

El Concepto de Rendimiento (*Throughput*) como Medida de Funcionalidad de un Sistema para la Construcción de un Indicador de Resiliencia

Orlando Durán Acevedo¹, Felipe Matamala Contreras²

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. orlando.duran@pucv.cl

² Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. felipe.matamala.c@mail.pucv.cl

Resumen

La resiliencia es una capacidad intrínseca de una entidad o sistema para recuperarse de eventos perturbadores. Esta capacidad, llevada a los sistemas productivos, está estrechamente relacionada con el rendimiento y el mantenimiento de sus activos físicos. En los últimos años se han propuesto varios modelos para la evaluación de la resiliencia de activos físicos y de sistemas de producción, sin embargo, la mayoría de los modelos son de naturaleza cualitativa. Este trabajo tiene como objetivo proponer el uso del concepto de rendimiento (*throughput*) como medida de funcionalidad de un sistema para viabilizar la evaluación cuantitativa de su resiliencia. Para considerar el efecto de la variación del rendimiento de cada componente del sistema, se adopta la OTE (*Overall Throughput Effectiveness*) como base para dicha evaluación. Se traslada un estudio de caso basado en una planta de molienda de mineral de cobre. En este estudio, y con el fin de medir el efecto de la variación de la disponibilidad en la resiliencia del sistema, se realizaron varios análisis de sensibilidad. En este sentido, el estudio del impacto causado por la variación de la confiabilidad y de la mantenibilidad (en cada equipo crítico) permite relacionar el rendimiento y eficiencia del mantenimiento con la resiliencia. A partir de ahí, se pueden detectar los principales problemas relacionados con la función de mantenimiento y recomendar mejoras que lleven al sistema a niveles más altos de rendimiento y resiliencia. Esta propuesta muestra un gran potencial considerando el vacío en la literatura y la ausencia de métricas que consideran indicadores cuantitativos de resiliencia basados en *throughput* y en la eficiencia real de los sistemas.

Palabras clave: Resiliencia; OEE; Rendimiento; *Throughput*.

Abstract

Resilience is an intrinsic capacity of an entity or system to recover from disruptive events. This capacity, taken to production systems, is closely related to the performance and maintenance of their physical assets. In recent years, several models have been proposed for the assessment of the resilience of physical assets and production systems, however, most of the models are qualitative in nature. This paper aims to propose the use of the concept of *throughput* as a measure of the functionality of a system to make the quantitative assessment of its resilience feasible. In order to consider the effect of the performance variation of each system component, the Overall Throughput Effectiveness (OTE) is adopted as the basis for such evaluation. A case study based on a copper ore milling plant is transferred. In this study, and in order to measure the effect of availability variation on system resilience, several sensitivity analyses were performed. In this sense, the study of the impact caused by the variation of reliability and maintainability (in each critical equipment) allows relating maintenance performance and efficiency with resilience. From there, it is possible to detect the main problems related to the maintenance function and recommend improvements that will lead the system to higher levels of performance and resilience. This proposal shows great potential considering the gap in the literature and the absence of metrics that consider quantitative resilience indicators based on *throughput* and actual system efficiency.

Keywords: Resiliency; OEE; Performance; *Throughput*.

1. Introducción

La resiliencia puede describirse como la capacidad intrínseca de una entidad o conjunto de entidades (sistema) para recuperarse de eventos perturbadores [1]. Esta capacidad, llevada a los sistemas productivos, está estrechamente relacionada con el rendimiento y el mantenimiento de los activos físicos. En los últimos años se han desarrollado varios modelos para la evaluación de la resiliencia de los activos físicos y de los sistemas de producción en particular [2]. Sin embargo, la mayoría de los modelos son de naturaleza cualitativa, lo que constituye un inconveniente. Los pocos modelos cuantitativos existentes se refieren al desempeño de un activo, o sistema, como la “funcionalidad” [3-4]. Esto es hecho de forma genérica y sin definir concretamente qué parámetro debe ser usado para medir el comportamiento de la resiliencia [5-7]. Esto va en dirección contraria a la búsqueda y aplicación de sistemas de apoyo a la toma de decisión que se basen en datos y en una época de transición digital. En este trabajo tiene como objetivo proponer el uso del concepto de rendimiento (throughput) como medida de funcionalidad de un sistema para la evaluación de su resiliencia y la propuesta de un indicador cuantitativo de esta. Para considerar el efecto de la variación del rendimiento de cada componente del sistema, se adopta la OTE (Overall Throughput Effectiveness) como medida de la funcionalidad del sistema. El OTE [8] es un indicador basado en los OEE (Overall Equipment Efficiency [9]) individuales (de cada equipo), y tiene la particularidad de tomar en cuenta los aspectos taxonómicos o disposición de los equipos a lo largo y ancho del sistema (en serie, en paralelo, etc.). Por la naturaleza de los índices que se propone utilizar en este modelo, OEE y OTE, esta muestra un marcado potencial para operar de manera automática. Los equipos existentes en un sistema de producción modernos, suelen estar conectados a sistemas de monitoreo y control a través del concepto de Internet de las Cosas (IoT). Esto permitirá el cálculo del indicador de resiliencia en tiempo real. Para validar la propuesta, se aplica un estudio de caso basado en una planta de molienda de mineral de cobre de una empresa chilena. En este estudio, y con el fin de medir el efecto de la variación de la disponibilidad en la resiliencia del sistema, se realizaron varios análisis de sensibilidad. En este sentido, el estudio del impacto causado por la variación de la confiabilidad y de la mantenibilidad (en cada equipo crítico) permite relacionar el rendimiento y eficiencia del mantenimiento con la resiliencia [10]. A partir de ahí, se pueden detectar los principales problemas relacionados con la función de mantenimiento y recomendar mejoras que lleven al sistema a niveles más altos de rendimiento y resiliencia. Creemos en el gran potencial de esta propuesta dado que existe un vacío en la literatura que considere indicadores cuantitativos de resiliencia

basados en throughput y en la eficiencia real de los sistemas.

2. Marco teórico

La resiliencia, en pocas palabras, puede describirse como la capacidad intrínseca de una entidad o conjunto de entidades para recuperarse de eventos perturbadores. En los últimos años, se han desarrollado varios modelos para la evaluación de la resiliencia de los activos físicos y de los sistemas de producción en particular. Sin embargo, la mayoría de los modelos son de naturaleza cualitativa. Linkov [11] identificó una serie de métricas que combinan aspectos cuantitativos y cualitativos. Hashimoto et al. [12] definen tres conceptos habitualmente relacionados: la fiabilidad, como el grado de susceptibilidad a los fallos; la vulnerabilidad, como el grado de gravedad de los fallos y sus consecuencias y, la resiliencia, como la rapidez con la que el sistema se recupera de un fallo. Otros trabajos dan cuenta de la resiliencia como la velocidad de recuperación ante un shock. Sin embargo, estos no consideran la magnitud del daño o su efecto [4]. Algunos autores destacan que el grado de recuperación no implica una restauración perfecta en la funcionalidad del sistema, sino que consideran que el sistema ha vuelto a un nivel o estado en el que este puede considerarse funcional. En otras palabras, la resiliencia podría o debería capturar el proceso de recuperación como el índice entre la funcionalidad recuperada y la funcionalidad perdida [5].

Un enfoque interesante es el de Haimés [13] que sugiere que la resiliencia puede derivarse de un vector dependiente del tiempo que contiene un conjunto de estados de un sistema. Estos estados se ven como un conjunto de salidas multidimensionales del sistema para cualquier entrada específica. Este autor no detalla la forma en que esos estados y la salida pueden ser descritos.

Según Cai et al. [10], para que un sistema despliegue toda su resiliencia, se deben tener en cuenta dos factores vitales: la estructura del sistema (taxonomía) y los recursos de mantenimiento dispuestos (estrategias). Es decir, al definir la estructura de un sistema y sus recursos de mantenimiento, se define también la resiliencia del sistema (si se mantienen las condiciones de funcionamiento). Esto permitiría considerar el concepto de resiliencia como una variable crítica en las decisiones relacionadas con la planificación, el diseño, la construcción y la operación de los sistemas de ingeniería. Teniendo en cuenta el concepto de estructura, es importante considerar que los sistemas de ingeniería suelen diseñarse como sistemas multicapa con taxonomías complejas que implican un gran número de partes y elementos, dispuestos en diferentes planos o capas. La combinación de estos elementos, conocida como taxonomía del sistema, permite

representar un sistema productivo según diferentes lógicas: en serie, en paralelo, stand by, etc.

Cholda [5] subraya que la resiliencia debe considerarse una medida global que proviene de las interrelaciones y las prestaciones locales (de cada equipo), junto con el grado en que repercuten en el conjunto del sistema. Bishop et al. [2] destacan que el foco debe estar en la estructura de los sistemas y los efectos en cascada que se producirán en presencia de eventos disruptivos y en cómo tener esto en cuenta en la definición de los sistemas resilientes.

Considerando los sistemas de ingeniería, surgen varias preguntas en el análisis de la resiliencia: ¿Cuál es la forma de medirla de manera cuantitativa?, ¿cómo expresar de forma eficaz y coherente la medida de desempeño a través de la cual se pueda medir la resiliencia?, ¿existe una forma de automatizar el cálculo de un índice de resiliencia?, ¿cómo propender hacia servicios resilientes partir de la información generada por un indicador de resiliencia? Por ello, se detectaron dos desafíos de investigación:

1. La necesidad de medir o expresar, de forma cuantitativa, la resiliencia en un sistema de alta ingeniería, considerando el impacto que diferentes componentes, subsistemas y diferentes niveles de abstracción pueden causar en dicha propiedad crítica a partir de un indicador de desempeño del sistema que sea coherente y representativo con su funcionalidad.

2. La conveniencia de automatizar el cálculo de dicho indicador de resiliencia partir de los parámetros del sistema en los cálculos o estimaciones de la resiliencia. La resiliencia es un concepto que se utiliza en las industrias para medir la capacidad de un sistema a resistir caídas en su funcionalidad [10]. Se dice de un sistema resiliente el cual, al haber una pérdida de funcionalidad, tiene un tiempo de recuperación breve. Esto levanta la pregunta sobre qué se entiende por funcionalidad.

Un indicador muy importante dentro de la industria es el OEE, indicador que mide el desempeño de un equipo para fabricar un determinado elemento o pieza [9]. Este indicador se basa en la productividad, la disponibilidad y la calidad del producto elaborado por una determinada máquina. Sin embargo, tradicionalmente el OEE sólo mide el rendimiento de equipos individuales, dejando de lado la perspectiva de sistema, aspecto fundamental en la gestión de activos físicos [11]. Sólo unas pocas contribuciones proponen una ampliación hacia un indicador de rendimiento a nivel de sistema. Muthiah y Huang [8] desarrollan el Overall Throughput Effectiveness (OTE) como una extensión de la definición de OEE a nivel de fábrica, comparando el rendimiento real y el máximo alcanzable del sistema de producción. La OTE se formula en la Ecuación 1

$$OTE = \frac{\text{Throughput real del sistema}}{\text{Throughput teórico del sistema}} \quad (1)$$

Como los esfuerzos desplegados en la literatura para cuantificar el concepto de resiliencia pasan por el análisis del comportamiento de la funcionalidad del sistema, término que no ha sido aclarado del todo, se debe encontrar un indicador real (material) que permita dicha cuantificación. Aquí proponemos el throughput del sistema como la variable a ser monitoreada para cuantificar la resiliencia. El OTE permite agregar los rendimientos locales en un indicador global a nivel del sistema, y a través de este, conectar los aspectos operativos que subyacen en el OEE (parámetro a partir del cual se obtiene el OTE), Disponibilidad, Productividad y Calidad con el rendimiento o efectividad global del sistema (throughput), y por último con la resiliencia.

Para medir la resiliencia el modelo propuesto por Cai et al. [10] usa como factor de funcionalidad a la disponibilidad del sistema. Siendo así, este modelo opera con una serie de tiempo de los valores de disponibilidad sistémica. La ecuación 2 presenta dicho modelo.

$$\rho = \frac{A_1}{n (\ln(t_1))} \sum_{i=1}^n \frac{A_2^i A_3^i}{\ln(t_3^i - t_2^i)} \quad (2)$$

Donde A_1 corresponde a la disponibilidad del sistema en estado estable. A este parámetro se le atribuye el instante t_1 . Al instante t_2 , una caída brusca en la disponibilidad del sistema ocurre, esto puede ser fruto en la caída de la disponibilidad de uno o más equipos del mismo. Dicha caída de la disponibilidad, por su vez, se debe a la caída en la confiabilidad y/o mantenibilidad de uno o más equipos existentes en el sistema. A partir de ahí, la disponibilidad asume un estado o valor transitorio A_2 . A partir de dicho instante (t_2), el sistema recupera su disponibilidad hasta un nuevo estado de equilibrio aceptable, A_3 . Esto ocurre en t_3 . El número de caídas de disponibilidad se denota por n . Por consiguiente, A_2^i y A_3^i representan los valores correspondientes asociados a cada uno de los i eventos disruptivos ($i \leq n$).

En este trabajo se propone alterar el modelo de Cai et al. [10] y utilizar reemplazando los valores de la disponibilidad por valores de los OTE. Esto es, generar series de tiempo de los valores del OTE de un sistema, y a partir de ellas, detectar los eventos disruptivos que constituyen caídas significativas del throughput y tratarlos como shocks según el modelo de resiliencia. Con esto, se podrá relacionar cada uno de los parámetros que componen los OEE de los equipos individuales, con el OTE, y finalmente, con la resiliencia del sistema.

3. Metodología propuesta

La figura 2 muestra la estructura del método propuesto. Inicialmente se debe modelar el sistema, utilizando diagramas del tipo RBD, dejando claro su estructura y los componentes principales del mismo. Aquí se deben reflejar las relaciones taxonómicas entre cada uno de los equipos (series, paralelos, etc.). Para viabilizar el cálculo de la resiliencia se debe contar con una serie de tiempo de dichos parámetros. Estos valores pueden corresponder a una serie histórico (expost), o a valores sintéticos generados a través de experimentos de Montecarlo (exante). Por lo tanto, a cada equipo se deben asociar las series de tiempo con los parámetros que permitirán obtener las funciones de distribución (promedio y desvío estándar) y el cálculo de los respectivos valores de OEE. Una vez definidos estos valores y sus respectivas funciones de distribución de probabilidades se realizarán los experimentos de Montecarlo. Para cada equipo se obtienen los valores de la disponibilidad de acuerdo a sus distribuciones, manteniendo fijos los valores de los otros parámetros del OEE del equipo, y todos otros los parámetros de los equipos restantes (*ceteris paribus*). Una vez obtenidos todos los valores de OEE para cada iteración y para cada período, es posible calcular los valores de OTE para cada período y en cada iteración. Una vez obtenidos los valores de OTE para cada período será posible calcular los valores de la resiliencia basada en el throughput. Por último, es posible establecer estudios de sensibilidad para verificar el comportamiento de los valores del OTE y las respectivas resiliencias a partir de modificación de los valores de disponibilidad de cada equipo. A partir de dichos estudios de sensibilidad, es posible determinar los principales drivers de throughput y de resiliencia y a partir de dicho conocimiento, orientar la definición de estrategias de mantenimiento. Es así que es posible establecer escenarios para los valores de MTBF y MTTR y, a partir de dichos valores, conocer los valores de disponibilidad, OEE, OTE y, por fin, de la resiliencia. Con esto, el impacto en este último, será medido a partir de los esfuerzos que se desplieguen en mejorar ya sea la confiabilidad o la mantenibilidad de un determinado equipo.

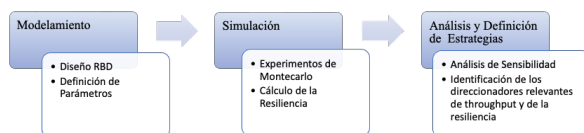


Figura 2. Metodología propuesta.

A partir del uso del mencionado enfoque, se podrán establecer los respectivos análisis de sensibilidad para determinar cuál de los equipos individuales hace que su disponibilidad impacte en mayor grado sobre la resiliencia del sistema. De manera más específica, los experimentos de simulación producen una serie de iteraciones donde el valor de la disponibilidad se hace

variar para un cierto número de periodos. Los valores del OEE de los equipos son calculados y luego son obtenidos los valores del OTE para cada uno de los periodos y en cada iteración. A partir de esos valores se calcula el valor de la resiliencia para cada iteración. Con los resultados de todas las iteraciones, es posible sensibilizar los impactos de la variación de las disponibilidades de cada uno de los equipos. De esta manera se puede conocer cuál de los equipos tiene un mayor impacto en el rendimiento global del sistema. Con esto, se vincula el desempeño de la función de Gestión de Activos con el Throughput y con la resiliencia sistémica. En la próxima sección se presenta un caso de estudio basado en un caso real de una planta de chancado en Chile.

4. Caso de estudio

Se presenta el caso de una línea de chancado primario existente en una operación minera localizada en los Andes centrales de Chile. En esta planta se realiza la primera reducción de tamaño del mineral proveniente de la mina, donde el mineral es enviado a la Tolva de Traspaso. La planta tiene una capacidad nominal de 4200 [TPH]. La figura 3 muestra el diagrama de flujo de la planta y la configuración de los principales equipos que forman la planta. Desde el punto de vista de la configuración, se considera inicialmente que los dos alimentadores de Placas (Feeders 1 y 2) se encuentran trabajando en paralelo conformando una estación de trabajo que llamaremos Alimentación, que a su vez se encuentra en serie con el resto de los equipos, tal como muestra la figura 3.

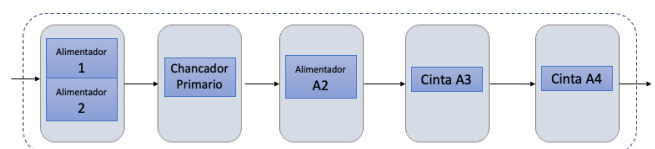


Fig. 3. Configuración global en serie del sistema productivo

Paraszczak [13] propuso una nueva forma para el cálculo de la OEE considerando las diferencias que existen entre los equipos de la minería y los de la industria manufacturera. El modelo de OEE propuesta por Paraszczak [13] opera según la ecuación 3:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} * \text{Tasa de Utilización} * \text{Rendimiento} \quad (3)$$

Como resultado de estos valores se calcularon los O.E.E. para cada equipo y se promediaron para realizar el análisis del O.T.E considerando este valor medio. Los valores de OEE promedio para cada equipo, y en orden ascendente, se muestran en tabla 1. El valor del O.T.E considerando los siete meses bajo análisis es de 33,10 %.

Tabla 1. Valores promedio de O.E.E. para cada equipo.

Alim. 1	32,67%
Alim. 2	40,12%
Chancador Primario	57,06%
Cinta A3	60,22%
Cinta A4	60,39%
Alimentador A2	60,41%

Los resultados permiten observar un importante hecho: el valor promedio de los OEE individuales (51,81%) es diferente al valor del OTE (33,10%); Otra constatación, la forma en que la compañía basa sus decisiones y define prioridades con respecto a las acciones de gestión de activos físicos, el equipo con menor desempeño es el Alimentador de Placas 1. Con los resultados reales y considerando 7 meses en análisis y usando la Eq. 1 adaptada se obtuvo un valor de Resiliencia de 0,11.

Una vez realizados los experimentos de Montecarlo para analizar el impacto en la resiliencia del Sistema a partir de la variación de las disponibilidades de cada uno de los equipos que lo componen, se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores obtenidos de cada simulación para cada equipo.

Equipo	Disp. Prom.	Desv.St.	Resil.	Desv.St. Resil.
Alim. 1	88,74%	0,0257	0,1182	0,0059
Alim. 2	87,37%	0,0270	0,1165	0,0018
Chancador	85,22%	0,0287	0,1040	0,0114
Alim. A2	86,76%	0,0315	0,1164	0,0033
Cinta A3	86,38%	0,0348	0,1165	0,0013
Cinta A4	86,07%	0,0277	0,1167	0,0000

Con estos resultados se puede observar claramente que existen tres equipos del sistema que no generan variaciones en la resiliencia sistémica a partir de la variación de sus disponibilidades. Dicho de otra forma, su impacto en la resiliencia sistémica no se logra apreciar en este experimento. Por lo tanto, esfuerzos adicionales para mejorar la disponibilidad de dichos equipos, con el fin de aumentar la resiliencia del sistema, serían poco relevantes.

Por otro lado, y comparando con el valor calculado de la resiliencia, los equipos que pueden generar un efecto positivo, y mayor, en el valor de la resiliencia, a partir de mejoras en su disponibilidad son: Alimentador 2, Cinta A3 y Alimentador A2.

Al observar la dispersión de los valores de la resiliencia, concluimos que los aumentos de la resiliencia se logran con la mejoría en la disponibilidad del Alimentador 2 y Cinta A3.

Por último, observamos en el diagrama de tornado de la Figura 3, que la mayor correlación entre la variación

de las disponibilidades locales y el valor de la resiliencia del sistema se da con el Alimentador 1. Esto se da por la gran dispersión que muestran los valores de disponibilidad histórica de esa variable de entrada y no debería verse corroborado, en lo general, a partir de la configuración en paralelo que poseen los Alimentadores 1 y 2.

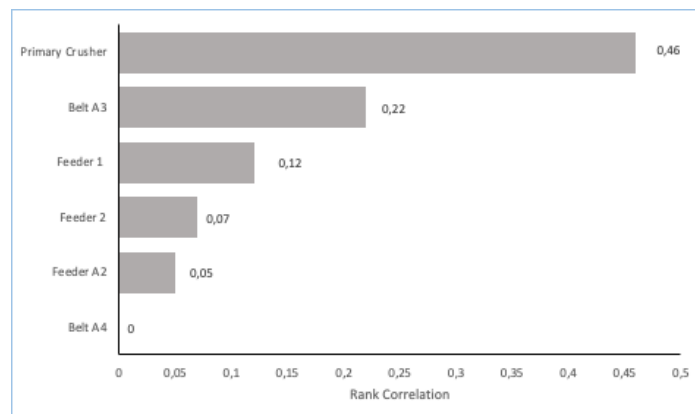


Figura 3. Diagrama de tornado con los resultados.

Considere que los efectos medidos son logrados a partir de los valores reales de disponibilidad obtenidos en la serie histórica del comportamiento de los equipos en el sistema. Por lo tanto, solo sirven de manera ilustrativa para comprender la forma de realizar los análisis a partir del método propuesto.

5. Conclusiones

La relevancia de la necesidad por una adecuada medición de la sustentabilidad y la resiliencia nos llevan a pensar en una nueva generación de indicadores globales que permitan tener una visión de los efectos globales provocados por eventos locales. Se debe ir más allá del uso de indicadores tales como el OEE que se remiten específicamente a mostrar el comportamiento individual del equipo. La visión sistémica, en específico, la medición del throughput, parece ser un camino adecuado. Sin embargo, queda un espacio para medir efectos estructurales y de largo plazo (estratégicos) y para conocer los impactos generados por las estrategias de mantenimiento en la resiliencia del sistema.

Al adoptar la medición de desempeño a nivel sistémico, se hace posible para que las compañías puedan focalizar sus esfuerzos en los principales parámetros que actúan como apalancando la eficiencia y el throughput, en vez de concentrarse en los activos individuales.

En específico, los rendimientos o las eficiencias de cada equipo, aquí reflejados en los OEE individuales, no entregan información sobre las razones u orígenes de bajos niveles. Eso no da luz sobre los aspectos que deben ser mejorados (i.e., disponibilidad, productividad o utilización), y no permite direccionar correctamente las decisiones hacia la mejoría de rendimientos que impacten positivamente

el throughput y a la resiliencia del sistema en el medio y largo plazo.

La metodología agrega un indicador de efectividad global (i.e., OTE), un indicador modificado de resiliencia, experimentos de Montecarlo y análisis de sensibilidad como un marco de referencia para vincular las definiciones estratégicas en Mantenimiento con la resiliencia sistémica.

6. Referencias

- [1] Bhamra, R.; Dani, S.; Burnard, K.: Resilience: The concept, a literature review and future directions. *Int. J. Prod. Res.* 2011.
- [2] Bishop, M.; Carvalho, M.; Ford, R.; Mayron, L.M. Resilience is more than availability. In *Proceedings of the Proceedings New Security Paradigms Workshop*; 2011.
- [3] Stephenson, A. *Benchmarking The Resilience In Organisations*. Univ. Canterbury 2010.
- [4] Yodo, N.; Wang, P. Engineering resilience quantification and system design implications: A literature survey. *J. Mech. Des. Trans. ASME* 2016.
- [5] Cholda, P.; Tapolcai, J.; Cinkler, T.; Wajda, K.; Jajszczyk, A. Quality of resilience as a network reliability characterization tool. *IEEE Netw.* 2009.
- [6] Fiksel, J.; Polyviou, M.; Croxton, K.L.; Pettit, T.J. From risk to resilience: Learning to deal with disruption. *MIT Sloan Manag. Rev.* 2015.
- [7] Gibson, C.; Tarrant, M. A “Conceptual Models” approach to organisational resilience. *Aust. J. Emerg. Manag.* 2010.
- [8] Muthiah, K. M. N., Huang, H.: Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection. *International Journal of Production Research* 45(20), 4753-4769 (2007).
- [9] Nakajima, S.: *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Pr, Cam-bridge, MA (1988).
- [10] Cai, B.; Xie, M.; Liu, Y.; Liu, Y.; Feng, Q. : Availability-based engineering resilience metric and its corresponding evaluation methodology. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2018.
- [11] Linkov, I.; Eisenberg, D.A.; Plourde, K.; Seager, T.P.; Allen, J.; Kott, A. Resilience metrics for cyber systems. *Environ. Syst. Decis.* 2013.
- [12] Hashimoto, T.; Stedinger, J.R.; Loucks, D.P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resour. Res.* 1982
- [13] Haines, Y.Y. On the definition of resilience in systems. *Risk Anal.* 2009.
- [13] Paraszczak, J. Understanding and assessment of mining equipment. *Min. Technol.* 2015, 114, 147–151.