

Diagnóstico y pronóstico de las fallas de los rodillos radiales del transportador Jacobi

Benigno Leyva-de la Cruz
Marjoris Utria-Jiménez

Resumen

El propósito del estudio fue diagnosticar, en la planta de Hornos de la empresa productora de níquel con tecnología Caron, las causas de la salida de servicio de los rodillos radiales en los transportadores Jacobi, con el fin de proponer acciones para aumentar su fiabilidad y pronosticar el comportamiento de las fallas. Se simuló, por elementos finitos, el régimen de explotación de los rodillos para determinar si las fallas se debían a baja resistencia mecánica y se realizó un análisis de causa-efecto a los rodillos retirados en 39 meses, verificando posteriormente la normalidad y la aleatoriedad. La frecuencia de fallas de los rodillos se pronosticó mediante el método de las medias móviles. No se encontró relación entre las fallas y el déficit de resistencia mecánica; el análisis de causa-efecto evidenció la influencia de factores como recursos humanos y materiales, el régimen de explotación de los rodillos y las características físico-mecánicas de estos en la variabilidad del número de rodillos que fallan; la prueba de normalidad de Gauss indicó existencia de factores predominantes en la variabilidad, y la de aleatoriedad, que la variabilidad responde a factores aleatorios. El pronóstico de fallas obtenido es de nueve rodillos al mes, lo cual constituye un referente para la contratación, fabricación, transportación y almacenaje de los rodillos.

Palabras clave: transportador Jacobi; hornos de reducción; rodillos radiales; fallas mecánicas; simulación.

Diagnosing and predicting failures in Jacobi conveyor radial rollers

Abstract

The objective of the investigation was to evaluate the causes of the failure on the existing Jacobi conveyor radial rollers at the kiln plant of the nickel production industry using Caron technology in order to increase their operating reliability and predict the pattern of these failures. The operating rate of the rollers was simulated by finite elements to determine if the failures were caused by a low mechanical resistance. A cause-effect assessment was carried out by testing the rollers that were removed in 39 months, which indicated a normal and random pattern. The frequency of failures on the rollers was estimated using the method of mobile media. No relation was observed between the failures and the low mechanical resistance. The cause-effect analysis revealed the effect of factors such as human and material resources, the operating rate and the technical and mechanical properties of the rollers on the variation in the number of failing rollers. The Gauss normality test results indicated the presence of prevailing factors in the variability and randomness. Variability responds to random factors. The estimated failure frequency is 9 rollers per month, which is a point of reference for contract, manufacture, transportation and storage of rollers.

Keywords: Jacobi conveyor; reduction kiln; radial rollers; mechanical failures; simulation.

1. INTRODUCCIÓN

Mejorar la eficiencia de los equipos e instalaciones en las fábricas productoras del níquel es una prioridad debido al importante rol de la industria del níquel en la economía del país.

La fiabilidad es la cualidad de un objeto de mantener sus características funcionales dentro de determinados límites durante un período establecido de tiempo (Navarrete & González 1986). Es decir, se puede expresar como la probabilidad de trabajo sin fallo de un objeto durante un periodo de tiempo establecido. La fiabilidad de un producto, elemento o máquina se conserva utilizando métodos correctos de almacenamiento, además de mantener su adecuada explotación, revisión sistemática, control profiláctico y reparación oportuna.

La vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquina se relaciona con los mecanismos de desgaste que sufren durante el período de explotación (Álvarez 1999). A pesar de la gran variedad de factores que provocan desgaste, como son las condiciones de trabajo y explotación a que están sometidos los elementos de máquinas, tienen particular significación en la durabilidad de estos las propiedades mecánicas del material y el acabado superficial que puedan tener dichos elementos (Leyva et al. 2011). Para controlar y evaluar la gestión de mantenimiento en las empresas resulta útil la implantación, estudio y análisis de indicadores. Un indicador, según Navarrete y González (1986) "es un parámetro numérico que facilita la información sobre un factor crítico identificado en la organización, en los procesos o en las personas respecto a las expectativas o percepción de los clientes en cuanto a costo calidad y plazos".

La unidad de Hornos de Reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara tiene como función la reducción de los óxidos de níquel y cobalto; los óxidos de hierro se reducen hasta hierro metálico, y se considera entre las de mayor influencia en la finalidad del proceso, ya que la producción del sinter depende directamente de la magnitud del extractable logrado durante la reducción del mineral. Para ello se cuenta con la instalación de 24 hornos de reducción, 12 transportadores sinfín que, a su vez, para su funcionamiento, utilizan 12 rodillos radiales de apoyo cada uno (Velázquez 2002). Estos rodillos, (Oliversos 2011) para mantener el rendimiento y la estabilidad en el trabajo, deben tener un acabado óptimo, sin grietas ni fisuras en toda la superficie de la pista de rodaje, además de buena resistencia mecánica a la fricción y flexión.

Uno de los problemas medulares que afecta la productividad de la planta de Hornos de Reducción es el deterioro de los rodillos. Según las estadísticas compiladas (Oliveros 2011), el índice promedio de deterioro es de 52 rodillos al mes, lo que representa unos 624 anuales. Las salidas frecuentes del servicio por causa del desgaste obligan a sustituirlos, lo que provoca pérdidas y afectaciones en la producción.

Los rodillos son unas de las piezas más importantes del transportador Jacobi y tienen la particularidad de ser el elemento fusible de la cadena formada por los rodillos y las llantas a las cuales les sirven de apoyo, exponiéndose a condiciones de cargas severas de temperatura, presión, velocidad, ambiente erosivo y corrosivo.

El propósito de este estudio fue diagnosticar, en los transportadores Jacobi de la planta de Hornos de la mencionada empresa, las causas de la salida de servicio de los rodillos radiales con el fin de proponer acciones para aumentar su fiabilidad.

1.1. Características de los rodillos del transportador Jacobi

Los rodillos radiales, en su conjunto, son estructuras sólidas compuestas por un cuerpo llamado igualmente rodillo. Estos son fabricados de acero 55 GOST o acero AISI 1045 ASTM y de 40–46 HRC de dureza en la superficie según proyecto. Van montados en dos rodamientos autoalineables N° 22315, según norma SKF, para girar sobre un eje fijo de material AISI 1045, que descansa sobre dos apoyos de hierro fundido con resistencia mecánica de 240 MPa. A este eje en uno de sus extremos se le hace un agujero longitudinal de 8 mm de diámetro hasta la distancia media del mismo, agujero que se interseca con otro transversal, para, mediante unas copillas, lubricar la zona de los cojinetes. Como accesorios complementarios posee 2 tapas, 2 prensa estopas, 2 camisas, 2 placas de seguro, 2 discos, una junta y cordón de amianto magnesiano. Todos estos elementos fijados con 22 tornillos y 14 arandelas para hermetizar dichos rodamientos, evitando que entre polvo, agua y partículas contaminantes a las superficies de trabajo, además de poder mantener lubricada toda esa zona. Tienen unas dimensiones generales de 480 mm entre los apoyos y el diámetro del cuerpo giratorio de 305 mm.

Estos rodillos (Figura 1) sirven de apoyo a las llantas, cuyas características son las siguientes: tienen una masa de 288,8 kg, se construyen de acero 55 (GOST) con una dureza de 50–55 HRC, hasta una profundidad de 10 mm; trabajan en condiciones ambientales adversas y agresivas en las que el polvo y el agua están siempre presentes.



Figura 1. Imagen del transportador donde se observan los rodillos junto a la llanta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Régimen de explotación de los rodillos

El estudio se hizo para los rodillos sometidos al régimen de explotación que muestra la Tabla 1.

Tabla 1. Régimen de explotación de los rodillos (Prieto 2013)

Material de los rodillos	Acero AISI 1045
Número de revoluciones	23,3 rev/min
Temperatura	250 C ⁰
Fuerza	37 258,82 N
Flujo de agua	10 m ³ /h
Porcentaje de sólido presente en el agua	1 %
Tiempo diario de trabajo	24 h
Dimensiones generales	
Diámetro exterior	305 mm
Diámetro interior	150 mm
Largo	m

2.2. Simulación con el método de elemento finito

La simulación del régimen de explotación de los rodillos se realizó para determinar si los rodillos fallan por déficit de resistencia mecánica. Para la verificación de resistencia mecánica de la pieza objeto de estudio se utilizó el software Cosmos Desing Star 4.5. El trabajo consistió en comprobar la capacidad de resistencia, de acuerdo con la carga y otros efectos a que los mismos están sometidos. Para la simulación se procedió según los siguientes pasos:

1. Cuando se tienen las dimensiones se procede a la elaboración del modelo geométrico de la pieza en tres dimensiones, utilizando como software de dibujo auxiliar el AutoCAD;
2. Después de elaborar completamente el modelo geométrico en AutoCAD se exporta como objeto Acis.Sat, para que el elemento tenga acceso en el Cosmos;
3. Luego en el Cosmos se crea un estudio para el tipo de sollicitación que corresponda;
4. Se asignan las propiedades del material;
5. Se aplican las condiciones de frontera y de mallado del modelo;
6. Se aplican las condiciones de contorno;
7. Corrida del estudio para la obtención de la solución y
8. Chequeo del diseño.

La construcción del modelo físico se realizó sobre la base del conocimiento de las características que lo definen. Las características del modelo quedan determinadas por la correlación de las dimensiones geométricas, la carga que soporta el elemento, el material del que está constituido y las condiciones de apoyo. Las dimensiones del elemento mecánico (rodillo) se definen mediante el dibujo en 3D, utilizando el software Autocad 2000, y las condiciones de carga, apoyo y material en el software Cosmos Desing Star 4.5.

2.3. Muestro aleatorio simple

El muestreo se efectuó para determinar la cantidad de observaciones que deben hacerse de la variable que permite la caracterización del problema, dado por las fallas de los rodillos, para especificar el grado de representatividad de los resultados. El tamaño de la muestra se determinó según el siguiente modelo, tomado de Miller et al. (2005).

$$n = \left[Z_{r/2} \cdot \frac{S}{E} \right]^2 \quad (1)$$

Donde:

$Z_{r/2}$ – estadístico de la distribución normal;

r – nivel de significancia;

S – desviación típica poblacional;

E - error máximo de estimación;

n - tamaño de la muestra requerido.

2.4. Comportamiento de la variable cantidad de rodillos retirados Análisis de causa-efecto

El análisis de causa-efecto se llevó a cabo para determinar los factores que hipotéticamente pueden influir en el comportamiento de la variable fallas de los rodillos.

En el análisis de las causas se sometieron a consideración la mayor cantidad posible de criterios para poder obtener una descripción lo más completa de la situación analizada.

La construcción del diagrama causa-efecto, para el caso de las mediciones de la cantidad de rodillos retirados, implicó el desarrollo de los siguientes pasos lógicos:

1. Recopilación de datos sobre el comportamiento de la variable cantidad de rodillos retirados.
2. Elaboración de la información a partir de los datos, para su presentación clara y entendible (resumida) ante un colectivo de personas familiarizadas con el tema.
3. Realización de una reunión para intercambiar ideas sobre las causas que originan la variabilidad observada en el comportamiento de la variable: Sección de lluvias de ideas.
4. Determinación de las causas potenciales, a partir del conocimiento del listado de posibles fuentes de variación.
5. Elaboración del diagrama de causa-efecto para mostrar las relaciones supuestas entre los factores considerados.

Verificación de la normalidad

La verificación de la normalidad tuvo como propósito determinar la existencia de algún factor determinante en el comportamiento de la variable fallas de los rodillos.

Para verificar la normalidad de los datos obtenidos durante la determinación de la cantidad de rodillos retirados por mes se aplicó la técnica gráfica conocida como diagrama para control de mediciones.

Los valores del diagrama de control para mediciones se determinaron aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación, las cuales fueron seleccionadas de Hernández (1986).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

$$LT_{m\acute{a}x} = \bar{X} + Z_{r/2} \cdot S \quad (4)$$

$$LT_{m\acute{i}n} = \bar{X} - Z_{r/2} \cdot S \quad (5)$$

Donde:

\bar{X} - media aritmética de la cantidad de rodillos retirados (*CRR med.*);

Z - estadístico de la distribución probabilística de Gauss, y se determina en la Tabla 3 del libro Probabilidad y estadística para ingenieros (Miller et al. 2005) en función del nivel de significancia (r);

S - desviación típica;

n - total de observaciones;

r - nivel de significancia.

Verificación de la aleatoriedad

La verificación de la aleatoriedad se llevó a cabo para hallar la naturaleza de las causas que originan las variaciones en las fallas de los rodillos, es decir, si las fuentes de variación son de origen aleatorio o sistemático.

Para la realización de esta prueba se siguieron los pasos que se refieren a continuación:

1. Definición de hipótesis

Hipótesis nula (H_0): la variable muestra un comportamiento aleatorio.

Hipótesis alterna (H_1): la variable no muestra un comportamiento aleatorio.

2. Nivel de significancia: $r = 0,05$

3. Criterio de rechazo de la H_0 : se rechaza la hipótesis nula si $Z > Z_{r/2}$,

4. Cálculo

5. Decisión: la decisión se toma sobre la base del resultado obtenido en el cálculo y la condición de rechazo definida como criterio, cabe indicar que la decisión tomada está sustentada en el nivel de significancia que precede al criterio.

Para la determinación del valor de Z se consideraron las siguientes expresiones:

$$Z = \frac{U - \sim_U}{\dagger_U} \quad (6)$$

Donde:

U - Es la cantidad de corridas presentes en el arreglo;

$$\sim_U = \frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2} + 1 \quad (7)$$

$$\dagger_U = \sqrt{\frac{2 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot (2 \cdot n_1 \cdot n_2 - n_1 - n_2)}{(n_1 + n_2)^2 \cdot (n_1 + n_2 - 1)}} \quad (8)$$

Siendo:

n_1 - Cantidad de símbolos del primer tipo;

n_2 - Cantidad de símbolos del segundo tipo;

U - Cantidad de corridas presentes en el arreglo;

\sim_U - Media de la cantidad de corridas;

\dagger_U - Desviación típica de la cantidad de corridas.

Las expresiones 6-8 son válidas si n_1 y n_2 son mayores que 10 (Miller et al. 2005), en caso contrario deben aplicarse los criterios para el rechazo de H_0 , tal como lo exponen Walpole et al. (2008).

Todas estas cantidades dependen del arreglo formado del conjunto de datos con referencia a la mediana de la variable cantidad de rodillos retirados. La formación del arreglo se hizo asignándole a los valores que están por encima de la mediana el código (a) y a los que están por debajo el código (b), y se ignoraron los que coincidieran con la mediana.

2.5. Medias móviles

El procedimiento de la media móvil (Guerra et al. 2003) se aplicó para contribuir a la conformación de un plan de acción que permita el mejoramiento de la fiabilidad de los rodillos. Es un método que, en ocasiones, se utiliza para estimar la tendencia. Se define como media móvil (promedio móvil) de orden n al que se obtiene mediante la siguiente secuencia:

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}, \frac{X_2 + X_3 + \dots + X_{n+1}}{n}, \frac{X_3 + X_4 + \dots + X_{n+2}}{n} \quad (9)$$

Donde:

X - Es la variable que adquiere el valor de cada observación;

n - Es el total de observaciones.

La suma en los numeradores de la expresión anterior (9) recibe el nombre de los totales móviles. Al utilizar los promedios móviles de orden adecuados pueden ser eliminados, o al menos bastante atenuados, los componentes cíclicos estacionales e irregulares (Guerra et al 2003). Al calcular los promedios móviles se pierde información al inicio y al final.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de la simulación del régimen de explotación

Construcción del modelo

En la Figura 2 se evidencia la construcción del modelo y el mallado del elemento, aspecto este que permite la identificación de las mallas, los elementos y nodos presentes en el modelo. Se pudo obtener como resultado de este modelo un mallado con 50 869 nodos y 10 632 elementos.

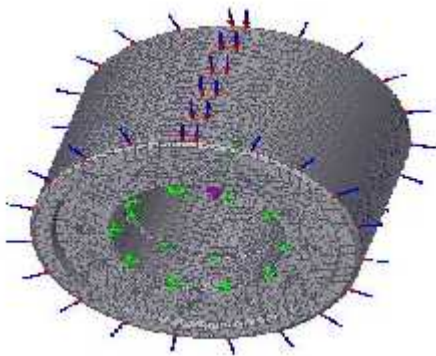


Figura 2. Modelo físico del mallado del rodillo en explotación.

Chequeo del diseño

Las tensiones, las deformaciones y los desplazamientos que se producen en el rodillo al ser sometido a las condiciones citadas no deben superar ciertos límites, pues puede aparecer la falla del elemento mecánico por deficiente resistencia. Estas últimas en un inicio pueden presentarse como deformaciones permanentes, picaduras y rotura. Para chequear el diseño realizado se emplean el criterio de Maximum von Misses Stress, el de Maximum Shear Stress (Tresca), el de Mohr-Coulomb Stress y el de Normal Stress. El desarrollo de estos criterios reveló que los rodillos resisten los esfuerzos a los que están sometidos. La Figura 3 muestra los resultados del chequeo, aplicando el criterio Maximum von Misses Stress

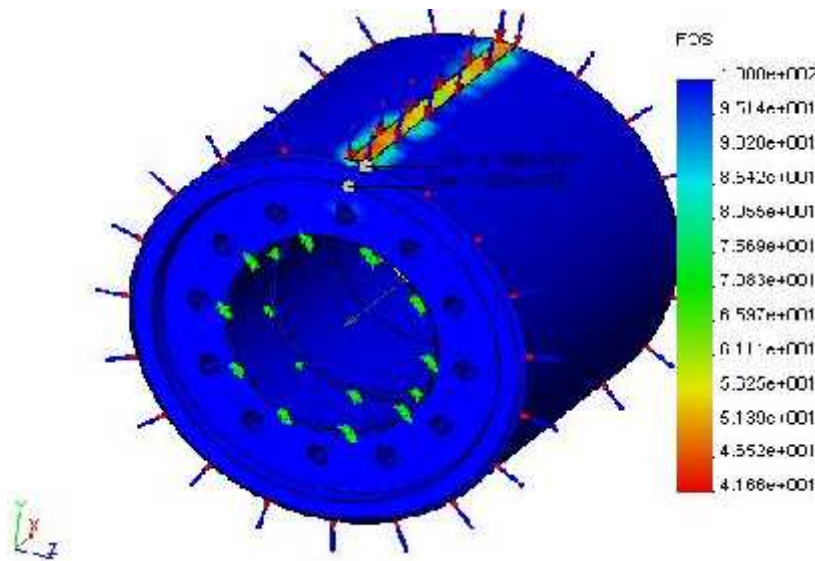


Figura 3. Resultado del chequeo del diseño según Maximum von Misses Stress.

De lo planteado anteriormente se infiere que el fallo de los rodillos del transportador Jacobi no se debe a la poca resistencia mecánica. Entonces, ¿por qué fallan los rodillos?

Debe tenerse en cuenta que, normalmente, la degradación de un componente raramente se debe a un solo mecanismo de fallo sino que, en general, obedece a una combinación de mecanismos, como por ejemplo, fenómenos de oxidación combinados con fatiga, abrasión, más oxidación, más fatiga.

Se puede plantear sobre la base de lo anterior que el método de elemento finito aplicado es adecuado para el estudio de las fallas de un elemento mecánico por resistencia, pero no refleja la realidad tal como existe pues el mismo se basa en la construcción de modelos, los cuales simplifican la realidad. Para caracterizar más adecuadamente el fenómeno de las fallas se suelen utilizar tres tipos de aproximaciones: análisis acústico de la señal, control de partículas y análisis vibratorio. De las tres aproximaciones, los análisis vibratorios se han convertido en los más populares a causa de su facilidad de medición (Wilson et al. 2001).

Además, se utilizan una gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problema, disponibilidad de la data y conocimiento de las técnicas; algunas de las cuales se mencionan a continuación: análisis causa-efecto, árbol de fallo, análisis de cambio, análisis de barreras y eventos y análisis de factores causales.

Según Harsha & Kankar (2004) el análisis causa-efecto es una técnica de identificación de causas fundamentales que conducen a fallos o fallos

recurrentes. Las causas identificadas son lógicas y su efecto relacionado; es importante mencionar que es un análisis deductivo, el cual identifica la relación causal que conduce al sistema, equipo o componente a fallos.

El diagrama causa-efecto, en forma de espina de pescado, comienza con una línea horizontal al centro que representa un problema. Los factores principales que afectan al parámetro se listan en líneas diagonales conectadas con la línea central horizontal. Los factores que afectan a los factores principales se incluyen como líneas horizontales conectadas a las líneas diagonales (Miller et al. 2005).

Para la aplicación de la técnica de causa-efecto se debe tener en cuenta el volumen de datos disponible, pues esto determina la representatividad y objetividad del análisis.

3.2. Análisis de la representatividad

La cantidad de datos requeridos en una muestra para asegurar la representatividad se verifica considerando la ecuación 1 expuesta anteriormente. Al asumir las siguientes aproximaciones para el cálculo ($t = E$, $r = 0,0026$ y $Z_{r/2} = 3$) puesto que se desconoce de antemano los valores de los términos involucrados en el modelo, ya que no se han realizados trabajos en este sentido; es decir un error máximo de estimación (E) igual a la desviación típica (\hat{T}) y un nivel de confianza del 99,74 %; se determina que el tamaño de la muestra requerido es de 9 unidades.

Esto indica el tamaño mínimo que debe tener la muestra para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio. Ahora bien, deben tenerse en cuenta los criterios siguientes: lograr un compromiso entre mayor representatividad, menor costo y mayor productividad para que el muestreo sea eficiente (Calero 1976). Teniendo en cuenta lo anterior se escoge un tamaño de muestra igual a 39.

3.3. Análisis del comportamiento de la variable cantidad de rodillos retirados

El análisis del comportamiento de las fallas de los rodillos se realizó de acuerdo con la base de datos recopilada por la Unidad Empresarial de Base Hornos de Reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, sobre la cantidad de rodillos retirados por meses en los últimos tres años, los cuales se muestran en la Tabla 2. El período considerado abarca de enero de 2010 a marzo de 2013.

Tabla 2. Base de datos de la cantidad de rodillos retirados

(Mes)	CRR	(Mes)	CRR	(Mes)	CRR	(Mes)	CRR
Ene-10 (1)	8	Ene-11 (13)	0	Ene-12 (25)	12	Ene-13 (37)	8
Feb-10 (2)	0	Feb-11 (14)	0	Feb-12 (26)	0	Feb-13 (38)	26
Mar-10 (3)	16	Mar-11 (15)	0	Mar-12 (27)	12	Mar-13 (39)	30
Abril-10 (4)	21	Abr-11 (16)	20	Abr-12 (28)	1		
May-10 (5)	12	May-11 (17)	6	May-12 (29)	0		
Jun-10 (6)	30	Jun-11 (18)	0	Jun-12 (30)	0		
Jul-10 (7)	49	Jul-11 (19)	0	Jul-12 (31)	0		
Ago-10 (8)	20	Ago-11 (20)	0	Ago-12 (32)	14		
Sep-10 (9)	19	Sep-11 (21)	0	Sep-12 (33)	0		
Oct-10 (10)	1	Oct-11 (22)	0	Oct-12 (34)	14		
Nov-10 (11)	0	Nov-11 (23)	12	Nov-12 (35)	0		
Dic-10 (12)	0	Dic-11 (24)	2	Dic-12 (36)	0		

En la tabla anterior se aprecia que durante el período considerado, las variaciones de la variable objeto de estudio (cantidad de rodillos retirados por mes) ha mostrado fluctuaciones. Las variaciones pueden estar influenciadas por factores de distintas índoles, de manera general, se pueden clasificar estas fuentes de variación, de acuerdo con su naturaleza, en sistemáticas y aleatorias (Hernández 1986). Las variaciones de índole sistemáticas son las causadas por factores tales como el hombre que realiza las mediciones, el ambiente en que se realizan las mediciones y los instrumentos de medición empleados. Mientras que las de índoles aleatorias obedecen a eventos casuales no controlables. Las primeras pueden detectarse y controlarse mediante el cambio de algunos de los componentes del sistema de medición, no así la segunda. Estas variaciones deben analizarse y expresarse el resultado de la forma más objetiva posible.

Análisis de causa-efecto

La Figura 4 muestra el diagrama de dispersión del comportamiento de las variaciones de la cantidad de rodillos retirados en el período de 39 meses. En el comportamiento de las fallas de los rodillos retirados en ese periodo se observa una tendencia al descenso de la variable, siendo en algunos meses cero. Se puede apreciar que en los primeros 12 meses (año 2010) no existen fallas esencialmente en los meses de febrero, noviembre y diciembre, y a la vez, se muestra el mayor comportamiento de fallas en el mes de julio, con un valor de 49 rodillos retirados.

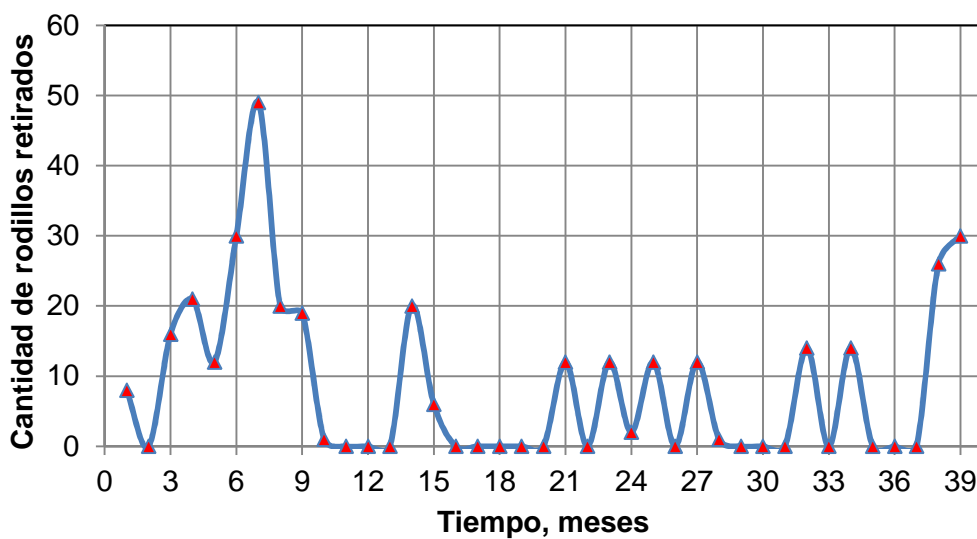


Figura 4. Diagrama dispersión del comportamiento de las fallas de los rodillos.

Se pudo observar también que en los meses 13 al 24 (año 2011) fue donde menos fallas ocurrieron ya que no se retiraron rodillos durante siete meses del año. En los meses 24 a 36 (año 2012) la variable se comporta de modo bastante similar al año 2011 pero con menos frecuencia de retiradas de rodillos; es decir, con un valor máximo de 14 rodillos retirados en el mes de agosto y octubre. Finalmente se puede concluir que en estos últimos tres años la frecuencia de rodillos retirados ha variado en orden descendente, pero en el transcurso de los primeros tres meses del año 2013, respecto a los años anteriores, aumentó la frecuencia de rodillos retirados por meses.

Para caracterizar la variabilidad de la cantidad de rodillos retirados se lleva a cabo un intercambio de ideas con diferentes funcionarios que laboran en la UEB: técnico de mantenimiento, mecánicos, operarios, jefe de mantenimiento, entre otros. Los mismos presentaron como principales causas que provocan dicha variabilidad: la alineación de los equipos de laboreo (transportadores), la carga a la que están sometidos los rodillos,

las altas condiciones ambientales corrosivas, las fallas de los rodamientos en casos particulares, y esencialmente, el desgaste que se produce actualmente en estos elementos.

Resumiendo, las posibles causas potenciales que provocan la variación de la cantidad de rodillos retirados son:

1. Régimen de trabajo al que están expuestos los rodillos,
2. Recursos humanos vinculados al proceso de explotación de los rodillos,
3. Recursos materiales que entran en contacto con los rodillos y
4. Características de los rodillos.

Dentro de las causas potenciales mencionadas anteriormente se pueden encontrar los siguientes factores, como se refieren a continuación: el régimen de trabajo al que están expuestos los rodillos caracterizado por la fuerza que soportan, la velocidad de rotación, el tiempo de explotación, la temperatura de trabajo, y los niveles de vibración; los recursos humanos vinculados al proceso dado por el técnico de mantenimiento, supervisores y mecánicos; los recursos materiales definidos por las llantas que entran en contacto con los rodillos y el líquido refrigerante que se le aplica a los rodillos. Por otra parte, las características de los rodillos la determina el acabado superficial, la dureza de estos, los rodamientos que poseen interiormente y las empaquetaduras o sellajes.

Sobre la base de la identificación de los factores potenciales se procede a la elaboración del diagrama causa-efecto que establece la relación entre los factores mencionados, como se muestra en la Figura 5.

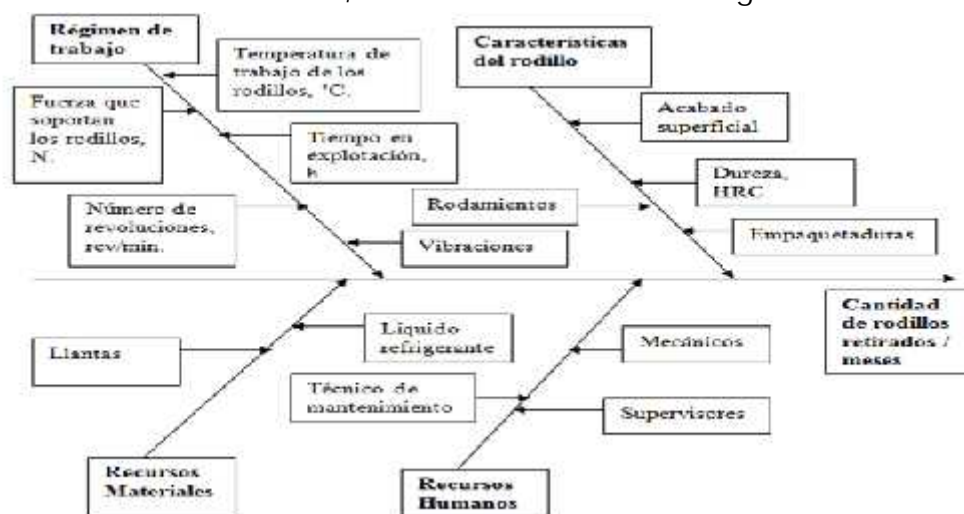


Figura 5. Diagrama causa-efecto del comportamiento de fallas de los rodillos.

En la figura anterior se muestra que el diagrama representado puede servir para elaborar planes de mejora de la calidad futura, ya que expone los factores que pueden influir para controlar la cantidad de rodillos retirados. Por ejemplo, en el caso de los recursos materiales se puede incidir en la durabilidad de los rodillos (menos rodillos retirados) considerando la posibilidad de utilizar sistemas de líquidos refrigerantes menos corrosivos; en otros casos, teniendo en cuenta las características de los rodillos, se puede utilizar rodamientos más adecuados y propiciar el nivel de acabado, dureza y sellaje adecuados. Esto se puede armonizar utilizando estrategias de diseño estadístico experimental, considerando las técnicas del análisis de varianza y los ajustes de curvas.

De acuerdo con Moubray (1997), para el análisis de las fallas se deben tener en cuenta las siguientes preguntas del Sistema del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad: cuál es la función del activo, de qué manera puede fallar, qué origina la falla, qué pasa cuando falla, importa si falla, se puede hacer algo para prevenir las fallas, qué pasa si podemos prevenir las fallas. Las respuestas a estas interrogantes pueden contribuir a centrar la atención del proceso de búsqueda de la causas que originan las fallas.

Análisis de la normalidad

Al aplicar las expresiones desde la 2 hasta la 5 se pudo establecer un criterio para evaluar la normalidad. A continuación se muestra en la Figura 6 el diagrama de control para las mediciones construidos al respecto.

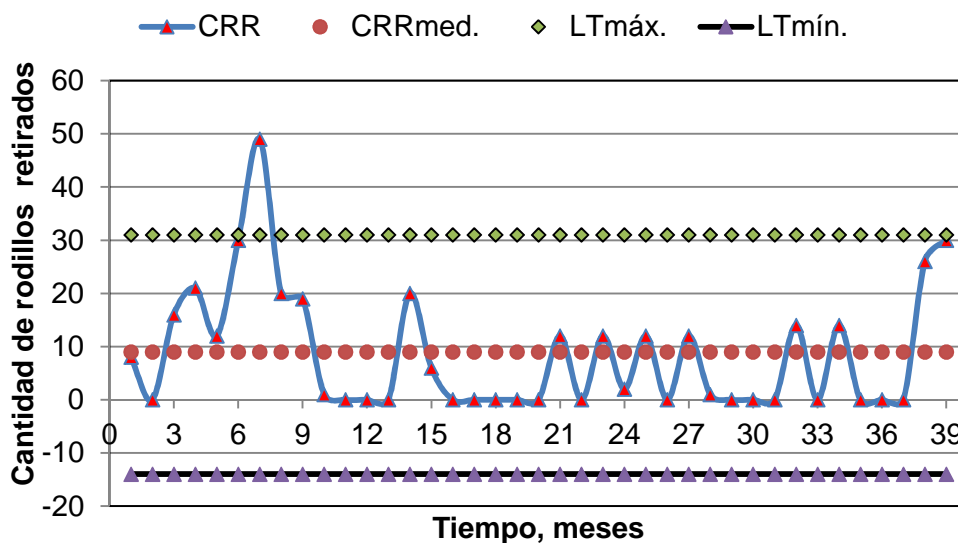


Figura 6. Diagrama de control de la cantidad de rodillos retirados.

La observación de la Figura 6 identifica que el proceso no está bajo control estadístico, ya que existen puntos fuera de los límites de control; la variable muestra un comportamiento anómalo. Estos valores están condicionados por el nivel de confianza especificado; el cual fue del 95 % ($Z_{0,025} = 1,96$). Los límites de tolerancia para la variable objeto de estudio son: límite mínimo de 14 rodillos por mes y el límite máximo de 31 rodillos por mes, y un valor promedio de 9 rodillos por mes.

De acuerdo con Hernández (1986), lo anteriormente planteado significa que hay influencias predominantes de factores en el comportamiento de la variable; todas las causas que determinan la variabilidad no influyen por igual. En este caso no puede asegurarse que cada evento que se realice, respecto a la retirada de rodillos, bajo condiciones similares a las del muestreo realizado, tenga una probabilidad del 95 % de que su valor esté en el rango de tolerancia calculado. Para poder realizar un pronóstico del comportamiento de la variable se requiere de un tratamiento de las irregularidades presentes en la situación analizada, lo cual no es objetivo de este apartado.

Análisis de la aleatoriedad

Después de obtener la formación del arreglo sobre la base de datos se tienen las siguientes cantidades, que permiten la verificación de la hipótesis de aleatoriedad de la variable.

$$n_1 = 19, U = 15, n_2 = 18$$

Una vez determinado la formación del arreglo y las correspondientes cantidades se obtienen los resultados de acuerdo con las expresiones 6, 7 y 8, según se muestra a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Prueba de aleatoriedad

Parámetros	Ec.	Valores
Z	6	-1,49
\sim_U	7	19,48
\dagger_U	8	2,996

La Tabla 3 muestra los valores determinados para la prueba de aleatoriedad de la variable cantidad de rodillos retirados, de lo que se arribó a la siguiente observación:

Puesto que $Z = -1,49$ no sobrepasa a $Z_r = 1,64$ (esto es el valor del estadístico de la distribución de Gauss en el nivel de significancia de 0,05), la variable muestra un comportamiento aleatorio y se concluye que la hipótesis nula no se rechaza, a un nivel de confianza del 95 %, es

decir, no se requiere de un análisis minucioso de las causas que provocan las variaciones del parámetro cantidad de rodillos retirados. En otras palabras, según criterios estadísticos de Miller et al. (2005), los factores que están provocando la variabilidad obedecen a causas no controlables.

3.4. Análisis de las medias móviles

Este análisis se efectúa animado por el volumen de datos que se dispone, y con el objetivo de ofrecer un pronóstico de la cantidad de rodillos retirados, lo cual permitiría aumentar su fiabilidad al poder definir un referente numérico en cuanto a la cantidad de rodillos que se retiran por mes, contribuyendo a la racionalización de las labores de contratación, fabricación, transportación y almacenaje de rodillos. En tal sentido se emplea en la caracterización del comportamiento de las fallas de los rodillos el método de las medias móviles, donde este permitió determinar la tendencia mediante la ecuación 9, expuesta anteriormente.

A continuación se muestra en la Figura 7 el diagrama de dispersión que muestra el comportamiento de las variaciones de la cantidad de rodillos retirados en el período de 39 meses y la línea ajustada a los datos por medio del método de las medias móviles.

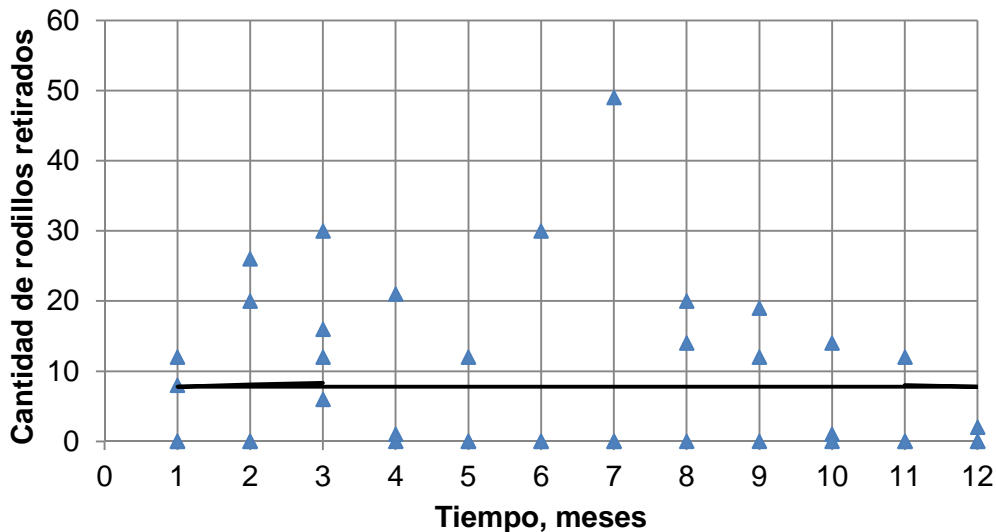


Figura 7. Diagrama de dispersión y medias móviles del comportamiento de las fallas de los rodillos.

El análisis realizado refiere en la figura anterior que por encima de la línea de tendencia móvil existe mayor variabilidad del comportamiento de la variable, que por debajo de esta. Y se pudo determinar que el valor de la tendencia expresado por las medias móviles durante el período es de aproximadamente 9 rodillos por mes, con periodo de la serie 35.

Para aumentar la fiabilidad de los rodillos no solo basta con definir una cifra, sino también debe hacerse observancia de una serie de medidas, algunas de las cuales se sugieren a continuación.

1. El debido control de la calidad de las propiedades, parámetros y características.
2. No permitir variación en la calidad de los materiales o sustituirlos por otros con menos calidad de la requerida.
3. No permitir el uso de elementos mal almacenados o mal transportados que altere sus propiedades.
4. Mantener la limpieza de la instalación y las normas sanitarias requeridas.
5. El adecuado control de cada operación y de la salida del producto terminado.

Además, debe considerarse el siguiente referente teórico en materia de mejoramiento de la fiabilidad: la resistencia al desgaste se incrementa con el aumento del contenido de carbono y de la dureza, la inclusión de pequeñas cantidades de elementos aleantes (níquel, cromo, silicio, magnesio). La resistencia al desgaste aumenta con el contenido de carbono hasta un límite, en dependencia del material, siendo los aceros más resistentes al desgaste aquellos cuyo contenido de carbono se encuentran entre 0,6 y 0,8 %. Se establece que el contenido de carbono, hasta un valor de 0,8 %, influye en la resistencia al desgaste; para mayores contenidos esta comienza a disminuir (Callister 1999; Guliaev 1983 y Pero-Sanz 2000). Plantea Callister (1999) que los aceros con alta cantidad de austenita retenida presentan una considerable resistencia al desgaste en masa abrasiva, la mejor estructura, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste abrasivo, es la martensítica o bainítica, fortalecida en su matriz. Leyva (2012) refiere que es posible emplear el método de deformación plástica superficial con rodillo como alternativa tecnológica para mejorar la resistencia al desgaste en elementos mecánicos mediante el incremento de la dureza y disminución de la rugosidad superficial, con mayor eficiencia técnico-económica y menor contaminación ambiental que los tratamientos tradicionales.

4. CONCLUSIONES

El análisis de la fiabilidad de los rodillos de transportadores Jacobi, utilizando el método de elemento finito programado en el software Cosmos Dising Star 4.5, indica que no debe producirse fallas por déficits de resistencia mecánica, sobre la base de los cuatro criterios utilizados. El

criterio de Maximum von Misses Stress refiere un factor de seguridad de 42, por lo que existe un gran margen para el esfuerzo que se admite.

La muestra de observaciones referidas a la cantidad de rodillos retirados, contenida en el estudio, asegura una alta precisión y exactitud en la estimación, puesto que para un error máximo de estimación, igual a la desviación típica, y un nivel de confianza del 99,74 %, el tamaño de la muestra requerido es de 9, y en el trabajo se utiliza una muestra de tamaño 39.

El análisis del comportamiento de la cantidad de rodillos retirados indica que, según la técnica de causa-efecto, los factores potenciales de posibles influencias en la variabilidad son los recursos humanos, los recursos materiales, el régimen de explotación de los rodillos y las características de estos; según la prueba de normalidad existen factores que ejercen acciones predominante en la variabilidad, y según la prueba de aleatoriedad dichas variaciones obedecen a factores aleatorios no controlables.

Mediante el método de las medias móviles se determinó que en el periodo analizado se retiran 9 rodillos al mes, lo cual constituye un referente para las labores de contratación, fabricación, transportación y almacenaje de los rodillos.

5. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, L. 1999. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. *Revista Construcción de maquinaria* 2: 69-76, Santa Clara.
- CALLISTER, W. 1999. *Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition.* Department of Metallurgical Engineering. Univers. of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 8 195 p. ISBN 0-471-32013-7.
- GUERRA, C.; MÉNDEZ, E.; BARRERA, R. & EGAÑO, E. 2003. *Estadística.* Félix Varela, La Habana.
- GULIAEV, A. 1983. *Metalografía.* Tomo II. Mir, Moscú, 120-135.
- HARSHA, S. P. & KANKAR, P. K. 2004. Stability analysis of rotor bearing system due to surface waviness and number of balls. *International Journal of Mechanic sciences* 46: 1 057-1 081.
- HERNÁNDEZ, S. 1986. *Metrología dimensional.* Editorial ISPJAE, La Habana.
- LEYVA, B.; FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I.; ALCÁNTARA, D. & OLIVEROS, Y. 2011. Comportamiento de la tolerancia dimensional en piezas cilíndricas de acero AISI 1045 durante la deformación plástica superficial con rodillo simple. En: VI Conferencia Internacional de aprovechamiento de recursos minerales CINAREM 2011. Moa, Cuba, 17-20 noviembre.

- LEYVA, B. 2012. Tolerancia dimensional en pasadores elaborados de acero AISI 1045 deformados por rodadura. Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- MILLER, R.; FREUN, J. E. & JONSON, R. 2005. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Félix Varela, La Habana, 25–30.
- MOUBRAY, J. 1997. Reliability-centered Maintenance II.
- NAVARRETE, E. & GÓMEZ, J. 1986. Mantenimiento industrial. Facultad de Construcción de maquinaria, ISPJAE, La Habana.
- OLIVEROS, E. 2011. Desgaste de los rodillos radiales de los transportadores sinfines para mineral laterítico. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- PRIETO, R. 2013. Caracterización de las fallas de los rodillos radiales del transportador Jacobi. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- PERO-SANZ, J. A. 2000. Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades. 3ra ed. Editorial DUSSAT S.A., España, 393-502.
- VELÁZQUEZ, A. 2002. Fragilización de la aleación HH por precipitación de fases SIGMA. Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba.
- WALPOLE, R. & Myers, R. 2008. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Félix Varela, La Habana.
- WANG, WILSON Q. FATHY ISMAIL, M. FARID GOLNARAGHI. 2001. Assesment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements. Mechanical Systems and Signal Processing 15(5): 905-922.

Benigno Leyva-de la Cruz bleyva@ismm.edu.cu

Máster en Electromecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

Marjoris Utria-Jiménez mutria@ismm.edu.cu

Máster en Electromecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.