



## VII Congresso de Sistemas LEAN

"Contribuições do Lean à gestão em tempos de crise"

### **Método para a avaliação do desempenho de sistemas de manutenção produtiva total: Complementando o OEE com foco em sustentabilidade**

**João Felipe Fraga Bianchi (UFF) – joaoffb@gmail.com**

**Hélder Gomes Costa (UFF) – helder.uff@gmail.com**

#### **Resumo:**

**Objetivo(s):** O propósito desse artigo é apresentar uma metodologia para avaliar o desempenho do sistema de Total Productive Maintenance (TPM) considerando, não somente a dimensão econômica, mas também as demais dimensões da sustentabilidade.

**Metodologia/abordagem:** A metodologia apresentada leva em consideração as dimensões econômica, social e ambiental do processo de manutenção, buscando os fatores que mais impactam cada dimensão. A metodologia ainda normaliza os indicadores obtidos permitindo realizar comparações entre fatores heterogêneos.

**Resultados:** O modelo desenvolvido nesse artigo permite a avaliação simultânea das 3 dimensões de sustentabilidade com base em resultados históricos, permitindo a criação de um índice para medir o desempenho de sistemas TPM ao longo do tempo.

**Implicações práticas:** Há poucos artigos que consideram as dimensões de sustentabilidade no desempenho dos processos de manutenção. São ainda mais raros os artigos que visam comparar diferentes períodos temporais e diferentes dimensões de sustentabilidade entre si. O presente trabalho visa sanar essa dificuldade, facilitando a avaliação dos processos de manutenção com base no desempenho histórico dos equipamentos.

**Palavras-chave:** Total productive maintenance; Sustentabilidade; TPM; Manutenção; Desempenho.

#### **Abstract:**

**Aims(s):** The objective of this paper is to present a methodology to evaluate the performance of the total productive maintenance (TPM) system, considering not only the economic dimension, but also the social and environmental dimensions of sustainability.



**Methodology:** The methodology takes into account the economic, social and environmental dimensions of the maintenance process, searching for most impacting factors of each dimension. The methodology is able to compare heterogeneous factors.

**Results:** The model developed in this article is able to evaluate simultaneously all the three dimensions of sustainability based on historical results, allowing the creation of an index to measure the performance of TPM systems over time.

**Practical Implications:** There are few articles regarding all three dimensions of sustainability in maintenance processes performance. Articles that compare different time periods and different dimensions of sustainability with one another are even rarer. The present work aims to solve this difficulty, facilitating the evaluation of the maintenance processes based on the historical performance of the equipment.

**Keywords:** Total productive maintenance; Sustainability; TPM; Maintenance; Performance.

## 1. Introdução

Shah e Ward (2007) desenvolveram um trabalho no intuito de definir o conceito de lean production e quantificá-lo. Ao final, concluiu-se que essa filosofia de trabalho é definida por dez fatores, dentre os quais encontra-se o modelo de Total Productive Maintenance (TPM).

O trabalho de Abdulmalek e Rajgopal (2007) cita o TPM como uma das ferramentas da Lean Production, e o utiliza para calcular o benefício total que a adoção dessas ferramentas pode trazer à organização. No entanto, sua avaliação trata apenas do aumento da efetividade geral do equipamento (Overall Equipment Effectiveness – OEE), indicador de desempenho preconizado pelo modelo OEE. Esse indicador leva em conta exclusivamente os fatores de disponibilidade, produtividade e qualidade, todos relacionados a fatores econômicos.

Tipicamente as métricas de desempenho de manutenção envolvem primariamente a efetividade, evidenciando uma preocupação mais econômica (Pires et al., 2016). Um sintoma dessa priorização é a reduzida quantidade de artigos que consideram os outros pilares da sustentabilidade nos trabalhos levantados por Ahuja e Khamba (2015), Parida et. Al. (2015), Kumar J. et al (2013) e Kumar U. et al (2013) em suas revisões bibliográficas.

Recentemente, no entanto, alguns trabalhos têm levado em consideração as dimensões ambientais e sociais na elaboração de um sistema de métricas para manutenção, como são os casos de Domingo e Aguado (2015), Sari et al. (2015), Pires et al. (2016) e Sénéchal (2016).

O presente trabalho tem por objetivo a elaboração de uma metodologia capaz de avaliar o desempenho de sistemas TPM, do ponto de vista da sustentabilidade de forma ampla. Isto é, considerando as dimensões econômica, ambiental e social, de forma equilibrada. Esta



metodologia permitiria avaliar o desempenho dos equipamentos sendo mantidos ao longo do tempo e, conseqüentemente, a qualidade do processo de manutenção.

Para propor a metodologia de avaliação de desempenho de equipamentos e processos de manutenção, serão considerados na sessão 2 aspectos relevantes acerca do modelo TPM, e ainda discorre sobre as métricas de sustentabilidade e adaptações de modelos tradicionais, priorizando as dimensões sociais e ambientais. Na sessão 3 será proposto um novo conjunto de indicadores de desempenho, resultado das análises construídas nas sessões anteriores e o modelo proposto, capaz de transformar os indicadores em um índice global de desempenho em manutenção em cada dimensão, visando a comparação do desempenho ao longo do tempo. A sessão 4 consiste na apresentação de resultados hipotéticos da aplicação desse método para a avaliação de desempenho de manutenção de turbinas ao longo de cinco anos. Ao final do trabalho, a sessão 5 pondera sobre conclusões que podem ser tomadas a partir desta metodologia.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. O modelo TPM

O modelo TPM foi desenvolvido por Nakajima, em 1988 visando maximizar a efetividade dos equipamentos, envolvendo desde os níveis gerenciais mais altos até o chão de fábrica, em diversos setores da organização e deve ser aplicado durante todo o ciclo de vida do equipamento (SHARMA, 2006).

Esse modelo mede a efetividade dos equipamentos por meio de um indicador conhecido como OEE – Overall Equipment effectiveness. Ele é formado a partir da medição dos aspectos de disponibilidade, desempenho e qualidade, conforme a figura 1.

A taxa de disponibilidade considerada pelo OEE é dada por:

$$a) D = (\text{Tempo de carregamento} - \text{perdas de disponibilidade}) / (\text{Tempo de carregamento})$$

A taxa de desempenho pode ser obtida por:

$$b) P = (\text{Tempo de ciclo} \times \text{total de itens}) / (\text{Tempo de operação})$$

Já a taxa de qualidade do equipamento é expressa por:

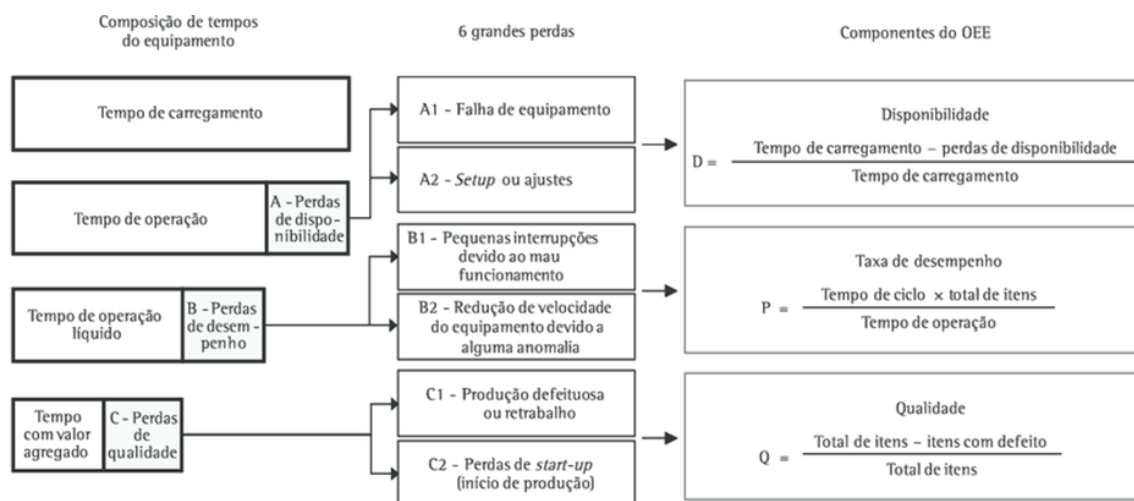
$$c) Q = (\text{Total de itens} - \text{itens com defeito}) / (\text{Total de itens})$$

Desta forma, a efetividade geral do equipamento é definida como o produto da disponibilidade pelo o desempenho e pela qualidade, cujos valores estão entre 0 e 1.

$$d) OEE = D \times P \times Q$$



Figura 1 – Composição do indicador OEE



Fonte: Busso e Miyake, 2013

No entanto, com o desenvolvimento de conceitos de sustentabilidade, muito vem sendo debatido sobre a necessidade de incorporar novos aspectos a este modelo, como a medição de desempenho nas dimensões social e ambiental.

## 2.2. Sustentabilidade e manutenção

Com o aumento global da preocupação quanto a questões de sustentabilidade, vêm sendo desenvolvidos métodos capazes de medir o desempenho dos equipamentos nas dimensões ambientais e sociais, além da econômica já tradicionalmente medida.

O trabalho de Domingo e Aguado (2015), busca adaptar o modelo tradicional, representado pelo OEE para considerar a dimensão ambiental, criando o chamado OEEE – Overall Environmental Equipment Effectiveness.

Este novo modelo é obtido multiplicando a efetividade tradicional pelo desempenho ambiental, conforme a equação e.

e)  $OEEE = OEE \times \text{Sustentabilidade}$

A taxa de sustentabilidade defendida pelos autores é dada por:

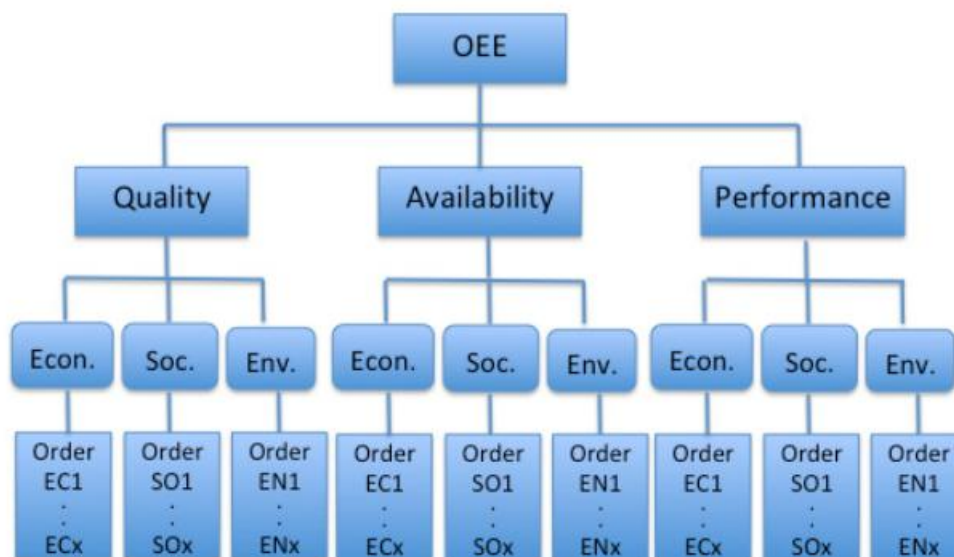
f)  $\text{Sustentabilidade} = 1 - (\text{Impacto ambiental após a produção} / \text{Impacto ambiental antes da produção})$

A dificuldade em adotar essa metodologia é mensurar os impactos gerados pela produção, uma vez que eles podem assumir diferentes formas, como poluição, redução da biodiversidade, entre outras. O autor sugere a transformação de todos esses itens para a mesma unidade, e exemplifica a utilização de equivalência em produção de CO<sub>2</sub>.



Pires et al. (2016) também desenvolveu um conjunto de indicadores com base no OEE para tratar os efeitos do equipamento sobre as dimensões ambientais e sociais. Sua sugestão é de que sejam avaliados esses aspectos dentro de cada item do OEE tradicional. O modelo sugerido pode ser ilustrado conforme a figura 2:

Figura 2 – Indicador OEE modificado



Fonte: Pires et. al, 2016

A partir desse modelo, foram levantados os objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela Global Reporting Initiative – GRI, e enviados questionários a especialistas, buscando associar pesos que correlacionem cada objetivo a um aspecto do OEE, de forma a possibilitar a medida separada. Dessa forma seria possível traduzir os objetivos do OEE para as 3 dimensões de sustentabilidade.

### 3. Método Proposto

#### 3.1. Seleção dos indicadores de desempenho

O conjunto de indicadores de desempenho proposto nesse artigo passa pelo desenvolvimento de métricas para avaliação separadamente das 3 dimensões. Entende-se que há benefícios em realizar esta distinção, uma vez que, de acordo com a estratégia adotada pela companhia, pode-se priorizar metas em uma dimensão específica. Dessa forma o modelo proposto resultará em um índice para cada esfera do triple bottom line.

Na dimensão econômica será mantido o OEE como o índice de desempenho. A grande vantagem de utilizar essa métrica é que ela permite mensurar como o tempo planejado para



funcionamento dos equipamentos foi efetivado na forma de volume produzido de itens capazes de atender aos requisitos de qualidade.

Para a dimensão ambiental, é importante considerar a eficiência de utilização dos recursos, impactos à biodiversidade, poluição gerada, volume de material descartado, entre outros aspectos relevantes. Nesta dimensão é fundamental que as métricas estejam adequadas à natureza de impactos provocados pela atividade produtiva, considerando, por exemplo, os impactos da fertilização na atividade agrícola e de eventuais derramamentos de óleo na atividade petrolífera.

No que tange à dimensão social, deve-se levar em consideração os indivíduos impactados pelo processo produtivo, considerando os riscos e danos à saúde dos funcionários, clientes e da sociedade como um todo. Exemplos de indicadores para essa dimensão seriam a quantidade de afastamentos e de incidentes, os níveis de poluição sonora, eventuais impactos no turismo, preços de imóveis, atividades da comunidade em que a companhia está inserida, etc.

### 3.2. Construção do índice para mensurar os indicadores

Uma vez que sejam definidos os indicadores avaliados dentro de cada dimensão, serão medidos os resultados de cada equipamento ( $i=1, \dots, n$ ) em cada período ( $j=1, \dots, p$ ), obtendo-se um conjunto de valores “x” para os “q” indicadores ambientais ( $x_{kij} = x_{1ij}, \dots, x_{qij}$ ) e outro conjunto de valores “y” para os “r” indicadores sociais ( $y_{lij} = y_{1ij}, \dots, y_{rij}$ ), bem como o OEE ( $OEE_{ij}$ ) associado a cada equipamento e período em questão.

Inicialmente os indicadores precisam ser transformados utilizando a amplitude dos valores, conforme as equações g, h e i. Esse método permite sua comparação, mesmo utilizando diferentes unidades.

$$g) a_{kij} = (x_{kij} - x_{k-\min}) / (x_{k-\max} - x_{k-\min}) \text{ para todo } k, i, j.$$

$$h) b_{lij} = (y_{lij} - y_{l-\min}) / (y_{l-\max} - y_{l-\min}) \text{ para todo } l, i, j.$$

$$i) c_{ij} = (OEE_{ij} - OEE_{\min}) / (OEE_{\max} - OEE_{\min}) \text{ para todo } i, j.$$

É importante observar que as dimensões social e ambiental podem apresentar indicadores indesejáveis (quanto menor, melhor) que não se adequam às equações acima. Nestes casos, a sugestão é utilizar as equações j e k.

$$j) a_{kij} = 1 - ((x_{kij} - x_{k-\min}) / (x_{k-\max} - x_{k-\min})) \text{ para todo } k, i, j.$$

$$k) b_{lij} = 1 - ((y_{lij} - y_{l-\min}) / (y_{l-\max} - y_{l-\min})) \text{ para todo } l, i, j.$$



Para facilitar a comparação de equipamentos e períodos selecionados após a geração inicial dos indicadores, os valores mínimos e máximos não devem ser atualizados, sendo sempre referentes aos valores iniciais. Dessa forma, pode haver equipamentos com desempenho de valor superior a um, caso ultrapassem os equipamentos e períodos inicialmente considerados, ou valores negativos caso o desempenho seja inferior ao mínimo.

A cada um dos indicadores ambientais transformados, estará associado um peso “ $\alpha$ ” ( $\alpha_k = \alpha_1, \dots, \alpha_q$ ) cujas somas são 1. Analogamente, cada indicador social também estará associado a um peso “ $\beta$ ” ( $\beta_l = \beta_1, \dots, \beta_r$ ), e a soma desses pesos também será 1. Por ser o único indicador econômico, o peso do OEE, “ $\gamma$ ”, será 1.

l)  $\alpha_1 + \dots + \alpha_q = 1$

m)  $\beta_1 + \dots + \beta_r = 1$

n)  $\gamma = 1$

Obtidos os pesos dos indicadores e os valores transformados de cada indicador para cada equipamento em determinado período observado, o desempenho dos equipamentos nas dimensões ambiental, social e econômica serão, respectivamente:

o)  $Amb_{ij} = \sum \alpha_k a_{kij}$  para todo  $k, i, j$ .

p)  $Soc_{ij} = \sum \beta_k b_{kij}$  para todo  $k, i, j$ .

q)  $Eco_{ij} = c_{ij}$  para todo  $k, i, j$ .

De posse dos resultados de cada equipamento, em cada período, para cada dimensão é possível plotá-los em um gráfico, evidenciando a diferença de desempenho. É possível também resumi-los usando a média dos 3 resultados.

#### 4. Resultados

A fim de exemplificar o método desenvolvido, será conduzida uma avaliação hipotética do processo de manutenção de 3 turbinas idênticas geradoras de energia elétrica ao longo de 5 anos, divididos em períodos de 1 ano.

Os indicadores escolhidos para observar as dimensões foram:

- ✓ Dimensão econômica: Será utilizado o indicador OEE, com o destaque de que pode ser necessário adaptar o conceito de qualidade para a produção de energia conforme especificação, considerando possíveis oscilações e demais desvios;



- ✓ Dimensão ambiental: Neste caso serão considerados os indicadores de eficiência energética (EfE) em percentual, quantidade de material descartado (KgD) em Kg, e massa de CO2 equivalente gerada (TonC) em ton.
- ✓ Dimensão social: Serão considerados como indicadores a quantidade de incidentes registráveis durante o período (QI) em unidades, a quantidade de falhas durante o período (QF) em unidades, e o nível de poluição sonora médio durante o funcionamento (dB) em dB. Apesar de a poluição sonora se tratar de um tipo de poluição, o principal fator de impacto é na saúde dos profissionais que trabalham na unidade, por isso esse indicador foi inserido entre os fatores sociais.

Foram gerados valores aleatórios, a fim de testar o índice para comparar diferentes equipamentos e períodos. Estes valores estão apresentados na tabela 1.

E, por último, a taxa de qualidade do equipamento é expressa por:

$$r) Q = (\text{Total de itens} - \text{itens com defeito}) / (\text{Total de itens})$$

Desta forma, a efetividade geral do equipamento é definida como o produto da disponibilidade pelo o desempenho e pela qualidade, cujos valores estão entre 0 e 1.

$$s) OEE = D \times P \times Q$$

Tabela 1 – Valores dos indicadores

		Econômico	Ambiental			Social		
		OEE	EfE	KgD	TonC	Qi	Qf	dB
T u r b i n a 1	Ano 1	0,75	59,0%	292	1272	4	6	93
	Ano 2	0,79	59,3%	613	1242	0	1	89
	Ano 3	0,8	58,8%	244	1305	1	3	98
	Ano 4	0,77	60,9%	694	1201	3	5	94
	Ano 5	0,8	58,8%	649	1220	3	4	97
T u r b i n a 2	Ano 1	0,75	58,5%	414	1775	4	1	100
	Ano 2	0,73	58,4%	149	1445	2	0	94
	Ano 3	0,78	58,8%	217	1301	0	1	96
	Ano 4	0,75	58,6%	313	1460	1	2	98
	Ano 5	0,77	58,3%	263	1734	0	1	96
T u r b i n a 3	Ano 1	0,8	59,3%	554	1344	2	5	87
	Ano 2	0,82	59,8%	238	1681	1	2	82
	Ano 3	0,81	60,5%	174	1672	3	4	87
	Ano 4	0,85	59,7%	616	1643	1	7	84
	Ano 5	0,78	60,2%	188	1247	0	0	99
Peso		100%	50%	15%	35%	40%	30%	30%

Fonte: O autor

De posse dos valores individuais tratados para cada indicador e dos pesos dos indicadores, definidos de acordo com as metas da organização respeitando as equações de 1 a





n, foram utilizadas as equações de o a q para construir os indicadores consolidados das 3 dimensões:

**Tabela 2 – Valores dos indicadores após tratamento**

		Econômico	Ambiental			Social		
		OEE	EfE	KgD	TonC	Qi	Qf	dB
T u r b i n a 1	Ano 1	17%	26%	74%	88%	0%	14%	39%
	Ano 2	50%	38%	15%	93%	100%	86%	61%
	Ano 3	58%	19%	83%	82%	75%	57%	11%
	Ano 4	33%	100%	0%	100%	25%	29%	33%
	Ano 5	58%	20%	8%	97%	25%	43%	17%
T u r b i n a 2	Ano 1	17%	6%	51%	0%	0%	86%	0%
	Ano 2	0%	2%	100%	57%	50%	100%	33%
	Ano 3	42%	17%	88%	83%	100%	86%	22%
	Ano 4	17%	9%	70%	55%	75%	71%	11%
	Ano 5	33%	0%	79%	7%	100%	86%	22%
T u r b i n a 3	Ano 1	58%	37%	26%	75%	50%	29%	72%
	Ano 2	75%	59%	84%	16%	75%	71%	100%
	Ano 3	67%	87%	95%	18%	25%	43%	72%
	Ano 4	100%	53%	14%	23%	75%	0%	89%
	Ano 5	42%	75%	93%	92%	100%	100%	6%
Peso		100%	50%	15%	35%	40%	30%	30%

Fonte: O autor

**Tabela 3 – Indicadores finais por dimensão, equipamento e ano**

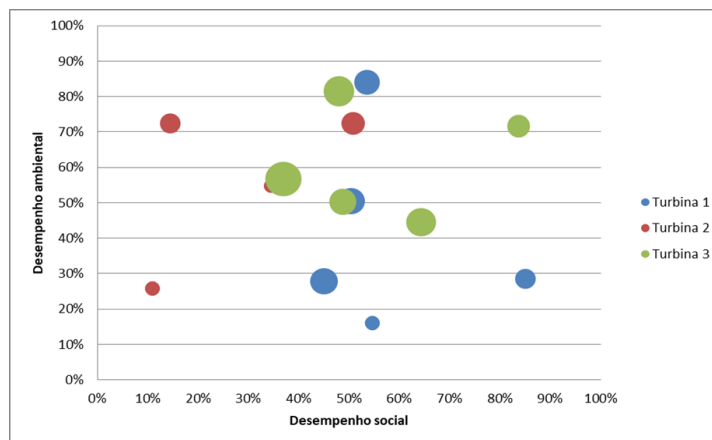
		Econômico	Ambiental	Social
T u r b i n a 1	Ano 1	17%	26%	0%
	Ano 2	50%	38%	100%
	Ano 3	58%	19%	75%
	Ano 4	33%	100%	25%
	Ano 5	58%	20%	25%
T u r b i n a 2	Ano 1	17%	6%	0%
	Ano 2	0%	2%	50%
	Ano 3	42%	17%	100%
	Ano 4	17%	9%	75%
	Ano 5	33%	0%	100%
T u r b i n a 3	Ano 1	58%	37%	50%
	Ano 2	75%	59%	75%
	Ano 3	67%	87%	25%
	Ano 4	100%	53%	75%
	Ano 5	42%	75%	100%
Peso		100%	50%	40%

Fonte: O autor

Os indicadores consolidados foram usados para construir um gráfico de bolhas, a fim de analisar como o desempenho nas 3 dimensões se relaciona. Neste gráfico foi usado o desempenho ambiental como eixo y, desempenho social como eixo x e o desempenho econômico está representado pelo tamanho das bolhas.



Figura 3 – Gráfico de desempenho dos equipamentos



Fonte: O autor

## 5. Conclusões

O modelo desenvolvido consegue, de forma simples, avaliar o desempenho dos equipamentos ao longo do tempo, e conseqüentemente do processo de manutenção.

A grande vantagem deste modelo é a capacidade de lidar indicadores muito distintos entre si, por meio da utilização da amplitude histórica como balizadora para o desempenho dos equipamentos. Desta forma, esse indicador é adequado para avaliar a sustentabilidade do processo de manutenção, por ser capaz de tratar de dimensões e indicadores de natureza consideravelmente diversa.

Em trabalhos futuros sugere-se a sua utilização em um problema real, aplicando essa metodologia para avaliar diferentes equipamentos, ou um mesmo equipamento ao longo do tempo. Dessa forma seria possível avaliar o impacto de modelos de manutenção e decisões estratégicas da companhia sobre o desempenho de seus equipamentos.

É importante avaliar ainda se este modelo mantém sua consistência ao tratar simultaneamente de unidades com escalas muito diferentes, como o caso dos decibéis, massa de CO2 gerada e eficiência energética, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

ABDULMALEK, Fawaz; RAJGOPAL, Jayant. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v. 107, p. 223–236, 2007.

AHUJA, I.P.S.; KHAMBA, J.S. Total productive maintenance: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 7, p. 709–756, 2008.



BUSSO, Christianne Matias; MIYAKE, Dario Ikuo. Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica. **Production**, v. 23, n. 2, p.205-225, 2012.

DOMINGO, Rosario; AGUADO, Sergio. Overall Environmental Equipment Effectiveness as a Metric of a Lean and Green Manufacturing System. **Sustainability**, v. 7, p. 9031-9047, 2015.

FRASER, Kym; HVOLBY, Hans-Henrik; TSENG, Tzu-Liang (Bill). Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence: A greater practical focus is needed. **International Journal of Quality & Reliability Management**, V. 32, n. 6, p. 635-664, 2015.

KUMAR, Jitendra; SONI, V.K.; AGNIHOTRI, Geeta. Maintenance Performance Metrics For Manufacturing Industry. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 136-142, 2013.

KUMAR, Uday; GALAR, Diego; PARIDA, Aditya; STENSTRÖM, Christer. Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 19, n. 3, p. 233-277, 2013.

PARIDA, Aditya; KUMAR, Uday; GALAR, Diego; STENSTRÖM, Christer. Performance measurement and management for maintenance: a literature review. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v. 21, n. 1, 2015.

PIRES, S. P.; Sénéchal, O.; Loures, E .F. R.; Jimenez, J. F. An approach to the prioritization of sustainable maintenance drivers in the TBL framework. **IFAC-PapersOnLine**, 49-28, p. 150–155, 2016.

SARI, Emelia; SHAHAROUN, Awaluddin Mohamed; MA`ARAM, Azanizawati; YAZID, A. Mohd. Sustainable Maintenance Performance Measures: a pilot survey in Malaysian Automotive Companies. **12th Global Conference on Sustainable Manufacturing**, p. 443-448, 2015.

SÉNÉCHAL, Olivier. Research directions for integrating the triple bottom line in maintenance dashboards. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, n. 1, p. 331-342, 2017.

SHAH, Rachna; WARD, Peter T. Defining and developing measures of lean production. **Journal of Operations Management**, v. 25, p.785-805.

SHARMA, Rajiv Kumar; KUMAR, Dinesh; KUMAR, Pradeep. Manufacturing excellence through TPM implementation: a practical analysis. **Industrial Management & Data Systems**, v. 106, n. 2, p.256-280.