

# Metodología para el monitoreo y análisis del sistema de transmisión de camiones mineros como una herramienta decisoria para su mantenimiento

## Methodology for the monitoring and analysis of the mining truck transmission system as a decision tool for maintenance

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.02>


Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 14/08/2019. Fecha de Aceptación: 03/02/2020.

**Cristian Antonio Pedraza-Yepes** 

Universidad del Atlántico. Puerto Colombia (Colombia)  
cristianpedraza@mail.uniatlantico.edu.co

**Jorge Enrique González-Coneo** 


Grupo de Investigación CONFORMAT. Barranquilla (Colombia)  
jegcneo@gmail.com

**Jorge Luis Martínez-Sánchez** 

Universidad del Atlántico. Barranquilla (Colombia)  
jorgeluis.martinez0616@gmail.com

**Oscar Fabián Higuera-Cobos** 

Universidad del Atlántico. Puerto Colombia (Colombia)  
oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co

**José Daniel Hernández-Vásquez** 

Universidad Antonio Nariño. Puerto Colombia (Colombia)  
johernandez79@uan.edu.co

Para citar este artículo:

C. A. Pedraza-Yepes, J. E. González-Coneo, J. L. Martínez-Sánchez, O. F. Higuera-Cobos & J. D. Hernández-Vásquez, "Metodología para el monitoreo y análisis del sistema de transmisión de camiones mineros como una herramienta decisoria para su mantenimiento", *INGE CUC*, vol. 16, no. 2, pp. 12–29, 2020. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.02>

### Resumen

**Introducción**— El sistema de transmisión de los vehículos mineros constituye uno de sus componentes más importantes. Este sistema está sometido a diversas condiciones de operación (por ejemplo: sobrecalentamiento, fatiga, fractura y desgaste, etc.) que pueden generar la falla de transmisión produciendo pérdida de disponibilidad. Debido a esto, es de vital importancia establecer las condiciones operacionales del equipo, a partir de la información suministrada por un sistema de diagnóstico de fallas y alertas, con el fin de determinar los planes de monitoreo y control adecuados, prolongando la vida útil de los componentes.

**Objetivo**— Este trabajo tiene como objetivo principal desarrollar una metodología para analizar el comportamiento de transmisiones de camiones mineros en estado operativo. Su finalidad es establecer, de acuerdo con las condiciones actuales del componente, una posible vida remanente en la que se determine si se encuentra dentro de rangos permisibles o si por el contrario se deben tomar acciones que garanticen un ciclo de vida aceptable.

**Metodología**— Este artículo muestra el despliegue de la metodología para el análisis y diagnóstico del componente, dividido en cuatro etapas: (i) Establecimiento de límites operacionales permisibles para análisis de las condiciones del aceite; (ii) generación de matriz de cambios modelo; (iii) análisis de eventos o fallas asociados con la transmisión; y (iv) mejoramiento de la vida útil del componente.

**Resultados**— Mediante la aplicación de la metodología se pudo determinar las causas principales de los fallos de las transmisiones y su relación con los parámetros operacionales analizados.

**Conclusiones**— La investigación busca generar resultados en tiempo real que faciliten la organización de las actividades preventivas y correctivas del componente, necesarias para la óptima operación del mismo.

**Palabras clave**— Mantenimiento; monitoreo bajo condiciones; transmisión de camiones mineros; análisis de aceite; matriz de cambio; embrague

### Abstract

**Introduction**— The transmission system of mining vehicles is one of their most important components. This system is subject to various operating conditions (for example: overheating, fatigue, fracture and wear, etc.) that can generate transmission failure producing loss of availability. Because of this, it is of vital importance to establish the operational conditions of the equipment, based on the information provided by a fault diagnosis and alert system, in order to determine the appropriate monitoring and control plans, prolonging the life of the components.

**Objective**— The goal of this paper is to develop a methodology in order to analysis of the behavior of mining truck transmissions in the operating state. Its purpose is to establish, in accordance with the current laws of the component, a possible remaining life in which it is determined if it is within permissible ranges or if on the contrary actions must be taken that guarantee an acceptable life cycle.

**Methodology**— This article shows the analysis of the methodology for the analysis and diagnosis of the component, divided into four stages: (i) Establishment of permissible operational limits for analysis of oil conditions; (ii) generation of model change matrix; (iii) analysis of events or failures associated with the transmission; and (iv) improvement of the component's useful life.

**Results**— Through the application of the methodology, it was possible to determine the main causes of transmission failures and their relationship with the operational parameters analyzed.

**Conclusions**— The research seeks to generate results in real time that facilitate the organization of the preventive and corrective activities of the component, necessary for the operation of the same.

**Keywords**— Maintenance; monitoring under conditions; mining truck transmission; oil analysis; change matrix; clutch

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria minera busca nuevas formas de reducir los costos de operación y aumentar la disponibilidad de los equipos, con el fin de cumplir las demandas actuales, enfocándose en incrementar la producción a un menor costo por tonelada. Debido a esto, surge el análisis de ingeniería en la operación de los equipos mineros como elemento esencial para la consecución del equilibrio entre la producción y la confiabilidad. Actualmente, se ha demostrado que los costos totales asociados con eventos de tiempos inactivos relacionados a fallas no programadas “Downtime”, pueden ser hasta quince veces mayor que la ejecución de la misma reparación realizada de manera programada, teniendo en cuenta factores como: piezas a reutilizar por daños contingentes, uso eficiente de la mano de obra y reducción de la producción como consecuencia del aumento considerable del tiempo de inactividad de los equipos.

Dentro a la operación minera, los camiones llevan todo el peso del acarreo y transporte debido a su potencia y gran capacidad de carga, por lo cual su relevancia dentro del proceso es innegable [1]. Dicha operación esta tan planificada, razón por la cual, un buen programa de mantenimiento debe buscar incrementar la productividad del equipo, reduciendo las horas de parada del vehículo, tanto en el taller como en el campo, incrementando los niveles de confiabilidad del sistema y de sus componentes asociados y de esta manera garantizar una operación satisfactoria y con un mínimo de fallas registradas. Todo esto se busca lograr mediante el desarrollo de un plan de seguimiento, totalmente condicionado de manera funcional, para ser el soporte principal de la detección oportuna y precisa de los cambios que se puedan presentar en los vehículos, analizando su rendimiento y funcionamiento. Mediante este plan, se podrán determinar las condiciones actuales de los equipos, identificando los eventos que provocan fallas durante su funcionamiento, y a su vez formulando las acciones que permitan mitigarlos y controlarlos. De esta forma se puede establecer que la gestión de la operación en el sector minero requiere ser fundamentada bajo el estudio de la condición de sus equipos, el cual se constituye en un factor dinámico que cambia en el tiempo [2].

El sistema de transmisión constituye uno de los componentes fundamentales de los vehículos debido a que permite su desplazamiento en cualquiera de las condiciones del terreno. En los últimos años se han evidenciado fluctuaciones en la vida útil de las transmisiones, en el cual, las horas de servicio no son constantes, afectando la disponibilidad de los equipos y generando inconformidad en los clientes. Mediante un análisis realizado a 259 transmisiones, con información recopilada durante tres (3) años, se logró evidenciar que el 62% de las transmisiones no cumplieron con el ciclo de vida estimado ( $\geq 15000$  hrs). Por tal motivo, es importante el desarrollo de una metodología que analice el comportamiento de los sistemas que se encuentran operativos, permitiendo determinar la condición actual del componente, sus rangos permisibles de funcionamiento o si, por el contrario, se deben tomar acciones que garanticen un ciclo de vida aceptable.

En esta investigación se analizaron las rutinas de mantenimiento aplicadas y recomendadas por los fabricantes, y se planteó una metodología para la determinación de los límites operacionales para camiones mecánicos modelo CATERPILLAR-793. Sin embargo, la metodología propuesta puede replicarse en otras flotas para sus respectivos análisis. Las condiciones analizadas fueron: Condición del aceite, obtención de una matriz de cambios para la generación de un modelo para la determinación de los niveles de utilización de embragues y la formulación de acciones preventivas para mejorar la vida útil de los componentes, mediante el análisis de eventos y fallas. El análisis busca sentar unas bases de gestión de información que sirvan de soporte para la formulación futura de planes de mantenimiento estratégicos, dinámicos y ajustados a las necesidades propias de la operación.

## II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación comprendió el desarrollo de las siguientes etapas:

#### A. *Condiciones de obtención y análisis de datos.*

##### 1) *Recolección de datos*

Abarcó la obtención de la información requerida, tomada de diversos sistemas de información establecidos para la administración de los equipos, muestras de aceites, eventos o fallas y registros fotográficos.

##### 2) *Revisión y clasificación de datos*

De la información recopilada de 259 transmisiones se seleccionó un grupo de 51 que habían alcanzado la vida útil esperada. Con esta información se establecieron los valores permisibles de los parámetros referentes al análisis de aceite en función del tiempo de operación. También se identificaron los fallos o errores presentados durante la operación de cada transmisión y la relación de los cambios utilizados durante su funcionamiento (matriz de cambios).

##### 3) *Análisis de parámetros*

En esta etapa se desarrollaron las tareas correspondientes al análisis de la información obtenida, determinando los patrones de comportamiento de los factores de desempeño relacionados al grupo de transmisiones escogido.

- *Muestra de aceites.* El análisis de los aceites consiste en la cuantificación o conteo de las partículas de los elementos presentes (tales como silicio, hierro, sodio, fósforo, zinc, aluminio, potasio, bromo y cobre), de acuerdo a su tamaño (según ISO 6, ISO 14), así como la medición de su viscosidad y su grado de oxidación [3]. Para esto, se analizaron de manera estadística las muestras de aceite como factor de desempeño, con el fin de determinar el patrón de comportamiento, incluyendo: Tabulación de las muestras de aceites, establecimiento de los límites de control según el comportamiento patrón, e identificación de elementos de desgaste y de contaminación.
- *Matriz de cambios.* A partir de la información obtenida sobre los cambios utilizados durante la operación del camión mediante el Sistema de Administración de Información Vital (Vital Information Management System, VIMS) y haciendo uso del análisis estadístico, se construyó una matriz en la cual se resumió la distribución base de embragues utilizada en función del número de horas de operación. El estudio incluyó: la recopilación y tabulación de las matrices de cambios para las transmisiones con más de 14.000 horas de servicio, el análisis técnico (identificación de señales de alerta, fallos o eventos operacionales), la estructuración de la matriz de cambio promedio según las horas de operación y el análisis del uso total de cada embrague, teniendo en cuenta el número de veces que se emplea en un cambio determinado.
- *Análisis de eventos.* Recopilación y tabulación de los eventos registrados desde las fechas de instalación de las transmisiones seleccionadas.

##### 4) *Validación de la metodología*

Fue seleccionado un grupo de transmisiones que no cumplieron el ciclo de vida esperado, teniendo como parámetro principal el rango de vida del componente y clasificándolas como transmisiones de vida corta y vida media. De igual manera, se seleccionó un grupo de transmisiones operativas en campo, para analizar su comportamiento actual con respecto a los parámetros determinados. La validación comprendió: Selección, clasificación e identificación de las transmisiones que no presentaron el ciclo de vida ideal; selección, clasificación e identificación de las transmisiones que se encuentran operativas en campo; y validación de datos.

##### 5) *Documentación y Conclusiones*

Se realizó una definición de cuadros de referencia relacionando las causas de las fallas identificadas y las posibles acciones a realizar, con el fin de mejorar la vida útil del componente. Se determinó la efectividad de la metodología planteada para la toma de decisiones por el área de mantenimiento.

### B. Establecimiento de límites operacionales permisibles para análisis de las condiciones del aceite

Mediante el análisis de los aceites se puede diagnosticar el estado interno de las transmisiones, ya que la presencia de partículas metálicas y no metálicas es un indicador del nivel de desgaste de los componentes y del deterioro del mismo aceite. Para esto, se establecieron los valores límites mínimo y máximo de cantidad de partículas presentes en el aceite, su viscosidad y grado de oxidación para cada 5000 horas de operación de un grupo de 259 transmisiones de camiones mineros Caterpillar-793 que alcanzaron un tiempo operacional de al menos el 90% de la vida útil especificada por el fabricante (15000-20000 horas).

Vale la pena resaltar que previo a este estudio no se contaba con un patrón histórico de referencia que indicara el tipo de distribución de probabilidad que presentaban los parámetros medidos con el análisis de aceites (por ejemplo: tipo, tamaño y cantidad de partículas, viscosidad y el grado de oxidación); razón por la cual fue necesario definir el comportamiento de cada una de las muestras, para después seleccionar las cartas de control correctas según fuera el caso. Lo anterior, se determinó siguiendo el proceso ilustrado en la Fig. 1.



Fig. 1. Procedimiento para el análisis de aceites.  
Fuente: Autores.

Del levantamiento inicial de información, se tomó el conjunto de transmisiones operativas (51) de la flota de vehículos mineros Caterpillar-793 que alcanzaron la vida útil esperada y que contaban con los datos del sistema de administración de información (VIMS). La Fig. 2 ilustra el proceso realizado.

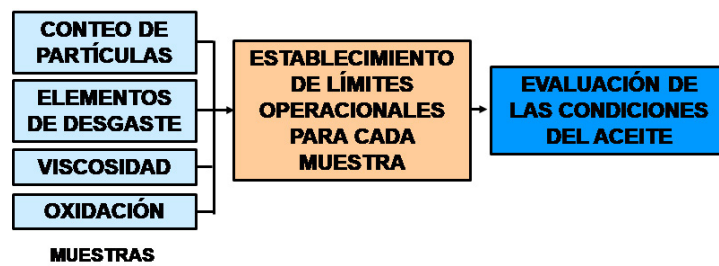


Fig. 2. Selección de muestras para evaluación de las condiciones del aceite.  
Fuente: Autores.

Para determinar el mejor modelo estadístico, se utilizó una *prueba de bondad de ajuste* como herramienta de identificación de la distribución de probabilidad, y así comprobar la correlación de todas las variables aleatorias del proceso. La prueba consistió en probar una hipótesis asignando una distribución normal de probabilidad (gaussiana) a las muestras y verificando a través de una prueba de normalidad si existía suficiente evidencia para inferir que dicha condición era válida para toda la población. Fue utilizada una distribución normal debido a que, conforme la teoría clásica del teorema central del límite, toda distribución de probabilidad, a medida que se aumenta el tamaño de su muestra, converge a una distribución normal de probabilidad. Además, este tipo de distribución es una de las más utilizadas por los diversos autores de la literatura especializada para evaluar el comportamiento físico de datos experimentales [4]-[5].

### III. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados más relevantes de las diferentes etapas de la investigación.

Respecto a los resultados del análisis de aceites, fue necesario aplicar una prueba de normalidad para verificar el tipo de distribución. El tipo de prueba utilizada se basó en la determinación del estadístico (A) (Anderson-Darling, AD) por su sensibilidad con valores cercanos y lejanos a la mediana, permitiendo así una mayor exactitud y claridad con los resultados esperados, sobre todo en los contextos en los que se desconoce totalmente el tipo de distribución que posee una

población [6]-[8]. El valor del estadístico de prueba ( $A$ ) fue calculado de forma teórica tomando como base (1) y (2), y de forma práctica utilizando el software estadístico Minitab® en su versión 17. Como parámetros, se tuvo en cuenta un nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05; asociado a un porcentaje de error (tipo I) del 5%, lo que lleva a tener un nivel de confianza ( $1 - \alpha$ ) para el ejercicio del 95%.

$$A^2 = -n - S \quad (1)$$

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] \quad (2)$$

Donde:  $n$  representa al número de observaciones;  $F(Y_i)$  es la distribución de probabilidad acumulada; y  $Y_i$  son los datos obtenidos en las muestras ordenados de menor a mayor.

La [Tabla 1](#) muestra un resumen acerca de los valores teóricos obtenidos en los cálculos del AD y la relación del valor  $p$  (p-value) en cada uno de los grupos analizados.

**TABLA 1.** VALORES DE AD Y P SEGÚN EL RANGO HORARIO DE LOS DATOS Y EL TIPO DE ANÁLISIS DE ACEITES.

Rango/Hora	ISO 6			ISO 14			Si		
	AD	P		AD	P		AD	P	
0–5000	12.2	<0.005	X	13.5	<0.005	X	114	<0.005	X
5000–10000	11	<0.005	X	9	<0.005	X	101	<0.005	X
10000–15000	12.8	<0.005	X	13.2	<0.005	X	74.5	<0.005	X
15000–20000	11	<0.005	X	10.2	<0.005	X	36.6	<0.005	X
Rango/Hora	Fe			Cu			Al		
	AD	P		AD	P		AD	P	
0–5000	26.3	<0.005	X	135	<0.005	X	100	<0.005	X
5000–10000	82.1	<0.005	X	102	<0.005	X	106	<0.005	X
10000–15000	145	<0.005	X	247	<0.005	X	97.3	<0.005	X
15000–20000	61.3	<0.005	X	152	<0.005	X	81.5	<0.005	X
Rango/Hora	Na			K			P		
	AD	P		AD	P		AD	P	
0–5000	86.7	<0.005	X	55.4	<0.005	X	11.6	<0.005	X
5000–10000	51.9	<0.005	X	89.3	<0.005	X	26.3	<0.005	X
10000–15000	38.9	<0.005	X	163	<0.005	X	20.3	<0.005	X
15000–20000	32.5	<0.005	X	117	<0.005	X	11.3	<0.005	X
Rango/Hora	Zn			V@100a			Oxidación		
	AD	P		AD	P		AD	P	
0–5000	21.8	<0.005	X	183	<0.005	X	95.1	<0.005	X
5000–10000	53.2	<0.005	X	163	<0.005	X	103	<0.005	X
10000–15000	69.3	<0.005	X	191	<0.005	X	177	<0.005	X
15000–20000	24.2	<0.005	X	119	<0.005	X	132	<0.005	X

ISO 6: tamaño de partícula mayor a 6 micrones. ISO 14: tamaño de partículas mayor a 14 micrones.  
 Fuente: Autores.

La [Fig. 3](#) muestra la gráfica de probabilidad normal para la muestra de aceites del grupo analizado por conteo de partículas ISO 6 obtenida mediante el uso del software Minitab® (versión 17). Los resultados obtenidos al analizar todas las muestras dejaron en evidencia que la hipótesis planteada debía ser rechazada, debido a que los datos no seguían la distribución especificada. Como los datos no presentaron una distribución paramétrica normal no se pudo optar por utilizar las cartas tradicionales de Shewhart sino que se debió recurrir al uso de cartas especiales como el gráfico de Media Móvil Ponderada Exponencialmente (EWMA: Exponentially Weighted Moving Average).

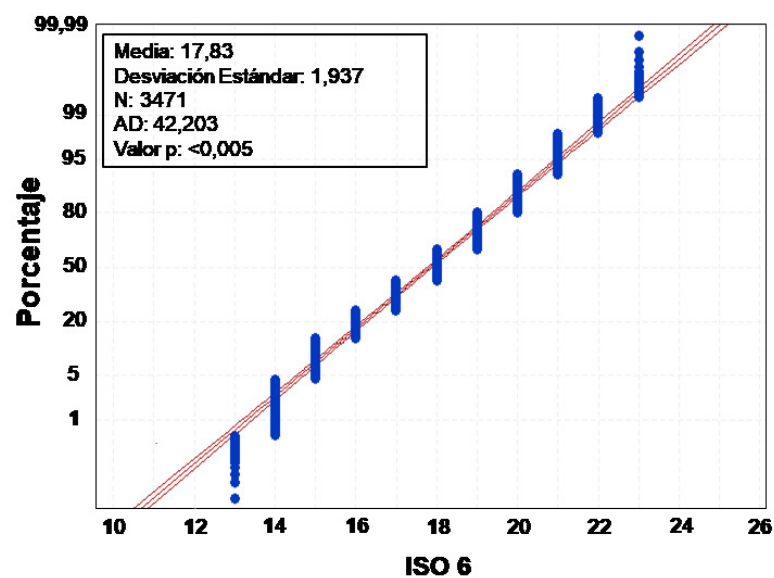


Fig. 3. Gráfica de probabilidad normal para la muestra de aceites por conteo de partículas ISO 6.  
Fuente: Autores.

La carta EWMA [9] permite monitorear procesos que muestran una media que cambia gradualmente a lo largo del tiempo, y de esta forma se pueden detectar los pequeños cambios presentados en el proceso estudiado, por ejemplo, los cambios graduales provocados por el desgaste de los componentes. Para la generación del gráfico EWMA se utilizó el software Minitab® (versión 17). La Fig. 4 es claro ejemplo de uno de los gráficos de control generados, en este caso corresponde a los límites operacionales del análisis de conteo de partículas ISO 6, de 0 a 2500 horas de operación.

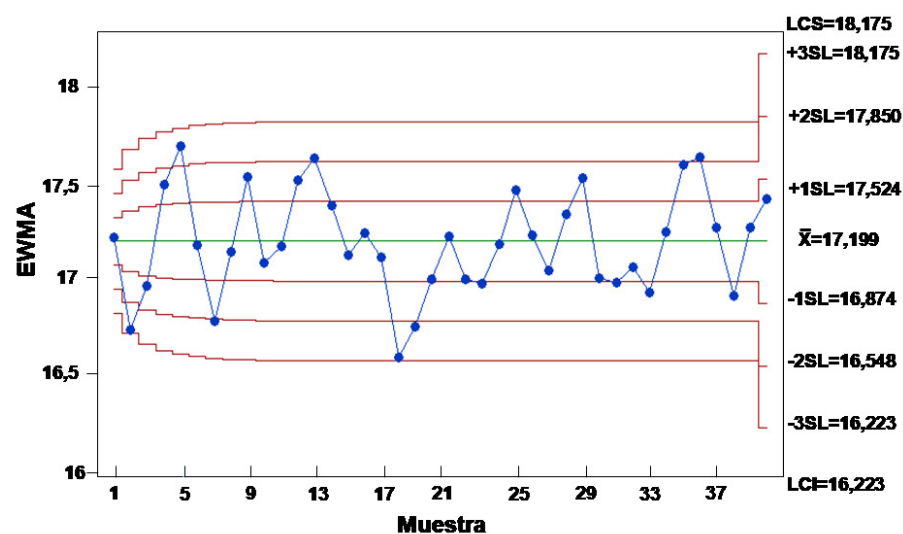


Fig. 4. Gráfico de control EWMA generado para el análisis del conteo de partículas ISO 6 de 0 a 2500 horas.  
Fuente: Autores.

#### A. Generación de Matriz de Cambio Modelo

El análisis de aceites permite relacionar el estado de la transmisión con el tiempo de operación y establecer parámetros para detectar si debe realizarse alguna intervención. Dicho estado, no depende solo del tiempo de uso, sino también de la calidad del mismo. Este aspecto está relacionado en gran medida por los cambios en la marcha y la frecuencia en la que estos son realizados. Conocer la distribución de los cambios (relaciones de velocidad) ejecutados a lo largo de la vida operativa del componente, se hace fundamental a la hora de construir la metodología de diagnóstico para evaluar las transmisiones en los camiones mineros. La forma, cantidad y frecuencia en la cual se realizan los cambios, afectando la durabilidad de la transmisión.

En cuanto a los vehículos de la flota 793, los cuales traen incorporados el VIMS, diseñado e instalado por el fabricante, en el cual, se almacena toda la información de la operación diaria de la máquina, así como el comportamiento de cada uno de los componentes del vehículo [10]-[11]. Es así, como de la base de datos del VIMS de cada equipo se descargó la información del grupo de 51 transmisiones que cumplieron con el ciclo de vida estimado según el fabricante.

Con esta información, se construyó una matriz de los cambios realizados. Esta matriz permite establecer los patrones de uso de la transmisión y su relación con el tiempo operativo. Mediante la construcción de esta matriz se analizó la distribución de cambios de una transmisión específica, la cantidad total de uso de cada cambio y de forma específica, el uso total de cada embrague (Tabla 2).

TABLA 2. ESTRUCTURA Y NOMENCLATURA DE LAS POSICIONES DE MARCHA EN LA MATRIZ DE CAMBIOS.

DJA	N1	N2	R	1	2	3	4	5	6
N1		A	B	C	D	E	F	G	H
N2	I		J	K	L	M	N	O	P
R	Q	R		S	T	U	V	W	X
1	Y	Z	AA		AB	AC	AD	AE	AF
2	AG	AH	AI	AJ		AK	AL	AM	AN
3	AO	AP	AQ	AR	AS		AT	AU	AV
4	AW	AX	AY	AZ	BA	BB		BC	BD
5	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK		BL
6	BM	BN	BO	BP	BQ	BR	BS	BT	

Fuente: Autores.

De la Tabla 2 se puede extraer la siguiente información:

- $N_t$ : Número total de cambios registrados en la matriz.
- $N_a$ : Número de cambios ideales (Zona de color verde).
- $N_b$ : Número de cambios de impacto medio (Zona de color amarillo).
- $N_c$ : Número de cambios de alto impacto (Zona de color rojo).
- $N_z$ : Número de cambios por hora.

La construcción del modelo comprendió:

- a) *La identificación de las zonas existentes en la matriz de cambios.* De acuerdo con las indicaciones del fabricante y la determinación de nomenclatura de cada posición de marcha.
- b) *Determinación del nivel de utilización de embragues.* Se tomaron en cuenta los embragues utilizados por cada cambio ejecutado y el número de veces en el cual se realiza un cambio por hora (Tabla 3). Así mismo se determinó el número de embragues utilizados bajo la relación mostrada en (3) (Tabla 4).

$$N^{\circ} \text{ cambiosxhora} = \Sigma / LU \quad (3)$$

TABLA 3. EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE UTILIZACIÓN DE EMBRAGUES EN TRANSMISIÓN XMSN I

XMSNI	15119 h	Embrague No.					
	$\Sigma$	1	2	3	4	5	6
N1	173,343			X			
N2	179,522	X					
R	72,226	X					X
1	323,195	X				X	
2	428,95		X			X	
3	416,995	X			X		
4	312,051		X		X		
5	160,141	X		X			
6	41,318		X	X			

Fuente: Autores.

c) *Identificación de los valores máximos y promedios de cada una de las posiciones establecidas para la matriz de cambio. Se obtuvieron por la multiplicación entre el número de horas de operación y los valores determinados como número de cambios ideales.*

**TABLA 4.** EJEMPLO DE CÁLCULO DE NÚMERO DE EMBRAGUES UTILIZADOS EN TRANSMISIÓN XMSN I.

XMSNI	15119 h	Embrague No.					
	$\Sigma$	1	2	3	4	5	6
N1	11			X			
N2	12	X					
R	5	X					X
1	21	X				X	
2	28		X			X	
3	28	X			X		
4	21		X		X		
5	11	X		X			
6	3		X	X			

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta que el factor de utilización de los embragues es progresivo, por ser un elemento de desgaste, se determina el porcentaje de utilización de los valores máximos y el resultante o promedio (Tabla 5 y Tabla 6).

**TABLA 5.** PORCENTAJE MÁXIMO DE UTILIZACIÓN DE EMBRAGUES PARA CADA CAMBIO: EJEMPLO EN 8.000 HORAS DE OPERACIÓN PARA TRANSMISIÓN XMSN I.

XMSNI	15119 h	Embrague No.					
	$\Sigma$	1	2	3	4	5	6
N1	93,94			X			
N2	92,29	X					
R	49,59	X					X
1	182,7	X				X	
2	237,6		X			X	
3	230,7	X			X		
4	175,4		X		X		
5	90,95	X		X			
6	23,49		X	X			

Fuente: Autores.

**TABLA 6.** PORCENTAJE PROMEDIO DE UTILIZACIÓN DE EMBRAGUES: EJEMPLO EN 8.000 HORAS DE OPERACIÓN PARA TRANSMISIÓN XMSN I.

Horas	Promedio	Embrague No.					
8000		1	2	3	4	5	6
N1	85,986			X			
N2	90,170	X					
R	38,685	X					X
1	169,599	X				X	
2	224,122		X			X	

Fuente: Autores.

*B. Análisis de la frecuencia de ocurrencia de las fallas o eventos asociados con la transmisión*



En esta etapa de la investigación, se diseñó un modelo para administrar el flujo de información requerida para el análisis de fallas asociadas con las transmisiones de los camiones, dentro del cual se determinaron los lineamientos necesarios para el establecimiento de la media de ocurrencia de todos los eventos registrados. La información inicial fue tomada del VIMS de cada vehículo de la flota 793 (modelos 793C y 793D), el cual arrojó un conjunto de eventos predeterminados asociados con las anomalías que por consideraciones del fabricante son las que se pueden presentar en el tren de potencia de cada máquina.

### 1) *Matriz de Eventos*

Para la elaboración de las listas de reportes correspondientes a la ocurrencia de eventos o fallos [12], se construyeron las matrices de eventos en las cuales, de una manera ordenada, se compilaron todos los datos disponibles tomados de la muestra seleccionada (Fig. 5). En dicha matriz de eventos, se usó una codificación para identificar las transmisiones analizadas, el equipo y el modelo al que pertenecían. La referencia a una transmisión se realizará mediante la abreviatura “XMNS”, terminología usada en el medio automotriz.

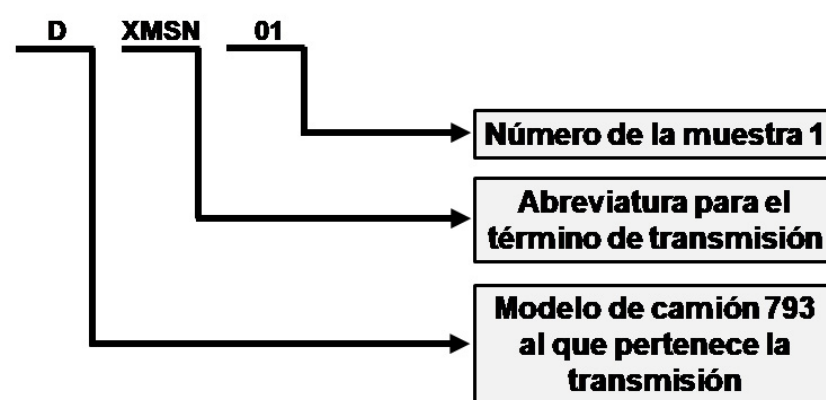


Fig. 5. Identificación de las transmisiones para matriz de eventos.  
 Fuente: Autores.

A cada equipo analizado se le asignó un número de muestra consecutivo diferente, a fin de llevar un conteo ordenado del total de muestras que hacen parte del estudio. Dentro de la matriz de eventos se consideraron dos (2) tipos de eventos, de acuerdo con el sistema de alertas de la máquina y a las consideraciones del fabricante del componente: i) *Evento de sistema*, el cual es causado por la falla o desajuste de un componente del sistema eléctrico; y ii) *Evento de máquina*, el cual corresponde a una lectura de parámetros fuera de especificación, es decir, toda condición anormal que cause una anomalía en la máquina. La Tabla 7 muestra los eventos asociados a las transmisiones de camiones de la flota 793.

TABLA 7. EVENTOS O ALERTAS ASOCIADOS A LAS TRANSMISIONES DE CAMIONES DE LA FLOTA 793.

Cambio brusco.	Sensor salida del convertidor de torque (velocidad).
Solenoides de cambio descendente.	Sensor salida del convertidor de torque (temperatura).
Velocidad del motor.	Desajuste sistema de prueba de funcionamiento.
Código del cambio.	Sensor conexión Filtro de entrada.
Módulo de Control Motor.	Comunicación sistema VIMS y Módulo de control del motor.
Solenoides de bloqueo.	Temperatura del lubricante.
Sensor de temperatura de aceite del freno.	Nivel de aceite bajo.
Freno de parqueo encendido.	Solenoides cambio ascendente.

Fuente: Autores [11].

No todos los eventos se presentan en todas las máquinas. Esto depende de la configuración de los equipos, el modelo y los componentes utilizados dentro del período operativo. Así mismo, la matriz de eventos incluye: i) el número de ocurrencias en las que se presenta un evento en la máquina dentro de un rango de tiempo; ii) el horómetro inicial y final; iii) el diferencial de tiempo, como en (4); y iv) el período horario promedio de que ocurra un evento se determina como se muestra en (5).

$$\Delta T = \text{Horómetro Final} - \text{Horómetro Inicial} \quad (4)$$

$$\text{Periodo Horario} = \frac{\text{Horas}}{\text{Evento}} = \frac{\Delta T}{\# \text{Ocurrencias}} \quad (5)$$

La **Tabla 8** muestra un ejemplo de una matriz de eventos desarrollada para una transmisión de un camión de la flota 793C.

**TABLA 8.** EJEMPLO DE MATRIZ DE EVENTOS PARA LA TRANSMISIÓN C-XMSN-01.

C-XMSN-01	Matriz de eventos para análisis de transmisiones						
	Evento Sistema	Evento Máquina	Número de Ocurrencias	Horómetro		Dif.	Período Horario
				Inicio	Fin		
Cambio brusco.		X	25	14.670	16.404	1.743	69.36
Velocidad del motor.		X	10	14.813	16.202	1.389	138.9
Cambio seleccionado.	X		2	15.868	15.868	0	0.00
Código del cambio.	X		3	15.861	15.861	0	0.00
Sensor de temperatura de aceite del freno.		X	1	15.902	15.902	0	0.00
Sensor de freno (encendido).		X	8	14.856	16.213	1.357	169.63
Sensor salida del convertidor de torque (velocidad).	X		120	15.541	16.408	867	7.23
Sensor salida del convertidor de torque (Temperatura).		X	42	14.698	16.399	1.701	40.50
Módulo control del motor.	X		1	14.979	14.979	0	0.00

Fuente: Autores [11].

## 2) Matriz Promedio de Eventos

La construcción de las matrices de eventos sirve de base para la generación de una matriz promedio, a fin de establecer un patrón modelo que sirviera como parámetro de comparación al momento de revisar la lista de eventos de un equipo en particular (tomados del VIMS del vehículo). De esta manera, se podrá determinar en tiempo real si la cantidad de eventos relacionados con la vida normal de la transmisión analizada es superior a los datos obtenidos estadísticamente.

Para garantizar el óptimo flujo de información y evitar los inconvenientes actuales presentados en torno al manejo, descarga, interpretación y utilización de la información contenida en los VIMS de cada vehículo, se diseñó un modelo para la administración del flujo de la información, y de esta forma se buscó garantizar la disponibilidad y veracidad de ésta, obteniendo resultados confiables en tiempo real y bajo unos patrones de comportamiento establecido del análisis de aceites (límites operacionales) y las especificaciones del fabricante principalmente. El desarrollo de este modelo busca facilitar la toma de decisiones por parte del Departamento de Mantenimiento (Fig. 6).



Fig. 6. Modelo para administración del flujo de información para análisis de eventos de las transmisiones.  
Fuente: Autores.

Los insumos de información permiten que el sistema se retroalimente constantemente con todos los nuevos datos que van ingresando, generándose un patrón estadístico para medición del comportamiento del componente con el paso del tiempo. La matriz promedio de eventos está integrada por unos elementos como: i) número de máquinas donde se ha presentado un evento común determinado; ii) periodo horario promedio, como en (6); iii) promedio de ocurrencia de eventos dentro de un rango horario en el cual el vehículo se encuentra en operación, como en (7).

$$\text{Periodo Horario Promedio del Evento} = \frac{\text{Periodo Horario del Evento}}{\# \text{ Transmisiones}} \quad (6)$$

$$\text{Promedio de Ocurrencia del Evento} = \frac{\text{Horas de operación}}{\text{Periodo Horario Promedio del Evento}} \quad (7)$$

El éxito de los resultados que ofrece la matriz depende del adecuado suministro de información (Fig. 7). Una vez determinado el sistema de información y los elementos que la integran queda definido el modelo de la Matriz Promedio de Eventos. La Tabla 9 muestra un ejemplo desarrollado para una transmisión de un camión de la flota 793C con 10000 horas de operación.



Fig. 7. Suministro de información para cálculo de elementos de la matriz promedio de ocurrencia de eventos.  
Fuente: Autores.

**Tabla 9.** EJEMPLO DE MATRIZ PROMEDIO DE EVENTOS PARA UN VEHÍCULO 793C CON 10.000 HORAS DE OPERACIÓN.

Matriz promedio de eventos para análisis de horas de transmisiones según su tipo de operación						Ingrese horas de operación de la XMSN 10000
Mod.	C-XMSN	Evento Sistema	Evento Máquina	Cantidad de Máquinas	Período Horario Promedio	Promedio de Ocurrencia de Eventos
Evento						
Cambio brusco.			X	11	121.69	82
Solenoides cambio descendente.		X		1	6.56	1.525
Velocidad del motor.			X	7	159.45	63
Velocidad del motor.		X		1	61.63	162
Selección del engranaje.		X		1	171.28	58
Código del cambio.		X		1	10.00	1.000
Solenoides de bloqueo.		X		1	9.83	1.017
Sensor de temperatura de aceite del freno (posterior-izquierdo).		X		1	22.00	455
Sensor de temperatura de aceite del freno (frontal-izquierdo).			X	3	10.17	983
Sensor de temperatura del freno (posterior izquierdo).			X	6	299.14	33
Sensor de freno (encendido).			X	7	159.18	63
Sensor de temperatura de aceite del freno (frontal-derecho).			X	3	9.48	1.055
Sensor de temperatura de aceite del freno (posterior-derecho).		X	4	400.35	25	
Sensor salida del convertidor de torque (velocidad).		X		9	210.07	48
Sensor salida del convertidor de torque (temperatura).		X		13	63.14	158
Sensor salida del convertidor de torque (temperatura).		X	13	62.82	159	
Módulo control del motor.		X		5	179.56	56
Solenoides cambio ascendente.		X		1	11.80	847
Comunicación sistema VIMS y Módulo de control del motor.		X		1	516.33	19

Fuente: Autores.

### C. Mejoramiento de la vida útil del componente

Para el desarrollo de esta etapa, se tomó la información únicamente de las transmisiones que no cumplieron con su ciclo de vida útil en los últimos cinco años, con el propósito de encontrar una muestra representativa, la cual permitió desarrollar un análisis estadístico para identificar los tipos de fallas más comunes que se presentan en estos componentes.

El proceso de identificación de las fallas y sus causas es clave dentro de los sistemas de mantenimiento, dado que permite tomar las acciones para anticipar problemas en el sistema. Estas acciones pueden ser predictivas y/o correctivas [13]. El monitoreo de las condiciones permite realizar un análisis estadístico del comportamiento del componente. En este caso, se pudieron determinar los principales eventos de falla presentados en las transmisiones. Como se observa en la Fig. 8, las causas de falla más significativas se presentaron por el deslizamiento de piñones o por problemas de modulación (38%) y sobrecalentamiento de la transmisión (30%). La Tabla 10 resume los problemas encontrados y las posibles causas encontradas generadoras de las fallas en los componentes analizados.

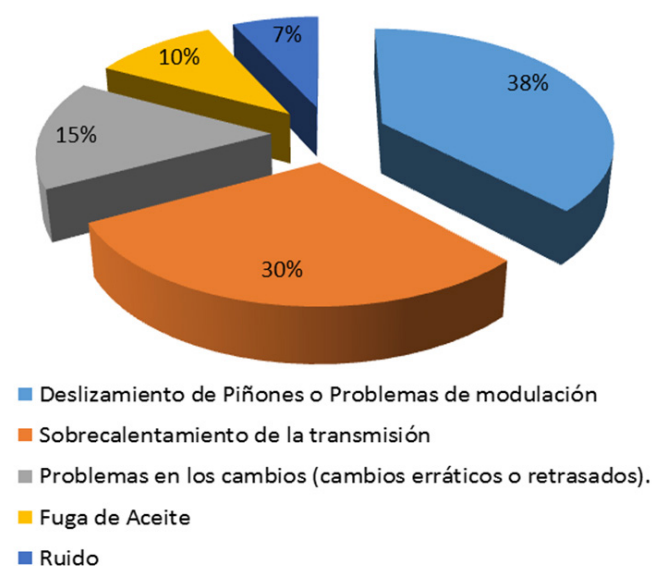


Fig. 8. Eventos de falla en transmisiones que no cumplieron su ciclo de vida.  
Fuente: Autores.

TABLA 10. CAUSAS QUE DETERMINAN LA OCURRENCIA DE FALLAS EN COMPONENTES ANALIZADOS.

Problema o evento	Causas
Deslizamiento y/o problemas de modulación.	Bajo fluido de aceite, talas en el solenoide, piñones desgastados, desgaste progresivo en los platos de embrague.
Sobrecalentamiento.	Bajo nivel de fluido, aceite quemado, obstrucción de fluido en la línea de enfriadores, acarreo, funcionamiento de la máquina en altas temperaturas (temperatura extrema), problemas en los solenoides.
Problemas en los cambios (cambios erráticos o retrasados).	Bajo fluido de aceite, utilización de un aceite inadecuado, aceite ineficaz o quemado, líneas de auto vacío averiadas, problemas con el solenoide.
Fuga de aceite.	Empaquetadura defectuosa, problemas con los sellos, fuga en los conductos de fluidos, tala en el convertidor de torque.
Ruido.	Bajo fluido de aceite, tala en el convertidor de torque.

Fuente: Autores.

Mediante un Diagrama de Pareto (Fig. 9) se identificó la relación entre las causas que contribuyen al 80% de ocurrencia de las fallas con los resultados obtenidos en la distribución de los eventos de fallas reportados en el grupo de transmisiones seleccionadas [14].

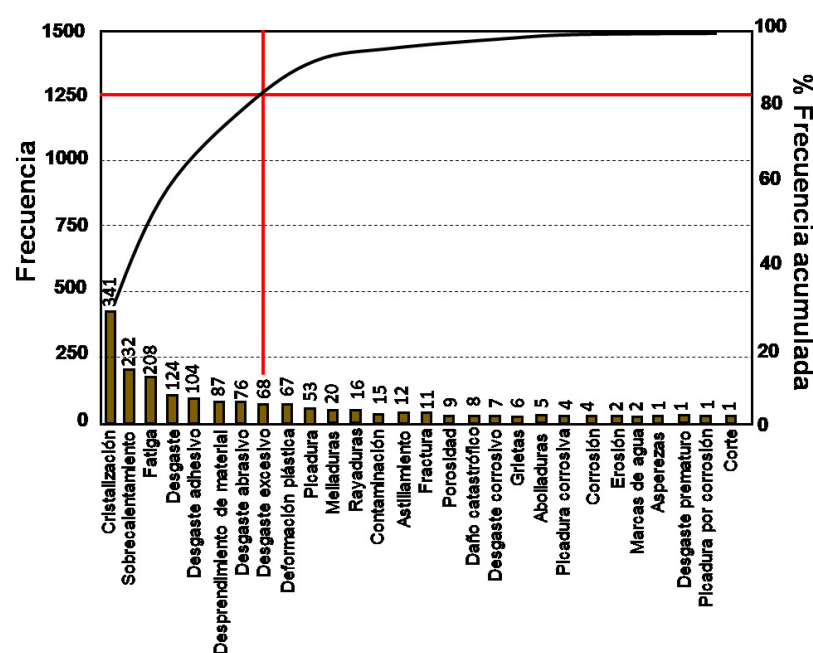


Fig. 9. Diagrama de Pareto: causas que representan la mayor ocurrencia de eventos.  
Fuente: Autores.

Del Diagrama de Pareto se concluye que la mayor causa de la ocurrencia de eventos es la cristalización, la cual está asociada a los problemas de modulación y deslizamientos que se presentan en los discos al momento de realizar el acople. En segundo lugar, está el sobre-

calentamiento, el cual está relacionado con las obstrucciones en el sistema, las cuales pueden ser generadas también por los elementos que son desprendidos de las partes del componente que presentan desgaste en sus diferentes versiones. También se analizó la distribución de las causas encontradas en cada uno de los embragues. La Fig. 10 muestra un registro general de fallas por embrague.

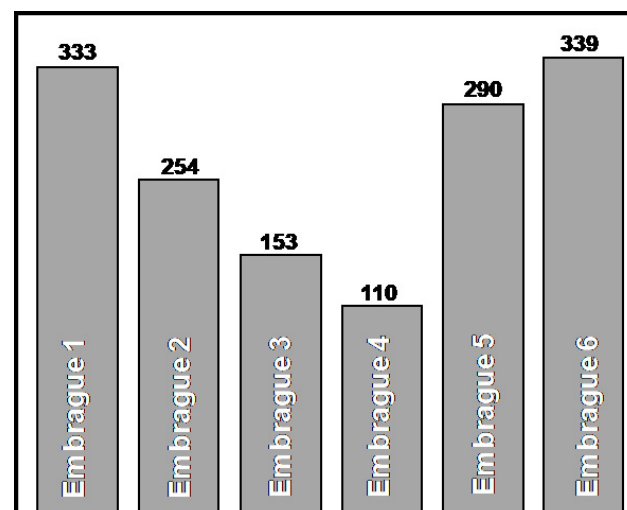


Fig. 10. Diagrama general de fallas por embrague.  
Fuente: Autores.

En la Fig. 10 se puede observar que los embragues 1 y 6 son los subsistemas que registran mayor ocurrencia con valores de 333 y 339 respectivamente de un total de 1485, representando un porcentaje alrededor del 46%. De igual manera, se logró distribuir las causas evidenciadas por embrague a fin de observar de manera individual cuales eran las más representativas para cada uno de ellos. La Fig. 11 muestra un ejemplo del Embrague 1.

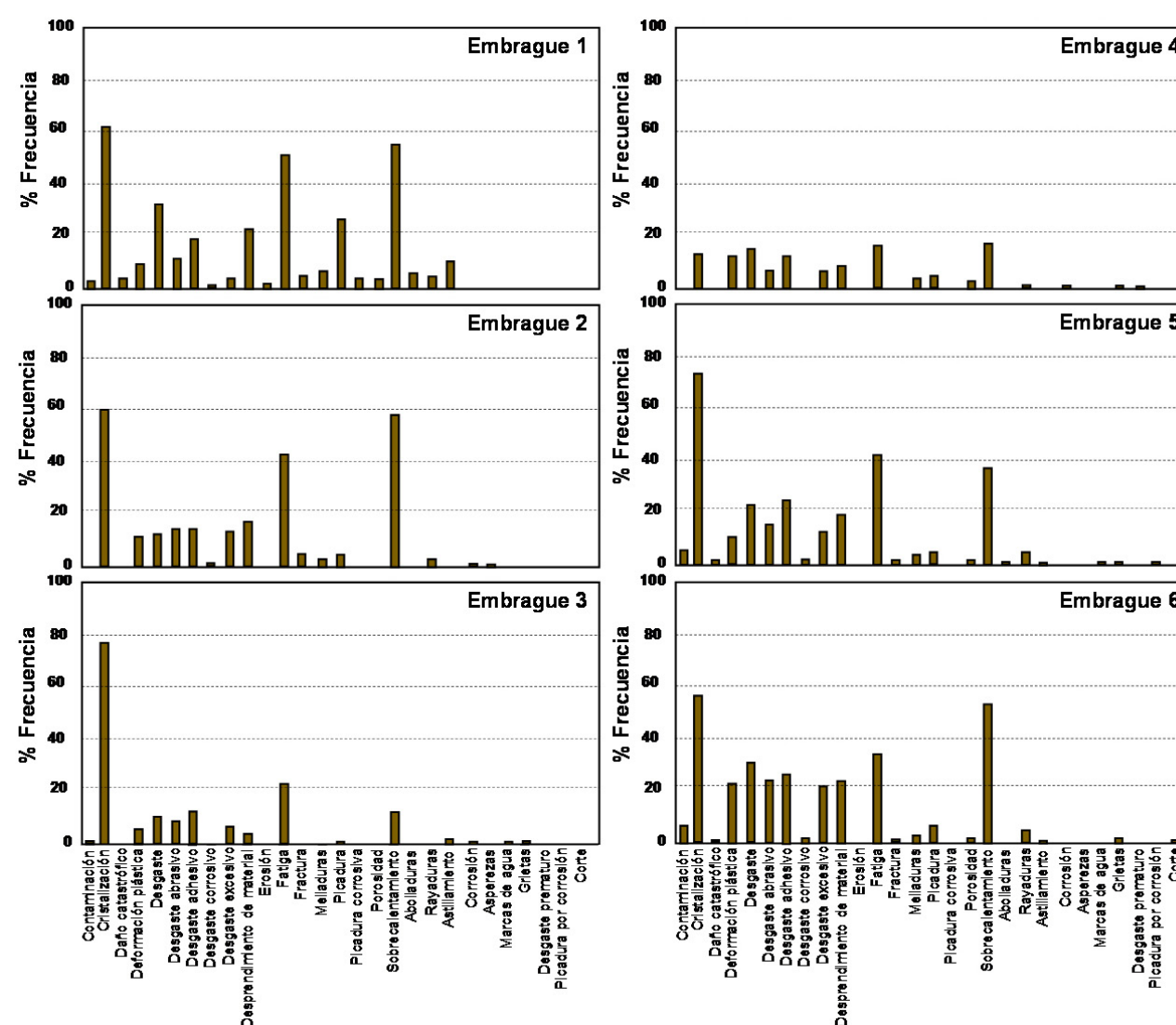


Fig. 11. Causas representativas y frecuencia de fallos para el daño de los Embragues.  
Fuente: Autores.

De todos los gráficos obtenidos para cada embrague se encontró que el fenómeno de la cristalización es el predominante. Sólo en el cuarto embrague no es la principal causa presentada, sin embargo, la diferencia con la cual es superada es mínima. Este fenómeno es un proceso que va asociado con el ciclo de vida de este tipo de componente, sin embargo, se estima que, mediante un buen manejo del equipo, este tipo de eventos se presentarían de forma periódica y en cantidades razonables durante el ciclo de vida de la transmisión. En la Fig. 12 se muestran algunos ejemplos sobre las fallas más representativas de los embragues estudiados.

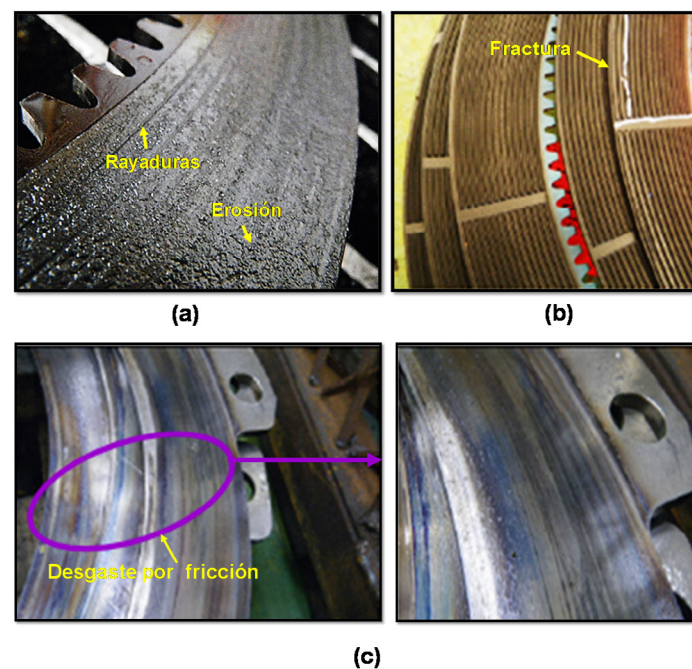


Fig. 12. Fallas representativas de los embragues. (a) Embrague 4, (b) Embrague 6 y (c) Embrague 5.  
 Fuente: Autores.

Adicional a esto, se encontró que uno de los aspectos importantes para mejorar el rendimiento en los embragues y reducir el fenómeno de la cristalización era mediante una correcta calibración de presiones, por lo que se analizaron los tiempos de deslizamiento de las transmisiones con el fin de desarrollar una herramienta y/o modelo estadístico sólido, el cual en un futuro ofreciera resultados beneficiosos para el objetivo trazado. En este punto, los tiempos de deslizamiento fueron tomados de transmisiones que cumplieron su ciclo de vida normal. La Tabla 11 muestra las tendencias del tren de potencia en relación con los tiempos de deslizamiento. Los tiempos ideales son los que se encuentran dentro del rango de color verde.

TABLA 11. TENDENCIAS DEL TREN DE POTENCIA.

Tren de potencia: Tendencia del tiempo de deslizamiento - Tiempo típico (seg.)				
793	<Rango	Dentro de Rango	>Rango	>>Rango
Cambio descendente	<1.5	1.5 - 2.25	2.26 - 2.50	>2.51
Cambio ascendente	<1.3	1.3 - 1.55	1.56 - 1.60	>1.61
Cambio 2-3	<0.7	0.7 - 0.83	0.84 - 0.90	>0.91
Cambio 3-2	<0.5	0.5 - 0.85	0.86 - 0.90	>0.91
Cambio 3-4	<0.6	0.6 - 0.73	0.74 - 0.80	>0.81
Cambio 4-5	<0.73	0.73 - 0.85	0.86 - 0.90	>0.91
Cambio 5-6	<0.675	0.675 - 0.75	0.76 - 0.80	>0.81

Fuente: Autores.

El grupo analizado mostró en su mayoría porcentajes altos fuera de los rangos. Lo anterior se explica por el elevado número de horas de operación que representan un alto desgaste en el material de fricción de los discos. Adicional a esto, se observa un alto número de fallas eléctricas no identificadas que deberían ser corregidas. Como conclusión de esta sección del estudio se determinaron los tiempos promedio de deslizamiento en las transmisiones de la flota 793C y 793D. En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos para la flota 793C.

TABLA 12. TIEMPOS PROMEDIO DE DESLIZAMIENTO EN TRANSMISIONES 793C.

Promedio XMSN's 793C							
Promedio	Deslizamiento de embrague. Cambio descendente (%)	Deslizamiento de embrague. Cambio ascendente (%)	Deslizamiento: 2-3(%)	Deslizamiento: 3-2(%)	Deslizamiento: 3-4(%)	Deslizamiento: 4-5(%)	Deslizamiento: 5-6(%)
< Rango	3.85%	5.08%	8.56%	0.24%	3.29%	13.00%	4.51%
Dentro de rango	61.41%	26.65%	12.59%	26.98%	11.34%	8.44%	5.72%
> Rango	10.75%	3.72%	4.92%	2.78%	4.64%	3.54%	2.48%
>> Rango	13.82%	57.49%	63.99%	52.84%	70.20%	53.79%	26.64%
Falla no conocida	10.18%	7.06%	9.94%	17.16%	10.52%	21.23%	60.66%

Fuente: Autores.

#### IV. CONCLUSIONES

La presente investigación ha permitido establecer una metodología de monitoreo para determinar acciones que permitan mejorar la vida útil de las transmisiones en los camiones mineros. Con la metodología planteada se pudieron observar las condiciones reales del componente, y por ende emitir alertas en un tiempo óptimo, mediante las cuáles se ejecutarán acciones que contribuyan al mejoramiento del ciclo de vida del componente. Como conclusiones se obtuvieron:

Mediante la metodología de análisis de aceites se determinó un comportamiento patrón en las diferentes propiedades del aceite, cuyo objetivo fue el de generar una relación mucho más directa entre la transmisión y el entorno en el cual está operando. Durante el desarrollo del análisis de aceites, los valores registrados presentaron un comportamiento estadístico no paramétrico. Este comportamiento se atribuye a diferentes factores que influyen a lo largo del ciclo de vida de las transmisiones como: mantenimientos preventivos, valores atípicos generados por casos puntuales, cambios de aceites fuera de lo programado, eventos de falla, entre otros. Las cartas de control EWMA son adecuadas ante estos comportamientos de los datos y las mismas fueron usadas para establecer los límites máximos y mínimos en los diferentes factores analizados en el aceite.

La investigación también permitió detectar la tendencia de concentración y el comportamiento escalonado de los límites acorde a una etapa o número de horas de servicio ejecutadas en el ciclo de vida útil de las transmisiones. En la gran mayoría de los límites de control estipulados por los fabricantes de aceites se brinda un valor que cubre el mayor número de incidencias que puedan presentarse, sin embargo, mediante los límites establecidos en la presente investigación, se podrá observar el comportamiento ideal de las transmisiones que se encuentran en operación, permitiendo una toma de decisiones más efectiva. La utilización de los embragues está muy relacionada con el número de cambios realizados en una transmisión dentro de un periodo de tiempo. Es así, como la determinación de los valores máximos, mínimos y promedio permitió establecer el comportamiento patrón de la matriz de cambios resultante. Como no todas las transmisiones presentaron el mismo tiempo de servicio a la hora de ser analizadas, fue necesario establecer valores unitarios que al final sirvieron como factor para el cálculo de la matriz modelo. El uso de la matriz de cambios modelo desarrollada como resultado de la investigación, se convierte en una herramienta de gran utilidad durante la operación, facilitando la interpretación y análisis de una matriz real, permitiendo compararla con una matriz de referencia obtenida estadísticamente y validada y sustentada con el aporte de personas con amplio conocimiento y experiencia. Uno de los logros significativos de la investigación fue la estandarización del proceso de administración de la información, el cual, al igual que para las matrices de cambio, se logró definir un procedimiento que garantiza la obtención de información con un flujo continuo y confiable, y que a su vez permite seguir ampliando la base de datos de manera que el modelo de análisis sea cada vez más robusto, proporcionando mediciones predictivas a corto, mediano y largo plazo.



Mediante el diseño del modelo de administración de información, se estableció un patrón promedio de comportamiento de acuerdo con el conteo de eventos comunes registrados en la actual base de datos. La metodología desarrollada permite analizar el comportamiento de los diferentes eventos que se presentan en las transmisiones, generando un conjunto patrón de registros permisibles en un punto determinado del ciclo de vida de la transmisión. Este primer desarrollo facilitará la toma de decisiones al grupo analista en función del número de registros que se detectan versus el comportamiento ideal para la flota de camiones. Igualmente se podrá analizar la relación de eventos que se pueden realizar para cada componente en un rango de tiempo determinado. En la medida en que se aproveche mejor la base de datos de la máquina, se logrará alimentar en mayor proporción el sistema con la información necesaria, generando un criterio mucho más sólido y confiable, con rangos operacionales superiores a los presentados. Es así como con la investigación se pudo entender como el sistema de información para análisis de fallas o eventos genera un conocimiento en tiempo real sobre el estado de la transmisión de la máquina. De esta forma se pueden determinar las actividades preventivas o correctivas necesarias en pro de garantizar que los vehículos de la flota 793 continúen operando dentro de sus niveles máximos de producción. Dicha gestión favorece en mayor medida la formulación de planes eficaces de mantenimiento. Dentro de la temática planteada por el presente estudio, en lo referente a planes de mantenimiento y monitoreo bajo condiciones para los vehículos de la flota 793 usados por la industria minera, es de vital importancia resaltar que la eficacia de toda la metodología planteada en la investigación, así como la eficiencia de los planes de mantenimiento formulados y ejecutados por el personal encargado dentro de las empresas, dependen en gran medida de la descarga oportuna y la interpretación adecuada de toda la información almacenada dentro del VIMS (Sistema de Administración de Información Vital) de cada máquina, como fuente principal para alimentar la base de datos con la que deben contar los departamentos de mantenimiento de cada empresa.

Como conclusión general de la investigación, al establecer y poner en funcionamiento la metodología de monitoreo desarrollada, el usuario podrá obtener la información requerida en tiempo real, la cual le permitirá contar con un registro completo del estado de las transmisiones de cada máquina, de tal forma que se logre gestionar una administración más eficiente del componente, mejorando los programas de mantenimiento programado, maximizando la vida útil y reduciendo los costos de operación.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Reyes, “Camiones mineros: gigantes en tamaño y relevancia,” *Minería chilena*, no. 401, pp. 128–131, Nov. 2014. Disponible en <https://www.mch.cl/revistas/sierra-gorda-scm-apunta-su-expansion-2/#>
- [2] L. Chavarría, “Diseño de un sistema de control de gestión para una empresa de servicios de ingeniería de consulta en minería,” *Trabajo grado*, dpto Ing Ind, UCh, Sgo, Cl, 2010. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103800>
- [3] S. Fygueroa, J. Serrano y G. Moreno, “Mantenimiento Predictivo de Motores Mediante Análisis de Aceite,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 1, no. 13, pp. 92–95, 2009. Disponible en [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home\\_40/recursos/revistas/27102011/revista\\_13.jsp](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIG/home_40/recursos/revistas/27102011/revista_13.jsp)
- [4] A. Feigenbaum, *Control Total de la Calidad*. México, D.F., Mex.: Grupo Editorial Patria, 2008.
- [5] R. Walpole, R. Myers, S. Myers y K. Ye, “Pruebas de hipótesis de una y dos muestras,” en *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*, 8a Ed. México, D.F. Mex.: Pearson, 2015, pp. 310–388.
- [6] M. Marqués, “Prueba de bondad de ajuste normal de Anderson-Darling,” en *Estadística básica: un enfoque no paramétrico*, México, D.F., Mex.: UNAM, 2013, pp. 41–46.
- [7] R. Herrera y T. Fontalvo, *Seis Sigma. Métodos estadísticos y sus aplicaciones*. B/q, Co: B - EUMED, 2011.
- [8] R. Walpole, R. Myers, S. Myers y K. Ye, *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias*. México, D.F. Mex.: Pearson, 2012.
- [9] R. Loaiza, “Gráficos de control no paramétricos basados en r-estadísticos con aplicación al caso multivariante,” *Trabajo grado*, dpto Ing. Ind., UC3M, Mad, Esp, 2013. Disponible en <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/18161>
- [10] *Specalog ASHQ5600-793D*, Camión de minería 793D CAT, CAT, Dec, Il, USA, 2005. Available: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10549350>
- [11] VIMS. (2010). CAT. Available: [http://www.cat.com/es\\_US/support/operations/technology/fleet-management-solutions/vims.html](http://www.cat.com/es_US/support/operations/technology/fleet-management-solutions/vims.html)
- [12] *Schematic 4ARI-217*, Sistema eléctrico camión 793C CAT, CAT, Dec, Il, USA, 1998. Available: <http://www.catsch.info/senr1447.html>

- [13] L. Amendola, “Diagnóstico de Fallos por Monitoreo de Condición,” *Mantenimiento: ingeniería industrial y de edificios*, no. 167, pp. 50–53, 2010. Disponible en <https://www.aem.es/publicaciones/revista-mantenimiento>
- [14] H. Gutiérrez & R. De la Vara, *Control estadístico de calidad y seis sigma - 2 ed.* Guad., Mx: McGraw-Hill, 2009. Recuperado de <https://www.uv.mx/personal/ermeneses/files/2018/05/6-control-estadistico-de-la-calidad-y-seis-sigma-gutierrez-2da.pdf>

**Cristian Antonio Pedraza-Yepes** es Ingeniero Mecánico de la Universidad del Atlántico (Colombia). Master en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte (Colombia). Profesor asociado y miembro del Grupo de Investigación CONFORMAT del Programa de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Las áreas de interés de investigación incluyen diseño mecánico, procesos de fabricación, caracterización de materiales y generación de energía alternativa. <https://orcid.org/0000-0002-5951-7835>

**Jorge Enrique González-Coneo** es Ingeniero Mecánico y Master en Ingeniería Mecánica por la Universidad del Norte (Colombia). Profesor de la Universidad de la Costa (Colombia). Ha estado vinculado a los departamentos de ciencias civiles y ambientales, energía y ciencias naturales y exactas. Actualmente realiza estudios de doctorado en Nanociencia y Tecnologías de Materiales. Ha trabajado en diferentes áreas: mantenimiento, materiales, termofluidos e instrumentación. <https://orcid.org/0000-0001-9391-8002>

**Jorge Luis Martínez-Sánchez** es Ingeniero Mecánico de la Universidad del Atlántico (Colombia), con experiencia en gestión de mantenimiento de maquinaria pesada e industrial. Ha trabajado en empresas del sector. Amplia experiencia en mantenimiento y prevención de fallas en camiones mineros. <https://orcid.org/0000-0002-3377-9159>

**Oscar Fabian Higuera-Cobos** es Ingeniero Metalúrgico y M.Sc. en Ingeniería Metalúrgica por la Universidad Industrial de Santander (Colombia). Ph.D. en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Politécnica de Cataluña (España). Ha trabajado como profesor en la Universidad Industrial de Santander, y posteriormente como profesor de planta en la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Actualmente es profesor asociado y director del Grupo de Investigación CONFORMAT del programa de Ingeniería Mecánica de la facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico (Colombia). Es autor de dos libros relacionados con las áreas de materiales y tribología, así como de diferentes artículos relacionados con la Ingeniería metalúrgica y la ciencia de la Ingeniería de materiales. Sus principales áreas de investigación están relacionadas con la deformación plástica severa, la electroquímica y el medio ambiente, la metalurgia física, los tratamientos térmicos y los materiales avanzados. <https://orcid.org/0000-0002-4836-5215>

**José Daniel Hernández-Vásquez** es Doctor en Ingeniería Mecánica por la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro (PUCRio, Brasil). Máster en Metrología de la PUC-Rio (Brasil). Ingeniero Mecánico de la Universidad del Atlántico (Colombia). Durante su formación de posgrado recibió una beca de instituciones del Gobierno de Brasil para el desarrollo de la ciencia y la tecnología: CAPES, FAPERJ y CNPq. Experiencia en disciplinas de ministración en el departamento de Ingeniería Eléctrica y en el programa de Posgrado en Metrología de la PUC-Río, y en la facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico. Investigador y consultor de la industria brasileña en proyectos financiados por ANEEL y la ANP / PETROBRAS; enfocados específicamente para: (i) evaluar la incertidumbre de medición de los sistemas de transferencia de calor y (ii) desarrollar una metodología para la calibración y evaluación metrológica de medidores ultrasónicos de gas natural y líquido. Además ha trabajado en la gestión técnica y administrativa de los Laboratorios de Metrología. Reconocido por la Red Colombiana de Metrología (RCM, Sub-Red: Academia, Industria), como experto en metrología para el mercado colombiano. Actualmente, trabaja como profesor de tiempo completo con dedicación exclusiva en la facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica (FIMEB) del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Antonio Nariño (Colombia). <https://orcid.org/0000-0002-0028-2912>