

EFECTIVIDAD GENERAL DE EQUIPOS (OEE) AJUSTADO POR COSTOS

Carlos A. Díaz-Contreras, David A. Catari-Vargas, Corazon De Jesús Murga-Villanueva, Gabriela A. Díaz-Vidal y Vania F. Quezada-Lara

RESUMEN

El éxito de las metodologías de fabricación moderna, tales como Lean Manufacturing o TPM (Total Productive Maintenance), dependen en gran medida de la medición precisa y el análisis de los datos de producción. El concepto de OEE nace como un KPI (indicador clave de desempeño) asociado al programa estándar de mejora de la producción TPM. La ventaja del OEE frente a otras razones es que mide, en un único indicador, mediante un porcentaje, todos los parámetros fundamentales en la producción industrial: disponibilidad, rendimiento y calidad. Desde su creación, en los años 80, su principal crítica

ha estado en que los tres componentes tienen igual importancia; por ello, se han diseñado distintas propuestas de cómo modificar las ponderaciones, algunas de ellas basadas en los costos, aunque en estos casos el indicador resultante se expresa en unidades monetarias y no en porcentaje. En este trabajo se presenta una metodología, que ajusta el valor final de cada uno de los componentes del OEE basada en costos (OEE_{AC}), expresando el indicador en porcentaje, la que posteriormente se aplica en una empresa metal-mecánica a una máquina de corte de acero.

Introducción

Hoy en día, las empresas han ido destinando cada vez más recursos para ocuparse de distintos indicadores de desempeño, como por ejemplo disponibilidad, rendimiento, y en mayor medida, la calidad. Toda esta preocupación ha sido resultado de la gran competitividad que existe entre las diferentes organizaciones, llegando a ser la reducción de pérdidas un elemento de supervivencia.

La tecnología existente en la actualidad, posibilita que las empresas posean sistemas automatizados en casi su totalidad. Las máquinas permiten que los errores y costos de operación sean menores a los del trabajo realizado por personas, generando beneficios cuando las máquinas funcionan con una alta eficacia y eficiencia, sumado además a un sistema de

gestión adecuado (Wudhikarn, 2010).

Con el objeto de evaluar los procesos productivos y así lograr optimizar el uso de la maquinaria y las líneas de producción, entre las diferentes herramientas surgidas a partir de la mitad del siglo pasado está el mantenimiento productivo total (TPM, del inglés *Total Productive Maintenance*). Esta herramienta fue desarrollada por Seiichi Nakajima en 1951 como 'mantenimiento productivo' (PM), que a partir del 1971 se transformó en el enfoque y la práctica del 'mantenimiento productivo total'. "TPM es un sistema de organización donde la responsabilidad no recae sólo en el departamento de mantenimiento sino en toda la estructura de la empresa ya que el buen funcionamiento de las máquinas o instalaciones depende y es responsabilidad de todos. El

TPM está orientado a lograr cero accidentes, cero defectos y cero fallas" (Martos *et al.*, 2006: 476).

Las máquinas se diseñan desde la base de una cierta capacidad de producción, pero a menudo la producción resulta menor que la capacidad para la que se diseñó y no siempre con la calidad esperada. La precisión y exactitud en la medición de la efectividad de una máquina o línea de producción se vuelve fundamental, especialmente para las empresas que aplican TPM, y como solo lo que se mide se puede gestionar y mejorar, el TPM, como todo sistema de gestión, requiere medidas de rendimiento apropiadas que permitan medir y cuantificar los procesos. Para ello se han desarrollado diferentes indicadores, siendo el más importante la efectividad global de equipos (*Overall*

Equipment Effectiveness - OEE).

Efectividad global de equipos (OEE)

El indicador OEE propuesto por Nakajima (1988) tiene como objetivo medir la efectividad productiva de los equipos y reducir sus pérdidas a lo más próximo de cero, y que sea reconocido como una necesidad por diferentes organizaciones. (Badiger y Gandhinathan, 2008).

Para Bamber *et al.* (1999) el rol del OEE va más allá de solo monitorear, controlar y llevar la cuenta de las iniciativas de mejora del equipo. El OEE previene la suboptimización individual de las máquinas o líneas productivas, entregando un método sistemático de estabilización de objetivos de producción e incorpora herramientas y técnicas

PALABRAS CLAVE / Calidad / Costo Menor / Disponibilidad / Eficacia General del Equipo / Medición del Rendimiento / OEE / Rendimiento /

Recibido: 12/08/2019. Modificado: 03/03/2020. Aceptado: 12/03/2020.

Carlos A. Díaz-Contreras. Doctor en Gestión de Empresas, Universidad de Deusto, España. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile. Dirección: Departamento de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Tarapacá. Calle

18 de septiembre, N° 2222. Arica, Chile. e-mail: cdiazc@uta.cl.

David A. Catari-Vargas. Magíster en Gestión de Activos y Mantenimiento, Universidad Federico Santa María, Chile. Académico, Universidad de Tarapacá, Chile.

Corazon De Jesús Murga-Villanueva. Ingeniera Civil Industrial, Universidad de Tarapacá.

Gabriela A. Díaz-Vidal. Magíster en Dirección y Gestión de Recursos Humanos, Universidad Arturo Prat, Chile. Docente,

Universidad Católica del Norte, Chile, y Universidad Tecnológica de Chile, Antofagasta, Chile.

Vania F. Quezada-Lara. Ingeniera Civil Industrial, Universidad de Tarapacá.

COST ADJUSTED OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (OEE)

Carlos A. Díaz-Contreras, David A. Catari-Vargas, Corazon De Jesús Murga-Villanueva, Gabriela A. Díaz-Vidal and Vania F. Quezada-Lara

SUMMARY

The success of modern manufacturing methodologies, such as Lean Manufacturing or TPM (Total Productive Maintenance), heavily relies on accurate measurement and analysis of production data. The concept of OEE is born as a KPI (Key Performance Indicator) associated with the standard TPM production improvement program. The advantage of the OEE among other reasons is that it measures, in a single indicator, by a percentage, all the fundamental parameters in industrial production: availability, performance, and quality. Since its creation, in

the '80s, its main criticism has been that the three components are equally important. Different proposals have been designed about how to modify weights, some of them based on costs, although in these cases the resulting indicator is expressed in monetary units instead of a percentage. This paper presents a methodology that adjusts the final value of each of the components of the OEE based on costs (OEE_{AxC}), expressing the indicator as percentage, and is applied in a metal-mechanical company to a steel cutting machine.

EFETIVIDADE GERAL DE EQUIPAMENTOS (OEE) AJUSTADO POR CUSTOS

Carlos A. Díaz-Contreras, David A. Catari-Vargas, Corazon De Jesús Murga-Villanueva, Gabriela A. Díaz-Vidal e Vania F. Quezada-Lara

RESUMO

O sucesso das metodologias de fabricação moderna, tais como Lean Manufacturing ou TPM (Total Productive Maintenance), dependem principalmente da medição precisa e da análise dos dados de produção. O conceito de OEE (Overall Equipment effectiveness) nasce como um KPI (indicador chave de desempenho) associado ao programa padrão de melhora da produção TPM. A vantagem do OEE diante de outras razões, é que mede, em um único indicador, mediante uma porcentagem, todos os parâmetros fundamentais na produção industrial: disponibilidade, rendimento e qualidade. Desde sua criação, nos

anos 80, sua principal crítica tem sido que os três componentes têm igual importância; por isso, tem se desenhado distintas propostas de como modificar as ponderações, algumas delas baseadas nos custos, ainda que nestes casos o indicador resultante se expressa em unidades monetárias e não em porcentagem. Neste trabalho se apresenta uma metodologia, que ajusta o valor final de cada um dos componentes do OEE, baseada em custos (OEE_{AxC}), expressando o indicador em porcentagem, que posteriormente se aplica em um equipamento de corte de aço de uma empresa do segmento Metal Mecânico.

prácticas de gestión con el fin de lograr una vista equilibrada de la disponibilidad de proceso, calidad y rendimiento.

El indicador OEE es un método de medición de la efectividad productiva con un resultado porcentual y que integra datos tales como la disponibilidad del equipamiento, el rendimiento y la tasa de calidad que se logra (Belohlavek, 2006):

$$OEE = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad} \quad (1)$$

donde la explicación y cálculo de cada uno de sus componentes en una máquina que produce un único producto es:

Disponibilidad: Proporción de tiempo que la máquina estuvo lista para operar o producir respecto al tiempo planificado de producción, es decir,

mide el tiempo realmente productivo (Alonso, 2009):

$$\text{Disponibilidad (D)} = \frac{\text{TPdP} - \text{Paradas y/o Averías}}{\text{TPdP}} \quad (2)$$

donde TPdP: tiempo planificado de producción.

Rendimiento: Muestra el correcto aprovechamiento de la capacidad de la máquina en el tiempo que estuvo operativa. Las disminuciones del rendimiento son provocadas generalmente por pequeñas paradas o por variaciones de la velocidad, a valores menores que la capacidad nominal de la máquina. (Belohlavek, 2006):

$$\text{Rendimiento (R)} = \frac{\text{Total unidades producidas}}{\text{TdO} \times \text{Cn}} \quad (3)$$

donde Total unidades producidas = (TdOxCn - unidades no producidas), siendo TdO: tiempo de operación y Cn: capacidad

nominal. Capacidad nominal de la máquina es la que brinda el fabricante expresadas en unidades producidas/unidad de tiempo.

Calidad: Cuántas unidades producidas dentro de los parámetros de calidad establecido respecto al total de producción realizada, sean productos buenos o malos (Belohlavek, 2006). Las unidades producidas pueden ser buenas, de segunda y malas. OEE solo toma en cuenta las unidades buenas producidas a la primera, no las de segunda, por lo que éstas se consideran como unidades malas. La calidad resulta de dividir las piezas buenas producidas por el total de piezas producidas incluyendo piezas reprocessadas y desechadas:

$$\text{Calidad (C)} = \frac{\text{Total de unidades buenas}}{\text{Total de unidades producidas}} \quad (4)$$

Tanto la Disponibilidad, el Rendimiento y la Calidad son valores entre 0 y 1, por lo tanto, el OEE también se encuentra en el rango [0; 1] pero se suele expresar en porcentaje. El valor obtenido del OEE tiene un significado y refleja un calificativo para la maquinaria, lo cual permite clasificar una o más líneas de producción, o toda una planta, con respecto a las mejores de su clase y que ya han alcanzado el nivel de excelencia. En general, este indicador se clasifica en cinco rangos (Tabla I).

Aunque OEE pareciera ser un indicador de medición de efectividad completo, su principal crítica tiene que ver con las ponderaciones. El indicador OEE especifica los pesos de cada componente de manera equivalente, lo que significa que todos tienen la misma importancia

TABLA I
CLASIFICACIÓN DEL OEE

OEE	Valoración	Descripción
OEE<65%	Deficiente (Inaceptable)	Se producen importantes pérdidas económicas. Existe muy baja competitividad.
65%≤OEE<75%	Regular	Aceptable sólo si se está en proceso de mejora. Se producen pérdidas económicas. Existe baja competitividad.
75%≤OEE<85%	Aceptable	Debe continuar la mejora para alcanzar una buena valoración. Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
85%≤OEE <95%	Buena	Entra en valores de Clase Mundial. Buena competitividad.
95%≤OEE≤100%	Excelente	Valores de Clase Mundial. Alta competitividad.

Fuente: Cruelles (2010).

para su cálculo. Según Raouf (1994), existe una diferencia en el peso de los componentes del OEE; además, las pérdidas asociadas a cada componente son totalmente diferentes, debido a que la tasa de disponibilidad está asociada a la pérdida de tiempo, el rendimiento se preocupa de las pérdidas de velocidad y la tasa de calidad está definida como las pérdidas de calidad.

Variaciones de OEE

Pintelon y Muchiri (2008) señalan que la aplicación industrial de OEE, como lo es hoy, varía de una industria a otra. Si bien la base de la medición de la efectividad se deriva del concepto original de OEE, los fabricantes han personalizado el OEE para que se ajuste a sus requisitos industriales particulares. El término OEE ha sido modificado en la literatura a otros términos diferentes con respecto al concepto de aplicación, entre ellos:

- Eficacia general de la fábrica (*Overall Factory Effectiveness* - OFE): Se desarrolló para medir la efectividad a nivel de fábrica, donde se instalan varios pasos de producción o máquinas para formar un proceso de producción. Mientras que OEE trata de alcanzar la excelencia en equipos individuales, OFE trata sobre las relaciones entre diferentes máquinas y procesos (Pintelon y Muchiri, 2008).
- Eficacia global del rendimiento (*Overall Throughput Effectiveness* - OTE): Mide la eficacia con que la gerencia de la planta está utilizando su capacidad de activos, considerando las pérdidas de tiempo por

inactividad planificadas (almuerzo/pausa, limpieza, mantenimiento preventivo, entrenamiento, reuniones de equipos, entre otros).

c) Eficacia general de los activos (*Overall Asset Effectiveness* - OAE): Identifica y mide todas las pérdidas asociadas con el proceso de producción general. Estas pérdidas de producción se cuantifican midiendo las pérdidas de tiempo (Pintelon y Muchiri, 2008).

d) Rendimiento total de la eficacia del equipo (*Total Equipment Effectiveness Performance* - TEEP): Invancic (1998) propuso este indicador, que es muy similar al OEE, donde la principal diferencia está en que este último es usado para máquinas que no son cuellos de botella, en cambio, el TEEP se aplica en equipos cuellos de botella o recursos críticos.

e) Eficacia del equipo de producción (*Production Equipment Effectiveness* - PEE): Raouf (1994) propuso este indicador para operaciones de producción de tipo discreto o secuencial:

$$PEE = A^{k_1} \times P^{k_2} \times Q^{k_3} \quad (5)$$

donde A: Disponibilidad, P: Efectividad del rendimiento, Q: Efectividad de la calidad, k_i : peso de los elementos PEE ($0 < k_i \leq 1$), y $\sum_{i=1}^3 k_i = 1$.

f) Efectividad total de la producción por peso (*Overall Weight Equipment Effectiveness* - OWEE): Wudhikarn (2010) planteó entregarle un peso determinado a cada componente de la fórmula original del indicador OEE, donde una persona autorizada perteneciente a la empresa

jerarquiza el peso de cada componente del indicador OEE, para luego aplicar el método *Rank Ordered Centroid* (ROC) de Edwards y Barron, 1994):

$$ROC: w_j = \frac{1}{n} \sum_{k=j}^n \left(\frac{1}{k}\right), j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

donde w_j : peso del j-ésimo componente, n: número de componentes, y

$$OWEE = w_D \times \text{Disponibilidad} + w_R \times \text{Rendimiento} + w_C \times \text{Calidad} \quad (7)$$

donde: w_D : peso del componente Disponibilidad; w_R peso del componente Rendimiento y w_C : peso del componente Calidad.

g) Extensión del OEE por Método Taguchi: Yuniawan *et al.* (2013) presentaron una propuesta de extensión del OEE ponderado utilizando el método de Taguchi, basándose en un enfoque mediante una simulación de procesos.

h) Efectividad general del equipo predictivo (*Predictive Overall Equipment Effectiveness* - POEE): Propuesto por Kao *et al.* (2016) para evaluar y monitorear la eficacia futura en un solo instrumento. El indicador OEE tradicional solo calcula una eficacia determinista; en cambio, POEE incluye además la efectividad predictiva en términos de tiempo de producción adicional, debido a una condición anormal de la máquina y la calidad del producto no deseada.

Variaciones del OEE considerando costos

Otros autores han propuesto variaciones del OEE considerando distintos tipos de costos

(de producción y/o de oportunidad). Entre ellos están:

a) Metodología del efecto gerencial contributivo por OEE: Hipkin y De Cock (2000) señalan que es importante calcular cuánto contribuye el indicador OEE al beneficio empresarial cuantitativamente, mediante el aumento del margen de contribución (MC). Esta metodología se centra en el incremento de productos buenos. Dado que los productos buenos son finalmente los bienes que salen al mercado, es decir, son los que se venden al cliente, el incremento de productos buenos es aproximadamente igual al incremento de productos que pueden ser vendidos al cliente (Kwoon, 1996).

b) Indicador *Overall Equipment Cost Loss* (OECL): Este indicador, propuesto por Wudhikarn *et al.* (2009) calcula las pérdidas usando los mismos factores del indicador OEE originalmente pero el resultado está representado en unidades monetarias. OECL mide las pérdidas para cada elemento diferente, dependiendo del consumo de recursos.

$$OECL = AL + PL + QL \quad (8)$$

donde: AL: pérdidas por Disponibilidad, PL: pérdidas por Rendimiento y QL: pérdidas por Calidad.

c) Indicador *Overall Equipment and Quality Cost Loss* (OEQCL): La mayoría de las organizaciones califican la calidad como el principal valor que le dan los clientes a los productos y servicios y como concepto clave de la estrategia empresarial, al momento de lograr una alta competitividad (Ross y Wegman, 1990). Para Bohan y Horney (1991), Ravitz (1991) y Carr (1992), la medición y el reporte de los costos de calidad (COQ) es el primer paso a seguir al desarrollar un programa de gestión de la calidad, debido a que la información que entrega dicha medición puede ser considerada como indicador de mayores oportunidades de acciones correctivas y para otorgar incentivos de mejora de la calidad.

Wudhikarn (2012) desarrolló el indicador OEQCL, el cual reúne la metodología del OECL, añadiendo las pérdidas por COQ:

$$\text{OEQCL} = \text{OECL} + \text{COQ} \quad (9)$$

Metodología

Los componentes del indicador OEE tienen igual importancia en su cálculo. Por ello, autores como Kwoon y Lee (2004), Wudhikarn *et al.* (2009) y Wudhikarn (2012, 2016) han propuesto distintas metodologías que incluyen los costos para reflejar la distinta importancia de los componentes, pero quedando el indicador final expresado en unidades monetarias. El indicador OEE es el resultado de multiplicar los valores obtenidos de la disponibilidad (D), del rendimiento (R) y de la calidad (C). En la Tabla II se muestra un ejemplo de cálculo del OEE para tres máquinas distintas.

En todas las máquinas el indicador OEE tiene un valor de 90% sin importar si el problema está en la disponibilidad, en el rendimiento o en la calidad. Al tener las tres máquinas el mismo OEE, tendrían la misma

prioridad para mejorarlas, pero ¿el impacto de cada una de ellas en los costos de la empresa es el mismo? Probablemente no, pero ello no queda reflejado en el indicador.

Si, por ejemplo, es la calidad la que tiene un mayor impacto en los costos, entonces el OEE de la máquina 3 debiese ser inferior a 90%. Ello priorizaría adecuadamente los equipos problemáticos.

Los métodos PEE (Raouf, 1994) y OWEE (Wudhikarn, 2010) tienen las ventajas de diferenciar la distinta importancia de la Disponibilidad, el Rendimiento y la Calidad; son fáciles de calcular e implementar en la empresa y, además, el resultado es un porcentaje. Pero por otro lado, tienen las desventajas que las importancias relativas deben ser determinadas por una persona calificada dentro de la empresa, con lo que este procedimiento es subjetivo y sus valores variarán dependiendo de quién los haga; además, sus resultados tienden a ser más altos y diferir bastante del OEE tradicional. Esto último se puede visualizar en las Tablas III y IV. En la Tabla III, para una máquina, la persona calificada

le ha asignado una importancia de 20% a la Disponibilidad, de 30% al Rendimiento y un 50% a la Calidad, las que constituyen las ponderaciones del método PEE. Para el método OWEE, usando la Ec. 7, las ponderaciones son:

$$w_D = \frac{1}{3} = 0,1111$$

$$w_R = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = 0,2778$$

$$w_C = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = 0,6111$$

En la Tabla IV los valores 0,912, 0,837 y 0,741 fueron asignados, en distintas combinaciones, a la Disponibilidad, Rendimiento y Calidad. En todos los casos el indicador OEE es de 56,56% sin importar la combinación. En cambio, usando las ponderaciones de la Tabla III, los resultados de los indicadores PEE y OWEE dependen de la combinación, cuando el valor 0,912 se le asigna a la Calidad (que en este caso, se asume como el más importante), PEE y OWEE también son más altos. Entregando una señal correcta, pero sus valores difieren mucho del OEE tradicional y se acercan bastante más al valor 100%, pudiendo interpretarse que la máquina tiene mayor efectividad quedando, probablemente, en una categoría más alta en su clasificación (Tabla I).

En la Tabla V, en la segunda columna se le asigna el valor de 0,9 a los tres componentes del OEE, es decir, una pérdida de 0,1 en cada uno de ellos (tercera columna). A continuación, se indican los costos asociados a esas pérdidas en dos

situaciones distintas: una en que cada pérdida es de 1000 unidades monetarias (um); y una segunda situación donde las pérdidas son distintas. Solo en el primer caso el OEE calculado como la multiplicación de los tres componentes estaría correcto, ya que cada componente afectaría por igual en los costos.

Metodología propuesta, OEE ajustado por costos (OEE_{axc})

Para ajustar el valor final de cada uno de los componentes del OEE en base a los costos se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Calcular el costo de cada uno de los componentes para un mismo nivel de pérdida.

Paso 2: Calcular la diferencial de costos entre el componente de menor costo y el componente i.

$$V_i = 1 - \frac{\text{Costo}_{\text{Componente menor costo}}}{\text{Costo}_{\text{Componente } i}} \quad (10)$$

donde V_i : diferencial de costo del componente i, e i: D, R, C.

Paso 3: Determinar el porcentaje en que se ajustará el valor original del componente i.

$$a_i = (1 - \text{Componente}_i) V_i \quad (11)$$

donde a_i : porcentaje de penalización al componente i.

Paso 4: Determinar el valor final del componente i ajustado por costos

$$\text{Componente}_i \text{ ajustado} = (1 - a_i) \text{Componente}_i \quad (12)$$

Ejemplo de cálculo de los ajustes

Paso 1) Si se considera un nivel de pérdida de 0,1 y los siguientes costos por esas pérdidas (Tabla VI)

$$\text{Paso 2) } V_D = 1 - \frac{1.000}{1.100} = 0,0909$$

$$V_R = 1 - \frac{1.000}{1.000} = 0,0000$$

$$V_C = 1 - \frac{1.000}{1.200} = 0,1667$$

$$\text{Paso 3) } a_D = (1 - 0,9)0,0909 = 0,0091$$

$$a_R = (1 - 0,9)0,0000 = 0,0000$$

$$a_C = (1 - 0,9)0,1667 = 0,0167$$

TABLA II
CÁLCULO DEL ÍNDICE OEE

Máquina	Disponibilidad	Rendimiento	Calidad	OEE
1	0,9	1,0	1,0	90%
2	1,0	0,9	1,0	90%
3	1,0	1,0	0,9	90%

TABLA III
PONDERACIONES SEGÚN EL INDICADOR

Ponderaciones	Disponibilidad	Rendimiento	Calidad
Indicador PEE	0,2000	0,3000	0,5000
Indicador OWEE	0,1111	0,2778	0,6111

TABLA IV
CÁLCULO DE DISTINTOS INDICADORES

Disponibilidad	Rendimiento	Calidad	OEE	PEE	OWEE
0,912	0,837	0,741	56,56%	80,12%	78,67%
0,912	0,741	0,837	56,56%	82,09%	81,87%
0,837	0,912	0,741	56,56%	80,81%	79,92%
0,837	0,741	0,912	56,56%	84,23%	85,62%
0,741	0,912	0,837	56,56%	83,82%	84,72%
0,741	0,837	0,912	56,56%	85,27%	87,22%

Paso 4)

$$\left. \begin{aligned} D_{ajustado} &= (1 - 0,0091)0,9 = 0,8918 \\ R_{ajustado} &= (1 - 0,0000)0,9 = 0,9000 \\ C_{ajustado} &= (1 - 0,0167)0,9 = 0,8850 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} OEE_{Original} &= 0,9 \times 0,9 \times 0,9 = 0,729 \\ OEE_{AxC} &= 0,8918 \times 0,9 \times 0,8850 = 0,7103 \end{aligned}$$

Al tener los tres componentes ajustados por costos, el OEE_{AxC} reflejará mejor la efectividad de la máquina, ya que los componentes que impliquen mayores costos para un mismo nivel de pérdidas

- b) Cálculo de los costos/beneficios por unidad (Tabla VIII)
- c) Cálculo de los costos mensuales (Tabla IX)
- d) Calcular las pérdidas por Disponibilidad

TABLA V
COSTOS POR PÉRDIDAS

Componentes	Valor	Pérdida	Costos por esa pérdida	
			Situación 1	Situación 2
Disponibilidad	0,9	0,1	1.000 um	1.100 um
Rendimiento	0,9	0,1	1.000 um	1.000 um
Calidad	0,9	0,1	1.000 um	1.200 um

tendrán un mayor impacto negativo en su cálculo, evitando sobreestimar el valor que se obtiene con el OEE original. En este método, el componente de menor costo mantiene su valor.

Mientras mayores sean las diferencias de costos, mayor será la diferencia entre ambos indicadores.

Caso Real: Aplicación y Resultados

La metodología propuesta se aplica en una empresa metal-mecánica. Los datos corresponden a una máquina de corte de acero, funcionando en un turno diario de 9h de lunes a viernes durante todo el mes de junio de 2019.

Para el cálculo de los costos asociados a las pérdidas de cada componente del indicador OEE se usará la metodología propuesta por Wudhikarn *et al.* (2009).

a) Cálculo de los parámetros de producción (Tabla VII):

Con los datos de la Tabla VII podemos obtener el indicador OEE original:

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{P_2 - P_1}{P_2} = \frac{176 - 8}{176} = 0,9545 \\ R &= \frac{P_3 \times P_3 - P_4}{P_3 \times P_3} = \frac{168 \times 24 - 144}{168 \times 24} = 0,9643 \\ C &= \frac{P_9 - P_8 - P_6}{P_9} = \frac{3.888 - 12 - 91}{3.888} = 0,9735 \end{aligned} \right\} OEE = 0,9545 \times 0,9643 \times 0,9735 = 89,61\%$$

Pérdidas por rechazo= Costo oportunidad+Costo materia prima directa+Otros costos= 13.741.000+32.760.000+96.875= \$46.597.875

Costo reproceso= (P₈)(U₃)= \$3.000.000

$$Otros\ Costos = \frac{P_8(\sum_{i=1}^9 G_i)}{(P_3)(P_7)} = \$12.775$$

Pérdidas por reprocesar= Costo reproceso+Otros costos= 3.000.000+ 12.775= \$3.012.775

Pérdidas por Calidad= Pérdidas por rechazo+Pérdidas por reprocesar=46.597.875+3.012.775= \$49.610.649

Con estos datos se puede empezar a aplicar la metodología propuesta en este trabajo:

Paso 1: Calcular los costos de los tres componentes para un

mismo nivel de pérdidas (Tabla X). Para ello, se modifican los tiempos de pérdida (P₁), las unidades no producidas (P₄), el número de unidades a reprocesar (P₈) y el número de unidades rechazadas (P₆) (columnas 1, 2 y 3), de modo que los valores de la Disponibilidad, Rendimiento y Calidad sean iguales (columnas 4, 5 y 6). Las pérdidas que corresponden a esos valores de los componentes se muestran en las columnas 7, 8 y 9. En el caso del componente Calidad, existen infinitas combinaciones entre P₆ y P₈ que podrían generar un mismo valor de pérdida, por lo que a partir de los datos de entrada, se determinó que P₆= 7,5833P₈ y esa relación se mantuvo durante todo el análisis.

TABLA VI
COSTOS POR UNA PÉRDIDA DE 10%

Componentes	Valor	Pérdida	Costos por esa pérdida
Disponibilidad	0,9	0,1	1.100 um
Rendimiento	0,9	0,1	1.000 um
Calidad	0,9	0,1	1.200 um

TABLA VII
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN

P ₁	Paradas y/o averías (h)	8
P ₂	Tiempo planificado de producción (h)	176
P ₃	Capacidad nominal (u/h)	24
P ₄	Unidades no producidas (u)	144
P ₅	Tiempo de operación (h)	168
P ₆	Número unidades rechazadas (u)	91
P ₇	Tiempo de operación neto (h)	162
P ₈	Número unidades a reprocesar (u)	12
P ₉	Producción real (u)	3.888

h: horas, u: unidades.

TABLA VIII
COSTOS/BENEFICIOS POR UNIDAD (\$)

U ₁	Utilidad	151.000
U ₂	Materia prima directa	360.000
U ₃	Reprocesar	250.000

TABLA IX
COSTOS MENSUALES (\$)

G ₁	Mano obra directa	1.400.000
G ₂	Materia prima indirecta	214.000
G ₃	Mano obra indirecta	170.000
G ₄	Preparación	380.000
G ₅	Depreciación	830.000
G ₆	Mantenimiento	675.000
G ₇	Alquiler	0
G ₈	Seguro	190.000
G ₉	Bienestar al personal	280.000

TABLA X
COSTO DE CADA COMPONENTE PARA UN MISMO NIVEL DE PÉRDIDAS

P ₁	P ₄	P ₈	Valores Componentes			Pérdidas por Componentes (\$)		
D	R	C	D	R	C	D	R	C
8,00	183,46	20,52	0,9545	0,9545	0,9545	29.153.136	27.880.444	84.834.211
6,28	144,00	15,72	0,9643	0,9643	0,9643	22.896.873	21.884.179	64.989.951
4,66	106,85	12,00	0,9735	0,9735	0,9735	16.996.279	16.238.061	49.610.649

TABLA XI
DESARROLLO DE LOS ÚLTIMOS TRES PASOS

Paso 2			Paso 3			Paso 4		
D	R	C	D	R	C	D	R	C
0,0437	0,0000	0,6714	0,0020	0,0000	0,0305	0,9526	0,9545	0,9254
0,0442	0,0000	0,6633	0,0016	0,0000	0,0237	0,9628	0,9643	0,9414
0,0446	0,0000	0,6727	0,0020	0,0000	0,0178	0,9723	0,9735	0,9562

Pasos 2, 3 y 4: Estos tres pasos se muestran en la Tabla XI.

Resultados

La metodología fue aplicada en una máquina de corte de acero de una empresa metalmeccánica, con los datos de junio de 2019. En ella, los valores de los componentes del OEE que tienen mayor incidencia en los costos se disminuyen en forma proporcional, recibiendo un mayor impacto el componente más relevante en costos. En la aplicación, los componentes Disponibilidad y Calidad son los que tienen mayor incidencia en los costos; por ello, el valor de la Disponibilidad se reduce desde 0,9545 a 0,9526 y la Calidad se reduce desde 0,9735 a 0,9562. En cambio, el Rendimiento permanece igual (por ser el componente de menor costo). Con los valores obtenidos en el cuarto paso se puede calcular el OEE_{AXC} como $OEE_{AXC} = 0,9526 \times 0,9643 \times 0,9562 = 87,84\%$.

Mientras el método OEE tradicional obtiene un valor de 89,61%, el método propuesto genera un valor menor (87,84%), lo cual induce a poner mayor atención y priorizar por mejorar los componentes que tienen mayor impacto en los costos para esa máquina, situación diferente a la que ocurre con los métodos PEE y OWEE.

Conclusiones

La principal crítica al indicador OEE está en que todos sus componentes tienen igual importancia. Autores como Raouf (1994) y

Wudhikarn (2010) han diseñado metodologías que no ponderan por igual a los tres componentes del OEE (como por ejemplo, métodos PEE y OWEE; Tabla IV), pero esas ponderaciones no necesariamente están basadas en los costos que implican que una máquina no rinda en un 100%. Otros autores como Kwoon, 1996; Wudhikarn *et al.*, 2009 y Wudhikarn, 2012 han introducido los conceptos de costos y beneficios pero sus resultados se expresan en unidades monetarias.

En este trabajo se propuso la metodología OEE_{AXC}, que ajusta la Disponibilidad, el Rendimiento y la Calidad, en base a los costos que implica que estos componentes no estén operando a un 100%. A diferencia de las metodologías PEE y OWEE, donde sus ponderaciones son subjetivas y no necesariamente basadas en los costos, la metodología propuesta es totalmente objetiva y al generar valores menores que el OEE tradicional induce a enfocar los esfuerzos de mejoramiento en los componentes más críticos (los que generan mayores costos), señal opuesta a las que entregan PEE y OWEE.

La metodología OEE_{AXC} es fácil de calcular y solo requiere datos que normalmente existen en todas las empresas, como son los datos de producción y datos financieros que pueden ser obtenidos de la contabilidad de costos de la empresa.

REFERENCIAS

Alonso HL (2009) Una herramienta de mejora, el OEE (Efectividad Global del Equipo). *Contrib.*

- Econ.* (2009-10). <http://www.eu-med.net/ce/2009b/hlag.htm>.
- Badiger A, Gandhinathan R (2008) A proposal: evaluation of OEE and impact of six big losses on equipment earning capacity. *Int. J. Proc. Manag. Benchmark.* 2: 234-248.
- Bamber C, Sharp J, Hides M (1999) Factors affecting successful implementation of total productive maintenance. *J. Qual. Mainten. Eng.* 5: 162-181.
- Belohlavek P (2006) *OEE: Overall Equipment Effectiveness*. 1ª ed. Blue Eagle. Buenos Aires, Argentina. 230 pp.
- Bohan GP, Horney NF (1991) Pinpointing the real cost of quality in a service company. *Nat. Product. Rev.* 10: 309-317.
- Carr LP (1992) Applying cost of quality to a service business. *Sloan Manag. Rev.* 33(4): 72-77.
- Cruelles JA (2010) *La Teoría de la Medición del Despilfarro*. 2ª ed. Artef. Toledo, España. 226 pp.
- Edwards W, Barron FH (1994) Smarts and Smarter: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizat. Behav. Human Decis. Proc.* 60: 306-325.
- Hipkin I, De Cock C (2000) TQM and BPR: lessons for maintenance management. *Omega: Int. J. Manag. Sci.* 28: 277-292.
- Hutchins D (1998) Introducing TPM. *Manufact. Eng.* 77: 34-39.
- Ivancic I (1998) Development of maintenance in modern production. *Euromaintenance '98 Conf. Proc.* Dubrovnik, Croatia.
- Kao Y, Chang S, Dauzère-Pérès S, Blue J (2016) Opportunity for improving fab effectiveness by predictive overall equipment effectiveness (POEE). *e-Manufacturing and Design Collaboration Symposium 2016*. National Taiwan University, Taipei.
- Kwoon O, Lee H (2004) Calculation methodology for contributive managerial effect by OEE as a result of TPM activities. *J. Qual. Maint. Eng.* 10: 263-272.
- Kwoon O (1996) Reserach on the effective program of TPM producing the more managing profits. *J. Kor. Inst. Plant Eng.* 1: 315-326.
- Martos F, Navarro J, Bullesos M, Gassó T, Barros M (2006) *Gestión de la Función Administrativa del Servicio Gallego de Salud*. Vol. 4. 1ª ed. Mad. España. 170 pp.
- Nakajima S (1988) *Introduction to Total Productive Maintenance*. Productivity Press, Cambridge, MA, EEUU. 129 pp.
- Pintelon L, Muchiri P (2008) Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *Int. J. Prod. Res.* 46: 3517-3535.
- Raouf A (1994) Improving capital productivity through maintenance. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 14(7): 44-52.
- Ravitz L (1991) The cost of quality: a different approach to noninterest expense management. *Financial Managers' Statement*, 13(2), 8-13.
- Ross JE, Wegman DE (1990) Quality management and the role of the accountant. *Industrial Management*, 32(4), 21-23.
- Wudhikarn R (2010) Overall Weighting Equipment Effectiveness. *2010 IEEE Int. Conf. Industrial Engineering and Engineering Management*. Macao. pp. 23-27.
- Wudhikarn R (2012) Improving overall equipment cost loss adding cost of quality. *Int. J. Prod. Res.* 50: 3434-3449.
- Wudhikarn R (2016) Implementation of the overall equipment cost loss (OECL) methodology for comparison with overall equipment effectiveness (OEE). *J. Qual. Maint. Eng.* 22: 81-93.
- Wudhikarn R, Manopiniwes W, Smithikul C (2009) Developing overall equipment cost loss indicator. *Adv. Intell. Soft Comput.* 66: 557-567.
- Yuniawan D, Ito T, Bin M (2013) Calculation of overall equipment effectiveness weigh by Taguchi method with simulation. *Concurr. Eng. Res. Applic.* 21: 296-306.