicador de condición, por lo que se debe encontrar un indicador que transmita el estado de un modo de falla fijado. Encontrar este indicador es un reto por sí mismo, es más, requiere considerable conocimiento basado en:

- Un modelo de ingeneria del mecanismo de falla.
- Experiencia previa de la falla, historia de la falla.

La persona que enfrentara el mantenimiento basado en condición presentara interrogantes inevitables, como "¿dónde establecer la falla potencial?", y "cual indicador", de las tantas variables monitoreadas, debería ser utilizado para este propósito?". Si las reglas físicas de una situación no son bien conocidas, establecer una "política" para declarar una falla potencial no es nada obvia.

Otros puntos por considerar al crear una curva P-F son los siguientes:

1. Generalmente los problemas son multi-dimensional. Cuando una variable significativa es una combinación lineal de varios factores que influyen sobre riesgos, se trata de una función más compleja, no es fácil formar un modelo P-F.

2. Tanto “P” como P-F pueden ser variables aleatorias.

3. La declaración de “P” puede no ser constante para distintas edades de trabajo del ítem. Un alto nivel de vibración en un ítem más antiguo puede indicar una falla inminente, mientras que el mismo nivel de vibración en un ítem más nuevo puede ser normal (Vásques, 2011).

1.13 Análisis Predictivo

El análisis Predictivo es una de las tantas herramientas que forman parte del conjunto conocido como *Business Intelligence*.

El Business Intelligence es la tendencia al uso de una nueva cultura generalizada respecto a los datos. La capacidad real de almacenar y procesar grandes conjuntos de datos, ligado a los avances experimentados por las TI, susceptibles de ser analizados en busca de tendencias.

El Análisis Predictivo requiere herramientas informáticas, que deben ser capaces de detectar patrones en los datos analizados, a través de estos patrones se deben formular reglas susceptibles de ser utilizadas para formular predicciones.

El Análisis Predictivo es un área de la minería de datos. Esto consiste en la extracción de información existente en los datos y su utilización para predecir tendencias y patrones de comportamiento, a su vez, estos datos pueden provenir de una máquina, un componente o cualquier equipo asociado al negocio.

Este análisis se fundamenta en la identificación de las relaciones entre variables en eventos pasados, para luego explotar dichas relaciones y predecir posibles resultados en futuras situaciones. Es importante mencionar que la precisión de los resultados obtenidos depende mucho de cómo se ha realizado el análisis de los datos, además de la calidad de las reglas y suposiciones.

Para llevar a cabo el análisis predictivo se debe disponer de una considerable cantidad de datos continuos, tanto actuales como pasados, para poder establecer los patrones de comportamiento y de ahí inducir conocimiento. Debe haber un aprendizaje computacional.

Los datos son la fuente de la que se obtienen las variables, las relaciones entre ellas, el conocimiento inducido y los patrones de comportamiento identificador. Es el elemento vital de todo análisis predictivo. Es por esto por lo que es de suma importancia la forma en que se recolecta la data.

1.13.1 Modelos Predictivos.

Los modelos predictivos son modelos de la relacion entre el rendimiento especifico de una unidad en una muestra y uno o mas atributos o caracteristicas de esta misma unidad.

Los modelos tienen como objetivo evaluar la probabilidad de que la unidar similar en una muestra diferente exhiba un comportamiento especifico. Esta categoria abarca modelos que se encuentran en muchas areas.

El análisis predictivo construye un modelo estadístico que utiliza los datos existentes para predecir datos de los cuales no se dispone. Se debe utilizar unidades de muestra disponibles con atributos conocidos y un comportamiento conocido, al que se le denomina conjunto de entrenamiento del modelo. Por otro lado, se utiliza una serie de unidades de otra muestra con atributos similares, pero de las cuales no se conoce su comportamiento, a este conjunto de datos se le denomina conjunto de prueba. Finalmente, la data a través de un procesamiento de información, con un conjunto de reglas y suposiciones deberá entregar un modelo predictivo. Esto se puede apreciar de mejor forma en la Figura **1-17**.

Figura 1-17: Bosquejo general del funcionamiento de un modelo predictivo. Fuente: Predictive Anaytics – The power to predict who will click, buy lie or die.

(Timon , 2017)

1.13.2 Aplicaciones relacionadas.

El Dr. Ali Soofastaei, quien actualmente es analista de datos de BHP Billinton utiliza modelos basados en métodos de Inteligencia Artificial para aumentar la productividad, la eficiencia energética, reducir los costos totales de operaciones mineras y el mantenimiento en los equipos. El Dr. Ali Soofastaei, quien es un PhD en "Mechanical and Mining Engineering" de la Universidad de Queensland, UQ. Ha trabajado en varias oportunidades con modelos predictivos para programar el mantenimiento de los equipos y componentes mineros.

Una reciente publicación llamada: "***Improving haul truck availability by braking system failure prediction using advanced data analytics***" tiene como objetivo presentar un

modelo informático multi objetivo para mejorar la disponibilidad de los camiones de acarreo utilizados en faenas mineras, esto desarrollado mediante el uso de métodos de inteligencia artificial.

El modelo que el Dr. Ali Soofastaei desarrolla lo inyecta como un servicio en línea o un paquete de software que recopila y analiza datos para predecir fallas graves o catastróficas en el sistema de frenado de estos camiones.

El modelo hace una lista de prioridades para futuras actividades de mantenimiento y así reducir eventos no programado. Así proporciona una plataforma para el mantenimiento proactivo continuo. Toda la información del modelo es filtrada y enviada a los operadores, supervisores y gerentes de la mina para así tomar decisiones de forma más informada.

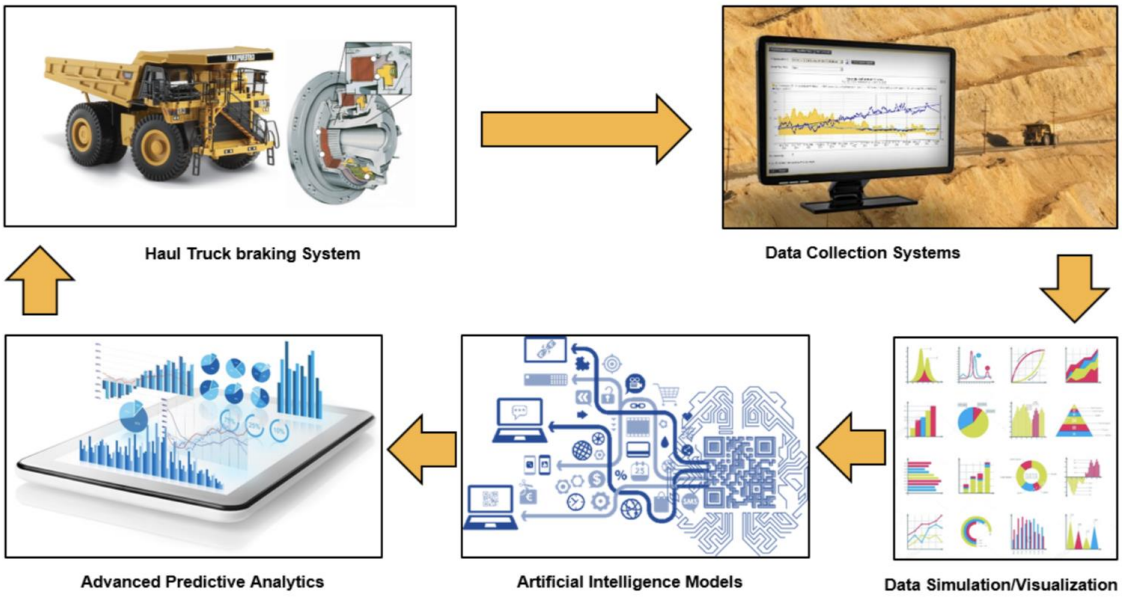


Figura 1-18: Modelo informático multi-objetivo desarrollado utilizando métodos de inteligencia artificial para completar análisis predictivo de los sistemas de frenado de camiones de transporte. Dr. Ali Soofastaei.

Como se aprecia en la **Figura 1-18** los modelos predictivos funcionan bajo la misma base que lo explicado en el ítem anterior, se debe contener una base de datos, analizarla y en base a esto hacer las predicciones necesarias.

Existen diferentes sistemas de recolección de datos instalados en los camiones mineros, estos deben estar conectados a las salas de control para monitorear el desempeño de los componentes, estos sistemas transfieren millones de bytes de datos en solo un par de segundos. Todos los modelos informáticos analíticos desarrollados muestran diferentes tipos de gráficos, tablas e informes en línea o fuera de línea para ayudar a operadores, supervisores y gerentes. Los modelos pueden mostrar alarmas o acciones recomendadas.

Los modelos del Dr. Ali Soofastaei de BHP Billinton ha sido validado en dos minas de superficie, en Estados Unidos y otra en Australia. La primera mina es de cobre ubicada en Arizona, quien representa una de las mayores reservas de cobre de EE. UU. y el mundo. La segunda mina es de carbón, ubicada en Queensland, quien tiene reservas de carbón que ascienden a 900 millones de toneladas de carbón de coque. En la Figura 1-19 se ilustran algunos resultados del uso del modelo desarrollado en las dos minas mencionadas anteriormente.

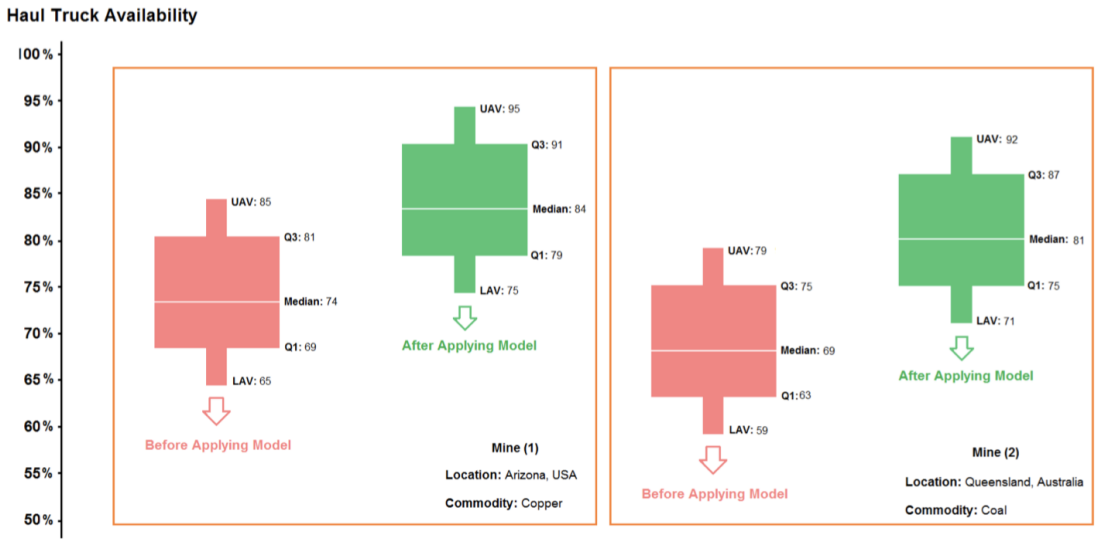


Figura 1-19: Mejora de disponibilidad de camiones de acarreo utilizando el modelo desarrollado. (Soofastaei, Aminossadati, Arefi, & Kizil, 2016).

Los resultados obtenidos muestran que la disponibilidad de camiones de acarreo se ha mejorado aproximadamente en un 14% en la mina de cobre, Arizona, EE..UU. y un 17% en la mina de carbón, Queensland, Australia (Soofastaei, Aminossadati, Arefi, & Kizil, 2016).

1.14 Parámetros de medición.

Para poder analizar el comportamiento operacional o monitorear cualquier componente, es necesario tener datos con un valor real de la condición de este sistema o componente para validar su estado.

En el caso de los equipos de la empresa, existen sistemas de monitoreo en tiempo real que están a la vanguardia en tecnología inalámbrica para mejorar la gestión con sus clientes, pero, además, estos datos permiten establecer análisis y concluir sobre el estado del camión y de sus funciones.

1.14.1 KOMTRAX.

Komtrax es un sistema de monitoreo satelital para los equipos de alto tonelaje, enfocado tanto a la minería como a la producción.

Permite acceder de manera remota a la información de la operación de los equipos y conocer la condición de los componentes más importantes. Se diseñó pensando en la reducción de costos de mantenimiento y mantener tanto la confiabilidad como disponibilidad del equipo en óptimas condiciones.

Esto permite tener un sistema complementario para la gestión de mantenimiento, reducir costos de mantenimiento con el monitoreo continuo de la condición y desempeño de los equipos, alertar cuando se superen ciertos umbrales atribuibles a prácticas incorrectas, lo que a su vez puede desencadenar en costos de operación menores, precisión en el registro de las horas de la máquina y datos de producción.

KOMTRAX permite monitorear algunas variables de interés para este trabajo que serán presentadas a continuación:

De los sensores eléctricos del camión se pueden obtener códigos de fallas asociados a comportamientos anormales en la operación, algunos de estos se pueden ver en la Figura 1-20:

Chassis Trend data and related fault code.

PARAMETER	Default Unit	Available in trend data for Analysis	
		Critical (snapshot recorded)	Warning (snapshot recorded) // (no snapshot recorded)
Hoist Pressure 1	kg/cm2		// A198, A202
Hoist Pressure 2	kg/cm2		// A199#, A203#
Steering Pressure Max	kg/cm2		// 200, A204
Ambient Temperature	deg C		// A206, A207
Ambient Pressure	kg/cm2		
Haul Stage			
Vehicle Speed	kph		// A011, A212
Sprung Weight	ton		// A246, A022
Brake Oil Temperature LF	deg C	A194 (High Temperature)	// A172, A168, A145#, A146#
Brake Oil Temperature LR	deg C	A196 (High Temperature)	// A166, A170, A145#, A146#
Brake Oil Temperature RF	deg C	A195 (High Temperature)	// A169, A173, A145#, A146#
Brake Oil Temperature RR	deg C	A197 (High Temperature)	// A167, A171, A145#, A146#
Hydraulic Oil Tank Temperature	deg C	A193 (High Temperature)	// A103, A104
Brake Pressure	kg/cm2		// A201, A205, A118,
Brake Power	MW/m2		
Brake Energy	GJ/m2		
Other Parameters (Not continous value and no trend)			
Suspension Pressure	-		// A018, A019 (A001 to A008 less severe sensor failures)
Hydraulic Oil Filter pressure	-		// A101
Steering Accumulators Precharge pressure	-		// A115
IM voltaje source	-		// A127, A128
Autolube system	-		// A190
GE System Warning	-		// A107# A108#, A109#, A193*, A225*, A226*, A227*, A228*, A229*

Figura 1-20: *Tabla de parámetros asociados a códigos de falla para camión Komatsu 930E.*

De la Figura 1-20 podemos rescatar parámetros considerables para este trabajo.

- **Brake Oil Temperature**: Desde el código de falla 194 hasta el código de falla 197 registra un alza de temperatura en el aceite en el freno de servicio. El código se obtiene a través de un sensor que registra un aumento del voltaje sobre 4.13 volts por 5 segundos. Existen sensores para las cuatro ruedas, LF, LR, RF, RR. Actualmente se pueden hacer ciertos análisis en base a estos datos, por ejemplo, al notar una tendencia al alza en la temperatura del aceite, con ciertos *peaks* se puede atribuir a un mal comportamiento operacional. Si una rueda tiene mayores temperaturas que otra, se puede atribuir a una posible falla. Esto se puede notar en mayor detalle en la Figura 1-21.

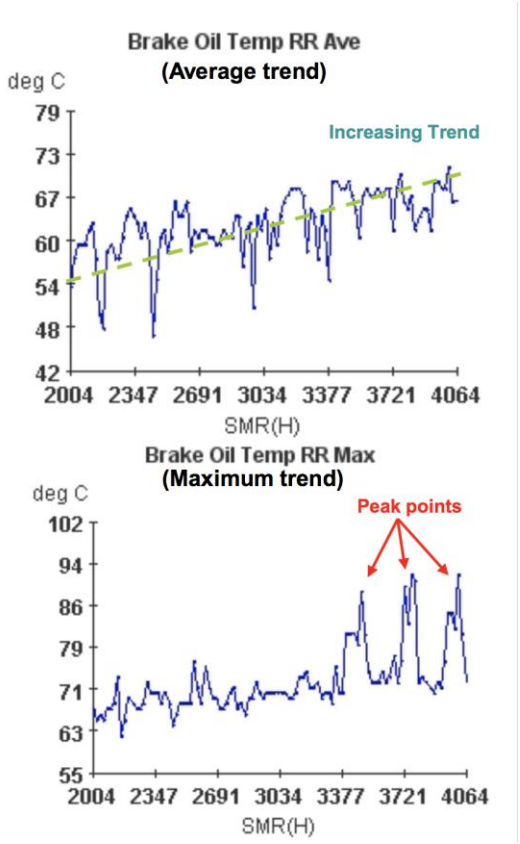


Figura 1-21: *Tendencias al alza en la temperatura del aceite en freno de servicio, en el gráfico superior se aprecia una tendencia al alza del promedio de las temperaturas, mientras que en el gráfico inferior peaks de valores máximos de esta temperatura.*

- **Brake Power:** El poder de frenado tiene relación con la presión que se ejerce para comprimir los discos de fricción y la velocidad que lleva el camión en ese mismo instante. Indirectamente esta presión está relacionada con la carga que lleva el camión y la condición del terreno, por ejemplo, la inclinación. Este dato es una densidad de potencia que puede indicar cuando las condiciones operacionales están cambiando por trabajar con un perfil más agresivo o más descuidado. Por otro lado, un *peak* repentino podría estar asociado a un evento puntual o una emergencia. Un valor alto siempre estará relacionado con un uso inadecuado del freno de servicio. En la Figura 1-22 se puede notar la relación entre estas dos variables.

PSI	Kpa	MW/m2						
> 2901	20000	11.3	56.7	113.3	170.0	226.6	283.3	339.9	396.6
2756 - 2901	19000 - 20000	10.8 - 11.3	53.8 - 56.7	107.6 - 113.3	161.5 - 170.0	215.3 - 226.6	269.1 - 283.3	322.9 - 339.9	376.7 - 396.6
2611 - 2756	18000 - 19000	10.2 - 10.8	51.0 - 53.8	102.0 - 107.6	153.0 - 161.5	203.9 - 215.3	254.9 - 269.1	305.9 - 322.9	356.9 - 376.7
2466 - 2611	17000 - 18000	9.6 - 10.2	48.2 - 51.0	96.3 - 102.0	144.5 - 153.0	192.6 - 203.9	240.8 - 254.9	288.9 - 305.9	337.1 - 356.9
2321 - 2466	16000 - 17000	9.1 - 9.6	45.3 - 48.2	90.6 - 96.3	136.0 - 144.5	181.3 - 192.6	226.6 - 240.8	271.9 - 288.9	317.2 - 337.1
2176 - 2321	15000 - 16000	8.5 - 9.1	42.5 - 45.3	85.0 - 90.6	127.5 - 136.0	170.0 - 181.3	212.4 - 226.6	254.9 - 271.9	297.4 - 317.2
2031 - 2176	14000 - 15000	7.9 - 8.5	39.7 - 42.5	79.3 - 85.0	119.0 - 127.5	158.6 - 170.0	198.3 - 212.4	237.9 - 254.9	277.6 - 297.4
1885 - 2031	13000 - 14000	7.4 - 7.9	36.8 - 39.7	73.6 - 79.3	110.5 - 119.0	147.3 - 158.6	184.1 - 198.3	220.9 - 237.9	257.8 - 277.6
1740 - 1885	12000 - 13000	6.8 - 7.4	34.0 - 36.8	68.0 - 73.6	102.0 - 110.5	136.0 - 147.3	170.0 - 184.1	203.9 - 220.9	237.9 - 257.8
1595 - 1740	11000 - 12000	6.2 - 6.8	31.2 - 34.0	62.3 - 68.0	93.5 - 102.0	124.6 - 136.0	155.8 - 170.0	186.9 - 203.9	218.1 - 237.9
1450 - 1595	10000 - 11000	5.7 - 6.2	28.3 - 31.2	56.7 - 62.3	85.0 - 93.5	113.3 - 124.6	141.6 - 155.8	170.0 - 186.9	198.3 - 218.1
1305 - 1450	9000 - 10000	5.1 - 5.7	25.5 - 28.3	51.0 - 56.7	76.5 - 85.0	102.0 - 113.3	127.5 - 141.6	153.0 - 170.0	178.5 - 198.3
1160 - 1305	8000 - 9000	4.5 - 5.1	22.7 - 25.5	45.3 - 51.0	68.0 - 76.5	90.6 - 102.0	113.3 - 127.5	136.0 - 153.0	158.6 - 178.5
1015 - 1160	7000 - 8000	4.0 - 4.5	19.8 - 22.7	39.7 - 45.3	59.5 - 68.0	79.3 - 90.6	99.1 - 113.3	119.0 - 136.0	138.8 - 158.6
870 - 1015	6000 - 7000	3.4 - 4.0	17.0 - 19.8	34.0 - 39.7	51.0 - 59.5	68.0 - 79.3	85.0 - 99.1	102.0 - 119.0	119.0 - 138.8
725 - 870	5000 - 6000	2.8 - 3.4	14.2 - 17.0	28.3 - 34.0	42.5 - 51.0	56.7 - 68.0	70.8 - 85.0	85.0 - 102.0	99.1 - 119.0
580 - 725	4000 - 5000	2.3 - 2.8	11.3 - 14.2	22.7 - 28.3	34.0 - 42.5	45.3 - 56.7	56.7 - 70.8	68.0 - 85.0	79.3 - 99.1
435 - 580	3000 - 4000	1.7 - 2.3	8.5 - 11.3	17.0 - 22.7	25.5 - 34.0	34.0 - 45.3	42.5 - 56.7	51.0 - 68.0	59.5 - 79.3
290 - 435	2000 - 3000	1.1 - 1.7	5.7 - 8.5	11.3 - 17.0	17.0 - 25.5	22.7 - 34.0	28.3 - 42.5	34.0 - 51.0	39.7 - 59.5
145 - 290	1000 - 2000	0.6 - 1.1	2.8 - 5.7	5.7 - 11.3	8.5 - 17.0	11.3 - 22.7	14.2 - 28.3	17.0 - 34.0	19.8 - 39.7
87 - 145	600 - 1000	0.3 - 0.6	1.7 - 2.8	3.4 - 5.7	5.1 - 8.5	6.8 - 11.3	8.5 - 14.2	10.2 - 17.0	11.9 - 19.8
		2	10	20	30	40	50	60	70
		kph							

Figura 1-22: *Tabla que relaciona los valores de presión y velocidad, mientras mayor es este valor, mayor será el daño provocado en los frenos.*

El formato de los archivos entregados por KOMTRAX se puede apreciar en mayor detalle en los anexos.
Actualmente esto no se utiliza para ningún análisis en particular, solo se tiene data histórica de estos parámetros.

1.14.2 MineCare de Modular Mining System.

Minecare es un sistema de Modular Mining con el que se puede mantener un alto nivel de supervisión y transparencia en toda la mina. Estos sistemas de gestión apoyan la toma de decisiones en la operación tanto para despachadores y administradores desde el inicio hasta el final de esta.

Minecare tiene la finalidad de incrementar la productividad y disponibilidad de los activos y reducir los costos de mantenimiento, esto a través de elementos como el monitoreo remoto de la condición del equipo, el manejo de eventos de alarmas y el estudio de tendencias. En general ayuda a todo el proceso de gestión del mantenimiento, proporcionando la información y herramientas necesarias para responder, rastrear, documentar, investigar, resolver y predecir temas relacionados al estado del equipamiento.

1.15 Normativas asociadas: ISO /WD 17359

La organización Internacional de Estandarización (ISO: the International Organization for Standardization) proporciona una guía para *el monitoreo de condición y diagnostico de las máquinas.*

La norma ISO 17359 es el grupo principal de estándares que cubre el campo de monitoreo y diagnóstico de condiciones. Establece los procedimientos generales que se deben tener en cuenta para organizar un programa de monitoreo de condiciones. Incluye referencias a otras normas internacionales que son necesarias para este proceso.

Esta norma internacional describe de forma general el procedimiento genérico recomendado a implementar en un programa de monitoreo de condición y además proporciona detalles sobre los pasos clave que se deben seguir. Introduce el concepto de modos y efectos de falla (FMECA), análisis de causa raíz (RCA) y describe el enfoque para establecer criterios de alarma y la confianza en el diagnóstico.

Los documentos necesarios para la aplicación de este documento son los siguientes:

- ISO 1925, *Mechanical Vibration – Balancing -Vocabulary*.
- ISO 2041, *Vibration and shock - Vocabulary.*
- ISO 13372, *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary.*

Un ítem importante que describe esta norma es el *Análisis de Costo Beneficio*. Un análisis de factibilidad y costo beneficio ayudará a establecer los indicadores de rendimiento y puntos de referencia para medir la efectividad de cualquier programa de monitoreo de condición. Los ítems que considerar incluyen:

- Costo de ciclo de vida.
- Costo de perdida de producción.
- Daño secuencial.
- Salud, seguridad y medioambiente
- Garantía y seguro.

La visión general del proceso para implementar un programa de monitoreo de condición que detalla la norma 17359 se puede apreciar en detalle en el diagrama de flujo en Figura **1-23**.

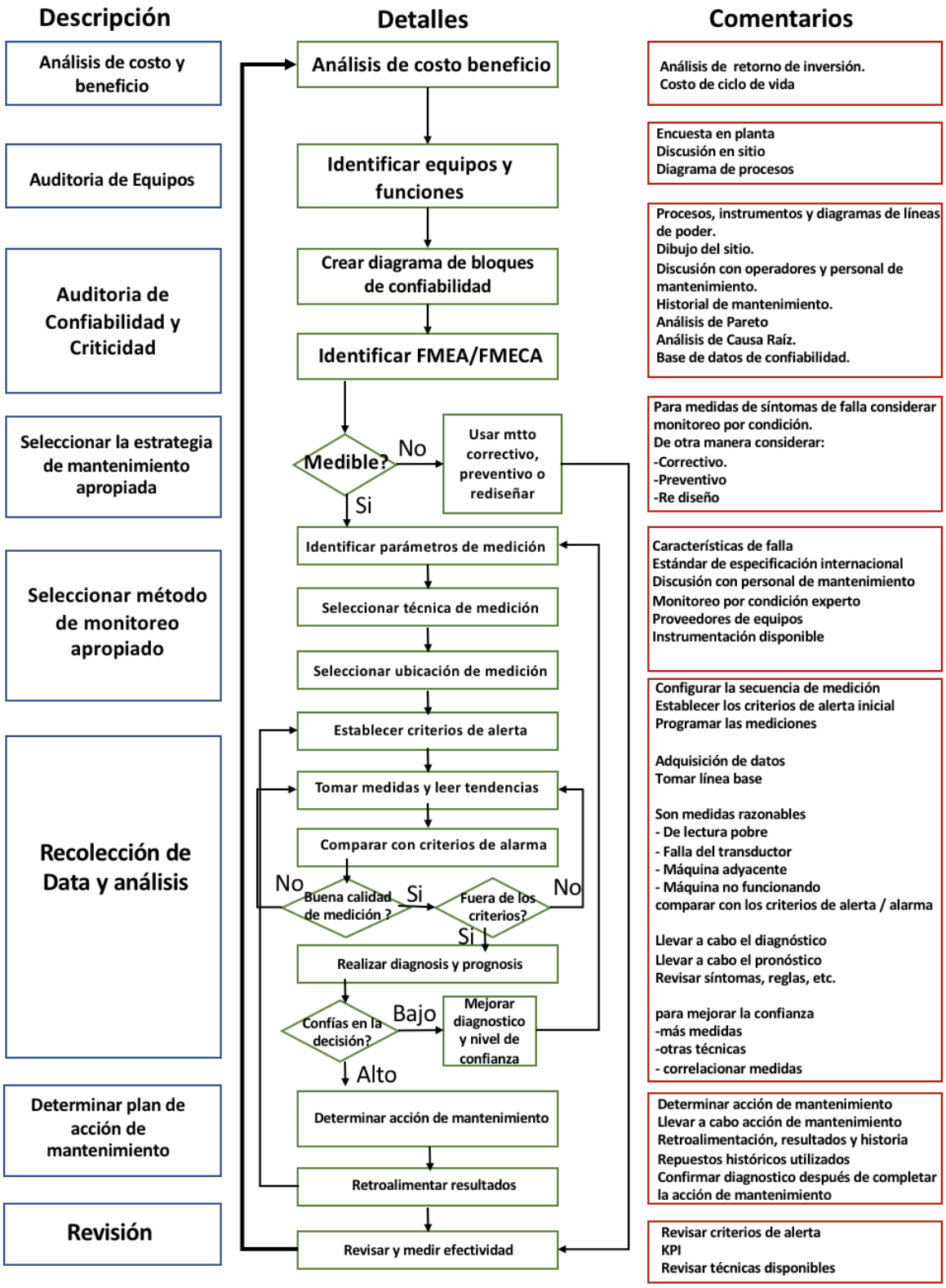


Figura 1-23: *Diagrama de flujo para un programa de monitoreo por condición.* Traducido desde norma ISO 17359 pag 3.

Cada uno de los ítems mencionados en la norma es tocado detalladamente por punto en este marco teórico, en base al alcance de este trabajo.

El punto 7 de la norma ISO 17359: *Reliability and criticaly audit.* Describe la confiabilidad y criticidad.

Acá son mencionados de forma general los diagramas de bloques de confiabilidad, los equipos críticos y los modos y efectos de fallas para análisis críticos (FMECA). Estos puntos son tocados en detalle en el ítem 1.9 Confiabilidad y diagrama de bloque (RBD) *y 1.10 Mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM).*

De igual forma, el punto 8 de la norma ISO 17359: *Monitoring method*, describe las técnicas de medida, la precisión de los parámetros de monitoreo, los intervalos de monitoreo y la adquisición de data entre algunas cosas. El detalle de esto se puede encontrar en los ítems *Análisis Predictivo* y ***¡Error! No se encuentra el origen de la r eferencia.*** en el *Marco Teórico* de este trabajo.

1.16 Síntesis de Marco Teórico.

Luego de haber hecho la revisión, investigación y desarrollo de los principales temas que intervienen en el proceso del desgaste y mantención del freno de servicio se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- Las políticas de mantenimiento de una compañía son primordiales asegurar el estado de operación de las maquinas y equipos. Es un servicio que incluye pruebas, inspecciones, ajustes, reemplazos, reinstalaciones, calibración, reparación, etc. Se basa en el desarrollo de conceptos, criterios y técnicas requeridas para establecer una guía de políticas para la toma de decisiones en la administración y aplicación de programas de mantenimiento. La función principal del mantenimiento es mantener un sistema productivo, afectando netamente en los recursos de la compañía.

- Para generar un programa de mantenimiento es primordial conocer en detalle el componente y su comportamiento. Aquí cumple un rol fundamental la confiabilidad, los diagramas de bloques (RBD) de los componentes involucrados, realizando RCA (Análisis de Causa Raíz) y determinando el modo de falla. Se debe evaluar como la compañía trabaja con el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) y como esto puede complementar un modelo en base a condición.

- El desgaste de los discos del freno de servicio, al igual que las pastillas en un auto, están sujetas a la operación, es por esto por lo que nunca se tendrá una exactitud sobre la fecha específica de falla, si no que siempre estará sujeto al comportamiento del operador, además de las condiciones de la faena y la sobrecarga del camión, que a su vez depende de otro operador, el de la pala.

- Es de suma importancia conocer las dimensiones del camión, ya que, sin duda, es un equipo que sobrepasa los volúmenes conocidos en todo sentido. El camión tiene más de un freno, es por esto por lo que se debe conocer la función de cada uno de estos y la operación del freno de servicio, para cuantificar como afectan las variables de presión y velocidad en el desgaste de los discos de fricción.

- Al proponer un modelo basado en condición (BCM) es de vital importancia en primera instancia conocer que es un análisis predictivo, de que forma se realiza, que requisitos debe cumplir la data para que sea funcional. En este punto es importantísima la información entregada por la normativa ISO 17359 la cual funciona como una guía para la determinación de la metodología a seguir para generar el modelo. Esta normativa se ve arduamente complementada con la información correspondiente en los otros ítems de este *Marco Teórico*. El trabajo será continuado por la *Metodología*, en el *capitulo II*, para luego entregar los *Resultados*, en el *capitulo III* y finalizar con las debidas *Conclusiones* y sugerencias.

- Si bien, el ideal de generar un BCM es reintegrar esto a las políticas de mantenimiento de la compañía, para esto se debe generar un plan de operaciones. Lo que significa una mayor trascendencia. Es por lo que el alcance del modelo de desgaste es netamente la propuesta de un BCM.

2. Capítulo II: Metodología

La realidad industrial está caracterizada por la enorme necesidad de explotar eficaz y eficientemente la maquinaria instalada y elevar a niveles superiores la actividad del mantenimiento. Es por esto, que se debe establecer sistemáticamente el proceso con el que se llevará la gestión para proponer una mejora en la forma de prevenir una falla, a través del comportamiento basado en la operación de los equipos.

La metodología utilizada se separará en dos etapas. La primera, es la creación de un informe de control operacional basado en la data de Modular Mining System. Con este informe se conocerá la realidad de las activaciones de freno de servicio, georreferenciadas en la faena, entregando información a los interesados respecto a la mala operación del camión. La segunda, para la etapa de la propuesta de predicción de falla para el freno de servicio, se detallarán 5 pasos con que se podrá implementar un programa de mantenimiento basado en la operación. Se puede ver con mayor visibilidad esto en el esquema a continuación:

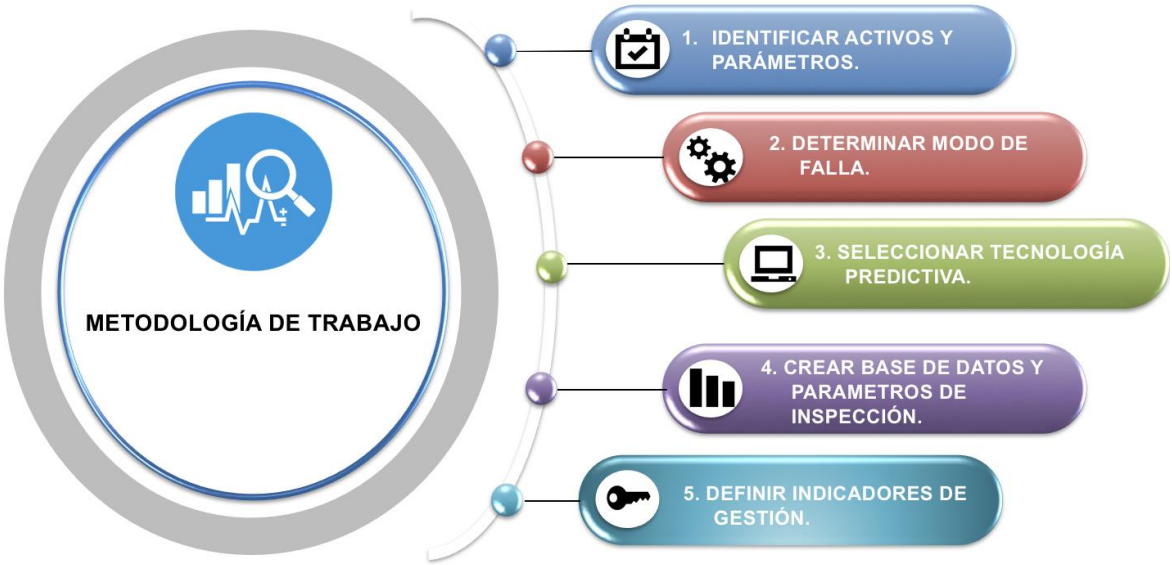


Figura 2-1: Esquema sobre la metodología a utilizar.

1. **Identificar los activos y parámetros:**

Se debe identificar el componente que será monitoreado basándose en la criticidad del equipo. La pregunta central es: ¿Cuál es la frecuencia e impacto en la seguridad? Para

esto, es necesario ocupar técnicas de confiabilidad, diagrama de bloques, disponibilidad de los componentes y subcomponentes.

2. **Determinar el modo y efecto de falla de los equipos seleccionados:**

Se deben conocer cuáles son los mecanismos que pueden desencadenar en una falla y las consecuencias en las operaciones, los costos, la accidentabilidad. Se requiere el conocimiento de la maquinaria desde el punto de vista mecánico y operacional, y saber cómo están conformados y trabajan los componentes involucrados para captar los síntomas de estas fallas en su estado prematuro.

3. **Seleccionar tecnología predictiva:**

El "lenguaje" de la maquinaria es cómo la maquina expresa su salud a través de diversos parámetros. Esto es clave para seleccionar la tecnología adecuada para captar las condiciones anormales en estado prematuro. Estas tecnologías especializadas miden y registran variables representativas de la salud de la maquinaria, a un nivel tal que se pueda hacer seguimiento de la evolución de los diversos problemas detectados y activen el potencial de planificación y programación del mantenimiento.

4. **Crear la base de datos de la maquinaria, parámetros de inspección, definir estándares permisibles y la frecuencia de inspección:**

En este punto se evaluará qué medir y contra qué hay que compararlo. Cada aplicación predictiva cuenta con diferentes parámetros de inspección definidos y configurados para registrar condiciones particulares que identifiquen un modo de falla característico.

Se trata de la configuración de la inspección al detalle, definir las variables que mejor representen la condición del activo. Estableciendo, ¿cuáles son los niveles estándares de aceptación del dato? Además, se deben definir todo el resto de los parámetros subjetivos útiles para detectar las condiciones anormales.

5. **Definir indicadores de gestión:**

Se deben reportar los resultados, donde el proceso de comunicación es un factor importante en la efectividad del sistema. Se debe hacer seguimiento también a los aspectos que reflejen un impacto positivo. Por ejemplo, si ha disminuido el mantenimiento de emergencia y las fallas recurrentes. La empresa deberá contar con indicadores de gestión que traduzcan todo esto.

Tanto para la construcción del material para el informe de control operacional, como para la propuesta de falla predictiva, el componente estudiado es el mismo: el freno de servicio.

La forma de operar viene dada por lo mencionado en el primer capítulo. Se comentará sobre la metodología para la construcción del informe de control operacional, para luego dar paso a la propuesta de modelo predictivo.

El modo y efecto de falla para el conjunto de freno de servicio, tal como se mencionó en el primer capítulo, es por fricción en el disco de freno. Además, como ya se ha señalado, podemos identificar que la operación juega un rol importantísimo en la vida remanente de este componente, debido a que mientras más severa sea la tensión de éste, la presión entre las placas separadoras y los discos de fricción será mayor. De esta forma, si la fricción será mayor, por consecuencia habrá más desgaste abrasivo (Ferdinand, Johnston, John, & David, 2007).

De lo anterior, se desprende que el punto 1 y 2 de la metodología, es igual tanto para el informe de control operacional como para la propuesta de modelo predictivo.

2.1 Informe de control operacional.

Tecnología predictiva:

Para la construcción del informe de control operacional, la tecnología predictiva encargada de la selección de variables es MineCare de Modular Mining System, mencionada en los parámetros de medición del capitulo I.

Se selecciona este sistema, ya que posee una frecuencia de muestreo de 2 segundos, mayor a cualquier otro sistema de monitoreo con el que cuente la compañía. El sistema MineCare carece de data histórica. La instalación para la faena minera se estableció a finales del año 2016, por lo que no se puede construir el historial completo de la vida remanente de un componente. Sin embargo, es muy efectivo para ventanas temporales pequeñas. El software utilizado para programar y graficar es Python.

Creación de base de datos y parámetros de inspección:

Como fue mencionado en el primer capítulo, el software *MineCare* puede responder a alarmas estipuladas por el cliente o quien este encargado del monitoreo de los equipos. Para este caso, un sensor en el pedal de freno detecta si el freno de servicio fue activado, entregando esta información de forma binaria (1 o 0), tomando "*snapshot"* o capturas de pantalla de las variables del camión al momento de la activación de éste. Los parámetros de inspección seleccionados para construir el informe de control operacional son la velocidad, la carga, el tiempo de aplicación y la inclinación del camión, todos estos se revelan al momento en que se activó el freno de servicio.

La selección de estas variables se basa en la Ley de Conservación de Energía, bajo el supuesto de que la energía cinética del camión en el momento de activar el freno de servicio se transmite a calor, en los discos de freno por fricción. Sabemos que existen perdidas de energía, por lo tanto

$$\Delta U = Q - W \ (1)$$

La ecuación de energía cinética viene dada por,

$$E_{cinética} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \Delta v^2 (2)$$

Luego, como la variable temporal es fundamental en el desgaste del disco, es decir, mientras mayor tiempo tengo friccionado el disco de freno,acontece mayor desgaste. Se procede a calcular la potencia disipada por esta aplicación.

$$Pot = \frac{E_{cinética}}{t} (3)$$

Como fue mencionado, la data proveniente de MineCare registra "*snapshot"* con una frecuencia de muestreo cada 2 segundos, esta captura guarda la activación de freno de servicio ("Brake On"), la velocidad ("Truck Speed"), la carga ("Payload"), el tiempo y la inclinación para cada camión. La data viene en formato de archivo CSV en Excel y se trabaja de la forma preestablecida. El formato en el que vienen los datos se puede apreciar en Anexo.

El archivo actualmente se debe descargar de forma manual, pero la compañía pretende en un corto plazo mantener toda esta información en un *Data Lake*, para que los algoritmos funcionen de forma remota y continua.

El proceso para leer la data es un poco engorroso, por lo que en primera instancia se crea un algoritmo que reescribe el archivo, dejándolo de una manera más simple de trabajar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	EqmtName,EqmtName3,EqmtName2,EqmtName5,Textbox4,textbox3,ParamTimeLog,OemParamTypeId,OemParamName,textbox2										
2	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,33619973,Incline Angle,6.93										
3	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,33619974,Speed,13.00										
4	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,33619978,PayLoad,341.10										
5	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,1040252941,Hydraulic Brake Temperature,0.00										
6	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,1040253167,Retard Mode,0.00										
7	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:08,1040253177,Brakes On,0.00										
8	CA,00,11-05-2017 22:45:36,647-1,NULL,ReadTime,11-05-2017 22:45:10,33619973,Incline Angle,7.04										

Figura 2-2: *Archivo CSV leído en Excel proveniente de manera cruda desde MineCare por Modular Mining System.*

El primer algoritmo utilizado tiene la finalidad de reescribir el archivo. Básicamente los datos que vienen de manera horizontal los reescribe en otro archivo CSV de manera vertical, de esta forma el segundo algoritmo podrá leer de una manera más simple y rápida los datos a estudiar.

La reestructuración del archivo se puede apreciar en la Figura 2-3.

	A	B	C	D
1	00,11-05-2017 22:45:08,6.9,13.0,341.1,0.0,0.0,0.0			
2	00,11-05-2017 22:45:10,7.0,13.0,330.2,0.0,0.0,0.0			
3	00,11-05-2017 22:45:12,,,,0.0,0.0,0.0			
4	00,11-05-2017 22:45:14,5.9,15.0,314.7,0.0,0.0,0.0			
5	00,11-05-2017 22:45:16,,,,0.0,0.0,0.0			
6	00,11-05-2017 22:45:18,4.5,15.0,316.6,0.0,0.0,0.0			
7	00,11-05-2017 22:45:20,3.0,22.0,397.3,0.0,0.0,0.0			
8	00,11-05-2017 22:45:22,0.3,22.0,451.7,0.0,0.0,0.0			
9	00,11-05-2017 22:45:24,0.5,23.0,312.0,0.0,0.0,0.0			
10	00,11-05-2017 22:45:26,2.9,24.0,305.7,0.0,0.0,0.0			
11	00,11-05-2017 22:45:28,-5.1,24.0,280.3,,,			
12	00,11-05-2017 22:45:30,-0.1,23.0,415.4,0.0,0.0,0.0			

Figura 2-3: *Archivo CSV reestructurado.*

Los beneficios de leer el archivo de esta forma, es que para cada activación se tiene solo una fila; y cada valor de esta fila se asignara a una columna que representa un parámetro de medición. Los parámetros mostrados en la Figura 2-3 son respectivamente: *"CA, FECHA, Incline Angle, Speed, Payload, Truck Speed, Hydraulic Brake Temperature, Retard Mode, Brakes On"*

Se guardarán estos parámetros para asignar ciertas reglas que calculen la energía cinética y la potencia según las *ecuaciones 2* y *3*.

Algoritmo

De manera muy general, el algoritmo recibe uno o todos los camiones que uno seleccione y realiza un conjunto de operaciones sistemáticas.

En primera instancia va a leer la columna de *"Brakes On"*, la cual funciona de manera binaria (1 o 0) y en caso de detectar una activación de freno de servicio (1) guardará otros parámetros involucrados.
Los parámetros guardados son básicamente nuestras variables de interés: *"Payload", "Truck Speed", "Fecha", "Incline Angle".* Entonces, esencialmente se tendrán todos estos parámetros para cada vez que el operador active el freno.

Ahora, otro paso importante es que el algoritmo determine cuándo se dejó de activar el freno. Cuando ocurra esto, se guardará nuevamente la velocidad y la fecha.

Entonces, se tendrá:

$\Delta t: Delta\ tiempo.$
$\Delta v: Delta\ velocidad.$
$P: Carga.$
$i: ángulo\ de\ inclinación.$

La carga del camión representará la masa de este para la *ecuación 2*, pero el dato de "Payload" solo guarda la carga que transporta el camión sobre la tolva. Así, para el análisis del desgaste del disco de freno también es necesario considerar la carga del camión. Por esto, la *ecuación 3* se puede reescribir de la siguiente forma,

$$Pot = \frac{\frac{1}{2} \cdot (P + 210.8) \cdot \Delta v^2}{\Delta t} \quad (4)$$

Donde 210.8 equivale al peso del camión sin carga, en toneladas. A través de un análisis dimensional podemos darnos cuenta que el valor de la potencia será en kW.

Ahora, con el valor de la potencia calculada para cada activación y en pro de una mayor visibilidad en el informe de control operacional, se hará una geo referenciación de cada una de estas activaciones.

Para esto se utilizará otro archivo, proveniente de PLM (*Payload Meter*), quien es el gestor de carguío de MineCare y tiene ciertos datos de importancia para la geo referenciación. El archivo viene en formato CSV y se ve de la siguiente manera.

	A
1	Model: Generic Truck,CA100,Invertex,647 -- 1,1040317629 - Service Brake @ Speed,Non-Critical,Mar-11-2017 21:45:47,0,N/A,017620283 - Puelles P. Rodolfo B.
2	Model: Generic Truck,CA100,Invertex,647 -- 1,1040317629 - Service Brake @ Speed,Non-Critical,Mar-14-2017 16:45:35,0,N/A,015825500 - Miranda G. Jorge D.
3	Model: Generic Truck,CA100,Invertex,647 -- 1,1040317629 - Service Brake @ Speed,Non-Critical,Mar-16-2017 08:16:34,0,N/A,010861440 - Cortez M. Cristian
4	Model: Generic Truck,CA101,Invertex,647 -- 1,1040317629 - Service Brake @ Speed,Non-Critical,Mar-14-2017 01:58:19,0,"10207392,000000:2384000,250000",011823956 - Torres C. Claudio N
5	Model: Generic Truck,CA101,Invertex,647 -- 1,1040317629 - Service Brake @ Speed,Non-Critical,Mar-14-2017 02:43:23,0,"10207392,000000:2384000,250000",011823956 - Torres C. Claudio N

Figura 2-4: *Archivo CSV proveniente de PLM. A través de este archivo se puede hacer la geo referenciación de las activaciones de freno de servicio.*

Básicamente, de este archivo extraeremos 4 parámetros: la fecha, el camión, el GPS y el ID del operador.

Entonces, se tendrán dos parámetros que se repiten tanto del primer archivo como en el PLM. Es acá donde se debe establecer una regla que establezca que cuando el camión y la fecha sea la misma, acumule los datos, es decir, ahora a la carga, inclinación, delta velocidad y delta tiempo se sumaran el GPS en faena y el ID del operador.

Ahora, se debe introducir la imagen de la faena para poder graficar los puntos con las activaciones sobre ésta. Entonces, se debe escalar el GPS para ajustar esta imagen. Se debe recordar que la faena a analizar es solo una.

Figura 2-5: *Imagen a escala de la faena minera, donde serán geo referenciado los datos de activaciones de freno de servicio para un futuro informe de control operacional.*

Ahora, solo queda graficar los puntos sobre la Figura 2-5. Esto puede entregar diferente información según lo que se desee, por ejemplo, se puede graficar la potencia disipada, la velocidad o inclinación al momento de la activación y la velocidad por zona. Asimismo, el informe puede incluir la información del operador y realizar análisis a través de esto; por ejemplo, que operadores activaron el freno más veces fuera de norma.

En la Figura 2-6 se puede apreciar un esquema en formato de mapa conceptual de cómo funciona el algoritmo, esto permite clarificar de mejor forma.

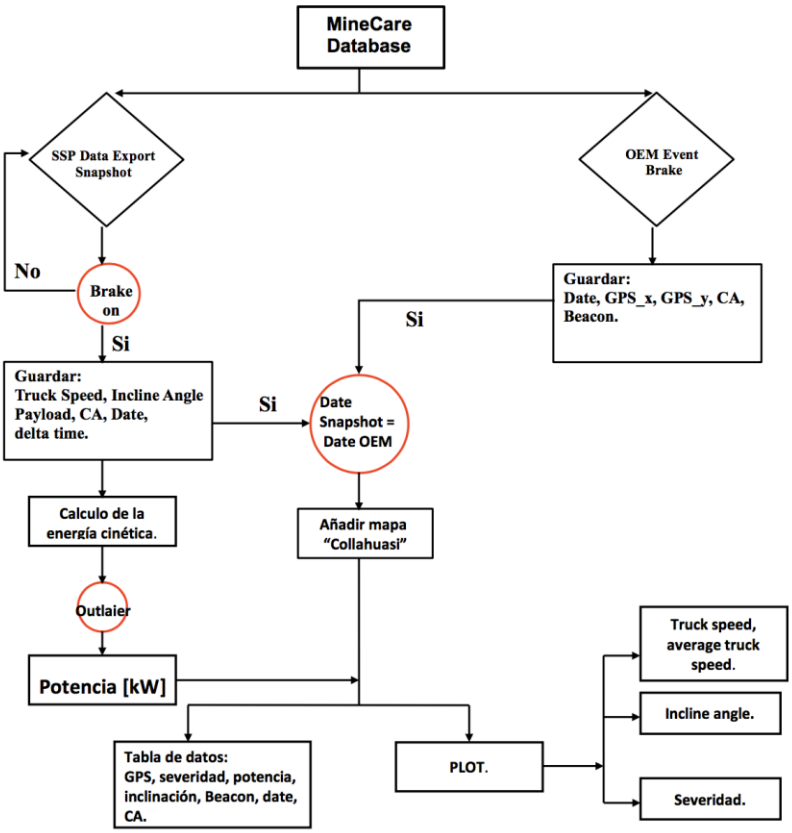


Figura 2-6: *Mapa conceptual del Algoritmo ocupado para la construcción de los gráficos incluidos en el informe del control operacional.*

Por último, cabe destacar que el algoritmo está diseñado para cualquier ventana temporal, tanto para un camión como varios según elección.

Definir indicadores de gestión:

Los indicadores de gestión para el informe de control operacional serán representados en el ítem de ***Resultados***.

2.2 Propuesta de modelo predictivo para el desgaste del disco de freno de servicio.

Los activos que evaluar, el modo y efecto de falla de estos, es el mismo que para el ítem 2.1, es por lo que no se reiterara.

Tecnología predictiva:

Para el caso de la propuesta de modelo predictivo para la vida remanente del freno de servicio, la tecnología predictiva a utilizar proviene de KOMTRAX, tal como se explicó en los parámetros de medición del capitulo I. Se selecciona esta data, debido a que si bien no tiene una frecuencia de muestreo tan alta como la de Modular Mining System, sí existe una data histórica suficiente para tener la vida total de un freno de servicio. Generalmente un freno de servicio tiene un TBO de 14.000 horas, donde en la mayoría de los casos se trabajan 500 horas por mes, es decir, se necesita tener información de aproximadamente 28 meses.

Por otro lado, aunque se tenga la data histórica del componente, es necesario obtener información de fallas asociadas a cierta fecha o SMR y de cambio de componente. Para esto, se le solicita al departamento de planificación esta información.

Creación de base de datos y parámetros de inspección:

De KOMTRAX obtendremos dos parámetros importantísimos. El primero consiste en el "Brake Power", que se traduce en el poder de frenado del camión, lo que tiene relación directa con la presión y la velocidad al momento de aplicar el freno de servicio y tendrá un valor más alto mientras mayor sea la severidad de la aplicación. El segundo, tiene que ver con el registro de temperaturas del aceite hidráulico del camión para cada rueda. Este aceite es el encargado de lubricar y enfriar el freno de servicio.

Se utilizarán una serie de hipótesis basadas en los conocimientos mecánicos y físicos.

1. El desgaste del disco de freno es acumulativo, es decir por cada activación se friccionan los discos y estos disminuyen su espesor. Luego de llegar a cierta acumulación de este valor el disco debería tender a fallar.
2. Al considerar la data histórica para formular el modelo se deben acumular los datos de los camiones que fallaron. Para esto se debe hacer un primer filtro con el TBO. Si el TBO del camión a analizar escapa mucho del TBO promedio, la falla de ese camión se atribuye a algún problema no operacional, es decir, una mala mantención, mala lubricación, falla de fábrica o cualquier agente externo a la operación.
3. A través de la ecuación de calor, a medida que se genere fricción en el freno y no se realice un cambio de aceite en el sistema hidráulico, este calor se debería representar a través de un aumento de temperatura. Esto según la *ecuación 5*.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T (5)$$

4. Se asumirá que la masa del aceite en el sistema hidráulico no cambia, lo que en teoría no es así, ya que se pueden producir fugas o perdidas.
5. Se supondrá que el calor especifico "c" de la *ecuación 5* no cambia.

Los camiones utilizados para entrenar el modelo, mencionado en el punto 2, se pueden apreciar en la siguiente tabla.

N° CAMIÓN	SMR INICIAL	SMR FINAL	TBO
CA85	26621	42271	15650
CA83	26012	42352	16340
CA100	22815	39676	16861
CA102	27175	43141	15966
CA108	19590	36052	16462

Tabla 1.- Camiones utilizados para entrenar modelo. A través de ellos se genera curva operacional a la que estarán sujetas los camiones para hacer las predicciones necesarias.

El dato de KOMTRAX registra la problemática de que solo se pueden bajar archivos de 3 meses. Por esto que se crea un primer algoritmo capaz de tomar todos los archivos con esta ventana temporal reducida, y se los une formando un solo archivo con toda la información. Se recopila data desde el año 2013.

Al igual que para el informe de control operacional, el *software* utilizado para la programación de estos algoritmos es *Python*.

Para la creación de la base de datos utilizada por el modelo se deben seguir una serie de pasos a documentar:

1. Primero se debe tomar una tabla de los camiones en los que falló el freno de servicio por imprevisto. Esta tabla es solicitada a Faena (unidad de gestión) con fallas del año 2016-2017. Cuenta con la fecha de cambio, el número de camión, el horómetro del equipo al momento de la falla (SMR) y el TBO del componente.
2. Con el SMR final del componente y el TBO de este se puede obtener el SMR inicial, es decir, cuando fue instalado el freno de servicio a estudiar. Esto queda más claro en la *Tabla 1*.

Figura 2-7: *Esquema de la vida útil del componente. Para el modelo es necesario tener SMR inicial y TBO.*

3. A través del algoritmo se debe revisar la data para los camiones que presentaron falla. Esta data no puede tener saltos temporales, es decir, debe ser continua desde el SMR inicial hasta el SMR final. Si se presenta esto no se considera el camión.
4. A través del algoritmo se evalúa si los valores de la data son típicos, es decir no escapan de los márgenes habituales. En el caso que no fuera así, se atribuye a un error de sensor y no se considera el camión con este problema.

Luego de realizar los filtros enumerados, el algoritmo comienza a acumular el dato de "Brake Power" dentro de los SMR, estipulados en la vida remanente del componente. Con esta data se calculan ciertas variables estadísticas, la potencia y la desviación estándar. Con la potencia promedio acumulada y el TBO promedio, se genera una línea de tendencia a través de la *ecuación 6*.

$$y_2 - y_1 = m \cdot (x_2 - x_1) (6)$$

Luego, utilizando nuevamente la *ecuación 6* pero ahora con el TBO nominal, se genera otra recta. El TBO nominal es entregado por el departamento de confiabilidad y tiene un valor de 19.500 horas. La tabla con los camiones con fallas a utilizar se encuentra en ***Anexos***.

Ahora, para probar el modelo, se le pide al algoritmo que acumule los datos para un camión que presento falla y ver cómo se comporta frente a la curva operacional. Esto se prueba para todos los camiones que presentaron falla y se escoge un parámetro de ajuste. El parámetro de ajuste se selecciona a través de inspección visual evaluando el gráfico.

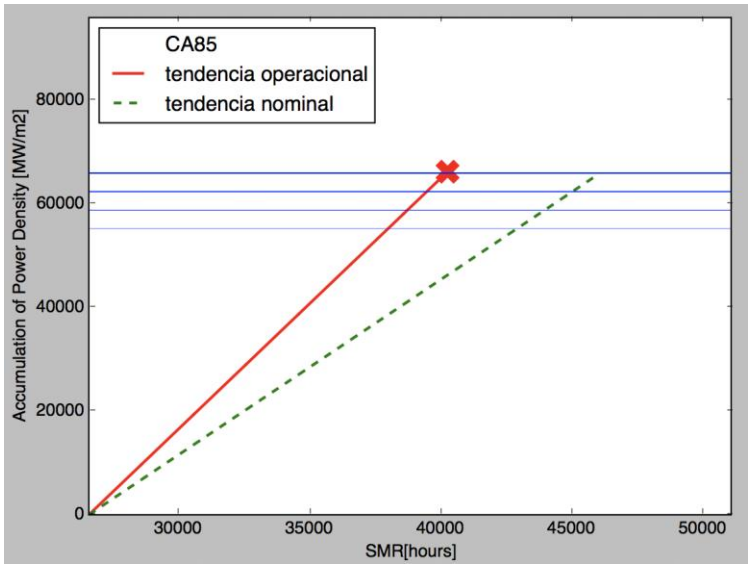


Gráfico 2-1: *Gráfico de la tendencia operacional y nominal para el modelo predictivo de desgaste. Las líneas en azul denotan las desviaciones estándar.*

Teniendo esta información, ya se le puede pedir al algoritmo cualquier camión, solo se le debe ingresar el número de camión, SMR inicial, TBO a evaluar. Esto se establece de la siguiente manera:

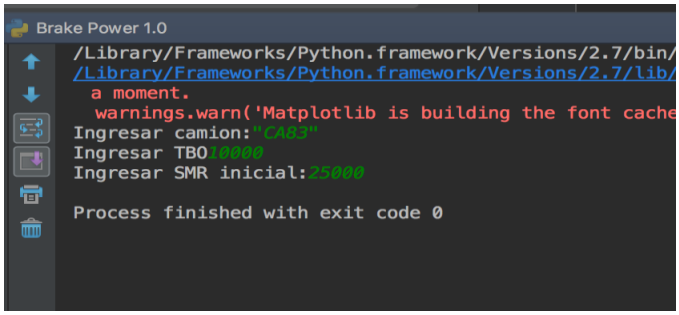


Figura 2-8: *Datos solicitados por el algoritmo para evaluar el desgaste del freno de servicio.*

Por otro lado, se consideran umbrales de severidad en la activación del freno de servicio.

1. Activación moderada: [0,102]
2. Activación media: [102, 153]
3. Activación severa: ≥ 153

Se hace un contador para cada uno de los umbrales. Los resultados de las pruebas para camiones serán mostrados en el ítem de ***Resultados***.

2.2.1 Análisis de temperaturas.

En la creación de data para este proyecto se consideraron las temperaturas del aceite de lubricación y enfriamiento del sistema hidráulico, detectadas por los sensores mostrados en la Figura **1-20**.

A través de la *ecuación 5*, teóricamente podemos decir que la temperatura sería un buen parámetro para medir el aumento de calor en el aceite, esto vendría dado por la fricción en los discos, lo que desencadenaría en el desgaste del freno.

Antes de incorporar este parámetro al modelo, se debe estudiar el comportamiento de estas temperaturas antes de la falla, a través de esto se pudo obtener los siguientes gráficos.

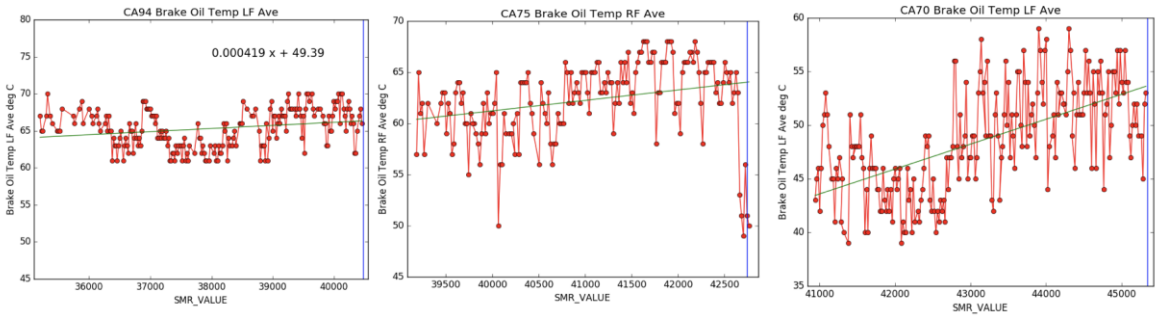


Gráfico 2-2: *CA94, CA75 y CA70 antes de fallar para faena minera. Se aprecia tendencia al alza.*

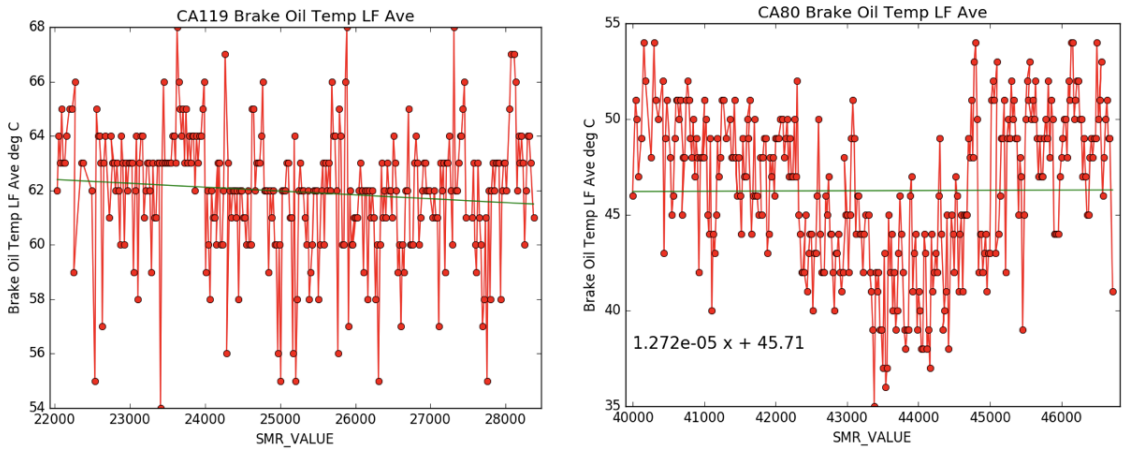


Gráfico 2-3: *CA119 y CA80 en ventana temporal aleatoria en faena minera. No se aprecia tendencia aparente.*

Se estudiaron ciertos camiones que presentaron falla (Gráfico 2-2) y otros sin falla conocida, en ventanas temporales aleatorias (Gráfico 2-3). Sobre esto se puede apreciar que los camiones cercanos a la falla generan una tendencia al alza, de hecho, se hizo una regresión lineal para ver la pendiente de estos datos y se obtuvieron valores positivos. Con respecto a los camiones sin falla aparente, no se pudo apreciar una tendencia al alza.

Ahora, en forma de *SubPlot* se grafican los camiones CA100, CA102, CA55 y CA 93 antes de la falla, esto se puede apreciar en los gráficos a continuación:

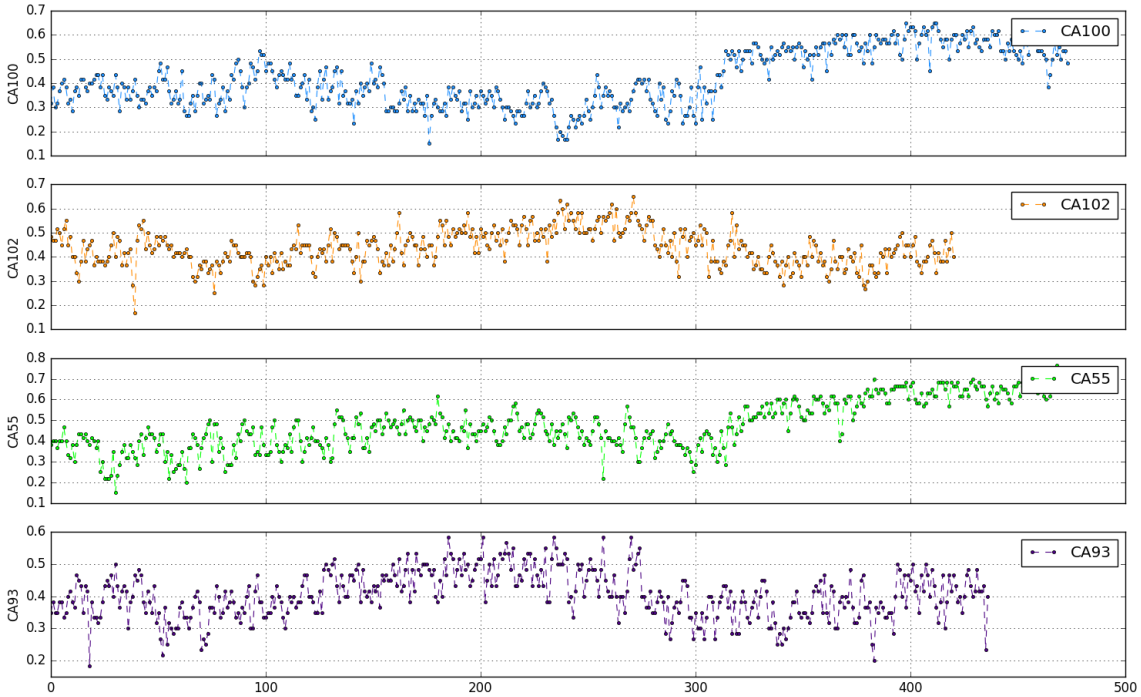


Gráfico 2-4: *CA100, CA102, CA55 y CA93 antes de fallar en faena minera. Para el caso del camión CA55 y CA100 se aprecia un alza considerable antes de la falla. Se realiza una normalización entre [0,1] para hacer más visible los resultados.*

A través de esta metodología se agregará al modelo la medición del parámetro de temperatura, así se le agregará valor al resultado y se entregará más información sobre el estado del freno de servicio.

3. Capítulo III: Resultados

En este capítulo se presentarán todos los resultados obtenidos aplicando las metodologías mencionadas en el capítulo anterior. Para esto se hará la misma separación que en la metodología, es decir en primera instancia los resultados para el control operacional y en la segunda los del modelo de desgaste del freno de servicio.

Como fue mencionado en el ítem de ***Metodología*** se presentarán los indicadores de gestión mostrando los resultados de una forma visible y fácil de interpretar.

3.1 Resultados informe de control operacional.

En este ítem se mostrarán todos los resultados obtenidos a través de los algoritmos y que se adjuntarán en el informe de control operacional con que la compañía informara a la faena minera sobre la operación de sus equipos.

Severidad de aplicación:

El Gráfico 3-1 adjunto tiene que ver con la severidad de aplicación, como fue mencionado en el ítem 1.3, por fabrica los camiones tienen limitaciones de velocidad para activar el freno de servicio, por ejemplo, si un camión disipa 1000 kW, bajo los supuestos establecidos y utilizando la *ecuación 4* y con una carga de 300 toneladas, lo que es muy normal en la faena minera, significaría que el camión disminuye su velocidad en 10.8 kph en 2 segundos, lo que para cualquier parámetro es dañino y se encuentra totalmente fuera de estándares. A través de un estadístico simple se conoce que el 13% de las veces se disipan más de 1000 kW.

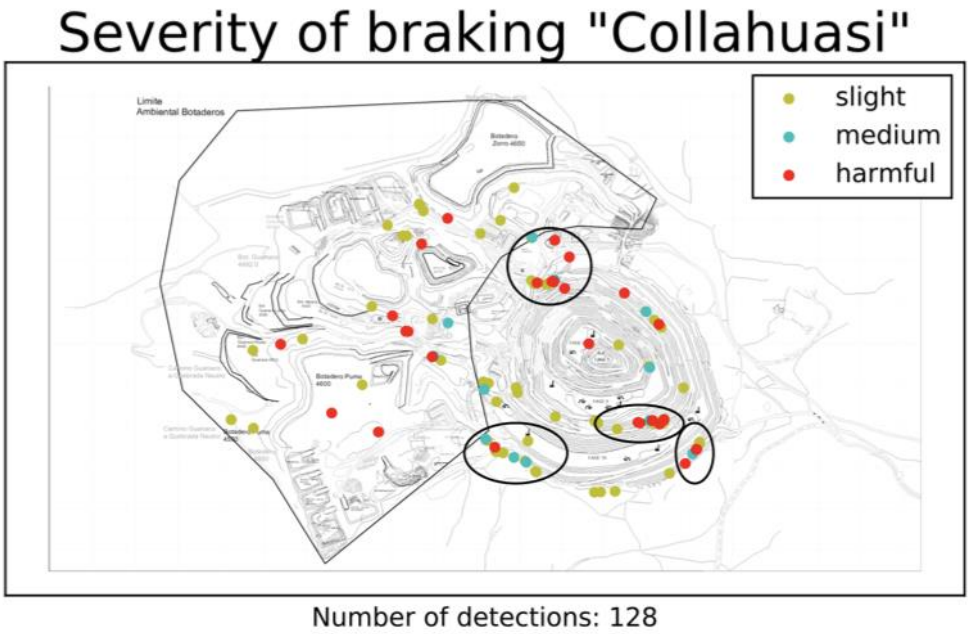


Gráfico 3-1: *Severidad de aplicación de freno de servicio, separado por umbrales. Cada color se atribuye a un umbral según la leyenda presente en el lado superior derecho. En este caso se tomó el mes de diciembre para todos los camiones disponibles.*

Velocidad al momento de aplicación:

Otro punto importante al momento de obtener resultados es evaluar la velocidad del camión al momento en que se activó el freno de servicio.

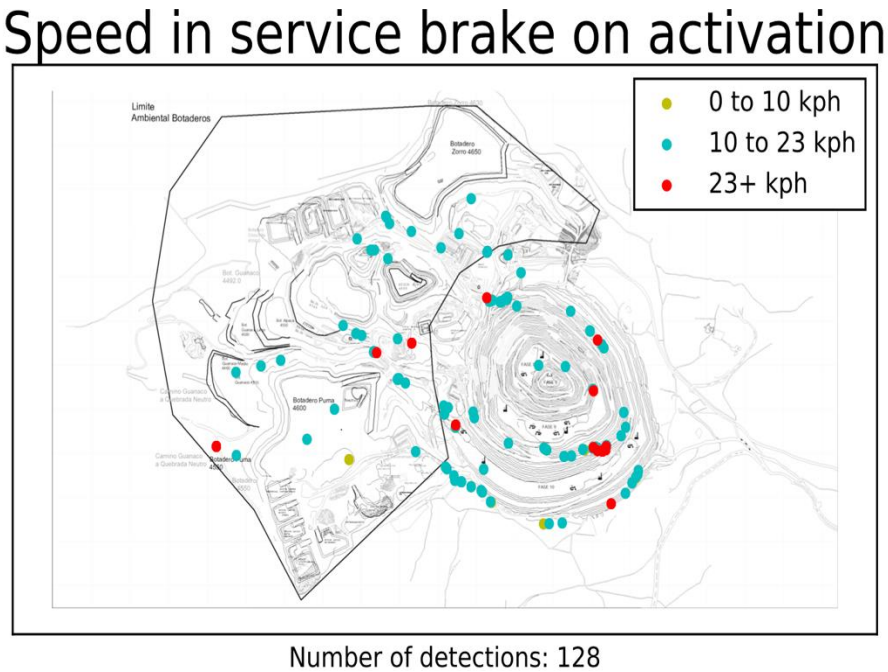


Gráfico 3-2: *Velocidad del camión al momento de activar el freno de servicio, se separa en 3 umbrales y se ocupa la misma ventana temporal que en el gráfico 1.*

Otro resultado importante a considerar es el promedio de la velocidad de las zonas, ya que esto puede significar un problema en el camino. Se verá más en detalle en el ítem de ***Conclusiones***.

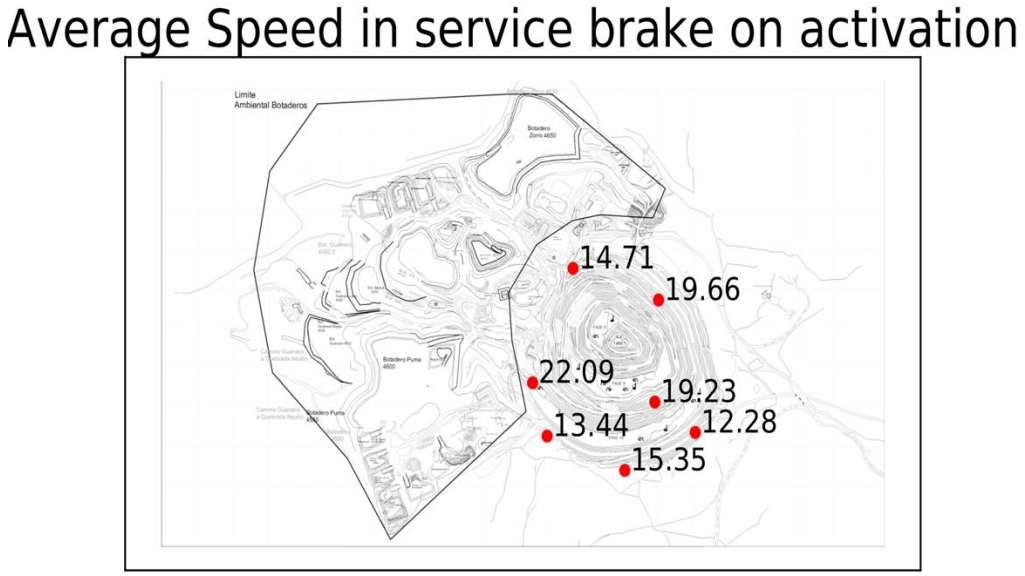


Gráfico 3-3: *Promedio de la velocidad del camión por zona. Se consideran las zonas con mayor frecuencia de activación. La ventana temporal es la misma que en los gráficos anteriores.*

Inclinación al momento de aplicación:

Existen dos razones importantes por las que se debe considerar la inclinación al momento de efectuar la aplicación del freno de servicio. Primero, el freno de servicio sufrirá más daño si es que existe una pendiente, acumulara más energía por el simple concepto de una energía potencial adicional. Por otro lado, y quizás lo más importante en este punto, es que la faena tiene por norma que la pendiente equivalente de la zona no puede superar los 9°. En el Gráfico **3-4** se puede notar que en color rojo se muestran los puntos donde se superó está pendiente, lo que puede representar un problema en el camino.

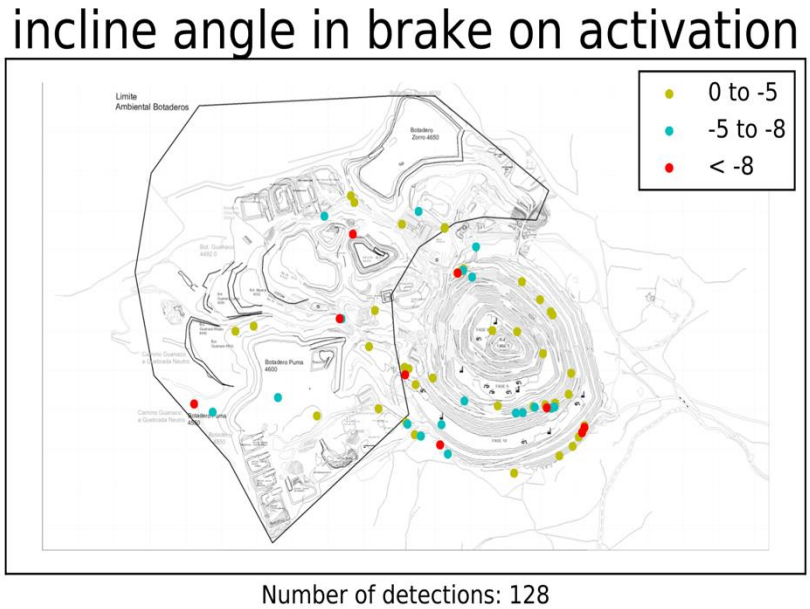


Gráfico 3-4: *Angulo de inclinación al momento de activar el freno de servicio. Geo referenciado en la faena para la misma ventana temporal que los gráficos anteriores.*

Por último, se toma un valor de potencia como referencia, a través de criterio experto y se hace una razón con el promedio de la potencia por zona. De esta forma se puede tener una severidad por zona y así conocer que zona es más severa que otra. También tiene que ver con el camino.

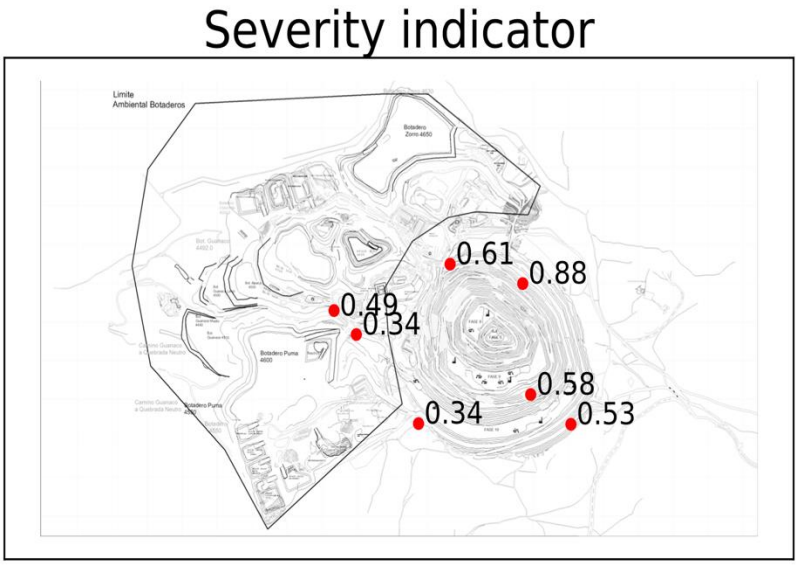


Gráfico 3-5: *Severidad por zona. Se calcula el promedio de la zona en razón al valor de 1516.81 [kW] (Criterio experto). Los datos son considerados en la misma ventana temporal que los gráficos anteriores.*

Finalmente, se utiliza el dato de la ID del operador, para entregar una tabla con el nombre del operador, el camión que estaba operando, la velocidad a la que activo el freno, el porcentaje de severidad y la potencia.

CA	ID	Speed[kph]	Severity Indicator %	pow[kW]
125	013985947 - Lopez C. Juan P.	14	121.14	1837.48
125	013985947 - Lopez C. Juan P.	14	13.46	204.10
125	010367274 - Mancilla V. Daniel	21.59	83.92	1272.92
125	010367274 - Mancilla V. Daniel	15.4	70.39	1067.67
128	013010087 - Fuentes S. Ernesto	18.99	51.53	781.56
129	007716857 - Rivera M. Jose L.	18.29	22.68	344.09
129	007716857 - Rivera M. Jose L.	19.09	59.95	909.37
129	007716857 - Rivera M. Jose L.	18.99	4.98	75.61
129	007716857 - Rivera M. Jose L.	18.29	94.14	1427.91
129	017096416 - Cruz C.Luis G.	19.09	15.21	230.66

Figura 3-1: *Tabla adjunta en informe de control operacional para la faena minera. Misma ventana temporal que los gráficos anteriores.*

3.2 Resultados propuesta de modelo predictivo para el freno de servicio.

En este ítem se mostrarán todos los resultados obtenidos a través de los algoritmos presentes en la propuesta de modelo de desgaste del freno de servicio.

Como se pudo apreciar en el *Gráfico 2-1* se tiene una curva nominal y otra operacional. La curva nominal se encuentra sujeta al TBO nominal, entregado por el departamento de confiabilidad, mientras que la curva operacional viene dada por el comportamiento de los camiones sobre cuales se plantea el modelo.

Como se muestra en la Figura 2-8, el algoritmo exige una serie de datos mínimos para estudiar el comportamiento operacional de cierto camión. Se debe indicar que camión se quiere observar, el SMR inicial del freno de servicio y el TBO en el que se quiera saber la información. Por ejemplo, En el Gráfico 3-6 se pide calcular el comportamiento operacional para el camión "CA97" quien tiene un SMR inicial de 25.000 horas y actualmente tiene 35.000 horas.

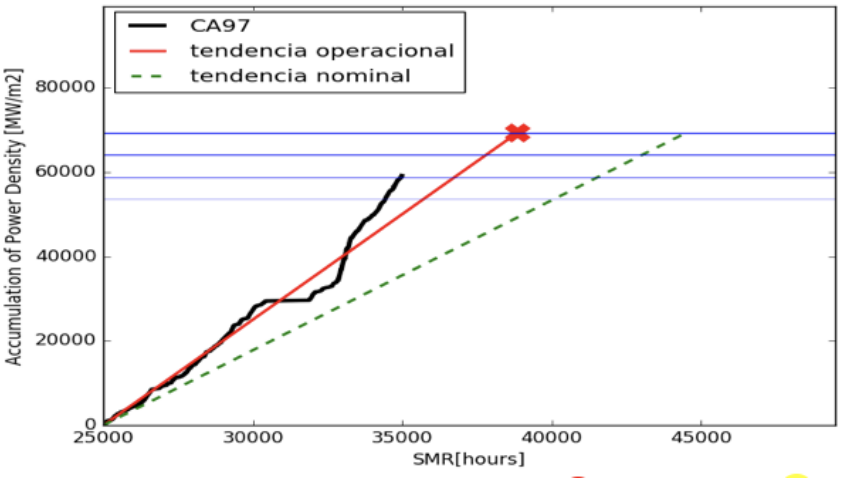


Gráfico 3-6: *Gráfico del comportamiento del camión 97, se aprecia la tendencia operacional y la tendencia nominal.*

En el Gráfico **3-7** se aprecia que el comportamiento del camión es cercano a la tendencia operacional, por lo que existe una mayor probabilidad de falla en el TBO operacional más que en el nominal. Con esta información la empresa puede establecer conclusiones y recomendaciones respecto a la información que le dará a la faena, sobre el comportamiento

y pronta falla del camión respectivo. Esto se verá en mayor detalle en el ítem de ***Conclusiones***.

Este mismo gráfico se puede obtener para cualquier camión del que se necesite adquirir información, en cualquier ventana temporal mientras la fecha de instalación del componente y el TBO a evaluar sean válidos.

Por otro lado, los estudios de confiabilidad determinaron durarte los años 2015 y 2016 que el TBO para los componentes era de 14.000 horas, por lo que retiraron muchos conjuntos de freno de servicio programados al cumplir esa hora.

La hipótesis en la que se basa este proyecto considera que el daño en el freno de servicio es acumulativo y basado en la operación, por lo que un TBO programado podría traer serios problemas en cuanto a la optimización del uso de los componentes.

Si se tiene una operación severa posiblemente el camión fallara antes del TBO programado y quedara sin uso en plena operación, aumentando gastos por indisponibilidad, horas hombres y el retraso de no tener programado el componente. Mientras que, si un camión tiene una operación suave, muy por debajo de la curva operacional y tiene un TBO programado, se podrían estar perdiendo muchas horas de uso del componente. Para probar esto, se probó en el modelo camiones con TBO programado en las 14.000 horas.

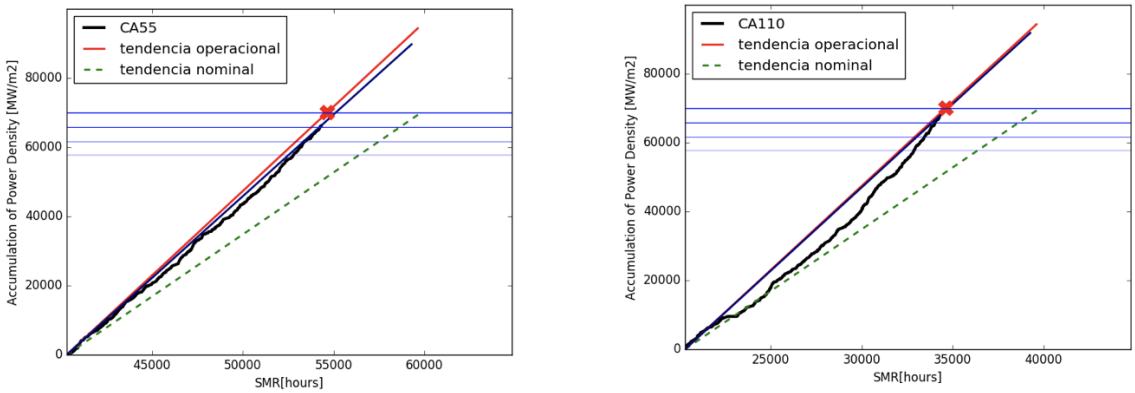


Gráfico 3-7: *Camiones CA55 y CA110 con TBO programado de 14.000 horas para la faena minera. Se aprecia que ambos camiones tenían una alta probabilidad de fallar en corto plazo,*

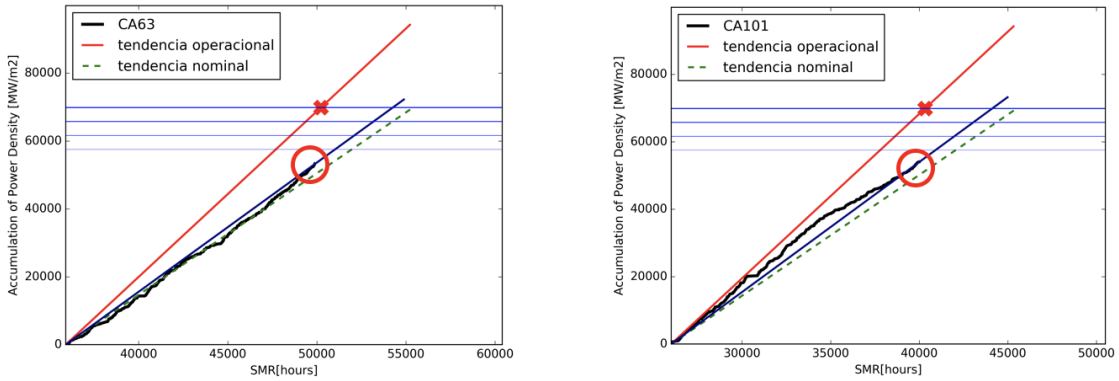


Gráfico 3-8: *Camiones CA63 y CA101 con TBO programado en 14.000 horas para la faena minera especifica. Ambos camiones están muy por debajo de las curvas operacionales, su TBO podría haber sido mucho mayor.*

Por otro lado, considerando lo expresado en el **ítem de Distribución normal e intervalos de confianza**, del capítulo I, tenemos:

$$\bar{x} - z_{\propto/2} \cdot {}^{s}/_{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + z_{\propto/2} \cdot {}^{s}/_{\sqrt{n}}$$

donde, utilizamos la acumulación de potencia acumulada (Brake Power) como la variable a analizar.

$\bar{x} = 67400.01$
$\sigma = 2262.63$

Trabajando con una confianza del 90%, obtenemos lo siguiente,

$E = \mp 526.07$

Es decir, la acumulación de potencia está sujeta a un error E, para una confianza de un 90%.

3.2.1 Resultado de análisis de temperaturas.

La Figura 1-20 muestra ciertos códigos de sensores de temperatura para cada rueda del camión, este código se genera a través de un “snapshot” de temperaturas y promedia las temperaturas del aceite hidráulico en cada freno de servicio en las últimas horas. Para el caso estudiado solo se considerarán LF (Left Front) y RF (Right Front), quienes corresponden a las ruedas delanteras del camión, en las mismas donde se estudia el modelo de desgaste del freno de servicio.

A través de la ecuación de calor (*ecuación 5*), podemos atribuir un calor por fricción (aumento de energía) a un cambio de temperatura, es decir, la fricción provocada por los frenados consecutivos podría desencadenar en un alza de temperatura en el aceite.
Por lo que se podría obtener una pendiente positiva si es que se realiza un ajuste lineal.

En la *tabla 1*, se puede apreciar que el camión CA100, uno de los camiones utilizados para entrenar el modelo, tiene un TBO de 14361. En todo este tiempo se hace un análisis de las temperaturas, las que se muestran a continuación.

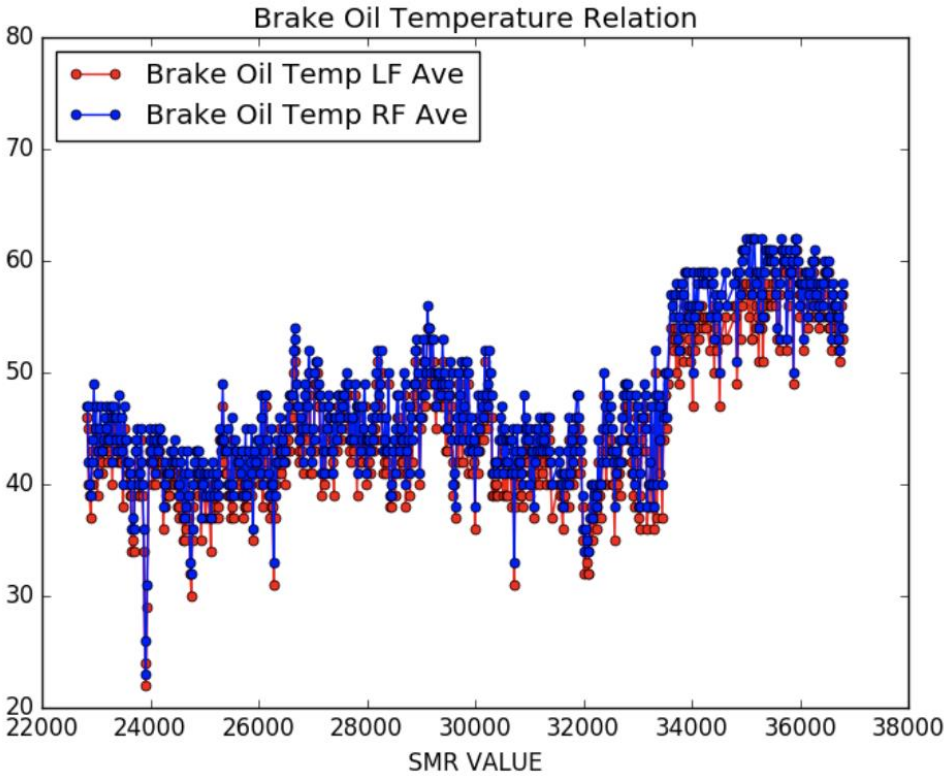


Gráfico 3-9: *Gráfico del comportamiento de las temperaturas del camión 100. En azul la temperatura RF, mientras que en rojo la temperatura LF.*

En el Gráfico **3-10** se pueden apreciar cambios bruscos de pendientes en la ventana temporal mostrada. Esto se debe a que cada cierto tiempo se realizan cambios de aceite hidráulico, lo que indudablemente haría disminuir considerablemente la temperatura, es por esto que la pendiente de toda la ventana temporal podría no ser un indicador tan exacto, por lo tanto, se debe solicitar al algoritmo que reduzca las ventanas temporales y pueda identificar un cambio de comportamiento en este. Por ejemplo, desde el SMR 34000 a la falla.

Otro punto importante que se puede rescatar de las temperaturas es que se puede dividir el comportamiento de una rueda con otra, si más es el mismo aceite hidráulico, los sensores detectaran mayor temperatura en el freno en el que existe una mayor fricción, atribuible a un mayor desgaste. Esto se puede apreciar de mejor manera en el Gráfico **3-10** para el camión CA100:

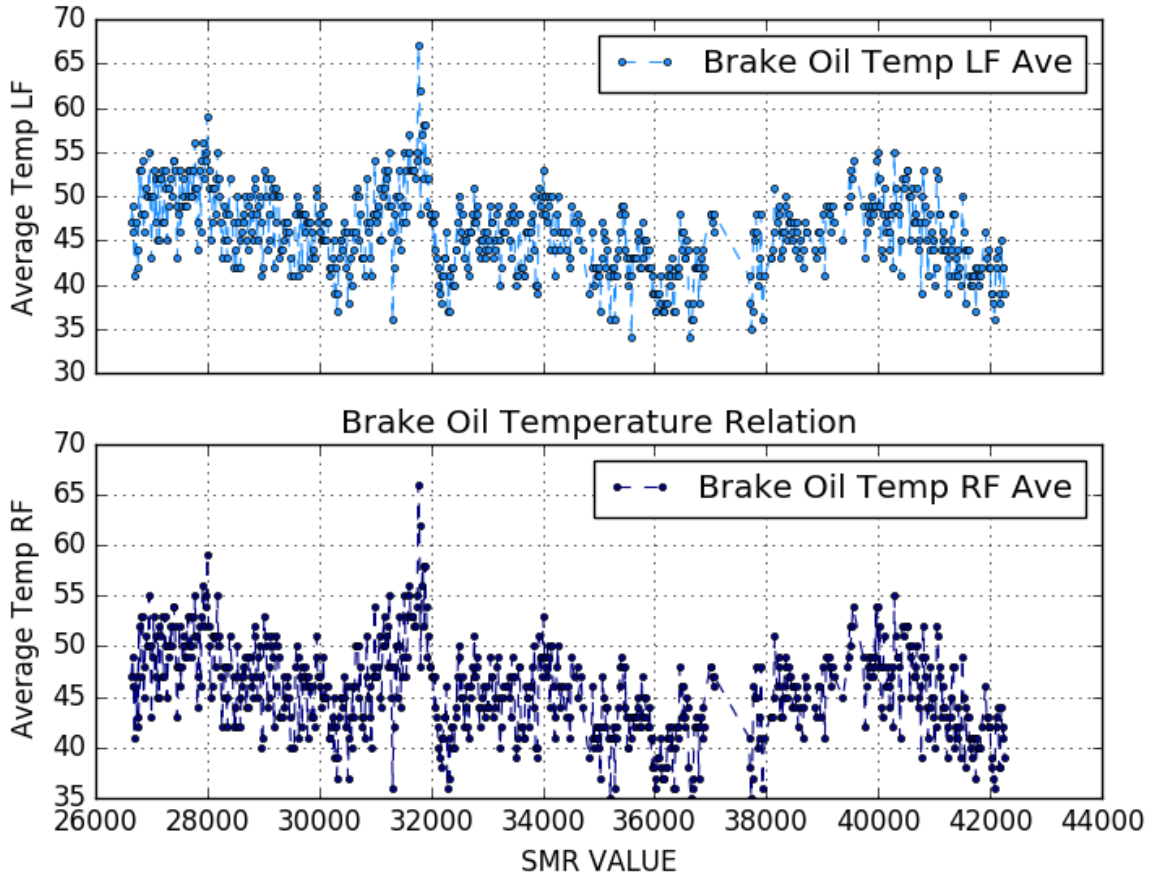


Gráfico 3-10: *Gráfico del comportamiento de las temperaturas del camión 100 en la faena. Arriba se aprecia la rueda superior izquierda, abajo la superior derecha.*

Se puede notar que el comportamiento de ambas ruedas es similar, si el aceite hidráulico de una rueda estuviera sobre un promedio mayor que otra, esto se podría atribuir a un mayor calor por fricción, por lo que esa rueda debiese ser medida con mayor prioridad.

3.2.2 Propuesta final modelo predictivo de desgaste.

La compañia destinara el modelo a una sala de monitoreo, es por lo que, con fin de dar mayor visibilidad a este, se itera en el formato.

Se añaden los siguientes cambios:

1. Se añade cuadro de texto con contador de activaciones por umbral, según lo explicado en el *ítem 2.2. Se consideran activaciones moderadas, medias y severas.*
2. *Se añade línea de proyección según el comportamiento del camión hasta el TBO a evaluar. Al cruzar esto con la horizontal se puede proyectar la vida remanente restante del componente.*
3. *Se añaden grillas con fin de dar una mayor visibilidad a la medida de TBO.*
4. *Se define una función que genera una circunferencia alrededor del último punto de acumulación de potencia de frenado. Se genera otro alrededor del punto con mayor probabilidad de falla. Si las circunferencias no se juntan el camión debería tener una muy baja probabilidad de fallar.*

La propuesta final de modelo de desgaste para el freno de servicio se puede apreciar a continuación:

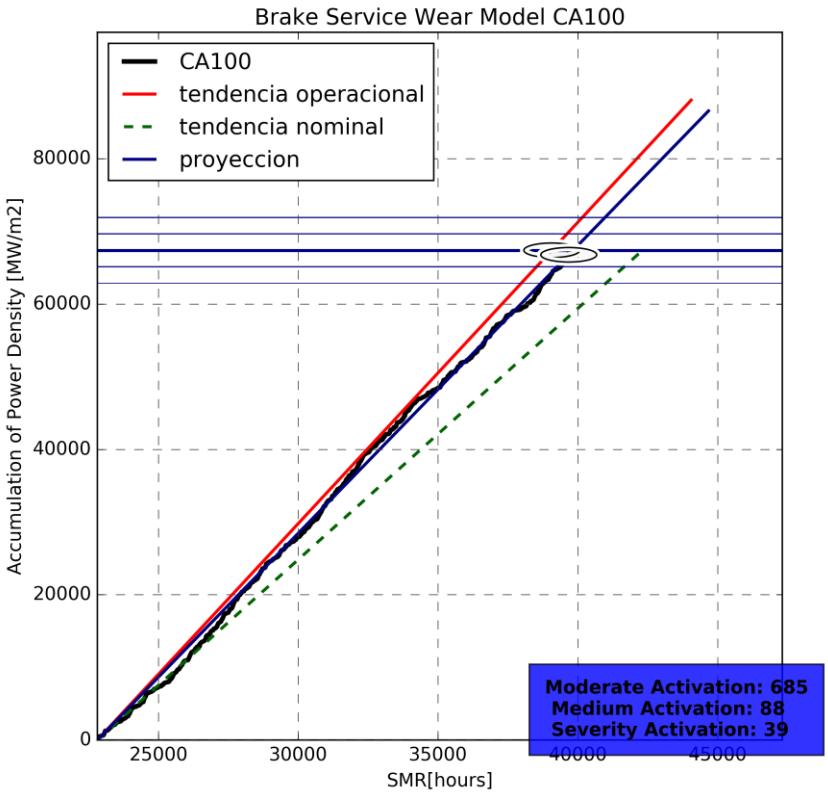


Gráfico 3-11: Propuesta final de visibilidad de modelo predictivo para freno de servicio.

3.3 Resultados adicionales.

De la data de Modular Mining mencionada en el ítem 2.1, sabemos que se pueden guardar datos de los camiones en tiempo real, por ejemplo, velocidad y carga. Con estos datos se pueden realizar una serie de análisis con la que se podrán entregar recomendaciones extra a las faenas involucradas.

Una variable involucrada directamente en el daño general de los componentes, pero principalmente en los frenos de servicio, es la sobrecarga. Es por lo que se realizó un estudio del comportamiento de este en la flota de camiones de la faena minera. Esto se hizo a través de una serie de histogramas que serán adjuntados a continuación.

1. **Histograma para la distribución de carga en la faena minera.**

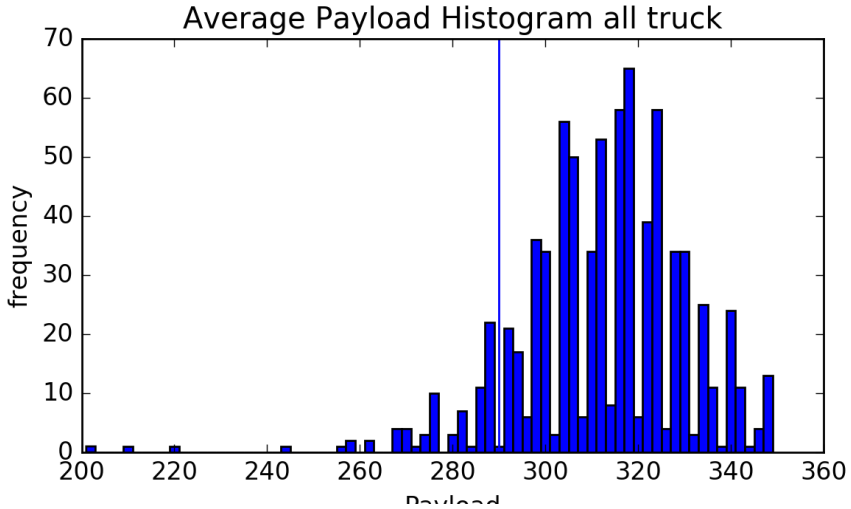


Gráfico 3-12: *Histograma de distribución de carga para camiones de alto tonelaje en la faena minera. La línea azul horizontal (290 Ton) representa la carga máxima que debería tener el camión según fabrica.*

2. **Histograma para distribución de carga por ciclos para camión CA123.**

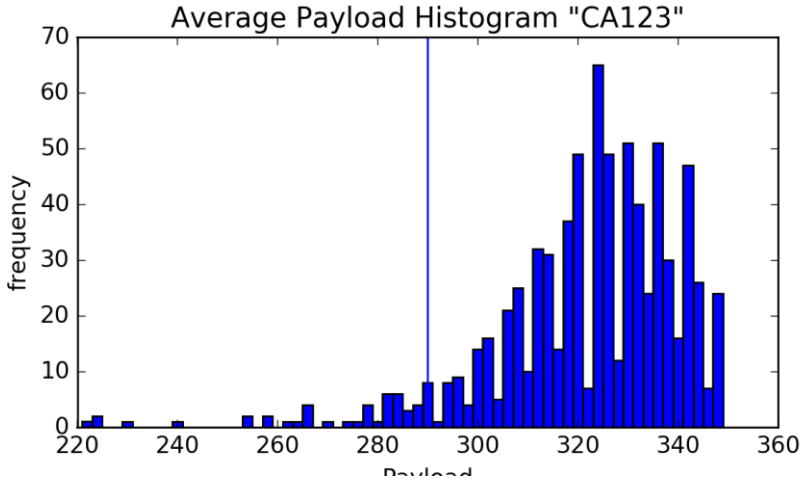


Gráfico 3-13: *Histograma de distribución de carga para camiones para camión CA123 en la faena minera por ciclo de carguío.*

4. Conclusiones y recomendaciones

Se puede definir el mantenimiento en base a condición como: "***Que persigue poner en evidencia, con la mayor anticipación posible, defectos, desvíos o síntomas de falla que se manifiestan sobre las piezas o componentes de los equipos en funcionamiento antes de su falla funcional, con la ayuda de instrumentos o pruebas no destructivas minimizando así el perjuicio sobre el servicio o la producción***". (Pistarelli, 2010)

La frase anterior hace mucho sentido para la finalización de este trabajo, donde se realizará una revisión de lo investigado y desarrollado durante el transcurso de este. Se mencionarán las conclusiones generadas al respecto.

En primera instancia seria bueno recordar el objetivo principal y los objetivos secundarios de este proyecto, así luego poder analizar si fueron cubiertos en cabalidad en este trabajo de titulo.

Objetivos generales:

- Proponer un modelo de análisis de desgaste en base a la condición para el freno de servicio de disco humedo, a través de la recopilación de data obtenida por los sensores instalados en el camión minero de alto tonelaje.

Objetivos específicos:

- Realizar un estudio estadístico de fallas para freno de servicio delantero, frente a los estándares o normas asociadas.

- Determinar las causas de falla del subsistema de frenos y establecer relación con data histórica para impacto en vida remanente.

- Entregar un consolidado de información respecto a las malas prácticas operacionales relacionadas con el uso indebido de freno de servicio para la faena minera especifica.

- Proporcionar información georreferenciada de las zonas con mayor aplicación de freno de servicio fuera de estándares.

- Entregar a la empresa un modelo analítico del estado del componente a partir de la información consolidada en su base de datos.

- Generar un plan de acción para mejorar las practicas de mantenimiento para el freno de servicio en el camión 930E.

A través del informe de control operacional y los gráficos obtenidos en el ítem de ***Resultados*** se establecen una serie de recomendaciones y conclusiones que serán de utilidad tanto para cerrar este trabajo, como para la empresa, ya que, al recomendar a la faena minera sobre la operación de sus equipos se genera valor con el cliente.

Si bien, el fin de este trabajo se centra en generar una propuesta de un modelo en base a condición para el freno de servicio del camión de alto tonelaje en la faena minera, el informe de control operacional sobre la operación de este componente debe ir a la par con el modelo.

La operación del componente influye totalmente en el modelo, por lo que, si se quiere ajustar a una tendencia operacional correcta y cumplir el TBO requerido, es primordial controlar la operación.

4.1 Recomendaciones propuestas en el informe de control operacional.

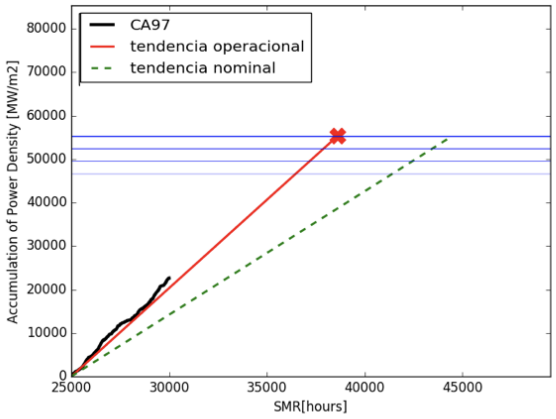
- La empresa debe verificar en faena si existe alguna relación entre la activación del freno de servicio y la severidad del camino utilizando el informe de control operacional, si existiese tal relación, lo cual es de alta probabilidad, este trabajo puede llevar a una investigación secundaria de como afecta el estado del camino en faena en el daño de sus componentes.
- La empresa debe controlar semanal o mensualmente la activación de freno de servicio fuera de las condiciones normales de operación.
- La empresa debe informar respecto a la reincidencia del conductor en la activación del freno de servicio fuera de condiciones de operación. Plantear re-instrucción en caso de ser necesario.
- La empresa debe asegurarse de obtener del taller la información que ayude a explicar la causa del síntoma reportado desde faena y comprobar si esto se ajusta a las causas excluyentes de este modelo.
- Se deben ir comparando mensualmente los informes de control operacional, si la severidad por zona mostrada en el Gráfico **3-5** disminuye, significa que la faena está haciendo bien su función de restaurar la faena.

- Una buena aplicación y gestión de los informes de control operacional por parte de La empresa y la faena debería desencadenar en un aumento de la vida remanente del componente involucrado.

4.2 Recomendaciones propuesta de modelo predictivo freno de servicio.

Respecto a la propuesta de modelo predictivo se establecen una serie de recomendaciones para cumplir con los objetivos de este trabajo, donde el más importante, sin ninguna duda, es que La empresa aumente la vida remanente del freno de servicio.

Para esto, la propuesta de modelo predictivo y el informe de control operacional mencionado en el ítem 4.1 deben ir de la mano, por ejemplo, si cierto camión presenta un comportamiento alejado de la tendencia nominal, pero a través de informes de control operacional se informa de esto a la faena, se realizan re-instrucciones y capacitaciones propuestas en el ítem 4.1 el comportamiento de la operación debería mejorar abruptamente, acercándose al cumplimiento del TBO nominal. Esto se puede apreciar en mayor detalle en los gráficos a continuación.



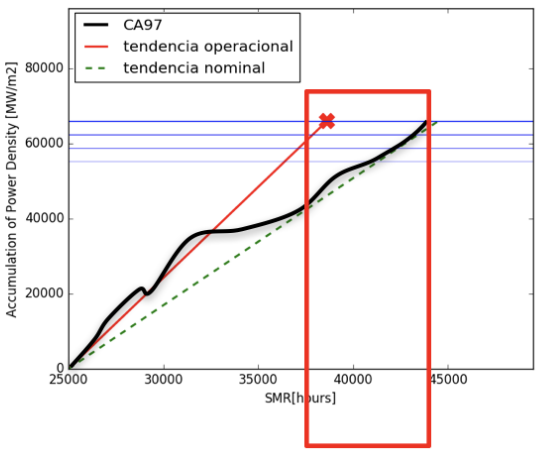


Gráfico 4-1: *A la izquierda el gráfico del comportamiento del camión 97 al tener un TBO de 5000 horas y a la derecha el gráfico del comportamiento del camión 97 al mejorar su comportamiento operacional. El cuadro rojo señala las horas componentes ganadas.*

El Gráfico 4-1 a la derecha es una proyección estimando un comportamiento operacional poco riesgoso para el componente.

Respecto a los gráficos de camiones con TBO programado, se puede ver que hubo un par de camiones donde su componente fue retirado con mucha anticipación ante de la posible falla, por lo que se pierde vida remanente del componente, lo que desencadena en costos.

Se recomienda a la empresa utilizar el modelo de desgaste de freno de servicio para estudiar el comportamiento del componente y no programar el cambio de este, ya que, su condición depende de la operación y no es un desgaste temporalmente constante.

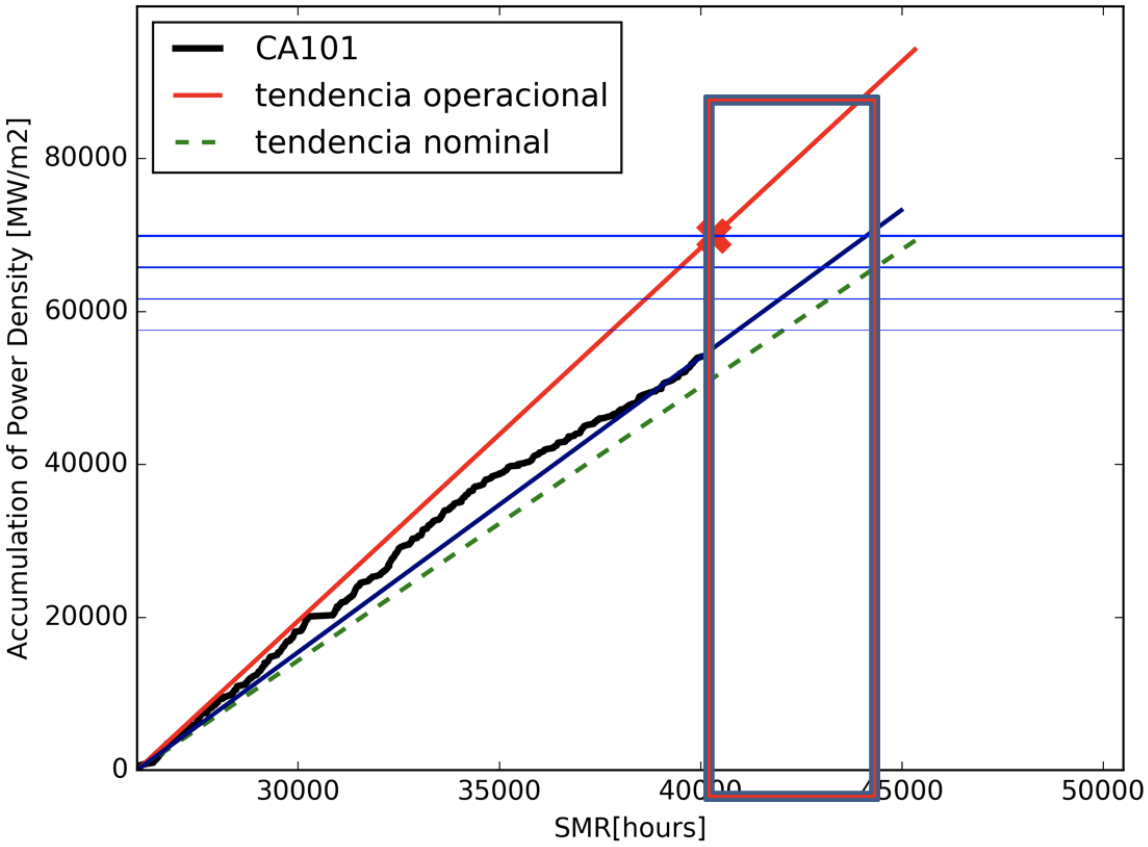


Gráfico 4-2: *CA101 con TBO programado en 14.000 horas para la faena minera. El rectángulo en rojo marca la diferencia de TBO que se pierde por programar el cambio de componente.*

Se puede apreciar en el Gráfico **4-2** que el rectángulo rojo denota la diferencia de TBO según la tendencia de la operación del camión y cuando realmente fue cambiado el componente por programa. Para este caso se pierden casi 4000 horas de uso, lo que equivale para la faena minera en 8 meses.

La temperatura del aceite hidráulico para las ruedas delanteras sirve para dos cosas principalmente:

1. Identificar un cambio en el comportamiento de los datos, más exactamente una tendencia al alza, esto se muestra en detalle en el Gráfico **4-3**.
2. Identificar que disco de freno de servicio tiene una temperatura mayor, una temperatura mayor debiese estar atribuida a un mayor desgaste. En cualquiera de los casos, si el modelo predice que un camión esta propenso a fallar lo recomendable es que en la mantención correspondiente se midan ambos frenos.

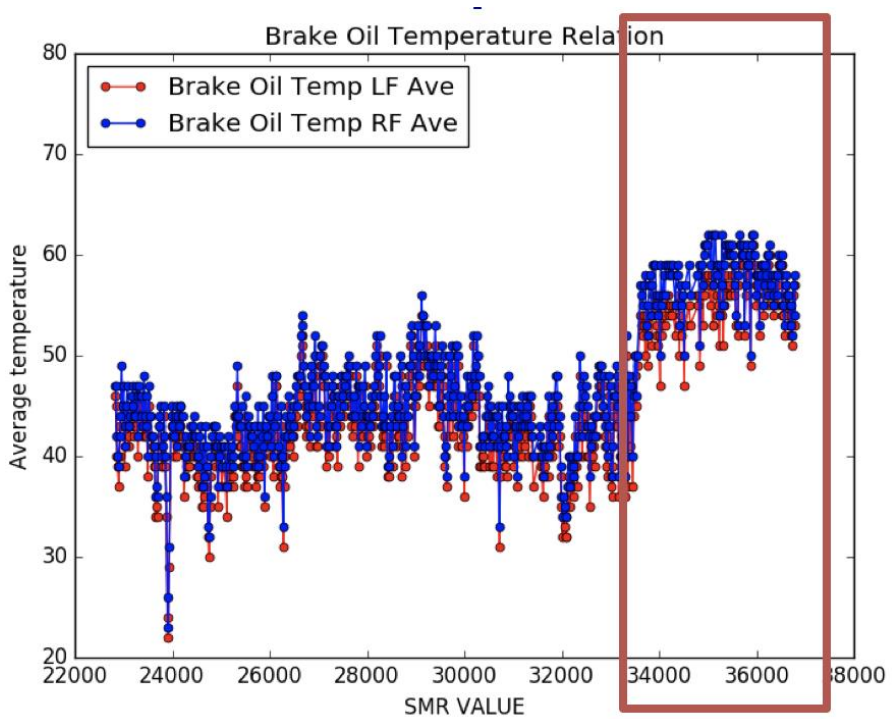


Gráfico 4-3: *Tendencias de temperaturas para el camión CA85. El cuadro rojo representa el cambio de comportamiento atribuible a falla operacional. Se aprecia que la temperatura del aceite en RF es mayor a LF.*

Sin embargo, este análisis, al igual que los de tribología no pueden ser concluyentes.

Luego de estudiar esta tendencia en varios camiones, no se puede concluir que existirá una tendencia al alza en la temperatura del aceite de frenos antes de producirse la falla.

De esta misma forma, tampoco se puede concluir que los análisis de tribología puedan predecir una falla. La principal explicación de esto es que la empresa no tiene un estándar para realizar las mediciones de aceite. Por ejemplo, algunas veces se analiza la tapa del compartimiento de aceite inferior y en otras ocasiones la tapa superior. Por otro lado, el aceite se cambia con una frecuencia superior a la que dura el freno de servicio, por lo que un alza o baja en su temperatura no seria representativo.

Es por esto, que en el plan de acción de la empresa debe ir incluido la mejora de estas practicas de medición para el aceite hidráulico, esto mejorara tanto los análisis de

tribología, como un posterior análisis de temperaturas para agregar valor a este modelo o a cualquier otro en que sea necesario.

4.3 Conclusiones adicionales.

- De los *gráficos de carga (PLM)* se puede apreciar un claro sesgo hacia la izquierda, lo que quiere decir que los camiones sufren ciclos de carguío con sobrecarga en la mayoría de sus casos.
- Para el camión CA123, un caso común dentro de los camiones, se nota un alto porcentaje en los que se supera el umbral de carguío admisible por fabrica.
- La empresa deberá evaluar los daños provocados en sus componentes producto de sobrecarga.
- La empresa debería incluir en todos los informes de control operacional la sobrecarga, realizar estos análisis y controlar mensualmente si mejora el comportamiento de esta.
- La empresa deberá evaluar cómo afecta la sobrecarga en sus políticas de mantenimiento.

4.4 Recomendaciones generales a la empresa.

- El departamento de confiabilidad de la empresa debe entregar planillas con información certera de la fecha y SMR del camión al momento del cambio de componente y falla de este.
- El departamento de monitoreo continuo debe encargarse de mantener los camiones entregando data correcta, verificar sensores y perdidas de señal. En caso de que se pierda data esto debe informarse oportunamente. En los gráficos a continuación se muestra que ocurre cuando se pierde o se altera la data.
- La empresa debe exigir a la faena minera medir correctamente el desgaste del disco de freno con la herramienta de desgaste de la Figura 1-8 según mencionan las pautas de mantención.

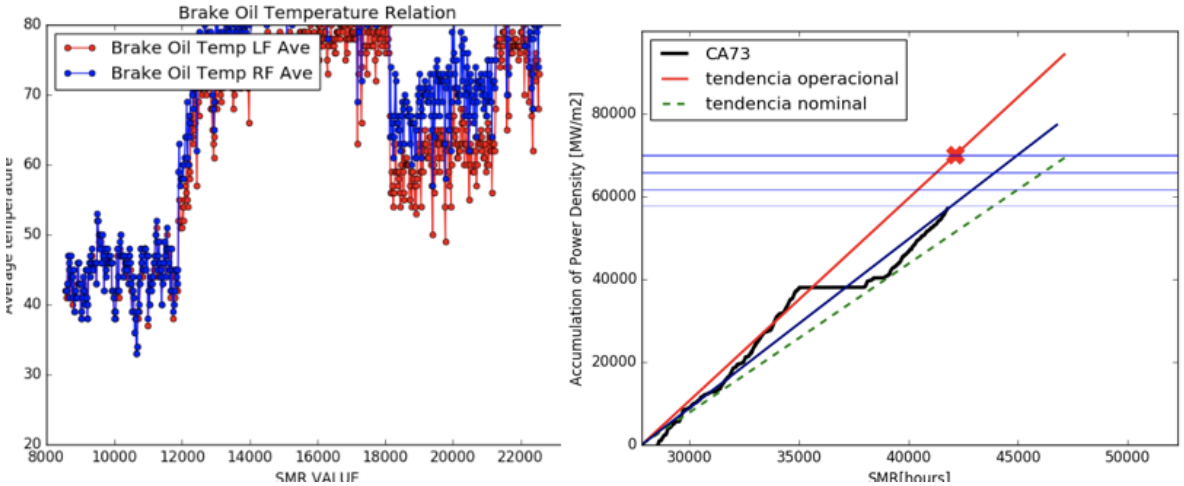


Gráfico 4-4: Camiones con falta o vacios temporales en su Data.

Entonces, se propone un modelo de desgaste para el freno de servicio del camión minero 930E, lo que da por cumplido el objetivo principal de este trabajo de título**. Llegando a un alcance mayor, este trabajo deja abierta la posibilidad de replicar el modelo de análisis predictivo para cualquier componente que cumpla los requerimientos, es decir, se puede cambiar el tipo de mantenimiento a gran escala, implicando netamente en los costos de la compañía.**

Adicionalmente, en el inicio de este trabajo se realizo un estudio estadístico de las fallas de freno de servicio, ligado a las normas y estándares de la compañía. Esto se puede apreciar en ***Anexos***, **lo que se da por cumplido el primer objetivo secundario.**

Se determina que la causa de falla anticipada predominante en el freno de servicio es por desgaste, producto de una mala operación y que visiblemente se puede apreciar en la data histórica, **por lo que se daría por cumplido el segundo objetivo secundario**.

El informe de control operacional entrega un consolidado de información respecto a las malas practicas operacionales relacionadas con este componente, además, de la información georreferenciada con las zonas de mayor activación en faena, entregando la posibilidad de vincular este trabajo con un posterior análisis relacionado a la influencia del camino en el componente. **Esto da por cumplido el tercer y cuarto objetivo.**

En las conclusiones y recomendaciones que este trabajo entrega a la empresa, se puede analizar como el modelo analítico puede afectar en los costos de la empresa y como a partir de esto se puede generar un plan de acción para mejorar las practicas de mantenimiento, **cumpliendo así el quinto y sexto objetivo de este trabajo.**

Luego de realizar un análisis punto a punto de los objetivos de este trabajo, se puede dar por finalizado de una forma satisfactoria, ya que se logro con creces el alcance propuesto y además da pie para posteriores análisis e investigaciones.

5. Trabajos citados

Komatsu America Corporation. (2007). Shop Manual. 11-16. Peoria, Illinois, Estados Unidos de América.

Komatsu America Corporation. (2007). Shop Manual 930E-4 Dump Truck. SECTION J . (KCH, Trad.) Peoria, Illinois, Estados Unidos de América.

Timon , C. E. (Enero de 2017). Análisis Predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo - herramientas Open Source que permiten su uso . Barcelona , España.

S. A., A. S., A. M., & K. M. (2016). Development of a multi-layer perceptron artificial neural network model to determine haul trucks energy consumption. International Journal of Mining Science and Technology. Quuensland, Australia.

Vásques, L. H. (28 de Mayo de 2011). *Living Reliability*. Obtenido de http://www.livingreliability.com/wordpress/posts/el-elusiva-intervalo-p-f/

F. B., Johnston, E. R., J. D., & D. M. (2007). *MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS ESTÁTICA* (OCTAVA EDICIÓN ed.). (M.-H. INTERAMERICANA, Ed.) D.F., MEXICO.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Octava edición ed.). (J. E. Murrieta, Trad.) D.F, México: Mc Graw-Hill Interamericana.

Baldin, A., Furlanetto, L., A., R., & Turco, F. (1982). *MANUAL DE MANTENIMIENTO DE INSTALACIONES INDUSTRIALES* (1ª edición ed.). (X. V. PLANELL, Trad.) BARCELONA, ESPAÑA: GUSTAVO GILI.

Miller, I., & Freund, J. E. (1963). *PROBABILITY AND STATISTICS FOT ENGINEERS.* (C. O. ROMERO, Trad.) NEW JERSEY, ENGLEWOOD CLIFFS, USA: EDITORIAL REVERTÉ. S.A.

Pistarelli, A. (2010). *Manual de Mantenimiento Ingeniería, Gestión y Organización.* Buenos Aires.

Ministerio de Mineria . (2017). *Cuenta Pública 2017.* Santiago.

6. Anexos

Tabla 12-10

Factor relacionado con el movimiento f_1

Modo de movimiento	Presión característica P, psi	Velocidad V, pie/min	f_1*
Rotatorio	720 o menor	3.3 o menor	1.0
		3.3-33	1.0-1.3
		33-100	1.3-1.8
	720-3 600	3.3 o menor	1.5
		3.3-33	1.5-2.0
		33-100	2.0-2.7
Oscilatorio	720 o menor	3.3 o menor	1.3
		3.3-100	1.3-2.4
		3.3 o menor	2.0
		3.3-100	2.0-3.6
	720-3 600	3.3 o menor	2.0
		3.3-100	2.0-3.2
		3.3 o menor	3.0
		3.3-100	3.0-4.8
Reciprocante	720 o menor	33 o menor	1.5
		33-100	1.5-3.8
	720-3 600	33 o menor	2.0
		33-100	2.0-7.5

*Valores de f_1 con base en resultados sobre un periodo extenso de tiempo de maquinaria para fabricar automóviles.

Tabla 12-11

Factor ambiental f_2

Fuente: Oiles America Corp., Plymouth, MI 48170.

Temperatura ambiental, °F	Materia extraña	f_2
140 o inferior	No	1.0
140 o inferior	Sí	3.0-6.0
140-210	No	3.0-6.0
140-210	Sí	6.0-12.0

Resulta útil incluir un factor de modificación f_1, dependiendo del tipo de movimiento, carga y velocidad, así como un factor f_2 que tome en cuenta las condiciones ambientales de temperatura y limpieza (vea las tablas 12-10 y 12-11). Estos factores toman en consideración las desviaciones con respecto a las condiciones de laboratorio bajo las cuales se midió K. Ahora, la ecuación (12-26) puede expresarse como

$$w = f_1 f_2 K P V t \qquad (12\text{-}27)$$

El desgaste es entonces proporcional a PV, el factor K de desgaste del material, las condiciones de operación f_1 y f_2, y al tiempo t.

Figura 6-1: Calculo de fricción en frenos. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. Embragues, frenos, coples y volantes.*

Tabla 16-2

Área del material de fricción que requiere una potencia de frenado promedio dada *Fuentes:* M. J. Neale, *The Tribology Handbook*, Butterworth, Londres, 1973; *Friction Materials for Engineers*, Ferodo Ltd., Chapel-en-le-frith, Inglaterra, 1968.

Ciclo de trabajo	Aplicaciones comunes	Relación del área con la potencia de frenado promedio, pulg²/(Btu/s): Frenos de banda y de tambor	Frenos de disco	Frenos de disco y yugo
Poco frecuente	Frenos de emergencia	0.85	2.8	0.28
Interminente	Elevadores, grúas y malacates	2.8	7.1	0.70
Trabajo pesado	Excavadoras, prensas	5.6-6.9	13.6	1.41

Figura 6-2: Área del material de fricción según potencia de frenado dada. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. embragues, frenos, coples y volantes.*

Tabla 16-3

Características de materiales de fricción para frenos y embragues *Fuentes:* Ferodo Ltd., Chapel-en-le-frith, Inglaterra; Scan-pac, Mequon, Wisc; Raybestos, Nueva York, N.Y. y Stratford, Conn.; Gatke Corp., Chicago Ill.; General Metals Powder Co., Akron, Ohio; D.A.B. Industries, Troy, Mich.; Friction Products Co., Medina, Ohio.

Material	Coeficiente de fricción f	Presión máxima $p_{máx}$, psi	Temperatura máxima Instantánea, °F	Temperatura máxima Continua, °F	Velocidad máxima, $V_{máx}$, pie/min	Aplicaciones
Cermet	0.32	150	1 500	750		Frenos y embragues
Metal sinterizado (seco)	0.29-0.33	300-400	930-1 020	570-660	3 600	Embragues y frenos de disco de yugo
Metal sinterizado (húmedo)	0.06-0.08	500	930	570	3 600	Embragues
Asbesto moldeado rígido (seco)	0.35-0.41	100	660-750	350	3 600	Frenos y embragues de tambor
Asbesto moldeado rígido (húmedo)	0.06	300	660	350	3 600	Embragues industriales
Zapatas de asbesto moldeado rígido	0.31-0.49	750	930-1 380	440-660	4 800	Frenos de disco
Que no sea asbesto moldeado rígido	0.33-0.63	100-150		500-750	4 800-7 500	Embragues y frenos
Asbesto moldeado semirrígido	0.37-0.41	100	660	300	3 600	Embragues y frenos
Asbesto moldeado flexible	0.39-0.45	100	660-750	300-350	3 600	Embragues y frenos
Hilo y alambre de asbesto arrollado	0.38	100	660	300	3 600	Embragues de automóviles
Hilo y alambre de asbesto tejido	0.38	100	500	260	3 600	Embragues y frenos industriales
Algodón tejido	0.47	100	230	170	3 600	Embragues y frenos industriales
Papel resiliente (húmedo)	0.09-0.15	400	300		$PV < 500\,000$ psi · pie/min	Embragues y bandas de transmisión

Figura 6-3: Características del material de fricción para frenos. *Richard G. Budynas, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. embragues, frenos, coples y volantes.*

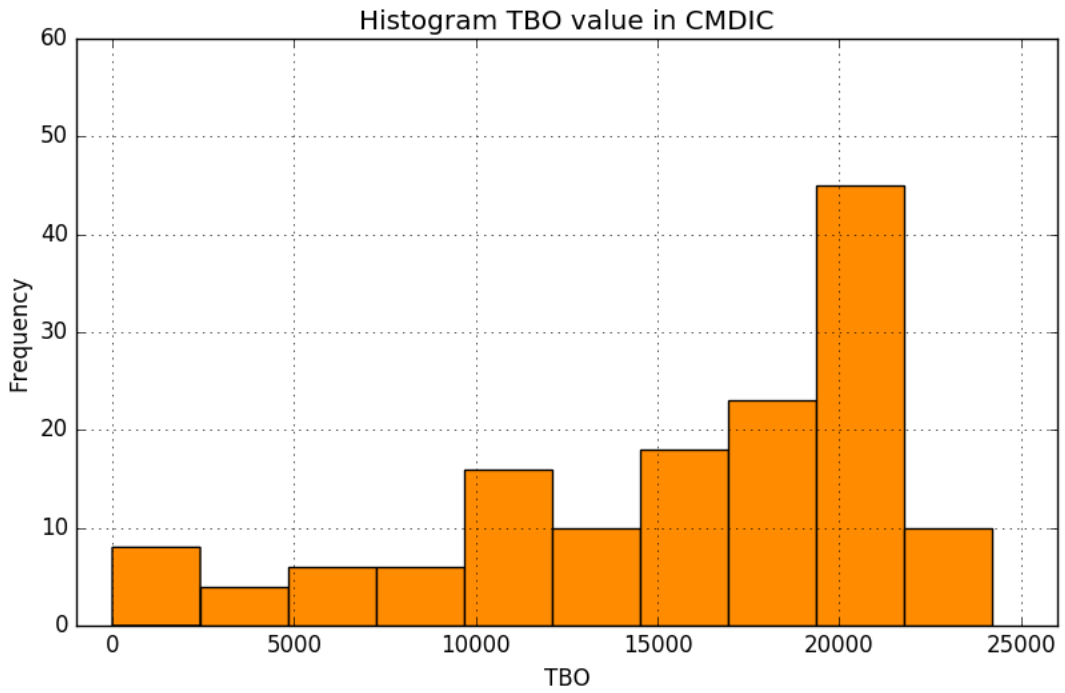


Figura 6-4: Histograma de la distribución de fallas de freno de servicio según el TBO alcanzado para los ultimos 4 años.

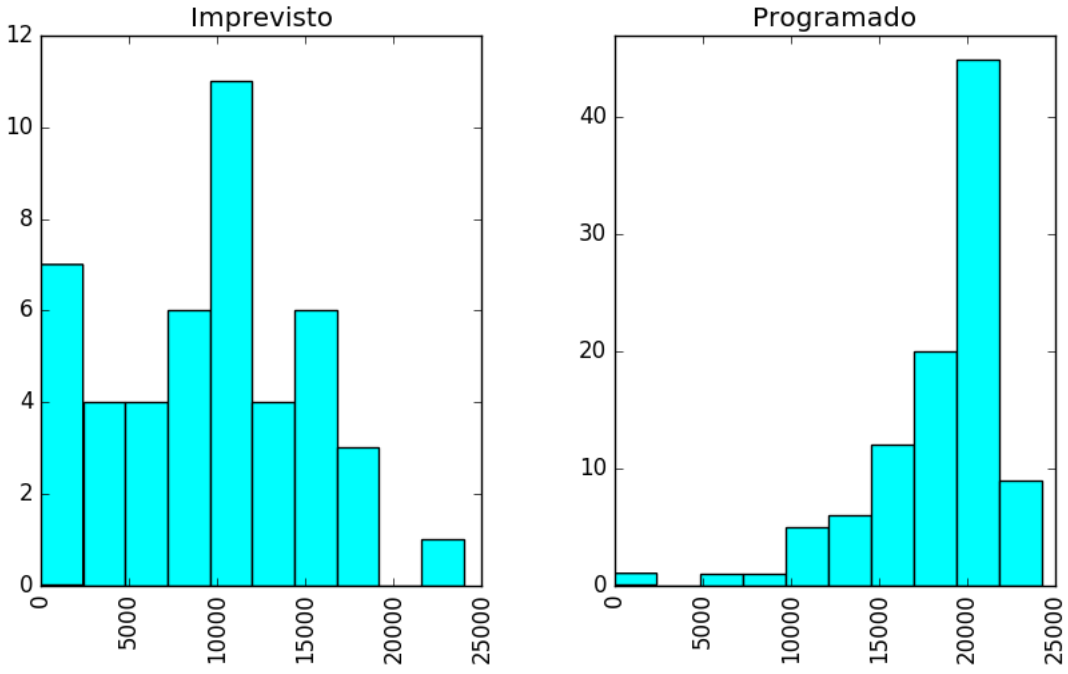


Figura 6-5: Histograma de la distribución de fallas de freno de servicio según el TBO alcanzado para los ultimos 4 años. Se separan en imprevistos y cambio programado.

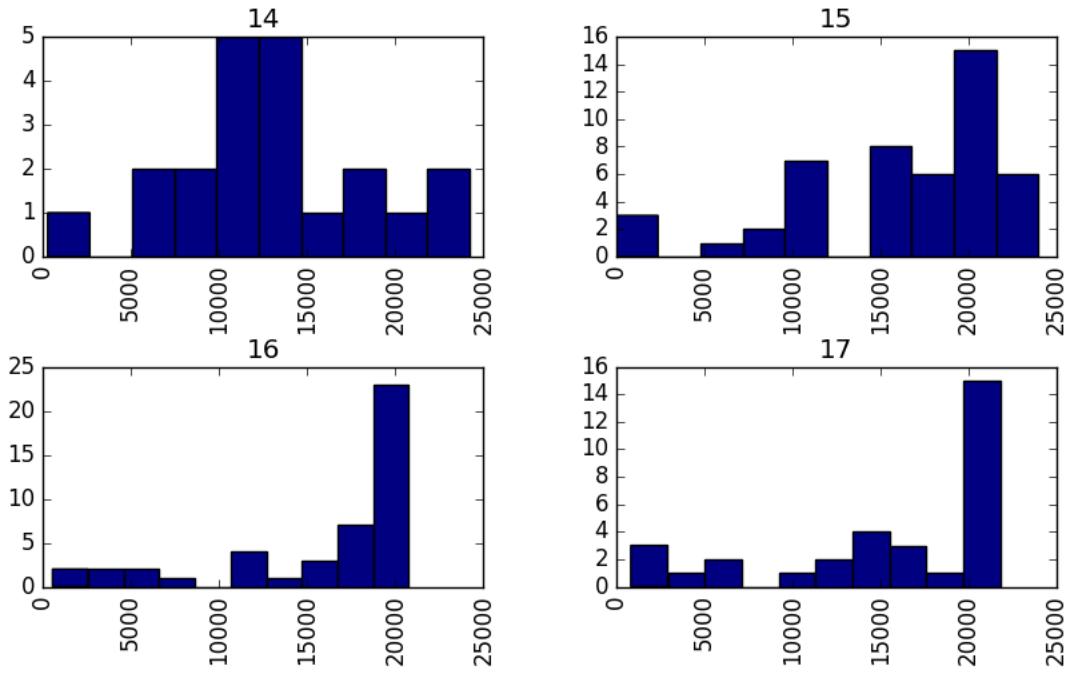


Figura 6-6: Histograma de fallas de freno de servicio separadas por año.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
36	CA69	A30756	930E	4SE	SC29	2	Brake Oil Temp LR Max	deg C	38	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
37	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	1	Brake Oil Temp RF Ave	deg C	46	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
38	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	2	Brake Oil Temp RF Max	deg C	60	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
39	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	1	Brake Oil Temp RR Ave	deg C	29	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
40	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	2	Brake Oil Temp RR Max	deg C	38	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
41	CA69	A30756	930E	4SE	SC62	2	BRAKE ENERGY	GJ/m2	0.58	43090.7	28-03-16	20:15:14	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
42	CA69	A30756	930E	4SE	SC25	2	Brake Power Max	MW/m2	126.9	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
43	CA69	A30756	930E	4SE	SC28	1	Brake Oil Temp LF Ave	deg C	46	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
44	CA69	A30756	930E	4SE	SC28	2	Brake Oil Temp LF Max	deg C	56	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
45	CA69	A30756	930E	4SE	SC29	1	Brake Oil Temp LR Ave	deg C	29	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
46	CA69	A30756	930E	4SE	SC29	2	Brake Oil Temp LR Max	deg C	37	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
47	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	1	Brake Oil Temp RF Ave	deg C	46	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
48	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	2	Brake Oil Temp RF Max	deg C	56	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
49	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	1	Brake Oil Temp RR Ave	deg C	29	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
50	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	2	Brake Oil Temp RR Max	deg C	37	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
51	CA69	A30756	930E	4SE	SC62	2	BRAKE ENERGY	GJ/m2	0.84	43070.7	27-03-16	17:13:39	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
52	CA69	A30756	930E	4SE	SC25	2	Brake Power Max	MW/m2	128	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
53	CA69	A30756	930E	4SE	SC28	1	Brake Oil Temp LF Ave	deg C	49	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
54	CA69	A30756	930E	4SE	SC28	2	Brake Oil Temp LF Max	deg C	64	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
55	CA69	A30756	930E	4SE	SC29	1	Brake Oil Temp LR Ave	deg C	31	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
56	CA69	A30756	930E	4SE	SC29	2	Brake Oil Temp LR Max	deg C	41	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
57	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	1	Brake Oil Temp RF Ave	deg C	49	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
58	CA69	A30756	930E	4SE	SC30	2	Brake Oil Temp RF Max	deg C	64	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
59	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	1	Brake Oil Temp RR Ave	deg C	31	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
60	CA69	A30756	930E	4SE	SC31	2	Brake Oil Temp RR Max	deg C	41	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	
61	CA69	A30756	930E	4SE	SC62	2	BRAKE ENERGY	GJ/m2	0.77	43050.7	26-03-16	18:25:11	Collahuasi E.	Komtrax Plus	

Figura 6-7: Formato en Excel de la data obtenida en KOMTRAX antes de ser procesada por el algoritmo.