



# Efectos de factores de riesgo locales en la vida de los componentes

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**Magdalena Muñoz**<sup>1</sup>, Alumna de sexto año

**Felipe Sánchez**<sup>1</sup>, Alumno de sexto año

**Rodrigo Pascual**<sup>1</sup>, Profesor Asociado

<sup>1</sup>DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINERÍA

## RESUMEN

Las condiciones en las que se encuentran los equipos mineros difieren dependiendo de la mina en la que estén operando. Sin embargo, las condiciones físicas, ambientales o de operación no son consideradas en el plan de mantención de los equipos y se desconoce el riesgo de falla que agregan estas condiciones en la vida de los componentes. En este trabajo se estudia el comportamiento de falla de ciertos componentes, en distintas faenas mineras del país, para determinar si es que las condiciones de algunas de ellas son efectivamente más riesgosas para los equipos. El estudio de caso considera componentes de camiones y, las condiciones estudiadas, fueron el modelo de camión, la altura a la que se encuentra la faena donde operan y si el camión sube, o no, cargado. El primer paso para estudiar el comportamiento de falla fue determinar un caso base entre los distintos casos que se tenía para el estudio. Se eligió la faena Pelambres y el modelo de camión Komatsu 930E-4 como caso base. Luego, se realizó un análisis de Weibull para ajustar la distribución de fallas y, finalmente, a partir de esos parámetros, se llevó a cabo un estudio de **confiabilidad** a través del Modelo de Cox. De este modo, se pudo relacionar todos los casos al caso base. Del análisis se concluye que operar a alturas sobre 4.000 metros sobre el nivel del mar

(msnm) aumenta significativamente el riesgo de falla, mientras que el efecto contrario se produce al operar en faenas donde los camiones suben cargados. La metodología que se describe en el artículo se muestra eficaz para la evaluación de riesgos locales en la gestión de los equipos y permite un uso de alto impacto de la data disponible. Actualmente, ni las empresas dedicadas al mantenimiento de equipos, ni las empresas mineras, le han dado importancia al efecto de las condiciones locales en la vida de los componentes, sin embargo, este estudio refleja que algunas condiciones físicas y operativas sí afectarían la duración de los componentes y que considerarlas dentro de los planes de mantención podría permitir que los tiempos entre intervenciones se determinen de manera más precisa.

## INTRODUCCIÓN

Para lograr que los movimientos mineros sean constantes y evitar que se detengan las operaciones, cada empresa debe llevar a cabo una estrategia de mantenimiento que se adapte a sus necesidades. En general, el objetivo es evitar las fallas y, por lo tanto, es habitual llevar a cabo una estrategia preventiva. De acuerdo a esto y a los costos involucrados en el proceso, los responsables de las mantenciones de los equipos fijan un tiempo óptimo entre intervenciones, en función del nivel de confiabilidad que deseen asegurar, a partir de una curva de confiabilidad como la que se muestra en la Figura 1.

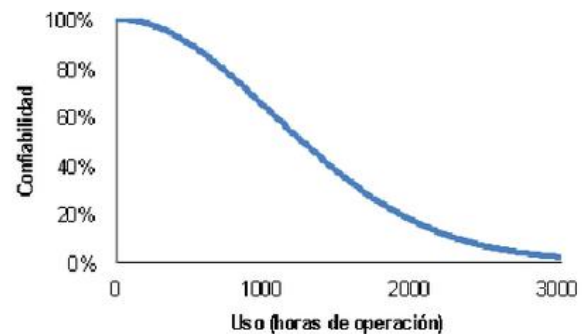


Figura 1: Time Between Overhaul (TBO) según nivel de confiabilidad.

Lo que indica la Figura 1 es que, después de una mantención o recambio de componentes (**overhaul** en tiempo 0) y a medida que aumentan las horas de operación, la confiabilidad o probabilidad de que el componente no haya fallado disminuye. Es decir, a medida que pasa el tiempo, el riesgo de falla aumenta. A modo de ejemplo, se puede ver que el **TBO** para una confiabilidad de 60% es de, aproximadamente, 1.000 horas de uso.

Debido a que el TBO de un componente se fija en base a la probabilidad de que éste no haya fallado (confiabilidad), después de un cierto tiempo de uso, junto con un análisis de costos asociado a las mantenciones preventivas y correctivas, claramente no todos alcanzan a llegar al tiempo óptimo (económico y técnico) de mantención y fallan antes. Estas fallas pueden deberse a múltiples factores, pero empresas fabricantes de camiones y expertas en mantenimiento se han percatado que, en distintas faenas, algunos componentes fallan antes que en otras, sospechando así, que ciertas condiciones físicas y operativas de las distintas minas podrían generar mayor o menor desgaste de los equipos, como se ilustra en la Figura 2.

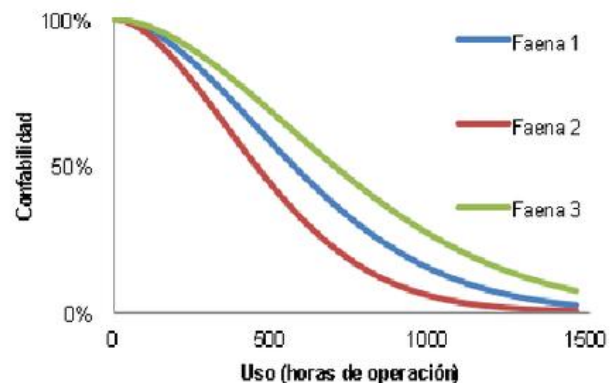


Figura 2: Confiabilidad según faena de operación.

Esto implica que la metodología de fijar un TBO para cada componente, sin considerar la faena en la que se utilizará, no es eficiente debido al costo de tener componentes que fallan antes de llegar a su mantención (en el caso de faenas donde las condiciones generan mayor desgaste), o bien, costos innecesarios de intervención al no aprovechar completamente su vida útil (en el caso de faenas donde las condiciones son favorables y la vida útil aumenta). El objetivo de este artículo es dar a conocer las diferencias que existen entre los tiempos de falla de los componentes en las distintas faenas, según las condiciones específicas bajo las que operan. De esta manera, se espera contar con un sustento válido para extrapolar esta situación a otras faenas de similares condiciones.

## METODOLOGÍA

El estudio se centró en el análisis de dos componentes específicos. Los datos utilizados fueron proporcionados por la Unidad de Confiabilidad de Komatsu Chile y corresponden a historiales de mantención y registros de **horómetros** operativos de algunas de las faenas más importantes del país, siendo éstas:

- Andina
- Collahuasi
- Escondida (MEL)
- Gaby
- Pelambres
- Radomiro Tomic (RT)

Las condiciones evaluadas fueron:

- Modelo de Camión
  - 930E-3
  - 930E-4
- Altura
  - Bajo 3.000 msnm
  - Entre 3.000 y 4.000 msnm
  - Sobre 4.000 msnm
- Camión sube cargado
  - Sí sube cargado
  - No sube cargado

El primer paso para el desarrollo de este estudio correspondió al análisis de la distribución de los datos correspondientes a cada componente, de manera de determinar un caso base sobre el cual trabajar.

A continuación se realizó un análisis de Weibull de dicho caso base, esto debido a que se ha demostrado que muchos procesos de falla se ajustan de muy buena manera a esta distribución [1]. Además de que sus parámetros  $\eta > 0$  y  $\beta > 0$  facilitan la construcción de la curva de confiabilidad, ellos representan la vida característica del elemento estudiado y el parámetro de forma de la distribución, respectivamente. Este análisis se realizó utilizando la herramienta Excel y consiste en graficar los datos, usando escala logarítmica en los ejes y, luego, ajustar los datos graficados a una regresión lineal a partir de la cual se obtienen los parámetros de la distribución Weibull. Para llevar esto a cabo se utilizaron las edades de recambio de componentes por motivos imprevistos y se mantuvieron censuradas las mantenciones preventivas y los componentes en operación [1].

Con los parámetros de Weibull, de la etapa anterior, se llevó a cabo el estudio de riesgo proporcional PHM o Proportional Hazard Model (Modelo Proporcional de Riesgo) [2,3]. El objetivo de este análisis estadístico es determinar, a partir del caso base, la magnitud del riesgo que le agrega cada faena, y sus respectivas condiciones, a la vida de los componentes. A partir de los tiempos entre fallas del caso base, se determinó una tasa de riesgo base  $\lambda_0(t)$  que depende del tiempo de uso del componente y de los parámetros de Weibull, tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$(1) \quad \lambda_0(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \left[ \frac{\text{fallas}}{\text{unidad de tiempo}} \right]$$

Luego, para determinar la tasa de riesgo de falla  $\lambda(t)$  de cada componente, en cada faena, se ponderó la tasa de riesgo base por una función que incorpora los efectos de cada uno de los factores que podrían, eventualmente, aumentar el riesgo de falla (modelo de camión y altura, entre otros). Se destaca que, en este caso, se consideró una parametrización exponencial, además que los factores de riesgo  $z_i$  no dependen del tiempo ( $z_i = 1$  si la faena presenta el factor de riesgo  $i$ ,  $z_i = 0$  si no lo hace). Luego, la tasa de riesgo de falla está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda(t, z) = \lambda_0(t) e^{\sum_{i=1}^n \beta_i z_i} \left[ \frac{\text{fallas}}{\text{unidad de tiempo}} \right] \quad (2)$$

Donde  $\lambda_0(t)$  es la tasa de riesgo base y las  $z_i$  son las covariables ( $n$  factores de riesgo). Se destaca, además, que al seleccionar el caso base, el parámetro  $\beta$  de éste se usa también para todos los otros casos, de modo que efectivamente todos tengan el mismo comportamiento de falla, es decir, en la ecuación anterior  $\beta_i = \beta \forall i$ . Esto es un supuesto básico para realizar el PHM.

De este modo, se determinó qué factores afectan en mayor magnitud al desgaste de los equipos y, al mismo tiempo, se cuantificó esta influencia. Es decir, se estableció el peso o relevancia relativa de un factor físico o ambiental con respecto al resto.

Como resultado del PHM se construyó la curva de confiabilidad que presenta al caso base y los demás casos como ponderación de éste último. La confiabilidad queda representada por:

$$R(t) = e^{-\alpha \int \lambda_0(t) dt} = e^{-\alpha \left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  corresponde al coeficiente de riesgo que le agrega cada uno de los factores al caso base ( $\alpha \geq 0$ , y para el caso base  $\alpha = 1$ );  $\alpha \geq 0$ , y para el caso base ( $\alpha \geq 0$ , y para el caso base  $\alpha = 1$ ) y  $\frac{t}{\eta}$  es la razón entre el tiempo de uso y la vida característica del componente.

En la sección “Principio Científico” se entrega una explicación más detallada de todo este procedimiento.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados Componente 1

#### Análisis de datos

De un universo de 247 observaciones, entre mantenciones imprevistas y programadas, se obtuvo la siguiente distribución de datos mostrada en las Figuras 3 y 4.

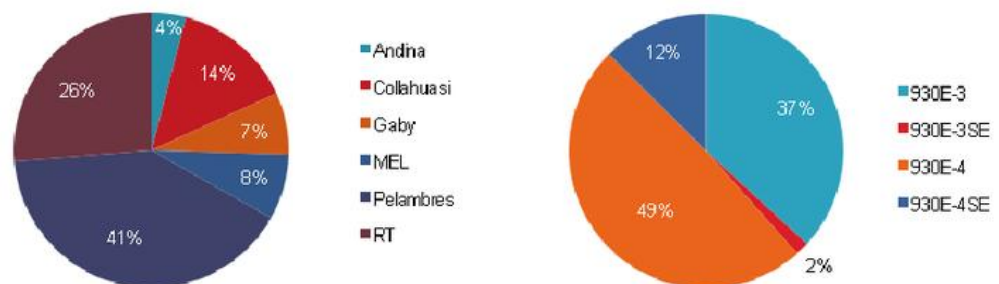


Figura 3: Componente 1, distribución de datos por faena. Figura 4: Componente 1, distribución de datos por modelo de camión.

Dado que la faena Pelambres y el modelo 930E-4 representan la mayor porción de datos, se utilizaron estas condiciones como caso base.

**Caso Base – Análisis de Weibull**

Los resultados obtenidos del análisis de Weibull del caso base son presentados en la Figura 5, donde se aprecian ambos comportamientos de falla del componente.

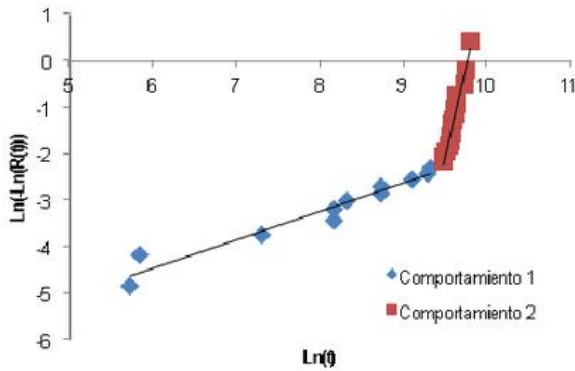


Figura 5: Componente 1, ajuste de Weibull.

Cuyos parámetros son:

$$\beta_1 = 0,60 \text{ y } \eta_1 = 608.194$$

$$\beta_2 = 7,64 \text{ y } \eta_2 = 17.216$$

El Modelo de Regresión de Cox determina el riesgo proporcional asociado a las condiciones incluidas en este estudio. El análisis se realizó utilizando el software R [4].

**Confiabilidad PHM**

Se utilizó un nivel de significancia del 5%. Las variables finales son todas representativas, de acuerdo al nivel de significancia del estudio. Además, tanto el Test de Razón de Verosimilitud, como el Test de Wald y el Test de Puntajes, indican que el análisis es representativo.

Finalmente, todas las condiciones generan un comportamiento distinto al del caso base. Los coeficientes de riesgo en relación al caso base de cada una de las condiciones, se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Componente 1, coeficientes de riesgo por condición.

Condiciones	Coficiente de Riesgo
Modelo 930E-3	0,50
Altura sobre 4000 msnm.	1,65
Sí sube cargado	0,65

Utilizando los coeficientes de riesgo obtenidos se generan las curvas de confiabilidad para cada una de las condiciones, tal como se presenta en la Figura 6.

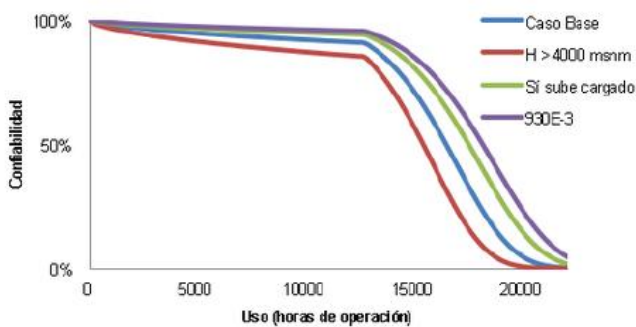


Figura 6: Componente 1, confiabilidad según condición.

A partir de estos resultados se pueden calcular los tiempos medios entre fallas (MTTF), según la siguiente expresión [1]:

$$MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4)$$

Donde  $\gamma \in \mathbb{R}$  corresponde a la vida asegurada (periodo de tiempo en el que la probabilidad de falla es muy baja o nula), cuyo valor se consideró igual a cero para todos los casos. El parámetro  $\beta$  es el mismo del caso base (correspondiente al segundo tramo, en este caso) y  $\eta$  se obtiene a partir de la curva de confiabilidad de cada condición de operación a través de la fórmula (3).

Los resultados aproximados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Componente 1, tiempos medios de falla por condición.

Condiciones	MTTF (horas de operación)
Caso Base	16.000
Modelo 930E-3	18.000
Altura sobre 4.000 msnm.	15.000
Sí sube cargado	17.000

### Resultados Componente 2 Análisis de datos

De un universo de 240 observaciones, entre mantenciones imprevistas y programadas, se obtuvo la distribución de datos que se ilustra en las Figuras 7 y 8 siguientes:

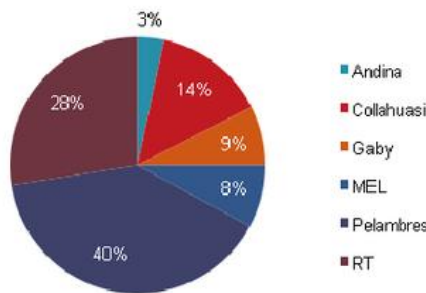


Figura 7: Componente 2, distribución de datos por faena.

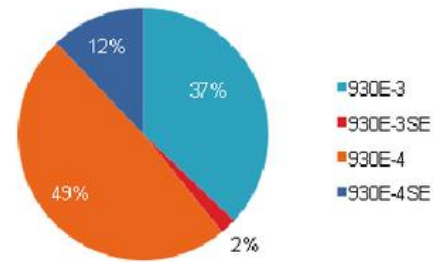


Figura 8: Componente 2, distribución de datos por modelo de camión.

Dado que la faena Pelambres y el modelo 930E-4 representan la mayor porción de datos, se utilizaron estas condiciones como caso base.

### Caso Base – Análisis de Weibull

Los resultados obtenidos del análisis de Weibull del caso base son presentados en la Figura 9.

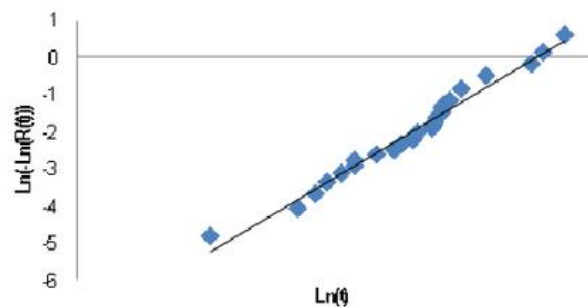


Figura 9: Componente 2, ajuste de Weibull.

Cuyos parámetros son:  $\beta = 1,65$  y  $\eta = 35.570$  hrs.

Dado que el análisis de Weibull no presenta anomalías, por medio del software R se llevó a cabo el Modelo de Regresión de Cox para determinar el riesgo proporcional asociado a las condiciones incluidas en este estudio [4].

### Confiabilidad PHM

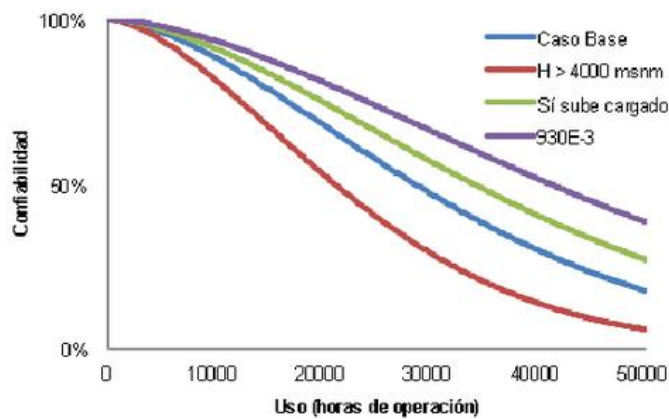
Se utilizó un nivel de significancia del 5%. Las variables finales son todas representativas, de acuerdo al nivel de significancia del estudio. Además, tanto el Test de Razón de Verosimilitud, como el Test de Wald y el Test de Puntajes, indican que el análisis es representativo.

Finalmente, todas las condiciones generan un comportamiento distinto al del caso base. Los coeficientes de riesgo, en relación al caso base de cada una de las condiciones, se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Componente 2, coeficientes de riesgo por condición.

Condiciones	Coficiente de Riesgo
Modelo 930E-3	0,55
Altura sobre 4.000 msnm	1,65
Sí sube cargado	0,75

Utilizando los coeficientes de riesgo obtenidos se generan las curvas de confiabilidad para cada una de las condiciones, tal como se presenta en la Figura 10.



**Figura 10:** Componente 2, confiabilidad según condición.

Al igual que en la sección anterior, a partir de estos resultados se pueden calcular los tiempos medios entre fallas (MTTF), según la siguiente expresión [1]:

$$(4) \quad MTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Donde  $\gamma$  corresponde a la vida asegurada (periodo de tiempo en el que la probabilidad de falla es muy baja o nula), cuyo valor se consideró igual a cero para todos los casos. El parámetro  $\beta$  es el mismo del caso base y  $\eta$  se obtiene a partir de la curva de confiabilidad de cada condición de operación a través de la fórmula (3).

Los resultados aproximados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4:** Componente 2, tiempos medios de falla por condición.

Condiciones	MTTF (horas de operación)
Caso Base	32.000
Modelo 930E-3	52.000
Altura sobre 4.000 msnm	26.000
Sí sube cargado	42.000

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se concluye que ciertas condiciones de las faenas efectivamente influyen en el comportamiento de falla de los componentes estudiados. Específicamente, la altura sobre 4.000 msnm acelera el decrecimiento de la confiabilidad, a medida que aumenta el tiempo de servicio de estos componentes. Además que la utilización del modelo 930E-3 y el hecho que los camiones suban cargados tienen el efecto contrario sobre la vida de estos componentes, disminuyendo su riesgo de falla.

El conocer cuantitativamente estos efectos puede traer diversos beneficios. En primer lugar, se pueden ajustar los TBO óptimos de cada componente dependiendo de las condiciones de la faena en donde se utilicen, generando beneficios económicos y logísticos, entre otros. Y en segundo lugar, dado que los coeficientes de riesgo están asociados a condiciones físicas y operacionales, y no a una faena específica, estos pueden extrapolarse a distintas faenas según las condiciones de las mismas.

A modo de ejemplo, se muestra a continuación las diferencias que se generan al aplicar estos resultados sobre el Componente 2, considerando que la faena en la que operarán los equipos esté sobre los 4.000 msnm.

En la Figura 11 se ilustran las curvas de costos globales, con y sin considerar los efectos de la altura sobre la vida del componente.

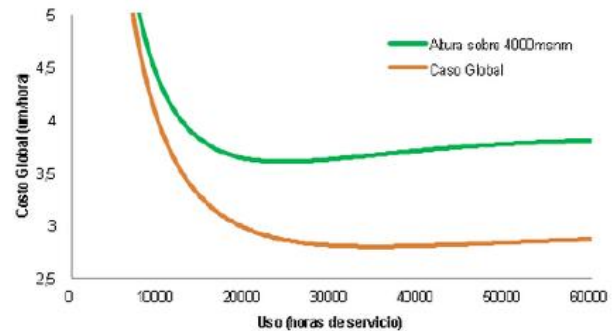


Figura 11: Costos globales, con y sin considerar los efectos de la altura [1].

Si para definir el TBO del componente se utiliza como criterio la minimización de los costos globales, el tiempo entre intervenciones que se debería fijar, considerando el efecto de la altura, se diferencia bastante del que se utilizaría tradicionalmente, siendo esta diferencia de, aproximadamente, un 30%.

Por otro lado, esta brecha entre los TBO se ve reflejada, por supuesto, en los costos globales de mantenimiento. Específicamente, el considerar el efecto de la altura podría traducirse en un ahorro de hasta un 5%, para este caso.

Esto implica que considerar las condiciones físicas y operativas de una mina dentro de los planes de mantenimiento de los equipos podría permitir que los tiempos entre intervenciones se determinen de manera más precisa. Es por esto que se recomienda analizar las condiciones más críticas de cada faena para establecer la magnitud del riesgo que cada una de ellas le agrega a los equipos y considerar estos riesgos en los planes de mantenimiento, para optimizar la vida útil de los componentes, dependiendo del lugar en que se encuentren.

### PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

El ajuste de datos, mediante una distribución teórica conocida, permite analizar y explicar el comportamiento de una variable aleatoria por medio de parámetros y/o propiedades propias de dicha distribución, de modo que se puedan inferir conclusiones sobre su comportamiento.

En el caso del comportamiento de falla de sistemas mecánicos, se ha demostrado que la distribución de Weibull se ajusta de manera efectiva a las observaciones y, es por esto, que es normalmente utilizada en estudios de confiabilidad en que se quiere analizar y prevenir las fallas de distintos dispositivos.

La distribución de Weibull se representa por la función de distribución:

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad \forall t \geq 0 \quad (1)$$

Esta ecuación representa la probabilidad de falla antes del tiempo  $t$ , donde  $\beta$  representa el parámetro de forma de la distribución y  $\eta$  se define como la vida característica del elemento estudiado.

El ajuste de observaciones a la distribución de Weibull se lleva a cabo por medio de una linealización gráfica de los datos y tiene por objetivo determinar los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ . Esto se hace usando en el eje de abscisas los tiempos entre falla  $x = \ln(t)$ , y, en las ordenadas, la confiabilidad  $y = \ln(-\ln(R(t)))$ . Donde  $R(t) = 1 - F(t)$ , y  $F(t)$  es inicialmente estimado usando rangos medios.

Como resultado del ajuste, se obtiene la ecuación de la recta formada por los puntos  $[x,y]$ , y es por medio de ésta que se obtienen los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  de la distribución. Si la ecuación se representa como  $y = ax - b$ , entonces  $\beta = ay$  y  $\eta = \exp(-b/a)$ .



## GLOSARIO

**Confiabilidad:** Probabilidad de que un componente seguirá realizando la función prevista tras cierto tiempo de uso.

**Horómetro:** Dispositivo que mide las horas en funcionamiento de los equipos y sus componentes, desde su última mantención.

**MTTF:** Mean Time To Failure, es el tiempo promedio en el que la probabilidad de que el componente falle es alta.

**Overhaul:** Intervención en la que se realiza mantenimiento o recambio de componentes.

**TBO:** Time Between Overhauls, corresponde al tiempo entre intervenciones.

## AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a Guillermo del Castillo y Alejandro Martínez, de la Unidad de Confiabilidad de Komatsu Chile, cuyo apoyo y constante preocupación por el proyecto ayudó de manera importante a la realización del estudio. También se agradece a Rodrigo Mendoza, quien brindó apoyo y consejo durante todo el proceso.

## REFERENCIAS

1. PASCUAL, R. Apuntes: El Arte de Mantener (draft), Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012.
2. KUMAR, D. Proportional Hazard Model: a useful tool for the analysis of a mining system, Cap. 69, 1992.
3. KUMAR, D. Proportional Hazards Modelling of Repairable Systems, *Quality and Reliability International*, 11, pp. 361-369, 1995.
4. SIMPOSIO DE ESTADÍSTICA (15°, 2005, Bogotá, Colombia). Análisis de Supervivencia Básico Utilizando el Lenguaje R. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, 2005.

## EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Magdalena Muñoz
- 2 Felipe Sánchez
- 3 Profesor Rodrigo Pascual

