



Determinación de una política de mantenimiento oportunista: análisis en flota de camiones mineros*

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Diego Carrasco¹, alumno de sexto año

Rodrigo Pascual¹, profesor asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

INTRODUCCIÓN

Los costos de mantenimiento de equipos conforman entre un 15% y un 70% del total de los costos de un proceso productivo [1]. En el caso de la minería, esa componente oscila entre 20% y 35% [2]. Actualmente, la minería aporta un 14,2% del PIB de Chile [3], por lo que una correcta política de mantenimiento tiene un alto potencial para impactar el desempeño del negocio minero y la producción nacional.

Existen distintas formas de minimizar los costos de mantenimiento, para esto existen distintas políticas para enfrentar el problema. De acuerdo a [1] las políticas de mantenimiento se pueden catalogar en cinco tipos: (i) **mantenimiento correctivo** (MC); (ii) **mantenimiento preventivo** (MP); (iii) **mantenimiento oportunista** (MO); (iv) **mantenimiento basado en condición**; y (v) **mantenimiento predictivo**. Estas se dividen, al mismo tiempo, en dos clases: las que toman datos de la condición del equipo y las que se basan en el tiempo de uso del equipo.

*Este trabajo corresponde a una versión de desarrollo de un artículo presentado en Mantemin 2014.

En el presente artículo se busca una metodología novedosa y de fácil uso para optimizar la política de mantenimiento. Partiendo de la base de que los modelos que se sustentan en el tiempo de uso son de mayor accesibilidad a los mantenedores, dado que no requieren la utilización de dispositivos extras de medición, en este estudio se optó por esa línea de política de mantenimiento.

Para poder realizar un análisis sobre las políticas se requiere que los equipos se deterioren en el tiempo. Wang [4] presenta una revisión de los modelos más importantes que han sido la piedra angular y que se han empleado durante la última década en el área.

Dado que no es adecuado aislar los diferentes componentes, se optó por una política de mantenimiento multicomponente, la que se puede optimizar de diversas maneras [5], entre las que destaca el mantenimiento oportunista (MO) [6]. Para optimizar una política de MO se han planteado diferentes alternativas, una de las cuales es mediante los modelos markovianos [7], que se explora en este artículo.

METODOLOGÍA

Para resolver el modelo de política oportunista óptima, se considera un criterio de costo marginal que es en el que se incurre por las actividades de mantenimiento de los componentes analizados [8]. La idea detrás de esto es solamente modelar una parte del problema de interés, dando simpleza al modelo. La función objetivo del modelo corresponde a la minimización de los costos marginales, que es un problema de minimización equivalente a lo que sería la minimización de los costos generales, considerando que solamente varían debido a la parte de los costos generales compuesta por lo analizado en la FO. Dado que se tomaron en cuenta sistemas en serie, existe dependencia económica entre los componentes.

Los costos considerados por actividad de mantenimiento son fijos y se calculan en función del costo de detención del equipo por unidad de tiempo y el costo de taller. Estos costos conforman una función lineal que es la misma para todas las intervenciones (Ecuación 1), ya que depende del sistema a analizar y no del componente; a su vez, el tiempo de intervención sí depende del componente. La parte de los costos variables por componente consiste en repuestos e insumos que dependen de la actividad realizada por cada elemento específico. Ambos fluctúan en caso de tratarse de un MP o MC, ya que cambian los tiempos, urgencia, y disponibilidad de repuestos y/o insumos.

$$(1) \quad C_{\text{fijo}} = C_{\text{Transporte}} + C_{\text{Detención}} \times t$$

Para cada componente se obtienen **funciones de confiabilidad** ($R(t)$). Dichas funciones sirven para calcular las probabilidades de falla de cada elemento a través del tiempo. Cabe destacar que existe una dependencia temporal entre los componentes, ya que operan simultáneamente, luego se considera que la misma escala de tiempo afecta de manera análoga a las funciones de confiabilidad por componente.

Para poder definir un horizonte de tiempo se fijó una política de MP por cada componente separado, resultado en un tiempo entre MP (T_i). Estos tiempos se obtienen minimizando los costos marginales esperados del mantenimiento de dichos equipos (Ecuación 2). Antes de llegar a T_i puede fallar, con probabilidad igual al complemento para llegar a 100% de la confiabilidad en T_i , incurriendo en actividad de MC, o si es conveniente puede tener un MO en el caso multicomponente. Esta conveniencia será determinada por una variable a optimizar. Se define un tiempo medio entre intervenciones (MTBI, por su acrónimo en inglés *Mean Time Before Intervention*) (Ecuación 3) y la no negatividad de la variable (Ecuación 4).

$$(2) \quad \text{Min}_x \left\{ \frac{R(T_i) \times C_{MP} + [1 - R(T_i)] \times C_{MC}}{MTBI(T_i)} \right\}$$

$$(3) \quad MTBI(T_i) = T_i \times R(T_i) + [1 - R(T_i)] \times \int_0^{T_i} R(t) dt$$

$$(4) \quad T_i \geq 0$$

donde C_{MP} y C_{MC} son los costos de un MP y un MC respectivamente.

Una vez obtenidos los tiempos se debe discretizar el horizonte T_i de cada componente, en $T_i/\Delta t$ intervalos, donde el largo de cada intervalo es Δt . Considerando que cada estado de la cadena markoviana debe ser capaz de contener toda la información del sistema [9], la cantidad de posibles estados está dada por:

$$(5) \quad n = \prod_i \frac{T_i}{\Delta t}$$

Los posibles eventos se definen como la falla de algunos componentes (subconjunto f), representando un MC cada uno de ellos (Ecuación 6). Aquí estos pueden cumplir su T_i , puede envejecer el sistema (Ecuación 7), o puede incurrirse en un MO.

$$(6) \quad P(\text{falla } j) = \prod_i \int_0^{t+\Delta t} [1 - R_i(x)] dx \prod_{i \neq j} \int_0^{t+\Delta t} R_i(x) dx$$

$$(7) \quad P(\text{envejecer}) = \prod_i \int_0^{t+\Delta t} R_i(x) dx$$

En caso de MP, los eventos ocurren cuando se alcanza el umbral T_i , luego si se cumple la ecuación 8 se realiza un MP. Una MO ocurre si se cumple la condición de la Ecuación 9, además debe haber un MC o MP, donde α_i corresponde a la fracción del umbral frente al cual conviene realizar un MO. Estas son las variables de decisión del modelo:

$$(8) \quad t + \Delta t \geq T_i$$

$$(9) \quad t + \Delta t \geq T_i \alpha_i$$

Todas las posibles transiciones están dadas en la matriz de transiciones M , definida en la Ecuación 10:

$$(10) \quad \mathbf{M} = \mathbf{M}_{MO} + \mathbf{M}_{MP} + \mathbf{M}_{MC} + \mathbf{M}_{ENVEJECIMIENTO}$$

La probabilidad de encontrarse en un estado cualquiera en el largo plazo, π , se define de acuerdo a la ecuación 11 [9]:

$$(11) \quad \boldsymbol{\pi} = \mathbf{M}\boldsymbol{\pi}$$

Finalmente el modelo se define como:

$$(12) \quad \text{Min}_{\alpha} \mathbf{c}_{MO}^T \mathbf{M}_{MO} \boldsymbol{\pi} + \mathbf{c}_{MP}^T \mathbf{M}_{MP} \boldsymbol{\pi} + \mathbf{c}_{MC}^T \mathbf{M}_{MC} \boldsymbol{\pi}$$

$$s.a. \quad \boldsymbol{\pi} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\alpha}) \boldsymbol{\pi}$$

El modelo se resuelve iterando y variando α , que cambia el factor M .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la validación del modelo se analizó una flota que consta de 30 camiones con capacidad sobre las 300 toneladas, que operan en una mina ubicada en Chile. Los camiones estudiados son propulsados por motores eléctricos, para lo cual cuentan con un módulo de potencia que entrega energía eléctrica a partir de la combustión de petróleo. Este módulo de potencia se conforma de un radiador, un alternador y un motor diésel. El radiador sirve para disipar el exceso de calor y el motor diésel para convertir el petróleo en energía mecánica, que es aprovechada por el alternador para generar la energía eléctrica que alimenta a los motores de tracción.

En el caso de camiones en minería, la relación de costos entre MP y MC es dos a tres en las condiciones operacionales de la flota [10].

Para el modelo luego se determinaron dos variables α_1 para el alternador y α_2 para el motor diésel, que conforman el vector α .

Las funciones de confiabilidad se modelaron vía distribución **Weibull**. Los eventos posibles se definen como: (i) probabilidad de que falle solo el componente 1; (ii) probabilidad de que falle solo el componente 2; (iii) probabilidad de que fallen ambos componentes; (iv) probabilidad de que ambos componentes envejeczan. Cada uno de los escenarios se divide en MC, MP, MO y envejecimiento. Éstos determinan M .

En la Figura 1 se observa cómo varían los costos marginales a partir de la metodología propuesta, considerando la variación de ambos umbrales de oportunidad, definiendo el caso base como α nulo. Los umbrales de oportunidad óptimo son 50% de T_1 y 60% de T_2 ($\alpha_1=0.5$ y $\alpha_2=0.6$).

El análisis se realizó tomando en cuenta una unidad de tiempo (ut) equivalente a un año. La unidad

monetaria (um) no se expresa por motivos de confidencialidad.

Se observa una disminución de dos unidades monetarias por unidad de tiempo de operación por camión (Figura 1). Asimismo, se aprecia un aumento de la disponibilidad de la flota a medida que aumentan los factores de oportunidad (Figura 2). Esto se debe a que el número de intervenciones incrementa el número absoluto de intervenciones.

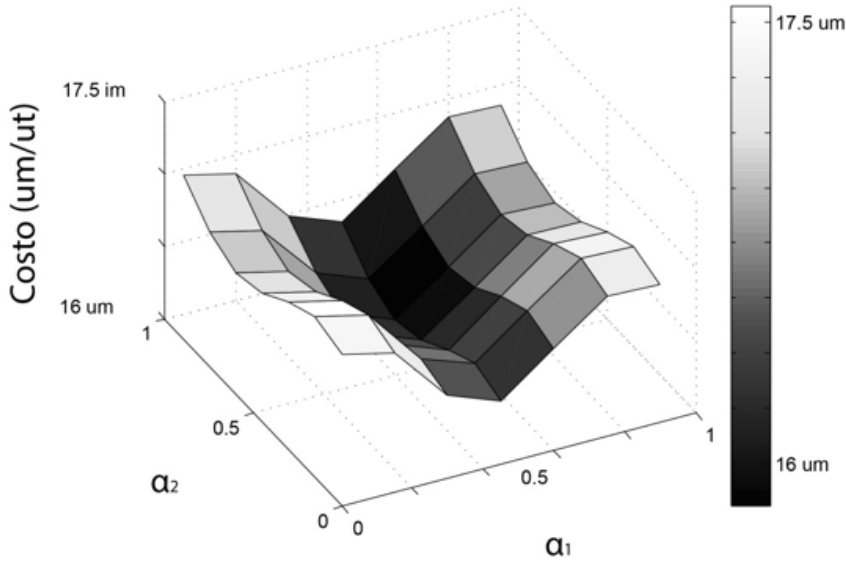


Figura 1. Análisis de α para caso de estudio.

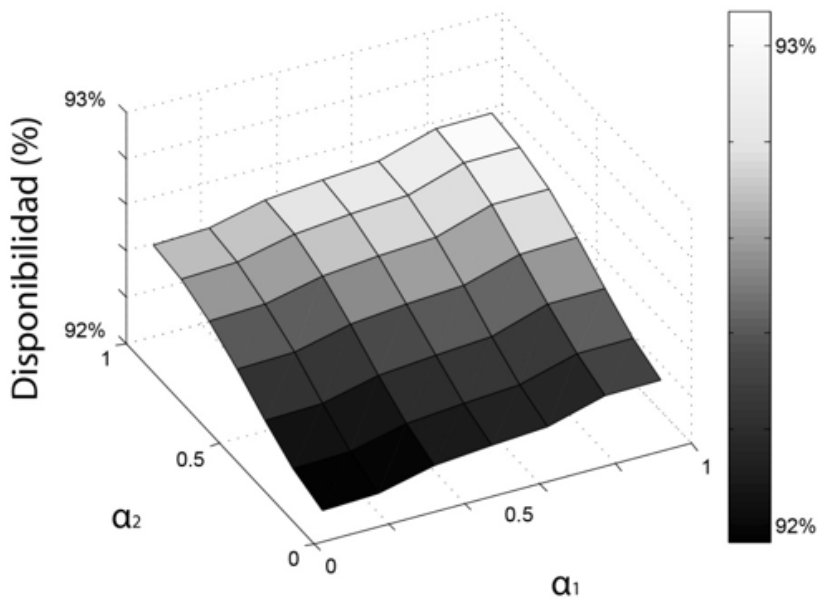


Figura 2. Análisis de disponibilidad.

CONCLUSIONES

A diferencia de soluciones propuestas actualmente, esta herramienta es fácil de plantear, pues no presenta dificultades frente a análisis de problemas que incluyan pocos componentes. El tiempo de elaboración del problema y de resolución crece exponencialmente, por lo que no serviría para casos en los que se quiere realizar un análisis en detalle de todo un sistema. En los otros casos, en que se estudia una parte del sistema o se agrupan subsistemas, el problema se puede resolver entregando disminuciones reales en costos.

Se observa que existe un *trade-off* entre la continuidad de la solución y el tiempo y facilidad de resolución, en la medida en que varía el tamaño de Δt . Esto se debe a que el número de estados posibles del modelo crece exponencialmente con la cantidad de componentes estudiados y con el grado de continuidad que se le da a la discretización del tiempo (ecuación 5). El diseño permite variaciones tan pequeñas en α como Δt lo permita. Por otro lado, si los cambios son muy pequeños, el tiempo de resolución aumenta exponencialmente el costo de resolución del problema, dado que se emplea un método iterativo.

Se observa a partir de la Ecuación 1 que si aumenta mucho el precio del cobre, el costo de detención del equipo crece, lo que hace que suba el costo de realizar mantenimientos. Si llegara a ser lo suficientemente grande, el objetivo sería disminuir el número de intervenciones, con lo que solución sería siempre realizar MO, ya que la Figura 1 tomaría la forma de Figura 2.

En el caso estudiado se observa una disminución de 2,6 millones de dólares por año, lo cual representa un ahorro real en la operación en caso de aplicarse la metodología.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

El costo de realizar una reparación es más alto que el de efectuar una mantención preventiva. Por tanto, en sistemas que se deterioran con el paso del tiempo es útil prevenir las fallas y mantener preventivamente.

Para realizar la modelación de la probabilidad de fallas se recurre a una función de confiabilidad. Con esta se puede definir un intervalo óptimo entre MP, el que si es muy pequeño, el equipo está sobremantenido, incurriendo en costos innecesarios; en cambio, si es muy grande, las intervenciones serán mayoritariamente MC. Esto se ve gráficamente en la Figura 3.

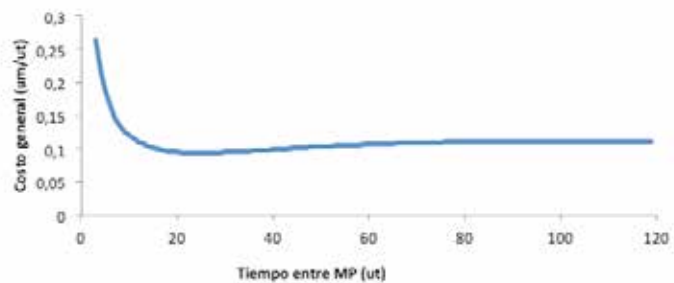


Figura 3. Costo general por unidad de tiempo en función de política de MP.

Este análisis no contempla interacciones entre componentes de un sistema, ya que si se detiene el costo de realizar una intervención preventiva será distinto por el aprovechamiento de economías de escalas, generadas por la ausencia de costo-oportunidad y costos de preparación para la intervención. Es por esto que se plantean políticas de MO, que presentan mejoras contra la optimización aislada de políticas de mantenimiento por componente.

GLOSARIO

PIB: Producto Interno Bruto, medida de la producción de un país en términos monetarios.

Mantenimiento correctivo: Estrategia de mantenimiento que solamente realiza actividades frente a falla.

Mantenimiento preventivo: Estrategia que consiste en actividades de mantenimiento periódicas, estableciendo estas de acuerdo a parámetros de confiabilidad.

Mantenimiento oportunista: Política en que se agrupan actividades de mantenimiento. Solamente se puede hacer en sistemas multicomponentes. Consiste en realizar más de una actividad preventiva o correctiva, que se caracteriza como secundaria, aprovechando una intervención primaria. La intervención primaria corresponde, generalmente, a un MP, MO o una inspección del estado del sistema o equipo.

Mantenimiento basado en condición: Estrategia en que las actividades de mantenimiento se realizan en función de deterioros de la condición del equipo. Es necesario monitorear el estado de las maquinarias continua o periódicamente.

Mantenimiento predictivo: Al igual que en el mantenimiento basado en condición se requiere recolección de información acerca de la situación de la máquina. A partir de esta se determinan patrones anómalos que sirvan de indicador de que ocurrirá una falla, antes de la cual se hace mantención al equipo.

Función confiabilidad: Función matemática que define la probabilidad de supervivencia de un elemento desde el instante cero hasta el cual en que se evalúa la función.

Weibull: Modelo matemático utilizado frecuentemente para definir funciones de confiabilidad. Sus parámetros son dos, uno de forma y una vida característica. El primero define la naturaleza de las fallas, que pueden ser infantiles, aleatorias o de vejez, las primeras ocurren dentro del primer tramo de vida del elemento, y las últimas ocurren con mayor frecuencia a medida que el elemento envejece. La vida característica se define como la esperanza de supervivencia del 37% de los elementos.

MTBI: Tiempo medio entre intervenciones, por su sigla en inglés *Mean Time Before Intervention*. Se define como el tiempo promedio que transcurre entre intervenciones, que pueden ser preventivas o correctivas.

REFERENCIAS

- [1] Bevilacqua, M., Braglia, M., The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection, *Reliability Engineering & System Safety* 70(1); 71-83, 2000.
- [2] Dhillon, B. S., *Mining equipment reliability, maintainability, and safety*. Springer, 2008, ISBN 1848002882.
- [3] Sociedad de Fomento Fabril (SOFOFA). La industria chilena en cifras [en línea], 2012, disponible en web: <http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>
- [4] Wang, H., A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research* 139(3); 469-489, 2002.
- [5] Nowakowski, T., Werbinka, S. On problems of multicomponent system maintenance modelling, *International Journal of Automation and Computing* 6 (4); 364-378, 2009.
- [6] Ab-samat, H., Kamaruddin, S, Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches: A review, *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 20(2); 98-112, 2014.
- [7] Laggoune, R., Chateaneuf, A., Aissani, D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering* 33(9); 1499-1510, 2009.
- [8] Smidt-Destombes, K. S., Van Der Heijden M. C., Van Harten, A. Joint optimisation of spare part inventory, maintenance frequency and repair capacity for k-out-of-N systems. *International Journal of Production Economics* 118(1); 260-268, 2009.
- [9] Pinsky, M., Karlin, S. *An introduction to stochastic modeling* (4a. edición), Elsevier Academic Press. Oxford, 2010, ISBN 0123814170.
- [10] Knights, P.F, Louit, D.; Lay, A. Determining return on investment of maintenance projects using statistical cost modeling, *Mining Engineering* 56(8); 33-47, 2004.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Diego Carrasco

2 Profesor Rodrigo Pascual



1



2