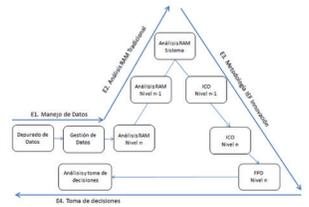


# Propuesta metodológica para la evaluación del impacto esperado de fallos en equipos complejos. Caso aplicado a una planta de trituración de mineral de cobre



## Methodological proposal for the evaluation of reliability impacts in complex systems. Applied case to a crushing copper plant

Fredy Kristjanpoller<sup>1,2</sup>, Adolfo Crespo<sup>1</sup>, Mónica López-Campos<sup>2</sup>, Pablo Viveros<sup>1,2</sup>  
<sup>1</sup> Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingeniería. Dpto de Organización y Gestión de Empresas I. Avda. Camino de los Descubrimientos, s/n - 41092 Sevilla (España). Tfno: +34 954 487215.  
<sup>2</sup> Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Industrias. Valparaíso (Chile). Tfno: +56 322654905.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8088> | Recibido: 20/06/2016 • Aceptado: 05/09/2016

### ABSTRACT

Analysis of the reliability and maintainability of a production process is relevant to the determination of availability and the capacity of the plant. In order to quantify the importance of each equipment in the systemic availability and improve decision-making related to asset management, it is proposed a new analysis tool: the methodology of the Expected Impact of Fault (IEF). It has as main novelty quantifying indicators of the real influence of each element in the total reliability/availability of the productive system. This is applicable in any logical functional configuration. In this way the importance of the equipment is set and is quantified more accurately the impact of his possible unavailability. The methodology starts with the management of the process data to analyze, and then proceeds to develop an analysis based on the classical technique of block diagram of reliability (RBD), which structure the teams according to their functional configuration by levels, in ascending order, to determine the availability of each item and of the system in general. Subsequently, IEF methodology makes descendant analysis, from the availability of the system to the impact of each element in particular in the expected availability of the system. This impact is expressed through indicators of Propagation of the Time of Failure (FPD) and the index of Expected Impact of Operational Criticality (ICO) of an element on the whole of the system. The use of these indicators has shown important results to evaluate the design and performance of a plant. In this case the methodology is applied to the actual data of a plant's crushing of a mining process.

**Keywords:** reliability, availability, operational efficiency, criticality, physical assets.

metodología inicia con la gestión de los datos del proceso a analizar, posteriormente se procede a desarrollar un análisis basado en la técnica clásica de diagrama de bloques de fiabilidad (RBD), la cual estructura los equipos de acuerdo a su configuración funcional por niveles, para llegar a determinar la disponibilidad de cada elemento y del sistema en general. Posteriormente, la metodología IEF hace el análisis descendiente, a partir de la disponibilidad del sistema hasta el impacto de cada elemento en particular en la disponibilidad esperada del sistema. Este impacto se expresa a través de los indicadores de Propagación del Tiempo de Detención (FPD) y del índice de Impacto Esperado de Criticidad Operacional (ICO) de un elemento sobre el conjunto del sistema. El uso de estos indicadores ha demostrado resultados importantes para evaluar el diseño y el rendimiento de una planta. En este caso la metodología es aplicada a los datos reales de una planta de triturado de un proceso minero.

**Palabras clave:** fiabilidad, disponibilidad, eficiencia operacional, criticidad, activos físicos.

### 1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas de fiabilidad con el fin de apoyar la toma de decisiones, es una tarea fundamental para la gestión eficiente y precisa de los activos y recursos en cualquier organización industrial. Es conocido que la capacidad productiva real de una planta, depende fuertemente de la disponibilidad sistémica, la cual a su vez está determinada por la configuración lógica en la que se encuentran los equipos. Equipos dispuestos en serie o con alguna clase de redundancia tendrán de por sí, distinto impacto en la disponibilidad del sistema, independientemente de su propia fiabilidad y disponibilidad individual. Es decir, el tiempo de indisponibilidad del sistema no tiene porqué corresponder con el tiempo de indisponibilidad de los equipos en fallo, pues cada equipo tiene un distinto "factor de propagación" de su tiempo de detención en el tiempo de detención del sistema. Sin embargo, a pesar de la utilidad y relevancia de conocer esta información, durante la ejecución de la mayoría de los planes de gestión de activos, el análisis del mencionado "factor de propagación" y del impacto de cada equipo en la disponibilidad sistémica no es común. Esta carencia no es menor, ya que el conocer el impacto real de cada activo en la configuración del sistema total proporciona ventajas en la planificación de la producción y mantenimiento.

En general, se reconoce que la teoría de la fiabilidad, junto con el análisis de ciclo de vida de los activos, es un apoyo importante

### RESUMEN

El análisis de la fiabilidad operacional y de la mantenibilidad de un proceso productivo es relevante para la determinación de la disponibilidad y de la capacidad de la planta. Con el fin de cuantificar la importancia de cada equipo en la disponibilidad sistémica y mejorar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos, se propone una nueva herramienta de análisis: la metodología del Impacto Esperado de Fallos (IEF). Esta tiene como principal novedad el cuantificar mediante indicadores la influencia real de cada elemento en la fiabilidad/disponibilidad total del sistema productivo, siendo aplicable en cualquier configuración lógico funcional. De esta forma se establece la importancia de los equipos y se cuantifica con mayor precisión el impacto de su posible indisponibilidad. La

para el análisis y mejora en plantas industriales [1]. La evaluación de la fiabilidad y disponibilidad, involucrando parámetros técnicos y de costos, es crucial en la evaluación del desempeño de un proceso industrial, específicamente en procesos productivos intensivos en capital [2]. Por otro lado, es conocido que el análisis de los KPI (*Key Performance Indicators*), es una forma efectiva para medir cuantitativamente los resultados y el desempeño de un proceso [3]. De aquí, se infiere que el contar con KPI que arrojen información relacionada con la cuantificación de la disponibilidad y del peso relativo de cada equipo en el sistema, por lo que es indispensable estudiar la criticidad de los activos para poder priorizar y focalizar las actividades de control del riesgo operacional [4].

A pesar de las ventajas de conocer el impacto esperado de fallo de cada elemento en la disponibilidad del sistema, se ha encontrado un vacío en este sentido. En la práctica industrial, frecuentemente se recurre a enfoques semi-cuantitativos como matrices de criticidad basadas en factores ponderados y flujogramas de análisis de riesgo, o bien se utilizan herramientas más bien genéricas desde el punto de vista de la toma de decisiones, como es el caso del *Proceso de Análisis Jerárquico* (AHP), las cuales necesariamente deben ser contextualizadas y adaptadas a cada caso, por consecuencia no necesariamente proporcionan resultados homogéneos y comparables entre procesos o instalaciones físicas. En la literatura científica exclusiva para la gestión de activos, solo se ha encontrado el *Índice de Birnbaum* [5] que permite la evaluación del impacto de equipos bajo una visión de riesgo epistémico, permitiendo un análisis directo, pero focalizado en procesos específicos. Este método compara los elementos entre sí, en función de la incertidumbre de fiabilidad que poseen y de la propagación de esta incertidumbre, con el objetivo de ordenarlos por nivel. Sin embargo dicho índice depende altamente de la calidad de los datos históricos, no considera directamente el efecto de la configuración lógica del sistema y es difícil de aplicar en sistemas compuestos por una cantidad considerable de elementos. Por otra parte Wang et al.[6] se basan en el índice Birnbaum y proponen una técnica de evaluación complementaria desde un enfoque probabilístico dependiente de una simulación.

El objetivo de este artículo es proponer una nueva metodología genérica, es decir aplicable sobre cualquier configuración lógico-funcional, cuantitativa e integral para el análisis de la disponibi-

lidad, y del impacto esperado de fallos (IEF) [7]. Esta propuesta diseña un nuevo algoritmo para calcular dos índices de impacto, el Índice de Criticidad Operacional esperado (ICO) y el Factor de Propagación del tiempo de Detención esperado (FPD), basados en la fiabilidad y capacidad de mantenimiento de los elementos; y el impacto esperado de cada uno de acuerdo a diferentes escenarios y configuraciones. Estos índices de impacto, basados en un enfoque probabilístico, definirán las condiciones previstas en el sistema, desde el punto de vista de la evaluación de sus posibles estados (comportamiento intrínseco), y en relación con la configuración lógica y funcional en el sistema. Permitiendo la comparación global de los elementos, su priorización y evaluación parcial de su efectividad.

## 2. DECLARACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis de la bibliografía y la experiencia práctica han puesto a la luz la inexistencia de una metodología de utilización sencilla y aplicable a cualquier configuración lógica funcional, que cuantifique el impacto de un fallo en la disponibilidad general de un sistema complejo. En la mayoría de las empresas industriales, no existe un criterio formal para identificar el impacto de cada activo y de su comportamiento de fallo considerando su fiabilidad y la de su subsistema, por lo que las decisiones de reemplazo de los equipos se realizan ad hoc y no de acuerdo a los procesos de negocio. Lo que hace necesario definir una propuesta metodológica que incluya el uso de indicadores clave de rendimiento (KPI) orientados al análisis del impacto de cada elemento en la disponibilidad sistémica, haciendo posible una jerarquización útil para la toma de decisiones estratégicas y operativas.

La propuesta desarrollada, consiste en una metodología para la cuantificación del impacto esperado del fallo de cada elemento sobre la disponibilidad de un sistema complejo, a la cual se le ha denominado Metodología de Impacto Esperado de Fallos (IEF). La estructura de esta metodología, la hace aplicable en sistemas complejos con una gran cantidad de elementos, tomando especialmente en cuenta la configuración lógico-funcional de cada uno como parte del cálculo de los índices de impacto. La metodología IEF parte con la gestión de los datos provenientes del proceso industrial y posteriormente determina dos indicadores clave

Notación	
IEF:	Metodología de Impacto Esperado de Fallos
RBD:	Reliability Blocks Diagram – Diagrama de Bloques de Fiabilidad
FPD:	Factor de Propagación del Tiempo de Detención
ICO:	Impacto Esperado de Criticidad Operacional
KPI:	Key Process Indicator – Indicador Clave del Proceso
MTTF:	Mean time to failure – Tiempo medio para fallar
MTTR:	Mean time to repair – Tiempo medio para reparar
MTBM:	Mean time between maintenance – Tiempo medio entre mantenciones
A:	Disponibilidad
RAM:	Reliability, availability, maintainability methodology – Metodología de evaluación de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad
$\alpha$	Parámetro de escala de Distribución Weibull
$\beta$	Parámetro de forma de Distribución Weibull
CMMS	Computerized Maintenance Management System – Sistema informático de gestión de mantenimiento

Tabla 1: Notación

de proceso (KPI) relevantes en el análisis de la disponibilidad. El primero es el índice ICO y el segundo es el factor FPD. El cálculo y seguimiento de estos indicadores y de la metodología propuesta, pretende desenvolverse en estrecha relación con el control de la gestión a través la definición de estrategias y toma de decisiones [8, 9].

La metodología propuesta IEF, tiene como reto principal, dotar de información relevante para la mejora en la gestión de activos. Uno de los puntos más importantes es conocer el efecto operacional, medido sobre la pérdida de la capacidad de producción, de cada elemento sobre el sistema que lo contiene. El impacto de un elemento debe ser definido como dinámico, ya que depende tanto del rendimiento individual del elemento en cuanto a su fiabilidad y capacidad de mantenimiento, como del estado de funcionamiento de todos los elementos presentes en el mismo subsistema, y de su configuración funcional. En la metodología IEF, este análisis se logra mediante los KPI propuestos: el factor FPD que cuantifica la propagación del impacto que tiene el desempeño de un componente, especialmente una detención no programada, sobre el desempeño total del sistema (pudiendo este factor ser cercano a cero por ejemplo, si debido a una redundancia total, la propagación del fallo sobre el desempeño del sistema es despreciable en términos de disponibilidad) y el ICO que, para un desempeño sistémico conocido, cuantifica la proporción de cada elemento componente del sistema sobre el desempeño sistémico (a partir de la disponibilidad de cada elemento y de su factor FPD en relación a los demás elementos que afectan al sistema).

Después de llevar a cabo un análisis IEF completo, se debería ser capaz de contestar las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los cuellos de botella del sistema? ¿Cuáles son los principales factores que explican la pérdida de la producción del sistema? ¿Cuál es el nivel de disponibilidad del sistema? ¿Dónde están las principales oportunidades de mejora?

### 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

Esta metodología se estructura en cuatro etapas que se resumen en la Figura 1. La primera etapa gestiona y prepara los datos e información del proceso sujetos a análisis. La segunda etapa se encarga del cálculo de la fiabilidad y disponibilidad de cada elemento individual hasta obtener datos sistémicos de disponibilidad.

La tercera etapa toma los datos de disponibilidad del sistema y con ellos encuentra la influencia real de cada elemento en el sistema, es decir su ICO y su FPD. La cuarta y última etapa corresponde al análisis de los indicadores para la toma de decisiones.

#### 3.1. ETAPA 1: DEPURADO Y GESTIÓN DE DATOS

Sin un suministro de información adecuado, el análisis de datos es tiempo perdido. Por tanto el primer paso de esta metodología implica la depuración y filtrado de los datos industriales con el fin de mejorar sus atributos, detectando la ausencia de valores y datos erróneos, discriminando datos correspondientes a distintos elementos y condiciones operacionales y evaluando en general la calidad de los registros [10].

En vista de lo anterior, es necesario diseñar un procedimiento para recabar los datos útiles del proceso, con el fin de tener datos fiables y representativos de cada elemento a analizar. Posteriormente el uso de técnicas estadísticas como el análisis de dominancia y percentiles significativos puede ser útil para filtrar los datos y lograr una base de datos depurada [11].

#### 3.2. ETAPA 2: ANÁLISIS ASCENDENTE. ANÁLISIS CLÁSICO RAM DESDE EL ELEMENTO MÁS PEQUEÑO HACIA EL SISTEMA

Para llevar a cabo esta etapa, se desarrolla un análisis clásico de Diagrama de Bloques de Fiabilidad (RBD) [12,13] en el que se realiza un análisis de fiabilidad y disponibilidad del proceso por niveles. Comenzando con el cálculo de la fiabilidad y disponibilidad de cada elemento y dada su configuración lógico-funcional se asciende para el cálculo de la disponibilidad sistémica. Este proceso puede ser entendido como ir de "abajo - arriba" ya que parte del cálculo de los indicadores RAM del elemento de nivel más bajo y posteriormente estos indicadores se utilizan para construir los índices de todo el sistema complejo, bajo el uso de las relaciones lógicas de RBD [14, 15].

La disponibilidad corresponde a una proporción de tiempo que podría ser expresada como la probabilidad de que el equipo está disponible, cuando se requiere. De esta manera, y suponiendo que el equipo requerido siempre debe ser utilizado y que las órdenes de producción se inician inmediatamente después de un fallo, es posible definir la disponibilidad prevista de un elemento específico, como por ejemplo [14]:

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (1)$$

Para la generación del análisis sistémico RBD, y para la obtención de la disponibilidad del sistema, se utilizan los modelos desarrollados por Dhillon [14] para las configuraciones de serie, redundancia total, *stand by*, redundancia parcial y fraccionamiento.

#### 3.3. ETAPA 3: ANÁLISIS DESDE EL SISTEMA HASTA EL ELEMENTO. DETERMINACIÓN DEL DESEMPEÑO SISTÉMICO Y DEL IMPACTO DE LOS ELEMENTOS

Esta fase corresponde a un análisis de "arriba - abajo", proceso para el cálculo de los indicadores de impacto, a partir de la disponibilidad del sistema

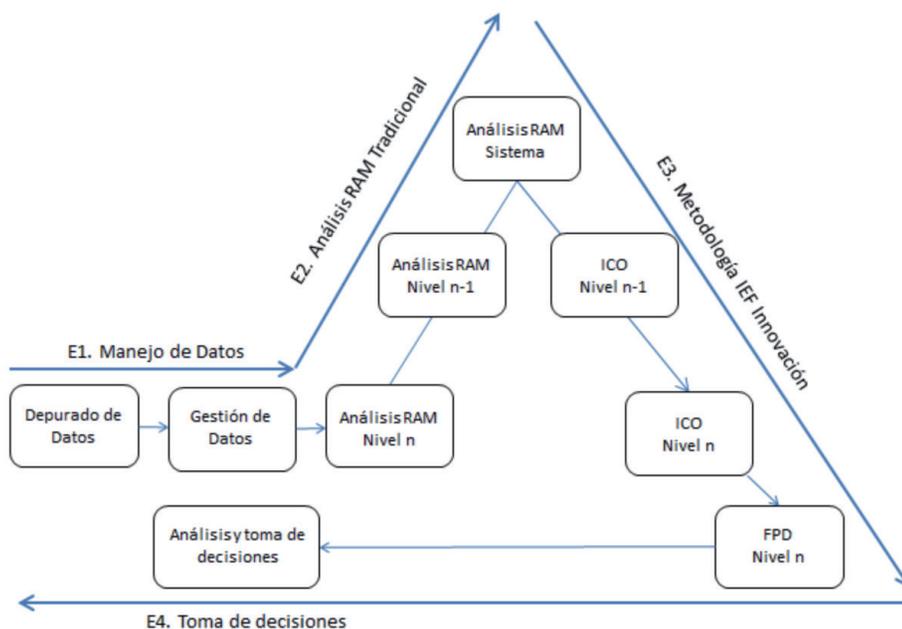


Fig. 1: Etapas de la Metodología IEF

hasta el elemento de nivel inferior. Así, es posible calcular el ICO (impacto esperado de criticidad operacional) que permite conocer la contribución del fallo de cada elemento a la pérdida de producción del sistema debido a su indisponibilidad, siendo la sumatoria de los ICO de todos los elementos el 100%.

Dado un sistema complejo compuesto por  $l$  niveles, desde  $i=0$  hasta  $i=r$ , donde el  $i=0$  corresponde al nivel del sistema en general,  $i=1$  al nivel de los elementos "padres" en que inicialmente se divide el sistema (subsistemas),  $i=2$  al nivel de los elementos "hijos" o sub-elementos del nivel anterior y así hasta el nivel  $r$ . Sea  $J$  el conjunto de elementos mantenibles del sistema; habrá desde  $j=1$  hasta  $j=n$  elementos en cada nivel  $i$  del sistema. El factor ICO de cada elemento en el sistema se determina a través de la descomposición del índice global y de cada uno de los subsistemas. El desglose del ICO de cada nivel se expresa con las ecuaciones 2, 3 y 4:

$$\text{Impacto de Criticidad Operacional (ICO)}_{\text{sistema } i=0} = 1 \quad (2)$$

$$A \text{ ICO}_{i,j} = \text{ICO}_{i-1} \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad \forall j: 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\frac{\text{ICO}_{i,j}}{\text{ICO}_{i,j+1}} = \frac{(1 - A_{i,j})}{(1 - A_{i,j+1})} \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad \forall j: 1, \dots, n \quad (4)$$

Dónde:

$\text{ICO}_{i,j}$ : Es ICO para el elemento  $j$  (de 1 a  $n$ ) que se encuentra en el nivel de descomposición  $i$  (de 1 a  $r$ ).

$A_{i,j}$ : Es la disponibilidad esperada para el elemento  $j$  (de 1 a  $n$ ) que se encuentra en el nivel de descomposición  $i$  (de 1 a  $r$ ).

En términos simples, el ICO muestra el resultado final de la contribución de cada elemento sobre el sistema, exponiendo el posible impacto de un fallo en la pérdida de capacidad de producción. Al considerar el nivel de detalle más bajo, esto es el sistema en su totalidad o nivel  $i=0$ , la suma de todos los ICO es 100% del sistema (ecuación 5).

$$A \text{ ICO}_{i,j} = 1 \quad \forall i: 0, \dots, r; \quad (5)$$

Por último, una vez conocido el  $\text{ICO}_{i,j}$  de cada elemento, su nivel de impacto se puede descomponer en dos aspectos principales: la frecuencia (por la falta de disponibilidad del elemento) y la consecuencia (a través del impacto del elemento según su configuración lógico funcional). Este último índice se llamará Factor de Propagación esperado de Detención  $\text{FPD}_{i,j}$ , el cual representa el efecto que causa una parada del elemento  $j$  en el sistema (ecuación 6). El efecto de detener un elemento  $j$  puede tener diferentes resultados, dependiendo del estado de los demás elementos que se encuentran en el mismo nivel  $i$ .

$$\text{FPD}_{i,j} = \frac{\text{ICO}_{i,j} * (1 - A_{\text{system}})}{(1 - A_{i,j})} \quad (6)$$

Considerando una estructura sistema-subsistema-equipo, el algoritmo de cálculos para esta etapa sería el siguiente:

1. Calcular la suma de la indisponibilidad total de todos los subsistemas de cada nivel  $i: j=1n1-Asub \quad \forall i:1,\dots,r-1$
2. El ICO del sistema será  $\text{ICO}_{\text{sis}} = 100\% (i=0)$
3. El ICO del subsistema  $\text{ICO}_{\text{sub}}$  será la proporción de impacto del subsistema con respecto al total de indisponibilidades, multiplicado por el  $\text{ICO}_{\text{sis}}$  lo que quedaría:  $1-Asub/ j=1n1-Asub \quad \forall i:1,\dots,r-1$
4. Calcular la suma de la indisponibilidad de los equipos pertenecientes a un subsistema:  $j=1n(1-Aequ) \quad \forall r$ . En caso de fraccionamiento, dicha indisponibilidad deberá multiplicarse por la capacidad de cada elemento.
5. El ICO del equipo  $\text{ICO}_{\text{equ}}$  será la proporción de impacto del equipo con respecto al total de indisponibilidades para el subsistema en análisis, multiplicado por el  $\text{ICO}_{\text{sub}}$  lo que quedaría:  $1-Aequ/ j=1n1-Aequ*ICOsub \quad \forall r$ . En caso de fraccionamiento, es necesario multiplicar la indisponibilidad del equipo por la capacidad,
6. El FPD del equipo  $\text{FPD}_{\text{equ}}$  se calcula con la ecuación 6.

### 3.4. ETAPA 4: ANÁLISIS DE INDICADORES Y RESULTADOS

Esta fase recoge los resultados numéricos obtenidos en las etapas anteriores y los analiza para la toma de decisiones estratégicas. Los primeros análisis pueden ir enfocados en la cuantificación de la indisponibilidad del sistema. Dicha indisponibilidad será el elemento de análisis para determinar el aporte de cada equipo y subsistema, en términos de consecuencia de posibles fallos. Posteriormente, el análisis de los subsistemas y equipos con mayor ICO indican cuáles son los elementos más críticos y sobre los que debería enfocarse la gestión de activos con mayor énfasis. En esta etapa se propone la elaboración de un Gráfico de Dispersión IEF, el cual relaciona en su eje X la indisponibilidad de los equipos y en el eje Y su FPD. De acuerdo a la localización de los equipos dentro del gráfico es posible hacer una clasificación de los equipos para enfocar diversas acciones de mejora.

## 4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IEF: PROCESO DE TRITURACIÓN DE MINERAL DE COBRE

### 4.1. ANTECEDENTES DEL CONTEXTO INDUSTRIAL

Una planta de trituración es una instalación compleja, que consta de una variedad de elementos. La elección del tipo y el diseño de una planta de trituración se determina principalmente por su importancia en el proceso de producción del cobre.

El proceso de obtención del cobre, comienza con la extracción del material desde la mina, el que se transporta a través de camiones al proceso de trituración primario, posteriormente a través de correas transportadoras es derivado al triturador secundario, para culminar el proceso de conminución en el triturador terciario. Una vez finalizado el proceso de trituración, el material es tratado con el curado ácido en correas transportadoras, para culminar el proceso en las pilas de lixiviación. El presente estudio, se focalizará en el proceso de trituración, en particular para la fase más crítica del proceso que es el de trituración secundaria.

- Trituración Primaria: este proceso tiene como objetivo el reducir el tamaño del material a un diámetro inferior a 8 pulgadas, de manera homogénea. En la fase previa al triturador primario, se encuentra un equipo Picador de Rocas, que facilita la entrada de las rocas de mayor tamaño. Este

proceso tiene una capacidad de 15.000 ton/h. El material triturado es trasladado por una Correa Transportadora de 1 km hacia el proceso de trituración secundaria.

- **Trituración Secundaria:** este proceso es alimentado por la producción del triturador primario y se compone por cuatros líneas independientes, cuyo objetivo es obtener un 100% de la granulometría bajo 1 pulgada, la cual es seleccionado por un harnero; todo el material que no cumple es procesado en el triturador secundario, con un proceso de retroalimentación repetitivo, hasta lograr el cumplimiento del objetivo.

Cada una de las líneas de trituración secundaria se compone por cuatro equipos: Alimentador, Correa, Harnero y Triturador. La capacidad de cada una de las líneas es descrita en la Tabla 2.

Trituración Secundaria	Capacidad [ton/h].
Línea 1	5.250
Línea 2	6.000
Línea 3	4.500
Línea 4	4.500

Tabla 2: Capacidad Líneas de Trituración Secundaria

Al observar las capacidades de las líneas y la forma independiente de operación entre ellas, se puede establecer que la configuración de este proceso es la de un fraccionamiento con capacidad ociosa [15], permitiendo operar en condiciones excepcionales, a menos carga de la requerida ya que la capacidad nominal del proceso de trituración secundaria corresponde a 20.250 [ton/h]. Tales sistemas pueden representar configuraciones de carga compartida con exceso de capacidad y niveles de trabajo flexibles, permitiendo asimismo que los equipos presenten diferente comportamiento de fallos.

#### 4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA IEF

Para el desarrollo de este artículo, se han utilizado los datos reales de mantenimiento de los equipos principales de una línea de trituración secundaria, de una planta de trituración minera situada en Chile.

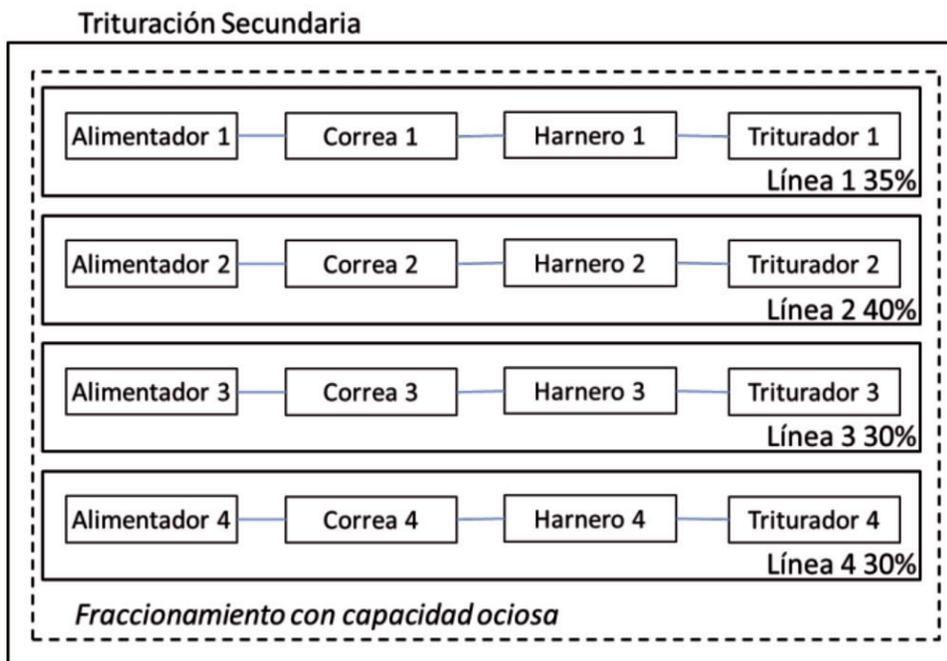


Fig. 2: Diagrama del proceso de Trituración Secundaria

#### 4.2.1. Etapa 1. Depurado y gestión de datos

Los datos del proceso a analizar han sido recopilados utilizando una metodología estructurada propuesta por Ballou et al [16]. Posteriormente, los datos han sido limpiados para trabajar solamente con información de calidad asegurada, eliminando datos no significativos e incompletos, con el soporte de los expertos de la empresa. Analizando la data histórica de intervenciones de mantenimiento de los equipos del proceso de trituración, se pudo verificar en la mayoría el concepto de independencia y análisis de tendencia (descartar envejecimiento). Se determinó bajo la hipótesis nula de homogeneidad de Poisson, utilizando el estadístico  $\chi^2$  (chi cuadrado) distribuido con 2 (n-1) grados de libertad, donde la hipótesis no es rechazada con un 5% de nivel de significancia. Esto se cumple para todos los equipos, indicando los parámetros de la distribución de Weibull respectivos en la Tabla 3.

#### 4.2.2. Etapa 2. Análisis clásico RAM ascendente

El proceso de trituración secundaria se ha descompuesto en cuatro subsistemas, de acuerdo con la lógica del proceso global (configuración de fraccionamiento con capacidad ociosa). Debido a que la suma de las capacidades de las líneas excede un 35% de la capacidad requerida, la cual queda definida por la trituración primaria, 15.000 toneladas por hora. La Figura 2, muestra la configuración lógica del proceso de trituración secundaria. Donde el porcentaje indicado representa la capacidad de cada línea o subsistema, sobre la capacidad requerida.

La Tabla 3, muestra los datos iniciales de fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad para cada uno de los 16 equipos del proceso. La base para la determinación de los modelos de fiabilidad, es a través de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  de la distribución de Weibull. Estos parámetros fueron obtenidos desde los sistemas de información de mantenimiento de la empresa en estudio. Aplicando los modelos de RBD [14, 15] para el cálculo de la disponibilidad de las líneas (A líneas) y el de fraccionamiento con capacidad ociosa [17] para la disponibilidad del sistema (A sist), se obtiene:

Del análisis RAM ascendente se observa que la disponibilidad esperada de todo el sistema de trituración secundaria corresponde a casi un 96%; destacando la línea 3 por ser el subsistema de menor disponibilidad (83,13%) y dentro de la misma línea 3, el triturador se aprecia como el equipo más indisponible.

#### 4.2.3. Etapa 3. Análisis descendente y cálculo de indicadores FPD e ICO

Se calcula el impacto de cada equipo, entendido como el porcentaje de pérdida de disponibilidad, producción o capacidad operativa, en el nivel superior  $i=0$ , siendo este equipo un componente de un subsistema o un subsistema  $i \neq 0$ . Este impacto es descrito por los indicadores FPD e ICO. Por la lógica descrita, el ICO y el FPD del sistema (nivel superior máximo o  $i=0$ ) será siempre 100%. El ICO es la contribución de cada elemento  $j$  en la disponibilidad del sistema, a causa de una falta de eficacia reflejada en una posible pérdida de producción; el Factor de Propagación de Detención (FPD) es el efecto esperado de una deten-

	Configuración	$\alpha$	$\beta$	MTR	A eq	A líneas	A sist
<b>Trituración Secundaria</b>	Fraccionamiento con ociosa						<b>95,93%</b>
Línea 1 CH2	35%					<b>85,52%</b>	
Alimentador 1 CH2	Serie	414,75	1,97	11,92	96,86%		
Correa 1 CH2	Serie	188,22	1,86	4,13	97,59%		
Harnero 1 CH2	Serie	1.727,09	1,56	6,93	99,56%		
Triturador 1 CH2	Serie	210,85	1,57	19,00	90,88%		
Línea 2 CH2	40%					<b>85,55%</b>	
Alimentador 2 CH2	Serie	343,97	1,91	14,42	95,49%		
Correa 2 CH2	Serie	230,49	1,57	7,68	96,42%		
Harnero 2 CH2	Serie	1.236,10	1,49	6,85	99,39%		
Triturador 2 CH2	Serie	214,35	1,39	13,62	93,49%		
Línea 3 CH2	30%					<b>83,13%</b>	
Alimentador 3 CH2	Serie	369,36	1,56	8,02	97,64%		
Correa 3 CH2	Serie	189,75	1,42	6,83	96,20%		
Harnero 3 CH2	Serie	1.413,29	1,48	6,29	99,51%		
Triturador 3 CH2	Serie	143,92	1,98	15,86	<b>88,94%</b>		
Línea 4 CH2	30%					<b>85,88%</b>	
Alimentador 4 CH2	Serie	629,60	1,79	7,28	98,72%		
Correa 4 CH2	Serie	113,58	1,42	5,24	95,17%		
Harnero 4 CH2	Serie	1.116,12	1,46	4,73	99,53%		
Triturador 4 CH2	Serie	136,73	1,87	10,79	91,83%		

Tabla 3: Análisis de disponibilidad por equipos, líneas y sistema de trituración secundaria

Nivel <i>i</i>		ICO Sist	ICO líneas	ICO Eq	FPD Eq
0	<b>Trituración Secundaria</b>	<b>100,00%</b>			
1	Línea 1 CH2		<b>25,15%</b>		
2	Alimentador 1 CH2			5,23%	6,77%
2	Correa 1 CH2			4,01%	6,77%
2	Harnero 1 CH2			0,74%	6,77%
2	Triturador 1 CH2			15,17%	6,77%
1	Línea 2 CH2		<b>28,69%</b>		
2	Alimentador 2 CH2			8,51%	7,67%
2	Correa 2 CH2			6,75%	7,67%
2	Harnero 2 CH2			1,15%	7,67%
2	Triturador 2 CH2			12,28%	7,67%
1	Línea 3 CH2		<b>25,12%</b>		
2	Alimentador 3 CH2			3,35%	5,77%
2	Correa 3 CH2			5,40%	5,77%
2	Harnero 3 CH2			0,69%	5,77%
2	Triturador 3 CH2			<b>15,68%</b>	5,77%
1	Línea 4 CH2		<b>21,03%</b>		
2	Alimentador 4 CH2			1,83%	5,80%
2	Correa 4 CH2			6,89%	5,80%
2	Harnero 4 CH2			0,66%	5,80%
2	Triturador 4 CH2			11,65%	5,80%
	<b>Sumatoria</b>		<b>100%</b>	100%	

Tabla 4: Cálculo ICO y FPD

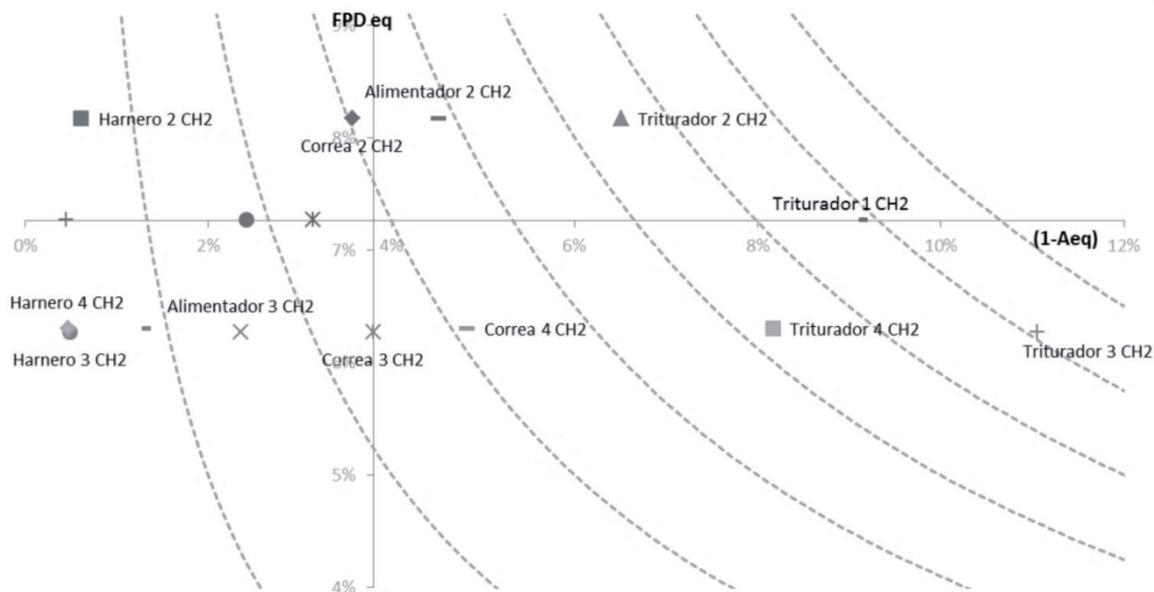


Fig. 3: Gráfico Dispersión para Metodología IEF

ción de cada elemento sobre el sistema. A partir de las ecuaciones 2-6 y de los algoritmos expuestos en la sección 3.2 y en 3.3 se hace el cálculo de los indicadores ICO y FPD para el caso de estudio, los cuales se muestran en la Tabla 4.

Los resultados de la Tabla 4 muestran que, aunque la línea 2 es la línea de trituración con mayor ICO, como equipo es el triturador 3, de la línea 3 el que tiene mayor ICO o impacto esperado de criticidad. Este equipo posee la mayor indisponibilidad de todo el sistema ( $A=88,94\%$ ), sin embargo su capacidad es menor que la de los trituradores de las líneas 1 y 2 (ver Tabla 2). La línea con el menor ICO es la 4, que además tiene el equipo con el menor ICO del sistema (harnero) y el triturador con menor ICO con respecto a los trituradores de las otras líneas.

#### 4.2.4. Etapa 4. Análisis de indicadores y resultados

Una vez que se cuenta con los datos de disponibilidad e indisponibilidad globales y por elemento, así como con los valores de los indicadores ICO y FPD es posible analizar las implicancias de esta información para la toma de decisiones.

La Figura 3 a través del Gráfico de Dispersión IEF, facilita la interpretación de los conceptos y del índice ICO, teniendo en cuenta en el eje X la falta de disponibilidad de equipos (indisponibilidad) y en el eje Y el FPD. El motivo de esta disposición es la evaluación estándar que se realiza de un riesgo operacional, que considera el producto de dos factores: frecuencia y consecuencia. Quedando los equipos más críticos para el funcionamiento sistémico por su factor de propagación e indisponibilidad, en el área más noreste posible del diagrama. Es fácil de confirmar, a través de las curvas de Iso ICO, que los trituradores ocupan los primeros lugares de mayor impacto en el sistema (en el orden por número de triturador 3, 1, 2 y 4), el quinto lugar es para el alimentador de la línea 2 y el sexto para la correa de la línea 4.

Respecto del FPD se puede establecer claramente que los factores más altos están en las líneas de mayor capacidad (2 y 1 respectivamente). Al estar en presencia de una configuración con cierto grado de redundancia (fraccionamiento con capacidad ociosa) el FPD es de suma utilidad, ya que por ejemplo el triturador 2 representa un 40% de la capacidad productiva requerida, pero si falla y las otras tres líneas se mantienen operativas, el sistema

de trituración secundaria solo pierde un 5% de su capacidad, obviamente al fallar más equipos de otras líneas de manera simultánea, la capacidad del sistema desciende, pero siempre de manera suavizada al contar con capacidad ociosa. EL FPD explica todas estas situaciones, estableciendo que en términos esperados una detención de cualquier equipo de la línea 2, implicará la pérdida un 7,67% promedio para el sistema.

Teniendo en cuenta las cuestiones clave que se presentan en la sección Planteamiento del problema, es fácil dejar claro que el subsistema con mayor ICO (subsistema 2) es el que tiene mayor impacto en la operatividad del sistema, siendo referido éste a más del 28% de la indisponibilidad esperada. Sin embargo como equipo individual es el triturador 3 el que más influye en la indisponibilidad sistémica, correspondiendo ésta en más del 15% a interrupciones en dicho triturador.

Ahora con la disponibilidad esperada de cada equipo, subsistema y del sistema en general, así como con el conocimiento del impacto de cada elemento es posible hacer un pronóstico más exacto de la capacidad del sistema para desarrollar un plan y control de la producción. Posteriormente, es posible aplicar otras metodologías de mejoras de procesos, tales como la propuesta de Eguren et al. [17].

## 5. CONCLUSIONES

En relación con los objetivos planteados al inicio, orientados a proponer una metodología que cubra un vacío de aplicación práctica y científica, se puede concluir que la metodología propuesta (IEF) es capaz de generar indicadores útiles para el análisis y posterior mejora en el desempeño de los sistemas productivos. Esto en términos de la disponibilidad de sus equipos. Así como para la priorización, focalización de las actividades y toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos, todo independientemente del tipo de industria del que se trate y de la disposición lógico-funcional de los componentes del sistema.

La propuesta metodológica IEF consta de cuatro etapas: la primera que gestiona y prepara los datos a analizar, la segunda que de forma clásica calcula la fiabilidad y disponibilidad operacional de cada elemento y del sistema general, la tercera que encuentra

el impacto en la criticidad operacional (ICO) y el factor de propagación del tiempo de detención esperado (FPD) de cada uno de los equipos sobre el sistema y la última que obtiene mediante un gráfico de dispersión "indisponibilidad vs FPD" la interpretación de los resultados para la toma de decisiones. Cada una de las mencionadas etapas se ilustra con el caso de análisis a un sistema de trituración de cobre, cuyos resultados finales arrojan información relevante para evaluar el diseño y el rendimiento de la planta, lo cual por supuesto se puede posteriormente traducir en beneficios económicos.

En general, después de aplicar la metodología es posible obtener los siguientes elementos de información:

- Identificar los activos que tienen el ICO más alto, lo cual es relevante para concentrar los esfuerzos en ellos dado su impacto potencial. Recordemos que el ICO descubre cuál es el subsistema o equipo con mayor impacto en la operatividad del sistema, asignando el % de la indisponibilidad total correspondiente
- Identificar los equipos de mayor criticidad en el sistema (frecuencia x consecuencia), entendiendo en este caso particular que la consecuencia medida es netamente operacional, por ende basada en la indisponibilidad individual y sistémicamente impactada de cada equipo. Este análisis se facilita por medio de un gráfico de dispersión, que relaciona en su eje X la indisponibilidad de los equipos (interpretada como la frecuencia) y en el eje Y el FPD (entendido como la consecuencia). En dicho gráfico es posible apreciar que para una misma configuración lógica, los elementos del mismo subsistema tendrán un mismo FPD, siendo la indisponibilidad esperada de cada elemento el factor diferenciador para priorizar un equipo sobre otro. También es posible visualizar que para una misma indisponibilidad entre equipos, la configuración lógico-funcional, representada por el FPD hace la diferencia en su criticidad.

Dado lo anterior, las acciones del plan de gestión de activos que emanen de esta metodología pueden ser dirigidas a la fiabilidad y mantenibilidad de los elementos presentes en la zona de la derecha (eje X) del gráfico, es decir los más indisponibles. Lo que implicaría la redefinición de su estrategia de mantenimiento, de los procedimientos de mantenimiento, y el análisis de piezas de repuesto. En tanto, para los elementos situados en la zona más alta (eje Y) del gráfico de dispersión, es decir para aquellos con mayor FPD, las acciones pueden estar relacionados en reducir el impacto del elemento, por ejemplo: incluyendo mejoras en el diseño, la incorporación de redundancia y de exceso de capacidad, cuando sea posible.

La contribución de esta metodología tiene un alto componente económico, ya que el determinar adecuadamente la disponibilidad de un sistema industrial ayuda a conocer su capacidad real de producción y por lo tanto los beneficios potenciales. Por otro lado, el identificar las oportunidades de mejora y asignar los recursos de mantención a los equipos y sistemas más críticos (y no sólo a aquellos de mayor capacidad productiva) genera ahorros en el presupuesto de mantención, pero además en la consecuente disminución en tiempos de ineficiencia, producción defectuosa, pérdidas y mermas. Finalmente, es importante destacar que por su carácter genérico, la metodología de IEF se podría incorporar en cualquier base de datos de un Sistema informático de gestión de mantenimiento - CMMS para tener una evaluación de impacto automatizada.

## BIBLIOGRAFÍA

(Endnotes)

- 1 Daylan B, Ciliz N. "Life cycle assessment and environmental life cycle costing analysis of lignocellulosic bioethanol as an alternative transportation fuel". *Renewable Energy* 2016. Vol.89 p.578-587. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.059>
- 2 Gang W, Wang S, Xiao F, Gao D. "Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability". *Applied Energy* 2015. Vol.159 p.265-275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.070>
- 3 Koontz A, Wehrich H. *Administración: una perspectiva global*. México: McGraw-Hill / Interamericana de México 2014. ISBN 978-607-15-0759-4.
- 4 Crespo A, Moreu P, Sola A and Gómez J. "Criticality Analysis for Maintenance Purposes: A Study for Complex In-service Engineering Assets". *Quality and Reliability Engineering International* 2015. Published online in Wiley Online Library. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/qre.1769>
- 5 Baraldi P, Compare M, Zio E. "Component ranking by Birnaum importance in presence of epistemic uncertainty in failure event probabilities". *IEEE*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TR.2013.2240885>
- 6 Wang, W., Loman, J., Vassiliou, P. "Reliability importance of components in a complex system". *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Los Angeles, California, USA, January 26-29, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2004.1285415>
- 7 Kristjanpoller F, Viveros P, Crespo A, Grubessich T and Stegmaier R. "RAM-C: A novel methodology for evaluating the impact and the criticality of assets over systems with complex logical configurations". In: *The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)*, Zurich, Switzerland, 7 - 10 September 2015.8-84-92970-17-9
- 8 Guillemette M, Laroche M, Cadieux J. "Defining decision making process performance: Conceptualization and validation of an index". *Information & Management* 2014. Vol 51 p.618-626. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.im.2014.05.012>
- 9 Chai J, Liu E, Ngai W. "Application of decision-making techniques in supplier selection: A systematic review of literature". *Expert Systems with Applications* 2013. Vol. 40 p.3872-3885. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2012.12.040>
- 10 Chapman AD. "Principles of Data Quality", version 1.0. Report for the Global Biodiversity Information Facility. Copenhagen: GBIF, 2005.
- 11 Carnero M. "The control of the setting up of a Predictive Maintenance Programme using a system of indicators". *Omega-International Journal of Management Science* 2004, Vol. 32, p. 57-75.
- 12 Rausand M, Hoyland A. "System reliability theory: models, statistical methods, and applications". 3rd ed. New York: Wiley; 2003.
- 13 Guo H, Yang X. "A simple reliability block diagram method for safety integrity verification". *Reliability Engineering System Safety* 2007. Vol. 92 p.1267-1273. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2006.08.002>
- 14 Dhillon B. "Maintenance Engineering a Modern Approach". Boca Raton: CRC Press LLC; 2002. ISBN 1-58716-142-7. p. 78.
- 15 Kristjanpoller F, Crespo A, Viveros P, Mena R, Stegmaier R. "A novel methodology for availability assessment of complex load sharing systems". *The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL)*. Wroclaw, Poland. Sept 14-18, 2014.
- 16 Ballou D, Madnick S, Wang R. "Assuring Information Quality". *Journal of Management Information Systems* 2003, Vol. 20, p.9-11.
- 17 Eguren-Egiguren J, Goti-Elordi A, Pozueta-Fernandez L. "Design, application and evaluation of a model for process improvement in the context of mature industrial sectors. Case study." *DYNA* 2011 Vol.86-1 p.59-73. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/3734>