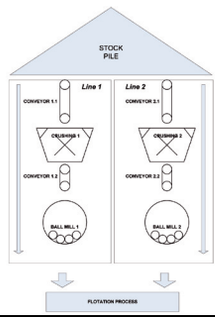
Influencia de la carga de alimentación en la fiabilidad de líneas de molienda. Caso de estudio



INFLUENCE OF THE INPUT LOAD ON THE RELIABILITY OF THE GRINDING LINE A CASE STUDY APPLIED TO THE MINING INDUSTRY

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/7013 | Recibido: 21/11/2013 • Aceptado: 01/02/2014

Luis Barberá, Pablo Viveros, Rodrigo Mena y Vicente González-Prida

Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería.
Dpto de Organización y Gestión de Empresas I. Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n. Isla de la Cartuja, 41092.
Tfno: +34 954 487215. lubarmar@etsi.us.es

ABSTRACT

- The management of physical resources in an organization involves several processes related to innovation and continuous improvement. For this reason, the proper study of the reliability and maintainability analysis is considered essential and is treated as one of the main pillars for decision-making at the tactical and operational levels.
  This paper proposes a useful support tool for decision-making in the field of maintenance management and reliability analysis, so that such decisions remain aligned with the vision, strategy and economic indicators of the business or industrial organization.
  This research clearly shows how the variability of different load levels (inflows) on the grinding lines, affects the reliability of a specific sulphur plant (located in Chile), determining after that, what the optimum load should be. The paper identifies the relationship between each line load ranges and the corresponding reliability, all through the development of a real case study conducted in a mining company located in northern Chile.
- **Key Words:** Reliability by load range, grinding line, management and maintenance optimization, efficiency and effectiveness in maintenance.

RESUMEN

La gestión de los recursos físicos en una organización involucra diversos procesos relacionados con la innovación y la mejora continua. Por este motivo, el estudio apropiado de la fiabilidad se considera fundamental y es tratado como uno de los pilares principales para la toma de decisiones tanto a nivel táctico como operacional.

El presente artículo propone una metodología de apoyo útil para la toma de decisiones en el ámbito de la gestión de mantenimiento y análisis de fiabilidad, de manera que dichas decisiones permanezcan alineadas con la visión, la estrategia e indicadores económicos del negocio u organización industrial.

Este artículo muestra claramente cómo afecta la variabilidad de los niveles de carga (flujos de entrada) a la fiabilidad de una planta de molienda y, posteriormente, determina cuál sería el rango de carga óptimo. El artículo identifica la relación existente entre los rangos de cargas de cada línea y la respectiva fiabilidad de las mismas desarrollando un caso práctico real llevado a cabo en una empresa minera ubicada en el norte de Chile.

Palabras Clave: Fiabilidad por rango de carga, línea de molienda, gestión y optimización del mantenimiento, eficiencia en mantenimiento.

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN

El desarrollo y aplicación de herramientas de soporte a la toma de decisiones ayuda a lograr una eficiente gestión de los recursos y activos físicos dentro de una organización industrial. Más aún cuando se presenta un número importante de dispositivos que interaccionan entre ellos y que disponen de una configuración funcional compleja. Con el fin de obtener aplicaciones reales basados en modelos analíticos, deben generarse herramientas que sean prácticas, funcionales, innovadoras y simples que ayuden a tomar más fácilmente decisiones tácticas y operacionales [1] [2].

En el contexto de la industria minera, la variable de carga de los equipos tiene especial importancia en el comportamiento de la fiabilidad. Este artículo presenta y analiza un caso de estudio real desarrollado en una planta de sulfuro, en la cual se considera prioritario el análisis de la operación de sus líneas de molienda, todas ellas sujetas a flujos de alimentación cambiantes (tonelajes de alimentación) y que son recibidos por cada uno de sus molinos SAG (Semiautógeno). La variabilidad en los flujos de alimentación depende principalmente de los objetivos de producción.

El presente artículo propone una herramienta que facilita el análisis de los resultados y mantiene un marco de gestión y supervisión de los diferentes planes de acción llevados a cabo en el ámbito de las actividades de mantenimiento [3]. A lo largo de esta investigación se observa cómo tras un análisis preliminar de las frecuencias de detenciones de cada una de las líneas, una de ellas presentaba una menor frecuencia de fallo coincidiendo con un volumen de alimentación inferior y estable.

En base a esta observación, se investigó la hipótesis de que las 2 líneas analizadas deberían estar alimentadas en rangos fiables de operación. Es decir, que la planta debiera ser operada en rangos de carga que permitan lograr objetivos de producción reales, reduciendo a la par el desgaste de los equipos, así como disminuyendo las detenciones operacionales. Todo ello, con la intención de alcanzar una operación estable en el tiempo que no implique un deterioro acelerado de los equipos de la línea y evitando, en definitiva, la ocurrencia de fallos mayores que impliquen detenciones por tiempos muy superiores a las medias actuales.

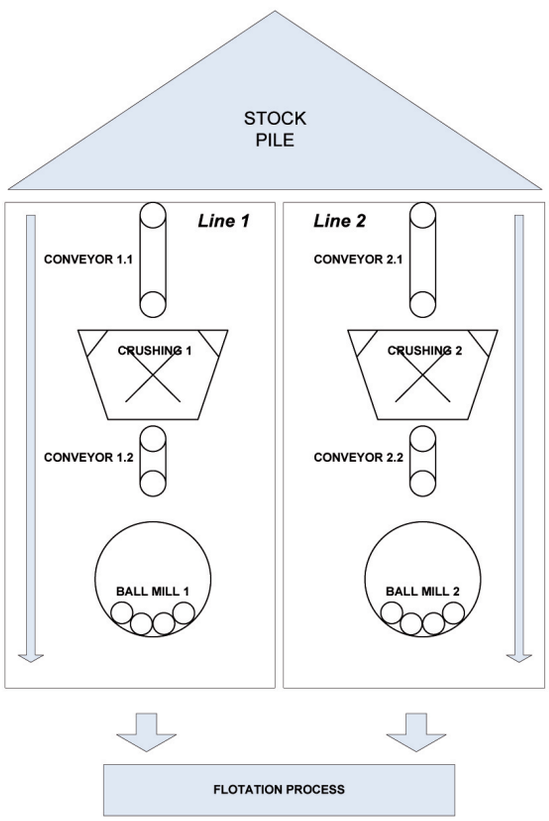


Fig. 1. Representación general de líneas de molienda 1 y 2 en la planta minera

2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

A continuación, se presenta en detalle una metodología de análisis y cálculo propuesta, desarrollada para optimizar la fiabilidad de las líneas de producción teniendo en cuenta los rangos de carga (alimentación de entrada) exigidos a los equipos [4]. La metodología consta de 3 etapas, a saber: análisis de cargas promedio de operación, análisis sistémico de fiabilidad por línea de trabajo y, por último, análisis de fiabilidad e indicadores por rango de carga.

2.1. ANÁLISIS DE CARGAS PROMEDIO DE OPERACIÓN

Este primer análisis es necesario para estimar las cargas promedio de trabajo durante dos instantes concretos de operación. Concretamente, se dispone de un registro histórico de datos de diez meses para las líneas de molienda 1 y 2. La información utilizada ha sido convenientemente filtrada y analizada en términos de tendencia, calidad y correlación, asegurando el supuesto de independencia y la inexistencia de tendencia [6]. Esta información corresponde a datos de carga de entrada promedio por hora de operación. Los registros corresponden a eventos de fallo, actividades planificadas y detenciones operacionales.

$$TBF_1 = T_1 \; TBF_2 = [T_2 - T_1 - TR_1] \; TBF_3 = [T_3 - T_2 - TR_2] \; TBF_n = [T_n - T_{n-1} - TR_{n-1}]$$

$$K = 1,2 \; y \; 3 \;\; j = 1 \;\; hasta \;\; p$$

M_1 = Evento Preventivo M_2 = Evento Correctivo M_3 = Detención Operacional

Equipo A_j	Evento E_i	Tipo de Evento M_k	Carga Promedio $\bar{Q}_i$	T. Calendario T_i	T. Reparación TR_i	T. Buen Funcionamiento TBF_i
A_1	E_1	M_1	$\bar{Q}_1$	T_1	TR_1	TBF_1
A_2	E_2	M_2	$\bar{Q}_2$	T_2	TR_2	TBF_2
A_3	E_3	M_3	$\bar{Q}_3$	T_3	TR_3	TBF_3
…	…	…	…	…	…	…
A_p	E_n	M_2	$\bar{Q}_n$	T_n	TR_n	TBF_n

Tabla 1. Representación de los datos históricos

Para obtener los datos de carga promedio, es necesario realizar un análisis gráfico (a partir de los datos históricos) que relacione la carga con el tiempo de buen funcionamiento (Figuras 2 y 3).

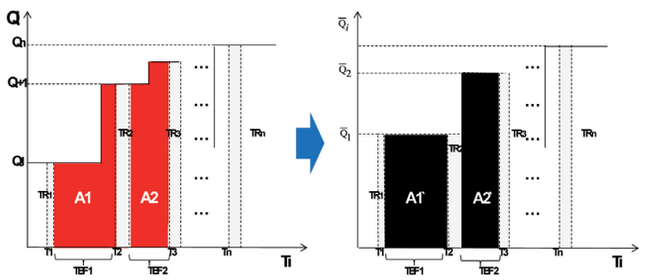


Fig. 2. Representación Gráfica de Carga promedio Qi por par de eventos consecutivos [Ei; Ei+1]

La Figura 2 muestra como entre los eventos de fallo (T_1, T_2,…, T_n), se producen variaciones de carga (gráfico izquierda). Para poder calcular las cargas de trabajo promedio que ha soportado el equipo entre los eventos de fallo (en tiempos de buen funcionamiento, TBF), se realiza una equivalencia gráfica de áreas entre eventos (carga total movilizada = A1 = A1').

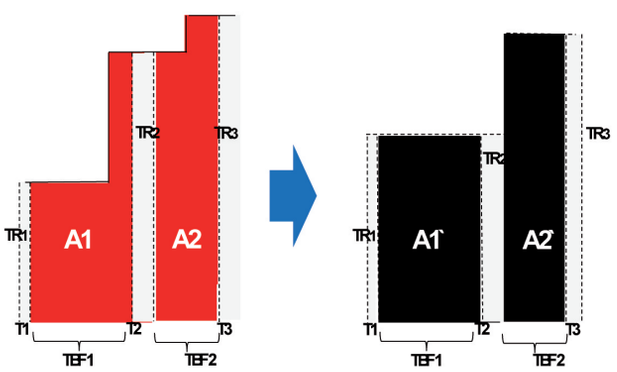


Fig. 3. Detalle Aproximación Gráfica de Carga promedio Qi por par de eventos consecutivos [E_i; E_{i+1}]

Matemáticamente, la equivalencia gráfica corresponde a:

$$A_1 = A_1' \quad \& \quad A_2 = A_2'$$

Esto, respetando el TBF_i real de cada evento, permite estimar el respectivo:

$$\overline{Q}_1 \; ; \; \overline{Q}_2$$

Realizando este análisis para cada par de eventos [E_1; E_{i+1}] es posible completar la Tabla 1, en donde se define el tipo de evento M_k, la Carga Promedio Q_i, el Tiempo de Buen Funcionamiento entre eventos TBF_i y el Tiempo de reparación TR_i [5].

2.2. ANÁLISIS SISTÉMICO DE FIABILIDAD POR LÍNEA DE TRABAJO

Para llevar a cabo el análisis sistémico de cada línea, se conocen con certeza los eventos: fallo, preventivo y detención operacional, cuyo Impacto I_i que estos eventos generan sobre la carga de la línea principal es menor o igual al 100%. Por ello, resulta necesario establecer algunos criterios para el cálculo de fiabilidad, independientemente del impacto individual de los eventos de fallo de sus componentes sobre el sistema:

a) Todo evento que tenga un Impacto $I_i > 0$, será considerado como un evento visible a nivel de línea. Las detenciones operacionales tienen un impacto 100% sobre la línea en análisis. La base de datos disponible para el análisis dispone de un indicador denominado "factor de conversión", equivalente al impacto I_i, el cual representa el porcentaje de pérdida de carga en la línea principal consecuencia de una falla individual.
b) La pérdida de producción de la línea será considerada proporcionalmente al impacto que el evento individual genere (dato obtenido de los registros de producción).
c) Los tiempos de reparación TR_i del sistema, para cada par de eventos consecutivos [E_i; E_{i+1}], serán calculados respetando las consideraciones que se muestran en la Figura 4, donde la falla parcial (I<100%) es proporcionalmente asociada a un evento ficticio con Impacto igual al 100%, es decir, para el cálculo de la fiabilidad se requieren estados binarios (sistema en pérdida total de funcionamiento o sistema en funcionamiento), por este motivo, los eventos que producen una pérdida de funcionamiento parcial (I<100%) deben ser aproximados a un evento de pérdida total de funcionamiento, ambos equivalentes en carga de trabajo perdida. Como consecuencia, el tiempo de reparación del nuevo evento ficticio (TR'1) debe ser menor que el tiempo de reparación real (TR1), para mantener la equivalencia de carga perdida. Gráficamente, se representa en la Figura 4.

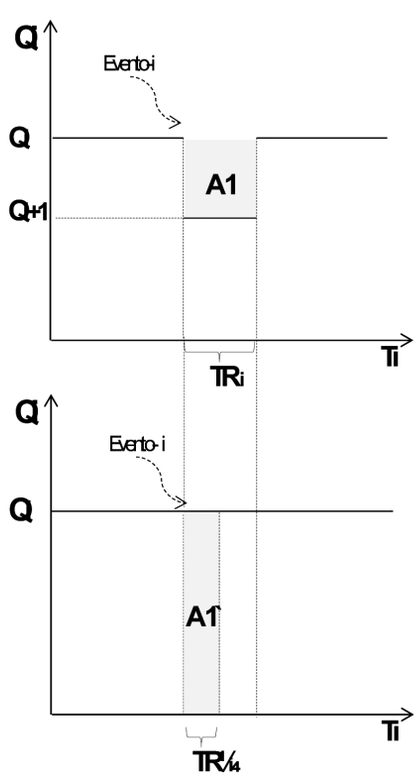


Fig. 4. Detalle aproximación gráfica de TRi y TR'i del sistema, para un par eventos de fallo [E_1; E_{i+1}]

Donde:

$$A1 = TR_i * (Q_i - Q_{i+1}) \quad A1' = TR'_i * Q_i$$
$$A1' = A1$$

Por lo tanto, la aproximación del tiempo de reparación del evento ficticio (proporcionalmente equivalente al evento real en términos de perdida de producción sobre el sistema) es:

$$TR'_i = \frac{TR_i * (Q_i - Q_{i+1})}{Q_i}$$

Los modelos de fiabilidad básicos y tradicionalmente aplicados en la Industria sólo consideran estados binarios [0,1] [6], los cuales no pueden ser empleados en este proceso ya que los fallos existentes en el sistema no generan pérdida completa de producción. No obstante, a pesar de ser un evento con impacto proporcional, se trata de un evento de fallo. Habiendo analizado todos los eventos registrados, se deben definir los rangos de carga para los cuales se calcularán las respectivas curvas de fiabilidad e indicadores. Estos rangos dependerán exclusivamente de la cantidad de información disponible, por lo tanto, mientras más datos se dispongan, más exactos serán las estimaciones de rangos de trabajo. A modo de ejemplo se muestra la Tabla 2.

RANGO (R_p)	$[Q_A - Q_B]$
RANGO $_1$	$[Q_1 - Q_2]$
RANGO $_2$	$[Q_2 - Q_3]$
RANGO $_3$	$[Q_3 - Q_4]$
...	...
RANGO $_N$	$[Q_N - Q_{N+1}]$

Tabla 2: Definición de Rangos

Desde $p = 1$ hasta n, siendo n el número de rangos totales como se muestran en la Tabla 2. El modelado de la fiabilidad de estos rangos dependerá exclusivamente de la cantidad de eventos de fallo (total o parcial) que existan. Posteriormente, se debe cruzar la información de la Tabla 1 asociando los Rangos ($R_{p)}$ con todos los eventos E_i que correspondan, obteniendo un número considerable de eventos, y por ende, tiempos de buen funcionamiento TBF_i, los cuales son necesarios para el ajuste de las curvas de fiabilidad.

Como resultado se obtiene la Tabla 3.

Para realizar el análisis de fiabilidad individual de cada línea, se utilizará directamente la información disponible en la Tabla 1, para obtener los indicadores TR_i, TBF_i y el valor de Carga Promedio Q_i cada par de eventos $[E_i; E_{i+1}]$ asociados todos a un mismo equipo. Con los tiempos de buen funcionamiento se obtienen directamente los valores de las curvas de fiabilidad a través de la parametrización correspondiente. La metodología de cálculo es similar a la sistémica, con la diferencia de que no es necesario considerar los impactos sobre el sistema superior (Línea), y el tiempo de reparación de cada actividad es obtenido directamente, sin aproximaciones ni supuestos. Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El análisis supone que los datos entregados a los analistas corresponden a la totalidad de eventos que ocurren en las líneas de proceso.
- Los registros de las cargas de entrada para cada línea de molienda son el promedio aritmético por cada hora de operación.
- Las Detenciones Operacionales (D.O.), conceptualmente no deben ser consecuencia del exceso de carga en las líneas, por lo tanto, los registros de D.O. asociados a estos fenómenos cuya descripción corresponda a "Atollo en las líneas", "Sobrecarga", "Embancamiento" y "Desborde de Material" serán evaluados como fallos en las líneas.
- Los impactos considerados para el análisis sistémico se

Rango R_i	Eventos E_i	Tipo de Eventos M_i	Carga Promedio $\overline{Q}_i$	T. Reparación TR_i	T. Buen Funcionamiento TBF_i
$[Q_1 - Q_2]$	$E_1; E_2; E_8; E_{45} \ldots E_{150}$	$M_1; M_2; M_8; M_{45} \ldots M_{150}$	$\overline{Q}_1; \overline{Q}_2; \overline{Q}_8; \overline{Q}_{45} \ldots \overline{Q}_{150}$	$TR'_1; TR'_2; TR'_8; TR'_{45} \ldots TR'_{150}$	$TBF_1; TBF_2; TBF_8; TBF_{45} \ldots TBF_{150}$
$[Q_2 - Q_3]$	$E_3; E_5; E_6; E_{43} \ldots E_{211}$	$M_3; M_5; M_6; M_{43} \ldots M_{211}$	$\overline{Q}_3; \overline{Q}_5; \overline{Q}_6; \overline{Q}_{43} \ldots \overline{Q}_{211}$	$TR'_3; TR'_5; TR'_6; TR'_{43} \ldots TR'_{211}$	$TBF_3; TBF_5; TBF_6; TBF_{43} \ldots TBF_{211}$
$[Q_3 - Q_4]$	$E_1; E_7; E_{21}; E_{45} \ldots E_{317}$	$M_1; M_7; M_{21}; M_{45} \ldots M_{317}$	$\overline{Q}_1; \overline{Q}_7; \overline{Q}_{21}; \overline{Q}_{45} \ldots \overline{Q}_{317}$	$TR'_1; TR'_7; TR'_{21}; TR'_{45} \ldots TR'_{317}$	$TBF_1; TBF_7; TBF_{21}; TBF_{45} \ldots TBF_{317}$
...	...	...	...	...	...
$[Q_N - Q_{N+1}]$	$E_7; E_3; E_{21}; E_{53} \ldots E_{321}$	$M_7; M_3; M_{21}; M_{53} \ldots M_{321}$	$\overline{Q}_7; \overline{Q}_3; \overline{Q}_{21}; \overline{Q}_{53} \ldots \overline{Q}_{321}$	$TR'_7; TR'_3; TR'_{21}; TR'_{53} \ldots TR'_{321}$	$TBF_7 TBF_3; TBF_{21}; TBF_{53} \ldots TBF_{321}$

Tabla 3: Asignación de datos a los Rangos Ri

han obtenido directamente de los registros del sistema *PI System*, el cual controla la alimentación a la línea de molienda. Lo anterior no excluye que el análisis pueda ser realizado considerando las lógicas funcionales y los efectos dinámicos entre los equipos y sus cargas de trabajo.

2.3. ANÁLISIS DE FIABILIDAD E INDICADORES POR RANGO

Para cada Rango R_p, es recomendable disponer de al menos 8 eventos de carácter correctivo para poder realizar la parametrización, lo cual es una exigencia estadísticamente implícita y necesaria para parametrizar y obtener curvas de fiabilidad representativas del sistema o línea bajo estudio. En el análisis, se considerarán las curvas de Densidad de Probabilidad de Fallo (PFD) Weibull, Exponencial, Normal y Log normal. A modo de ejemplo, se especifica la información que debe obtenerse para cada rango de carga (Tabla 4).

$$R(T) = e^{-\lambda_i * t} \quad [7]$$

b. El ajuste de curva utilizado, modela la fiabilidad del sistema asumiendo que cada vez que se realiza un evento de mantenimiento el equipo queda tan bueno como nuevo (Mantenimiento Perfecto – PRP) [8]. Se han analizados los datos existentes a través del test de Laplace [6], descartando la existencia de una posible tendencia.
c. El Indicador Q_i representa el indicador de carga real [Ton/hora] para cada Rango de Carga R_i, es decir, este indicador busca identificar la carga real procesada por hora de operación durante las intervenciones que ocurrieron en el rango de carga establecido.
d. El cálculo de disponibilidad (A) de un sistema o línea de producción que trabaja a diferentes cargas, debe ser complementado con otro tipo de análisis, dado que cuando existe variabilidad en la carga de trabajo, la disponibilidad podría ocultar fenómenos importantes de análisis. Los indicadores: Utilización (U), Velocidad de producción y la Calidad del flujo de salida componen el indicador global OEE (*Overall Equipment Effectivenes*), indicador general de eficiencia o control de pérdida [9].

Rango $[Q_A$-$Q_B]$	Ajuste	$MTBF_i$ [h]	$MTTR_i$ [h]	N° de Eventos Tipo M_1	N° de Eventos Tipo M_2	N° de Eventos Tipo M_3	Q_i [Ton/h]
[5000 – 5400]	Weibull	85	8	25	45	10	6000
[5400 – 5600]	Weibull	95	9	35	60	15	6200

Tabla 4: Asignación de data a los Rangos Ri

En el modelado de la fiabilidad se observa que los resultados (véase Figura 5) según los rangos de carga son, a un mismo tiempo de operación, muy diferentes entre los equipos que operan a diferente carga. Ra(t) > Rb(t) > Rc(t).

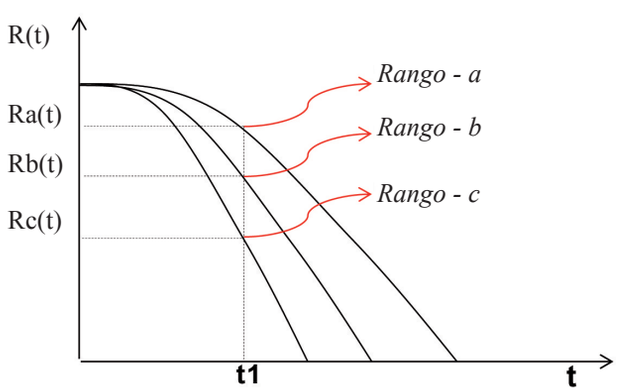


Fig. 5. Curvas de fiabilidad según rangos de carga

Algunas observaciones a destacar en el análisis de fiabilidad:

a. Como criterio para la correcta parametrización de los datos por parte de los evaluadores y en base a los estudios realizados en el área, en el caso de que no existan más de 8 datos correctivos por rango R_p se utilizará la aproximación $MTBF_i = 1/\lambda_i$, es decir, se asume tasa de fallo constante. La fiabilidad se modela por medio de la fórmula:

3. DESARROLLO Y RESULTADO DEL ANÁLISIS

Es necesario señalar que, en base a la metodología propuesta, la función de fiabilidad R[a,b](t) asociada a un rango de carga de operación [a,b] se entenderá como la probabilidad de que no se presente un evento de fallo en el sistema dentro un intervalo de tiempo t, para el cual, el equipo ha operado en promedio a una carga dentro de dicho rango [a,b]. En otras palabras, si se monitorea el promedio instantáneo de carga Q*, desde el último evento de fallo, este determinará el rango de operación Q* Î [a',b'], y, en consecuencia, la función de fiabilidad a considerar es R[a',b'](t).

Concretamente, se consideran rangos de análisis de 100 [ton/h]. Asimismo, el número de rangos variará de acuerdo a lo deducido de los datos históricos disponibles. A continuación, se presenta el análisis de fiabilidad.

3.1. ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO EN LAS DOS LÍNEAS

En la Figura 6 se muestran las curvas de fiabilidad obtenidas para la línea 1 de proceso. Los rangos determinados contemplan cargas de operación desde 1000 a 1900 [ton/h].

Es relevante destacar que el rango de carga óptimo es el [1600,1700], ya que éste es el más fiable, es decir, si la línea opera a una carga instantánea promedio dentro de dicho rango, la probabilidad de ocurrencia de eventos de fallos en la línea es menor, en comparación a operar en algún otro de los rangos considerados [10].

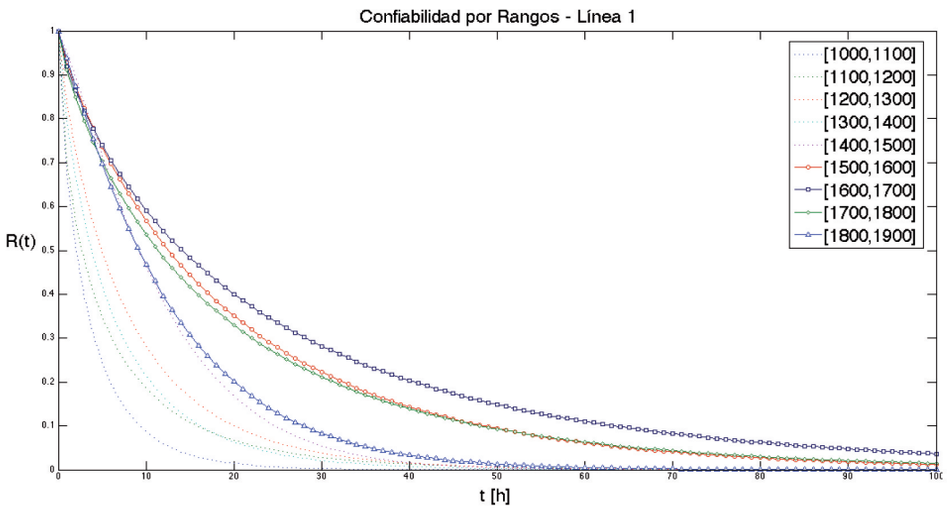


Fig. 6. Funciones de Fiabilidad por Rangos de Carga – Línea 1

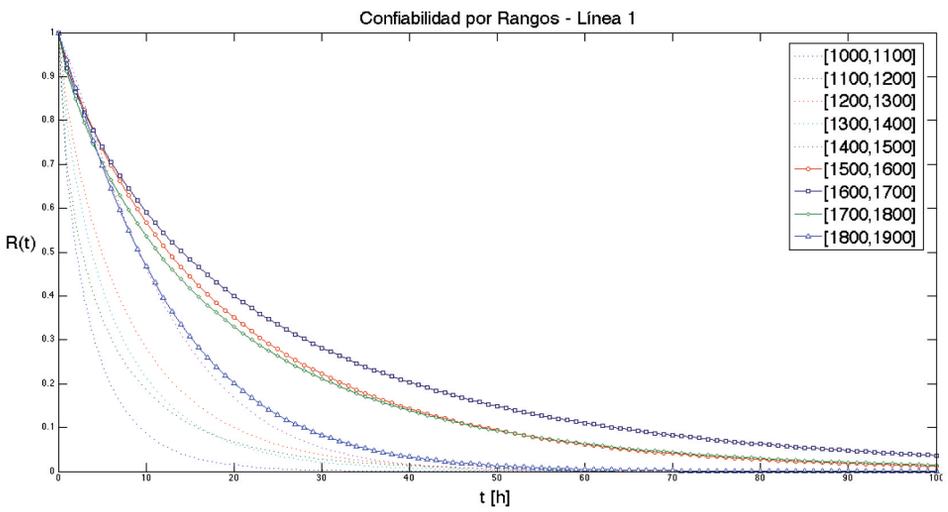


Fig. 7. Funciones de Fiabilidad por Rangos de Carga – Línea 2

Usualmente, es de esperar que a una mayor carga de trabajo los sistemas sean menos fiables. Sin embargo, esto se cumple en sistemas cuya carga de operación no presenta mayor variabilidad dentro del intervalo dado por dos fallos consecutivos. En el presente caso, cuando un fallo ocurre a cierto nivel de carga Q*, este no es directamente atribuible a tal nivel de carga, pues es necesario evaluar el comportamiento anterior de los niveles de operación hasta el instante del evento de fallo anterior, determinando la carga promedio a la que el sistema fue sometido. Así, es posible asignar un fallo ocurrido a un nivel de carga Q* a un rango promedio diferente.

Por otro lado, una de las conclusiones preliminares relevantes es la sensibilidad de la fiabilidad a un aumento en la carga de operación. Como se ha señalado, el nivel de operación más fiable se da dentro del rango [1600, 1700]. Además, analizando las gráficas de la Figura 6, es posible deducir que la carga de trabajo no debe superar las 1800 Toneladas (nivel superior), ya que la curva de fiabilidad para

Línea 1								
Rango [Ton/h]	Ajuste	Parámetros		MTBF [h]	MTTR [h]	Nº Eventos M2	Nº Eventos M1	Q [Ton/h]
		Alfa	Beta					
[1000-1100]	Weibull	3,27	0,8	3,62	1,78	15	2	1056,09
[1100-1200]	Weibull	4,64	0,68	5,85	0,88	10	1	1149,01
[1200-1300]	Weibull	7,59	0,86	8,05	2,21	15	0	1254,91
[1300-1400]	Weibull	5,92	0,83	6,59	1,87	17	0	1351,97
[1400-1500]	Weibull	12,38	1,21	11,59	1,51	12	0	1456,75
[1500-1600]	Weibull	18,97	0,89	17,10	2,85	21	2	1563,78
[1600-1700]	Weibull	22,34	0,80	23,91	3,73	16	1	1646,98
[1700-1800]	Weibull	17,65	0,83	13,38	1,61	14	1	1742,97
[1800-1900]	Weibull	12,86	1,08	12,53	4,02	10	0	1860,16

Tabla 5. Indicadores de Fiabilidad y Mantenibilidad por Rangos – Línea 1

ese rango es considerablemente inferior. Ídem para las cargas menores a las 1500 Ton (Tabla 5).

El análisis para la línea 2 arroja resultados muy similares a los obtenidos para la línea 1 (Figura 7). Sin embargo, el nuevo rango óptimo de carga en términos de fiabilidad es el de [1700,1800], por ende, es el rango recomendado por los analistas. Análogamente al caso de la línea 1, en la línea 2 no es recomendable superar las 1800 toneladas de carga, pues inmediatamente los niveles de fiabilidad disminuyen (Tabla 6).

3.2. OBSERVACIONES Y RESULTADOS

Las gráficas de los resultados (Fiabilidad por Rangos de Carga) para cada línea de molienda (Línea 1 y 2) se muestran en las Figuras 6 y 7.

Como análisis cualitativo de información, específicamente si se refiere al registro de los modos de fallo existentes para cada evento de fallo, se revisó el 100% de los Modos de fallo registrados, y se observó que existía fusión entre los conceptos de "Síntomas" o "Mecanismos de Fallo" [11], [12]. Del total de datos analizados (382 eventos de fallo), sólo el 39,1% tenían los modos de fallo correctamente asignados a los eventos de fallo. Este hecho limita el análisis cualitativo posterior, por ejemplo un Análisis Causa Raíz (ACR).

3.3. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS A LA METODOLOGÍA PRESENTADA

i. Evaluación económica global para identificar el rango óptimo de carga.

Identificar el Rango de Carga óptimo, considerando evaluación de costo Global para un periodo de vida mayor (ciclo de vida), es un análisis que requiere determinar aquel rango donde se maximice la producción y sea económicamente conveniente, es decir más rentable. Para ello, es conveniente sensibilizar las variables que se ven afectadas por el aumento de carga, dentro de las cuales se conocen:

- Costo Mantenimiento (Directo). Se debe tener claridad sobre los costos reales de cada evento de mantenimiento, lo que exige eficientes y eficaces sistemas de información, además de una adecuada "cultura del dato" para toda la organización.
- Costo Ineficiencia o Pérdida de Producción.
- Frecuencia de Fallo (MTBF) e intervenciones preventivas.
- Presupuesto de Mantenimiento.

La importancia de este análisis radica en el hecho de que no existe una medida objetiva de los efectos técnicos y económicos que traerán el aumento de carga sobre la capacidad nominal de diseño. La incertidumbre respecto a las consecuencias que tendrá en los activos un aumento de carga, específicamente en términos de desgaste y envejecimiento, es muy alta. Más aún respecto al impacto económico provocado por los fallos (principalmente por fallos catastróficos o de alta frecuencia), costo directo de mantenimiento y la respectiva pérdida de producción. Para el análisis de las líneas de molienda, sólo es posible evidenciar un aumento en las frecuencias de fallo, lo cual repercute directamente en las curvas de fiabilidad. Por esta razón las investigaciones posteriores debieran integrar características de operación, mantenimiento, prácticas, características de los equipos, entre otros.

ii. Complementar el análisis con indicadores.

Los indicadores deberán ser útiles y aplicables al proceso y contexto de operación. Concretamente, se propone aplicar el Indicador Global de Eficiencia (OEE). El indicador de Disponibilidad a nivel de componente o sistémico, en procesos con carga variable (velocidad de producción variable), en ocasiones oculta fenómenos de inutilización y bajos rendimientos, mostrando una realidad parcial del proceso. Esta situación conlleva la incorrecta toma de decisiones, mala asignación de recursos, falsas expectativas de resultados de producción, entre otros. Por ello, es recomendable complementar futuros análisis con el uso del OEE y con la evaluación de fiabilidad en cada evento (M1, M2 y M3).

El objetivo de este tipo de análisis es identificar la incidencia real de la fiabilidad en la producción, y las respectivas curvas según los niveles de carga exigidos al proceso (Figura 12).

iii. Auditoría del plan de mantenimiento.

Resulta necesaria la revisión detallada de los planes de

Línea 2								
Rango [Ton/h]	Ajuste	Parámetros		MTBF [h]	MTTR [h]	Nº Eventos M2	Nº Eventos M1	Q [Ton/h]
		Alfa	Beta					
[1000-1100]	Weibull	9,15	1,02	8,74	1,61	29	1	1046,34
[1100-1200]	Weibull	9,01	0,92	7,80	2,31	26	3	1150,06
[1200-1300]	Weibull	8,33	0,87	7,60	1,48	34	3	1252,63
[1300-1400]	Weibull	6,97	0,96	7,07	2,42	46	0	1353,45
[1400-1500]	Weibull	12,42	0,86	12,10	1,95	63	4	1455,20
[1500-1600]	Weibull	17,69	1,25	15,34	4,29	40	4	1554,21
[1600-1700]	Weibull	16,38	1,03	13,94	3,83	27	2	1652,91
[1700-1800]	Weibull	20,16	1,05	19,72	2,26	23	0	1745,70
[1800-1900]	Weibull	13,16	1,08	11,58	3,08	14	2	1853,33

Tabla 6. Indicadores de Fiabilidad y Mantenibilidad por Rangos – Línea 2

mantenimiento, focalizándose como primera etapa en la eficacia de éstos, es decir, las actividades preventivas o de inspección deben estar dirigidas a los modos de fallo críticos. Este primer análisis también debe considerar: generación de nuevas actividades preventivas y de inspección (modos de fallo potenciales según las nuevas exigencias); modificación de las actuales frecuencias de las tareas preventivas y de inspección; revaluación de las tasas de desgaste de los componentes; ampliación (en su caso) del presupuesto de mantenimiento; revisión de la política de abastecimiento asociada a los repuestos críticos.

Como segunda etapa, es recomendable verificar la eficiencia de los planes de mantenimiento, validando características como: calidad del mantenimiento; planificación, programación y cumplimiento de las tareas preventivos y de inspección; revisión de procedimientos.

Estas recomendaciones deben ser soportadas, de acuerdo al contexto de operación respectivo, por medio de las herramientas de aplicación Análisis de Causa Raíz [13] y Análisis de Modos, Efectos y Criticidad de Fallas (FMECA) [11].

Otras referencias relevantes en este ámbito son [14], [15], [16] y [17].

4. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada y propuesta en este artículo, tiene como finalidad dar apoyo al proceso de toma de decisiones en el ámbito de la dirección de mantenimiento, operación y análisis de fiabilidad, de manera que dichas decisiones permanezcan alineadas con la visión, la estrategia y objetivos. Este artículo muestra claramente cómo afecta a la fiabilidad de una planta de molienda la variabilidad de los niveles de carga (flujos de entrada) en las líneas de molienda de dicha planta y, posteriormente, determina cuál sería el rango de carga óptima. El artículo identifica, además, la relación existente entre los rangos de cargas de cada línea y su respectiva fiabilidad mediante el desarrollo de un caso práctico real llevado a cabo en una empresa minera ubicada en el norte de Chile, sirviendo éste como validación de la metodología desarrollada.

En las 2 líneas analizadas, los rangos de mayor fiabilidad coinciden con aquellos cuya producción es la recomendada. Que en estos rangos de carga exista una menor probabilidad de ocurrencia de fallos, no asegura que no puedan producirse, sino que se darán con una menor frecuencia a lo largo del tiempo. De acuerdo con la información obtenida, los comportamientos de fiabilidad modelados se ajustan a condiciones de operación y ocurrencia de eventos de fallo. De esta manera se validan empíricamente los resultados teóricos:

- Para la Línea 1, el rango de carga óptimo en términos de fiabilidad, es el de [1600,1700]. Es decir, si la línea opera a una carga instantánea promedio dentro de dicho rango, la probabilidad de ocurrencia de eventos de fallos en la línea es menor, en comparación a operar en algún otro de los rangos considerados. Además, analizando las gráficas de la línea 1, es posible deducir que la carga de trabajo no debe superar las 1800 Toneladas (Nivel Superior), ya que la curva de fiabilidad para ese rango es considerablemente inferior. Ídem para las cargas menores a las 1500 Ton.
- El análisis para la Línea 2 arroja resultados muy similares a los obtenidos para la línea 1. Sin embargo, el nuevo rango de carga óptimo es el de [1700,1800], por ende es el rango recomendado por los analistas. Se recomienda no superar una carga promedio de 1800 toneladas, ya que la curva de fiabilidad para ese rango es considerablemen-

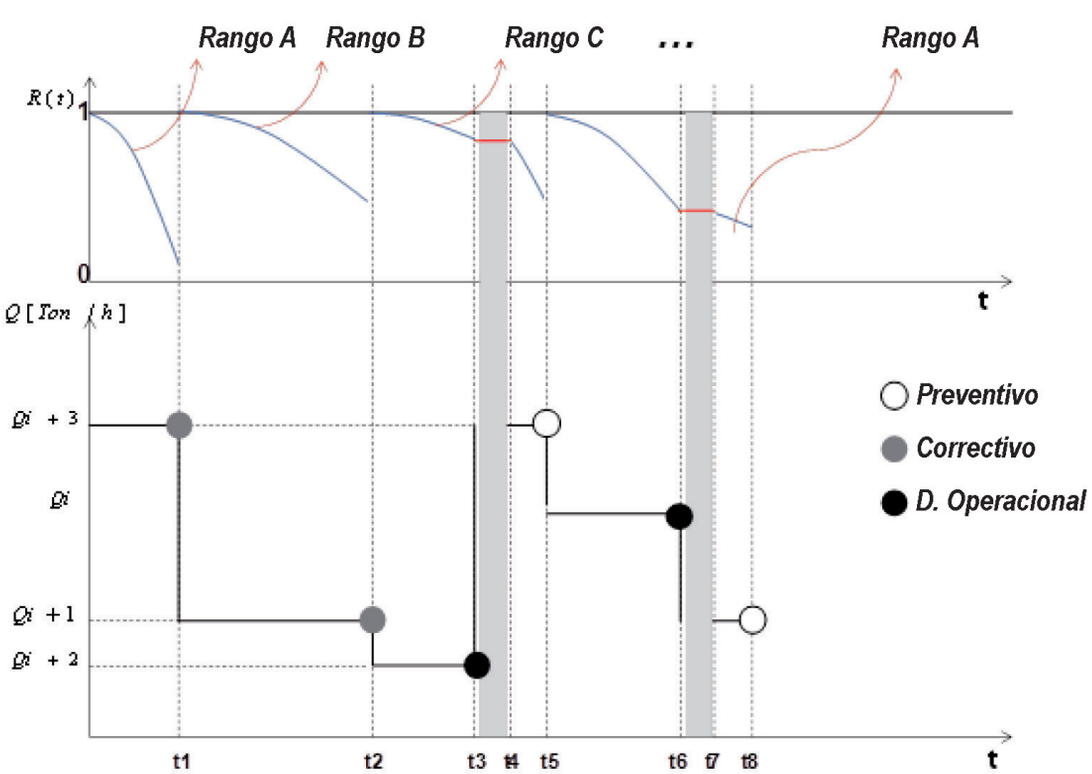


Figura 12. Tipo de análisis Carga de trabajo y fiabilidad de manera simultánea

te inferior. Ídem para las cargas menores a las 1500 Ton.

Para fundamentar los resultados de las Líneas 1 y 2 es necesario conocer en profundidad factores específicos implicados en la operación que no son registrables como datos cuantitativos. Para mejorar los análisis, resulta necesario dar seguimiento a los fenómenos identificados mediante la misma metodología, de esta forma se podrán comparar y correlacionar resultados bajo una misma métrica.

Como futuras líneas de investigación en este campo, se propone el desarrollo de herramientas que permitan integrar y relacionar el conocimiento de la fiabilidad, las cargas de trabajo y el estado en el cual se encuentran los equipos o subsistemas (fallo, detención preventiva o detención operacional), tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura 12. Este tipo de herramienta facilitará el análisis y toma de decisiones en la gestión de activos y mantenimiento en organizaciones industriales.

El objetivo de esta propuesta es desarrollar un sistema informático en línea que monitoree el comportamiento del sistema, evaluando la carga de trabajo en la cual se ha configurado el sistema/equipo, relacionándola directamente con la curva de fiabilidad que corresponda según la carga. Esta información es de gran utilidad para la gestión de las pautas de mantenimiento, control de los fallos y sus respectivas causas, dinamización de los planes de mantenimiento, así como para analizar características de los fenómenos de desgaste acelerado y sus posibles causas.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo se ha realizado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación Español y de los fondos FEDER. The research work was performed within the context of iMaPla (*Integrated Maintenance Planning*), an EU-sponsored project by the *Marie Curie Action for International research Staff Exchange Scheme* (project acronym PIRSES-GA-2008-230814 iMaPla).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Dhananjay K., Bengt K. (1994). Proportional hazards model: A review. Reliability Engineering and System Safety 44 (1994) 177-188.

[2] Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P. & Arata, A. (2012). "The Graphical Analysis for Maintenance Management Method: A Quantitative Graphical Analysis to Support Maintenance Management Decision Making". Journal of Quality and Reliability Engineering International, Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd. (wileyonlinelibrary.com) DOI: http://dx.doi.org/10.1002/qre.1296.

[3] Wightman D. W., Bendell A. (1985). The Practical Application of Proportional Hazards Modelling. Reliability Engineering 15 (1986) 29-53.

[4] Dhananjay K., Bengt K., Uday K. (1992). Reliability analysis of power transmission cables of electric mine loaders using the proportional hazards model. Reliability Engineering and System Safety 37 (1992) 217-222.

[5] Ansell J. I., Phillips M. J. (1997). Practical aspects of modelling of repairable systems data using proportional hazards Models. Reliability Engineering and System Safety 58 (1997) 165-171.

[6] Rausand, M. and Hoyland, A.System reliability theory: models, statistical methods, and applications, third edition, 2003 (Wiley, New York, New York).

[7] Blischke WR, Murthy DNP. Case studies in reliability and maintenance. USA: Wiley; 2003.

[8] Parra C., Crespo A., Kristjanpoller F. & Viveros P. (2012). "Stochastic model of reliability for use in the evaluation of the economic impact of a failure using life cicle cost analysis. Case studies on the rail freight and oil industry". Proc. IMechE, Part O: J. Risk Reliab., 2012, 226, N°4, 392–405.

[9] Pomorski Tom, Semiconductor Fairchild, "Managing Overall Equipment Effectiveness to Optimize Factory Performance", IEEE, 1997. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISSM.1997.664488.

[10] Jardine A. K. S., Anderson P. M., Man D. S. (1987). Application of the weibull proportional hazards model to aircraft and marine engine failure data. Quality and Reliability Engineering International. Vol. 3. 77-82.

[11] J. Moubray 1997. "Reliability-Centred Maintenance". Industrial Press, Inc. 2nd edition. , New York, USA. pp. 448. 1997. ISBN: 0831131462.

[12] ISO/DIS 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. October 2004.

[13] R. K. Mobley. Root Cause Failure Analysis. Butterworth-Heinemann, 1999.

[14] Huang S. H., Dismukes J. P., Shi J., Su Q., Wang G., Rauak M. A., Robinson E. (2001). Manufacturing System Modeling for Productivity Improvement. Journal of Manufacturing Systems Vol. 21, No 4

[15] Jardine A. K. S., Banjevic D., Wiseman M., Buck S., Joseph T. (2001). Optimizing a Mine Haul Truck Wheel Motors' Condition Monitoring Program: Use of Proportional Hazards Modeling. Journal of Quality and Maintenance Engineering, 2001, Volume: 7 Issue: 4 pp.286-301.

[16] Lugtigheid D., Banjevic D., Jardine A. K. S. (2008). System repairs: When to perform and what to do? Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 604–615.

[17] Vlok P. J., Coetzee J. L., Banjevic D., Jardine A. K. S., Makis V. (2002). Optimal Component Replacement Decisions Using Vibration Monitoring and the Proportional- Hazards Model. Journal of the Operational Research Society, Vol. 53, No. 2, Part Special Issue: The Process of OR (Feb., 2002), pp. 193-202