Modelo de predicción de la demanda para componentes de sistemas complejos usando data de mantenimiento

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
Sebastián Garrido[1], Alumno de séptimo año
Rodrigo Pascual[1], Profesor asistente
[1] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

INTRODUCCIÓN

El estudio de confiabilidad y disponibilidad de los sistemas permiten predecir el momento de falla o reemplazo de los componentes. Desde hace mucho tiempo las empresas suministradoras de equipos y servicios de mantención han tenido problemas en la estimación de la demanda de componentes dada su naturaleza intermitente. Esto se debe a la secuencia de fallas y reemplazos programados que tienen los equipos, por lo que una mala estimación de la demanda tiene un impacto en los costos de inventario, produciendo pérdidas millonarias en el corto y largo plazo. Esta investigación, una de las primeras en su tipo, desarrolla un modelo de estimación de demanda basado en el análisis de confiabilidad de los sistemas, utilizando como input la o las fuentes de demanda. El modelo fue probado para un sólo componente de los camiones mineros que se encontraban operando durante el 2011 en Chile. Se predijo la demanda de los componentes con intervalos de medición cuatrimestral y anual, logrando una diferencia porcentual promedio menor a 15% y 7% respectivamente, lo que significa un avance en la estimación de demanda intermitente utilizando data de mantenimiento y análisis de confiabilidad, al tener estimaciones más cercanas a la realidad.

METODOLOGÍA

Algunos métodos estadísticos como suavizamiento exponencial, media móvil o Croston, han sido investigados y desarrollados más a fondo en los últimos años, siendo un gran avance en la estimación de la demanda intermitente [1]. Estos métodos se enfocan principalmente en el comportamiento que tendrá la demanda dado los patrones históricos observados, por lo que se convierten en procesos reactivos de estimación. Poca investigación se ha desarrollado en la determinación de la demanda usando análisis de confiabilidad. Entiéndase confiabilidad como "la habilidad de un sistema/máquina para operar una función requerida sin falla bajo condiciones dadas para un intervalo de tiempo dado" [2]. Este análisis permite predecir la disponibilidad de los equipos usando modelos probabilísticos, por lo que es posible conocer el tiempo de falla y reemplazo de los componentes, conociendo de esta forma la o las fuentes de demanda en un horizonte de planificación, transformándose en un método proactivo de estimación.

Esta investigación propone un modelo de estimación de la demanda para un componente crítico en una flota de equipos, formulando un modelo basado en la confiabilidad de éstos, la fecha de su instalación y el tiempo de *overhaul* (TBO por su sigla en inglés). De este modo, el modelo plantea como input la demanda causada por los reemplazos por *overhaul* y por imprevistos o fallas.

Con la data de reemplazo de componentes para una flota, utilizamos un modelo de Weibull para predecir la disponibilidad de los equipos, que junto al modelo exponencial, son los más usados para el análisis de confiabilidad de sistemas [1]. Estos modelos asumen que la tasa de falla es independiente del tiempo. La función densidad de falla de la distribución de Weibull con dos parámetros es definida como:

$$R(t) = exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \qquad t > 0,\ \beta > 0,\ \eta > 0 \tag{1}$$

Para el cálculo de los parámetros según la data de reemplazo y mantención ver [1]. Para calcular el tiempo esperado de vida de los componentes calculamos la Vida Media Residual (MRL por su sigla en inglés), con este valor esperado podemos calcular el número de ítems que serán necesarios reemplazar por falla. Si se suma a esto el número de reemplazos por *overhaul*, tendremos la demanda de componentes por período. Para hacer más exacta la estimación de acuerdo a la vida real, se añade una constante k que proporciona la estimación según las condiciones de trabajo [1]. En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo que explica el modelo.

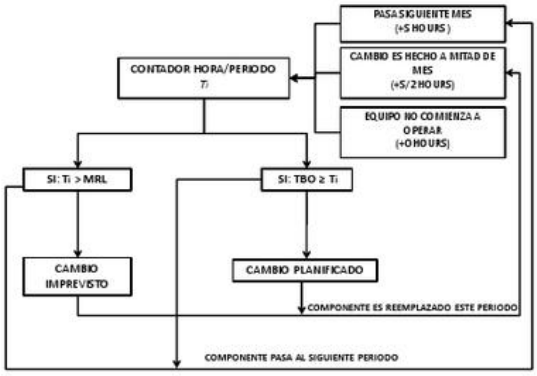

Figura 1: Diagrama de modelo de estimación. Donde: Ti es el contador que va acumulando el tiempo de uso del componente cada periodo. S hora de uso durante cada periodo. MRL vida media residual.

La vida media residual (MRL) es calculada de la siguiente forma:

$$MRL(t) = \int_0^{\infty} R(t)\,dt \tag{2}$$

$$MRL(t) = \kappa \frac{\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) - \frac{\eta}{\beta}\frac{1}{\beta}\exp\left(-\frac{1}{\beta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right)\left(\frac{1}{\beta}\frac{\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta(k-1)}}{\Gamma(k)}\right)\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)}{exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right)} \tag{3}$$

Donde η es la vida característica del componente en el modelo de Weibull; β el parámetro de forma en el modelo de Weibull; y k, la constante de aproximación del modelo por condiciones de trabajo.

De este modo, la demanda de componentes es la siguiente:

$$D(t) = \sum_{i=1}^{n} PR_i(t) + \sum_{i=1}^{n} UR_i(t) \tag{4}$$

Con $D(t)$ número esperado de componentes sobre el periodo t; $PR_i(t)$ reemplazos por *overhaul* del componente i en el periodo t, con i=1..n. $UR_i(t)$ reemplazos por imprevisto del componente i en el periodo t, con i=1..n.

Dado un tiempo de *overhaul* (TBO) para cada componente i y un tiempo de uso acumulado de T_i definimos:

$$PR_i(t) = \begin{cases} 1 & T_i(t) \geq TBO \\ 0 & e.o.c \end{cases} \tag{5}$$

Donde:

$$T_i(t) = \begin{cases} 0 & si\ componente\ i\ no\ opera \\ \frac{S}{2} & si\ componente\ i\ es\ reemplazdo\ por\ otro\ componente\ en\ t-1 \\ S & si\ el\ componenete\ i\ no\ es\ cambiado\ en\ t-1 \end{cases} \tag{6}$$

Los reemplazos por imprevistos quedan definidos como:

$$UR_i(t) = \begin{cases} 1 & MRL(t) < T_i(t) \\ 0 & PR_i(t) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

De este modo, se estimó la cantidad de componentes que serán requeridos en un horizonte de planificación. Obteniendo el número de ítems que serán reemplazados, se puede estimar el soporte requerido en el mismo intervalo considerando un tiempo logístico *(Tat)* constante. Se asume un proceso de Poisson para estimar el soporte requerido en un periodo de tiempo. Esto implica que la ocurrencia de reemplazos es puramente aleatoria y los componentes tienen una condición "tan buenos como nuevos" cada vez que son reparados. Se asume con este modelo que la tasa instantánea de cambios es la misma todo el tiempo; aunque esto no es cierto siempre, es una buena aproximación [1].

Fijando un nivel de servicio con un tiempo logístico constante y un pronóstico de demanda, la cantidad de componentes requeridos en un horizonte de planificación se puede estimar según ecuación (8):

$$p(k) = \frac{exp^{-D(t)T_{at}}(D(t)T_{at})^k}{k!} \quad (8)$$

Donde el nivel de servicio requerido es:

$$\alpha(s) = \sum_{n=0}^{s-1} p(n) \quad (9)$$

El desarrollo del modelo y la estimación de los componentes se pueden implementar en Excel, aunque un programa de simulación es necesario para calcular valores promedios dado distintos estados de los equipos y componentes.

ESTUDIO DE CASO

Para ilustrar el modelo propuesto, se presenta un caso de estudio para un componente de los camiones Komatsu 930 que se encuentran operando desde 2005 en Chile. En la Figura 2 es posible observar la entrada en operación de los camiones en distintas operaciones mineras en un periodo de cuatro años, como también los *overhauls* planificados que el componente para cada camión tiene a lo largo del tiempo. El efecto de posición de *overhauls* debido al ingreso temporal de los camiones a operación se refiere como efecto flota. Esto significa que la entrada de nuevos equipos va generando un aumento en la demanda de componentes para reemplazo y, por ende, un nuevo cálculo en el soporte para un tiempo logístico constante y capacidades físicas de talleres de reparación no variables en el corto plazo.

Los camiones 930 de Komatsu tienen una capacidad de 320 toneladas, por lo que la disponibilidad de cada uno de ellos en una flota es considerable en términos de producción. El componente estudiado tiene un tiempo antes de *overhaul* planificado (TBO) que varía entre 12.000 y 25.000 horas. Esto se debe a la diferencia en la antigüedad de los equipos y a las condiciones geográficas y climáticas del lugar donde éstos operan. Consideramos además que los reemplazos son realizados de forma inmediata y que el uso mensual de los equipos es de 500 horas.

En la Tabla 1 se presentan los parámetros del caso estudiado.

Tabla 1: Parámetros del modelo para el caso de estudio.

Parámetro	Valor	Unidad
η	15.884	h
β	1.12	-
TBO	12.000-25.000	h
S	500	h/mes
Horizonte de Planificación	60	mes

La demanda fue estimada para dos intervalos de medición: un intervalo cuatrimestral y uno anual, obteniendo los resultados que se observan en las Figuras 2 y 3 respectivamente.

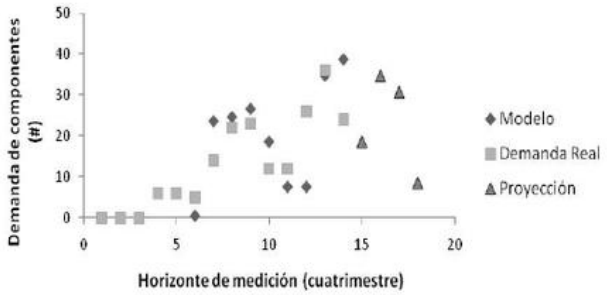

Figura 2: Demanda estimada cada 4 meses.

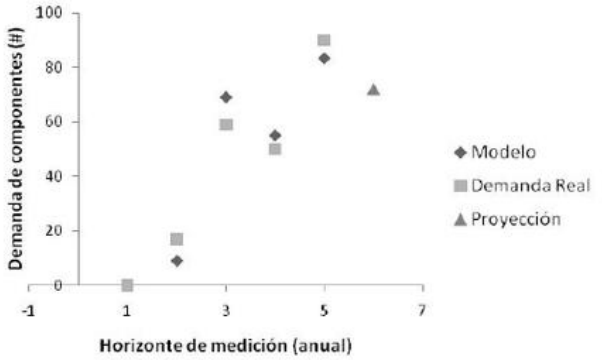

Figura 3: Demanda estimada cada un año.

La demanda estimada cada cuatro meses tiene notorias diferencias en la estimación entre los años 2009 y 2010 en comparación a la demanda real. Estas diferencias se deben a las variaciones en los intervalos de tiempo reales para cambios programados, ya que durante los dos primeros cuatrimestres del 2010 la empresa postergó los cambios, aumentando la demanda para el 2011, debido a la suma de los cambios acumulados con los que correspondían en ese periodo. Para una estimación anual, el modelo planteado se ajusta bastante bien a la demanda real, logrando una diferencia porcentual promedio menor a un 5%, lo que incluye condiciones climáticas y geográficas diversas para las operaciones incluidas en el estudio, sumado al no cumplimiento de los tiempos reales de mantenimiento en algunas

faenas mineras. El error medio obtenido se reduce en un 10% al usar un intervalo de medición más largo.

De este modo, el soporte de componentes requerido por equipo para distintos niveles de servicio se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Soporte de componentes requerido por equipo dado un nivel de servicio.

Nivel de Servicio	Soporte requerido por equipo
85%	0.13
90%	0.14
95%	0.14

Este número de componentes por equipo requerido para cumplir un nivel de servicio es concordante con lo que la empresa espera para el periodo. Al aumentar la flota de equipos operando, las empresas pueden ser capaces de estimar un soporte correcto, y de esta forma evitar costos por inventario inmovilizado o costos por inventario faltante.

CONCLUSIONES

El modelo desarrollado en esta investigación muestra una gran aceptabilidad en su estimación, llegando a ser menor a un 10% con intervalos de medición anual. Esto considera un gran avance en el uso de análisis de confiabilidad en la estimación de componentes, ya que involucra como input las fuentes de la demanda. Actualmente existe poca investigación que relacione la confiabilidad de los equipos con la estimación de la demanda, por lo que considerar las condiciones de uso y cómo influye esto en las fuentes de demanda intermitente es un avance para la estimación de la demanda de componentes. Esto permite obtener soportes de componentes óptimos, lo que involucra un costo óptimo por compra y mantención de inventario. Es importante mencionar que en este modelo existen parámetros que se encuentran estimados que contribuyen al error de la estimación, aunque parte de esta incertidumbre queda cubierta por intervalos de medición mayores. Futuras investigaciones podrían mejorar la estimación del modelo utilizando parámetros reales o considerando una función de probabilidades para éstos. Los autores recomiendan el uso de este modelo de predicción de la demanda para aquellos componentes que tienen un tiempo de entrega desde su manufactura *(lead time)* mucho mayor al tiempo de *overhaul* planificado, lo que sucede en la práctica con las partes grandes y más costosas de un equipo. Las empresas proveedoras de equipos y servicios de mantención y reparación son las que más obtendrán beneficio en el uso de este modelo, ya que podrán estimar el soporte correcto, en un horizonte de planificación de mediano a largo plazo, permitiendo disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones de inversión y manejo de inventario. Es recomendable que todo plan de mejoramiento de soporte considere no sólo una estimación adecuada de la demanda, sino que también el cumplimiento de los tiempos de mantención y una disminución en el tiempo logístico (Tat), lo que permitirá en el corto plazo llegar a un nivel de soporte óptimo.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

El principio utilizado se basa en el análisis de confiabilidad de sistemas. Para este análisis se utiliza información de reemplazos de los componentes de un equipo y se estima su vida media residual, de tal manera de estimar cuánto tiempo de vida le queda al ítem antes de fallar. La demanda de reemplazos en un periodo de tiempo es estimada mediante la suma de los cambios por imprevistos o fallas más los cambios programados. Con esta información y junto a un tiempo logístico de reparación se puede estimar el soporte o inventario necesario para responder a los reemplazos en un horizonte de tiempo.

$$D(t) = \sum_{i=1}^{n} PR_i(t) + \sum_{i=1}^{n} UR_i(t)$$

$D(t)$ número esperado de componentes sobre el periodo t.

$PR_i(t)$ reemplazos por *overhaul* del componente i en el periodo t, con i=1..n.

$UR_i(t)$ reemplazos por imprevisto del componente i en el periodo t, con i=1..n.

GLOSARIO

Data de Mantenimiento: Información que contiene el registro de mantenimiento efectuado para cada equipo y componente.

Data de Reemplazo: Información que contiene la fecha de reemplazo de los componentes por equipo.

Overhaul - Overhauling: En este caso de motores podría ser traducido como una Reparación Mayor, Renovación o Reconstrucción del Motor (tanto de motores diesel como gasolina), mediante la utilización de *overhaul kits*, o *kits* de reparación, que incluyen repuestos básicos.

Tiempo de Overhaul: Tiempo transcurrido hasta la necesidad de una reparación mayor de un equipo, involucrando la retirada del producto de la tarea en la cual es utilizada y su desmantelamiento total o parcial.

Tiempo logístico: *(Turn Around Time)* Es el tiempo desde que el componente es cambiado hasta que se encuentra nuevamente disponible para ser usado.

Soporte de componentes requerido por el equipo: Número de componentes disponible en stock para reemplazos por *overhaul* o falla de acuerdo a un nivel de servicio dado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Sr. Francisco Rivera, Subgerente de Planificación de Komatsu Chile, por su ayuda en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

1. Ghodrati B. Efficient Product Support - Optimun and Realistic Spare Parts Forecasting, 2011.

2. Wang W.; Syntetos A. Spare parts demand: linking firecasting to equipment maintenance. Transportation Research Part E 47: 1194-1209, 2011.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

1 Sebastián Garrido
2 Profesor Rodrigo Pascual

1

2