

ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS *FUZZY* COMBINADA COM O *OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS* PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DE LINHAS DE PRODUÇÃO EM UMA EMPRESA DO SEGMENTO FARMACÊUTICO

Aneirson Francisco da Silva - aneirson@yahoo.com.br

Fernando Augusto Silva Marins - fmarins@feg.unesp.br

Erica Ximenes Dias - Ericaximenes@yahoo.com.br

Carlos Ushizima- caushizima@maxionsc.com

Igor Souza Barbosa- igor_makysb@hotmail.com

Murilo Strongoli- murilo.strongoli@gmail.com

Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá - UNESP
Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – 12516-410 – Guaratinguetá - SP

Rafael de Carvalho Miranda – mirandaprod@yahoo.com.br

Instituto de Engenharia de Produção e Gestão - UNIFEI

Av. BPS, 1303, bairro Pinheirinho, Itajubá - MG

Telefone: (35) 3629 - 1101 Fax: (35) 3622 - 3596

RESUMO

A indústria farmacêutica tem se tornando cada vez mais competitiva e, a implantação do Sistema Toyota de Produção, que visa à produção enxuta, se tornou comum entre as empresas do setor. O principal indicador utilizado para medir eficiência de máquinas, ou de linhas de produção, é o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), não sendo considerada a ocorrência de incertezas. Aqui foi aplicado o modelo *Fuzzy*-DEA BCC para analisar a eficiência das linhas de produção de uma empresa farmacêutica do Vale do Paraíba, incluindo-se a possibilidade de incerteza nos parâmetros envolvidos. Também foram comparados os novos valores de eficiência obtidos com aqueles calculados por meio do OEE. Percebeu-se que a concordância entre os dois métodos foi de aproximadamente 57% e a linha de produção considerada mais eficiente pelo indicador OEE não foi aquela encontrada pelo modelo *Fuzzy*-DEA BCC. Entre as vantagens do modelo aqui proposto para os gestores, como alternativa ao OEE, pode-se citar a identificação de opções para melhorar a eficiência de uma linha de produção ineficiente, tendo como base linhas de produção que sejam *benchmarking* para ela. Além disto, com o modelo *Fuzzy*-DEA BCC pode-se identificar as linhas de produção mais sensíveis à variação nos parâmetros de entrada, desenvolver um *ranking* de eficiência e, também, estimar novas metas para redução dos *inputs* que podem realimentar os cálculos OEE, se for de interesse dos gestores.

PALAVRAS CHAVE: Eficiência de linhas de produção. Eficiência Global de Equipamentos. Análise por Envoltória de Dados. Lógica *fuzzy*. Sistema Toyota de Produção.

ABSTRACT

The pharmaceutical industry has become increasingly competitive, and the implementation of the Toyota Production System, which aims to lean production, has become common among industries of this sector. The main indicator used to measure efficiency of machines or production lines, is the Overall Equipment Effectiveness (OEE), and it is not considered the occurrence of uncertainty for its calculation. We applied the *Fuzzy*-DEA BCC model to analyze the efficiency of the production lines of a pharmaceutical company in the Paraíba Valley, including the possibility of uncertainty in the parameters involved. We also compared the new values of efficiency for the production lines with those previously calculated by using OEE. It was noticed that the degree of agreement between the two methods was approximately 57% and the production line considered more efficient by OEE indicator was not the same found by *Fuzzy*-DEA BCC model. Among the advantages of the proposed model for managers, as an alternative to OEE, one can cite the identification of options for improving the efficiency of an inefficient production line based on production lines, which are

benchmarking to it. Furthermore, with the Fuzzy-DEA BCC model one can identify the production lines more sensitive to variations in the input parameters, it can be created a ranking of effectiveness for the production lines, and also it can estimated new targets for reduction of inputs allowed improving OEE calculations, if this will be of interest to managers.

KEYWORDS: Production lines effectiveness. Overall Equipment Effectiveness. Data Envelopment Analysis. *Fuzzy Logic*. Toyota Production System.

1. Introdução

A Análise por Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis*- DEA) é uma abordagem não paramétrica utilizada para avaliar a eficiência relativa das unidades de tomada de decisão (*Decision Making Units* - DMUs) que empregam diversos insumos para gerar múltiplas saídas (CHARNES *et al.*, 1998). Este método é geralmente empregado presumindo que os dados de todas as entradas e saídas são conhecidos e sem ocorrência de incertezas (Hatami-Marbini *et al.*, 2011). Porém, em geral, em situações reais os dados disponíveis são imprecisos, neste caso a lógica dos conjuntos *fuzzy*, desenvolvida por Zadeh (1964), pode ser aplicada em conjunto com a DEA.

As indústrias utilizam a filosofia da produção enxuta para calcular a eficiência de suas linhas de produção, muitas delas adotam o *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) como uma maneira de monitorar equipamentos (BUSSO; MIYAKE, 2013; CHIARINI, 2012; DE RON e ROODA, 2006; SILVA, 2010; PERGHER *et al.*, 2011), mas não levam em consideração a ocorrência de incertezas e flutuações na eficiência de fabricação.

Neste trabalho apresenta-se uma aplicação em uma indústria farmacêutica brasileira sendo que a questão de pesquisa foi: há vantagens de se combinar a fuzzy-DEA com o OEE para auxiliar os gestores na avaliação da eficiência de linhas de produção, em um contexto sob incerteza?

Foram utilizadas funções de pertinência *Fuzzy* lineares (Triangular e Trapezoidal) para modelar as incertezas nos parâmetros das linhas de produção e o objetivo geral foi avaliar a eficiência de linhas de produção da empresa estudada por meio da DEA combinada com a lógica dos conjuntos *fuzzy*. Os objetivos específicos foram: comparar os resultados de eficiência gerados pelo modelo Fuzzy-DEA com os resultados reais oriundos do OEE de cada linha; identificar quais linhas foram mais sensíveis ao efeito da incerteza e desenvolver um *ranking* de eficiência entre elas.

Considerando a classificação proposta por Bertrand e Fransoo (2002), este trabalho se caracteriza como uma pesquisa aplicada, pois proporciona contribuições para a literatura atual, tendo objetivo empírico normativo, pois o modelo desenvolvido visa compreender políticas e estratégias que possibilitem ações para melhorar uma situação vigente. Além disto, pode-se classificar a forma de abordar o problema como sendo quantitativa e o método de pesquisa como sendo a modelagem.

A estrutura deste trabalho é composta de mais três seções. A Seção 2 apresenta um resumo da fundamentação teórica aqui aplicada; a Seção 3 descreve a modelagem do problema e a análise dos resultados; a última Seção traz conclusões e recomendações para futuras pesquisas, seguidas das referências bibliográficas.

2. Fundamentação Teórica

A produção enxuta, como é conhecido o Sistema Toyota de Produção (STP), está fundamentada sobre dois pilares: o *just-in-time* (JIT) e a automação (*Jikoda*). De acordo com Shingo (1996), *just-in-time* significa “no momento certo” e tem por objetivo eliminar desperdícios e garantir o fluxo contínuo no chão de fábrica. Nesse pilar o foco está em entregar peças no momento próximo em que serão utilizadas no processo de fabricação. Para isso a produção se baseia no *takt time* e segue um fluxo unitário (LIKER, 2005). *Takt time* é definido por Rother (2003) como o tempo necessário para que um produto, ou componente, seja produzido e alinhado com a demanda do cliente; ele dita o ritmo de produção para que seja possível atender à demanda do cliente, de acordo com as restrições de capacidade da linha em questão.

O segundo pilar, automação, ou *jidoka*, separa o homem da máquina, assim permitindo que o operador atue em mais de uma ao mesmo tempo e tenha autonomia de parar a máquina sempre que ocorrer um defeito (SLACK et al., 1996).

O *Overall Equipment Effectiveness* (OEE ou Eficiência Global) se tornou o índice mais utilizado para medição de produtividade industrial e, segundo Zammori (2014), é reconhecido como a forma mais rigorosa de se monitorar o desempenho real de um equipamento, sendo calculado por (1) e, para ser eficiente uma linha de produção deve ter $OEE \geq 85\%$:

$$OEE = \text{Disponibilidade} \times \text{Desempenho} \times \text{Qualidade} \quad (1)$$

Assim, avaliar a eficiência de uma linha de produção é considerada uma tarefa complexa, pois conta com inúmeras variáveis, tanto de entrada como de saída, principalmente se for considerada a ocorrência de incertezas. A eficiência pode ser simplesmente definida como a razão entre saída (*output*) e entrada ou insumo (*input*), é também conhecida como razão de produtividade. Assim, maior produção por unidade de insumo reflete-se em maior eficiência. Se o maior rendimento possível por unidade de entrada é conseguido, um estado de eficiência absoluta ou ótima foi alcançado, isto significa que não é possível melhorar este patamar de eficiência sem aplicação de novas tecnologias ou outras variações no processo de produção (SHERMAN; ZHU, 2006; WEN et al., 2011).

Como a Análise por Envoltória de Dados (DEA) tem sido aplicada em análises de desempenho (e de eficiência) em diversos setores, neste trabalho realizou-se a combinação entre modelos DEA, conjuntos *fuzzy* e a OEE. Os modelos DEA mais conhecidos são os modelos DEA-CCR (*Constant Returns to Scale - CRS*) e DEA-BCC (*Variable Returns to Scale - VRS*), podendo ser orientados aos *inputs* ou aos *outputs*:

Modelo DEA CCR (orientado aos *inputs*)

$$\max \quad wo = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (2)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (4)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

sendo DMU_0 a DMU sob análise, wo é o valor ótimo da eficiência da DMU_0 ; y_{r0} e x_{i0} são, respectivamente, o valor da r -ésima saída e i -ésima entrada para a DMU_0 ; y_{rj} é o valor da r -ésima saída para a j -ésima DMU; x_{ij} é o valor da i -ésima entrada para a j -ésima DMU; u_r é a variável de decisão associada à r -ésima saída; v_i é a variável de decisão associada à i -ésima entrada.

A formulação (2) – (5) é não linear, mas pode ser linearizada resultando no modelo dos multiplicadores com orientação aos *inputs*:

$$\text{Max } wo = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (6)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (9)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

Modelo DEA BCC (orientado aos *inputs*)

$$\text{Max } wo = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} + c_0 \quad (11)$$

Sujeito a:
$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + c_0 \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \quad (14)$$

$$v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

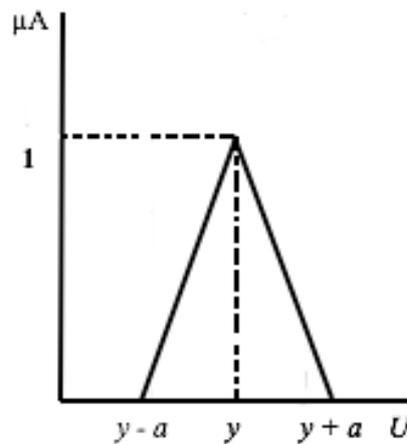
$$c_0 \text{ irrestrita} \quad (16)$$

A principal diferença entre os modelos DEA-BCC e DEA-CCR é a incorporação da variável c_0 que está associada aos retornos variáveis de escala. Cabe mencionar que há, ainda, os modelos DEA do envelope, com orientações tanto ao *input* quanto ao *output* que também podem ser combinados com a lógica *fuzzy*.

A teoria dos conjuntos *fuzzy* se tornou uma ferramenta para manipular dados imprecisos encontrados em situações do mundo real, sendo muito versátil, pois é capaz de modelar e manipular matematicamente informações imprecisas, variáveis linguísticas e situações complexas (ZADEH, 1975; XUE; HARKER, 2002; TAO *et al.*, 2012).

A caracterização dos conjuntos *fuzzy* propõe que certos elementos são mais pertencentes a um conjunto do que a outros. Dessa forma, o fator de pertinência pode assumir valores entre 0 e 1, com o valor 0 indicando completa exclusão do elemento do conjunto e o valor 1 a sua completa inclusão neste conjunto. A Figura 1 representa o fator de pertinência para valores de um conjunto *fuzzy* A , sendo y o valor nítido do número *fuzzy*, assim, os valores próximos a y pertencem ao conjunto A , mesmo que parcialmente, são representados por $(y - a, y + a)$ e possuem variados valores de fator de pertinência. O grau de pertinência dos valores fora deste conjunto é 0.

Figura 1 – Função de Pertinência para conjunto *fuzzy* A



Fonte: Adaptado de Zadeh (1995)

A lógica dos conjuntos *fuzzy* tem sido aplicada com sucesso em diferentes áreas, tais como, refinarias, processos biológicos e químicos, sistemas de ventilação e usinas nucleares, ou seja, áreas em que é imprescindível manipular dados incertos (Hatami-Marbani *et al.*, 2011).

As abordagens da lógica *Fuzzy* em conjunto com a DEA são classificadas em quatro categorias, segundo Hatami-Marbini *et al.* (2011): a abordagem da tolerância, a abordagem de nível α , a abordagem de classificação *Fuzzy* e a abordagem possibilística. Neste trabalho, adotou-se a abordagem de nível α que é a mais utilizada em modelos *fuzzy*-DEA. Kao e Liu (2000) transformaram o modelo *fuzzy*-DEA em um conjunto de modelos DEA convencionais que são baseados em dados exatos, podendo assim medir a eficácia de DMU's que possuem variáveis nebulosas e desenvolveram um modelo capaz de exprimir as medidas de eficiência utilizando funções de pertinência *Fuzzy*.

Observe-se, no modelo apresentado a seguir, que os índices, parâmetros e variáveis do modelo são análogos aos dos modelos anteriores, sendo que [~] denota parâmetro incerto ou não nítido:

$$\tilde{E}_j = \text{Max} \sum_{r=1}^s u_r \tilde{y}_{r0} \quad (17)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \tilde{x}_{i0} v_i = 1 \quad (18)$$

$$\sum_{r=1}^s u_r \tilde{Y}_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i \tilde{X}_{ij} \leq 0, \quad j=1,2,\dots,n, \quad (19)$$

$$u_r \geq 0, \quad r=1,2,\dots,s, \quad (20)$$

$$v_i \geq 0, \quad i=1,2,\dots,m, \quad (21)$$

Para mais detalhes sobre a abordagem do nível α , bem como a geração de cenários dos modelos *fuzzy*-DEA, recomenda-se a leitura dos trabalhos de Silva *et al.* (2014) e Silva *et al.* (2015).

3. Descrição, Modelagem do Problema e Etapas da Pesquisa

Este trabalho teve como base uma multinacional de grande porte do setor farmacêutico, com cadeia produtiva de grande relevância, localizada no Vale do Paraíba – SP. Nesta empresa há um

amplo campo para a aplicação de métodos matemáticos da Pesquisa Operacional (PO), que auxiliam nas análises de eficiência e otimização.

Com respeito as linhas de produção (DMUs) que fabricam os mesmos produtos, foi utilizada a teoria dos conjuntos *fuzzy*, pois foi identificado, durante a análise do processo e coleta de dados, que existia imprecisão dos valores fornecidos pelos operadores das linhas. Além disto, ao fim de cada turno há a necessidade de se introduzir os valores referentes a cada indicador do sistema produtivo no sistema, porém como o procedimento é realizado manualmente há uma grande margem de erro associada. De fato, os dados baseados em tempo são em sua maioria estimados, pois cabe ao operador identificar o início e o fim de cada ocorrência de parada de máquina. Além disso, os indicadores de unidades produzidas e perdas são baseados em um fator de conversão aproximado, desenvolvido para transformar peso (quilos) para unidades de produtos.

As etapas de abordagem deste problema incluíram:

Etapas (a) – Identificação do problema – Após contatos na Empresa escolhida como objeto do estudo, o problema foi verificar qual o melhor método para avaliar a eficiência de suas linhas de produção.

Etapas (b) - Coleta dos dados – Os dados analisados representavam o período de uma semana de acompanhamento de 25 linhas produtivas da indústria em questão. As variáveis envolvidas, considerando turno de trabalho com duração de 8 h e semana com 5 dias, para as linhas de produção analisadas, foram:

Inputs

- **Parada Programada** (*input 01*) - indica o tempo ([min]) que a linha de produção estava programada para não ser utilizada.
- **Downtime** (*input 02*) - indica o tempo total ([min]) que a linha de produção ficou parada devido a alguma ocorrência que teve duração maior que 3 min.
- **Pequenas Paradas** (*input 03*) - indica o número de ocorrências, com duração inferior a 3 min, que levaram a linha de produção a ficar parada.
- **Perda** (*input 04*) - indica quanto do produto ([número de produtos/min]) que foi desperdiçado na linha de produção.
- **Velocidade Média Nominal** (*input 05*) - indica quanto do produto ([número de produtos/min]) foi fabricado pela linha de produção.

Outputs

- **Produtos Bons** (*output 01*) - indica a quantidade total de produtos ([número de produtos/semana]) considerados aprovados fabricados na linha de produção.
- **Produção Média/Turno** (*output 02*) - indica a quantidade média de produto ([número de produtos/turno]) fabricado na linha de produção.

Com estas informações foi criada a matriz original de *inputs/outputs* do problema e introduziu-se nela a ocorrência da incerteza utilizando funções de pertinência triangular. Os números *fuzzy* triangulares foram obtidos adotando-se um desvio assimétrico para mais e para menos em relação ao valor observado de cada *input* e *output*. Os valores superiores e inferiores foram escolhidos com base em dados históricos da empresa e experiência dos engenheiros envolvidos nos processos de manufatura estudados. As matrizes completas de *input* e *output* podem ser acessadas pelos interessados no link <https://www.sendspace.com/file/g252tb>, pois, por motivo de disponibilidade de espaço, não foram disponibilizadas neste texto.

Etapas (c) - Modelagem e solução do modelo – Foi adotado o modelo *fuzzy*-DEA BCC, com as linhas de produção nos 3 turnos, sendo 75 DMUs analisadas, que produzem o mesmo item (ver Tabela 1), para modelar o problema e para simular cenários otimistas e pessimistas com o intuito de

medir e comparar a eficiência das linhas de produção. Neste trabalho adotou-se o modelo DEA-BCC devido ao fato que os dados coletados são provenientes de diferentes turnos, diferentes máquinas, diferentes linhas de produção, e diferentes operadores, caracterizando uma situação com retorno variável de escala.

Para a solução dos modelos, utilizou-se o software *General Algebraic Modeling System* (GAMS) na versão 24.3, e o solver CPLEX 12.6.

Etapa (d) - Análise dos Resultados e Conclusões - Foi desenvolvida com o apoio do supervisor da área da empresa estudada. A Tabela 1 mostra os resultados das eficiências fornecidas pela solução do modelo *fuzzy*-DEA BCC para os dois cenários, pessimista e otimista, agrupados. Estes resultados são comparados com os obtidos pelo uso do OEE e utilizados pela empresa até então, ficando evidentes as discrepâncias encontradas entre os valores.

Exemplificando, o indicador OEE apontou que a DMU (linha de produção) RH17 – A seria a mais eficiente entre as estudadas, mas o modelo *fuzzy* DEA-BCC aponta como a mais eficiente a DMU RH14 – B. Pode-se perceber, também, que as DMUs que possuem maior sensibilidade à variação dos dados são as que apresentaram menor valor de eficiência.

Tabela 1 – Comparação de Eficiências das Linhas de Produção: Modelo fuzzy DEA-BCC versus OEE

Linhas de Produção (DMUs)							
DMU	EDM1 – A	EDM1 - B	EDM1 - C	EDM2 – A	EDM2 - B	EDM2 – C	EDM3 - A
<i>Fuzzy</i> -DEA BCC	95,40%	96,24%	100,00%	61,79%	41,99%	25,45%	100,00%
OEE	35,73%	39,02%	45,11%	50,64%	43,00%	41,87%	32,11%
Linhas de Produção (DMUs)							
	EDM3 - R	EDM3 - C	HS04 - A	HS04 - B	HS04 - C	RH01 – A	RH01 - B
<i>fuzzy</i> DEA-OEE	75,05%	98,25%	71,71%	69,38%	100,00%	97,14%	93,88%
OEE	40,17%	49,27%	44,43%	48,98%	54,76%	62,27%	50,43%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH01 - C	RH02 - A	RH02 - B	RH02 - C	RH03 - A	RH03 – B	RH03 - C
<i>fuzzy</i> DEA-OEE	95,26%	97,12%	100,00%	98,72%	66,66%	60,07%	100,00%
OEE	18,66%	51,95%	75,67%	56,23%	67,50%	64,48%	74,34%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH04 - A	RH04 - B	RH04 - C	RH05 - A	RH05 - B	RH05 - C	RH06 - A
<i>fuzzy</i> DEA-OEE	100,00%	93,69%	96,58%	100,00%	100,00%	92,91%	89,94%
OEE	67,90%	70,97%	73,32%	80,53%	83,37%	76,06%	46,90%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH06 - B	RH06 - C	RH07 - A	RH07 - B	RH07 - C	RH08 - A	RH08 - B
<i>fuzzy</i> DEA-OEE	100,00%	90,96%	100,00%	92,42%	86,66%	83,04%	43,48%
OEE	42,96%	49,43%	67,25%	80,32%	63,41%	65,20%	58,01%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH08 - C	RH09 - A	RH09 - B	RH10 - A	RH10 - B	RH10 - C	RH11 - A
<i>fuzzy</i> DEA-OEE	100,00%	100,00%	100,00%	81,69%	88,47%	73,65%	77,28%
OEE	77,96%	54,20%	64,38%	52,88%	53,92%	50,80%	62,88%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH11 - B	RH11 - C	RH12 - A	RH12 - B	RH12 - C	RH14 - A	RH14 - B

fuzzy DEA-	66.77%	73.05%	100.00%	87.62%	76.33%	100.00%	100.00%
OEE	51,15%	58,58%	83,44%	70,20%	71,06%	54,09%	51,19%
Linhas de Produção (DMUs)							
	RH14 - C	RH15 - A	RH15 - B	RH16 - A	RH16 - B	RH17 - A	UN01 - A
fuzzy DEA-	100.00%	57.81%	31.99%	55.90%	59.24%	100.00%	80.11%
OEE	52,24%	44,69%	35,30%	51,05%	55,60%	83,52%	55,30%
Linhas de Produção (DMUs)							
	UN01 - B	UN01 - C	UN02 - A	UN02 - B	UN02 - C	UN03 - A	UN03 - B
fuzzy DEA-	64.46%	57.87%	60.78%	94.36%	96.35%	59.67%	45.67%
OEE	53,59%	56,01%	38,37%	60,61%	58,72%	52,35%	44,00%
Linhas de Produção (DMUs)							
	UN03 - C	UN04 - A	UN04 - B	UN04 - C	UN05 - A	UN05 - B	UN05 - C
fuzzy DEA-	59.61%	100.00%	100.00%	100.00%	97.68%	76.62%	74.02%
OEE	51,72%	52,21%	58,34%	66,89%	45,74%	52,37%	56,84%

A Tabela 2 foi organizada de forma a ranquear as linhas com maior supereficiência, dessa forma, é possível perceber a diferença entre os dois métodos. É interessante observar que a linha RH14 – B é tida como a mais eficiente pelo modelo fuzzy-DEA BCC, porém possui valor de OEE de apenas 51%. Esta discrepância pode ser fruto tanto do procedimento de coleta de dados tanto quanto pela forma como a empresa calcula o indicador OEE, conforme explicado na sequência.

É importante compreender que a interpretação do indicador de eficiência, introduzido pelo Sistema Toyota de Produção, varia entre empresas. Este trabalho foi desenvolvido dentro de uma empresa que considera horário de almoço, lanche, treinamentos e testes como tempo útil de produção, evidentemente a eficiência nesses períodos é nula. Quando estes valores são computados juntamente com o tempo em que efetivamente houve produção, o índice de produtividade é reduzido consideravelmente, e mascara como a linha realmente se comportou durante a fabricação real de produtos. Existem corporações que desconsideram esse tempo no cálculo de eficiência e desta forma apresentam valores de OEE bem superior.

Nos modelos DEA as DMUs com índices de eficiência iguais a 1 são consideradas eficientes e várias DMUs podem satisfazer este critério, ou seja, o método pode apresentar baixa discriminação. Neste caso, Andersen e Petersen (1993) propuseram o conceito da Supereficiência que altera a formulação original do modelo DEA-BCC, retirando a restrição (13) para a DMU sob análise, possibilitando que as DMUs eficientes possuam índices de eficiência superiores a 1, e evidenciando aquelas que possam apresentar alguma vantagem com respeito às demais DMUs eficientes. Este conceito foi utilizado no problema em questão e gerou os resultados que estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Ranking de máquina por Supereficiência

DMU	Supereficiência	OEE
RH14 – B	938%	51%
RH07 – A	381%	67%
HS04 – C	288%	55%
UN04 – B	233%	58%
RH17 – A	194%	84%
EDM1 –	162%	45%
RH06 – B	162%	43%
RH02 – B	158%	76%
RH09 – A	155%	54%
RH03 - C	151%	74%

Conforme disposto na Tabela 2, para as dez primeiras linhas de produção consideradas eficientes pelo cálculo do OEE identificou-se seis linhas de produção, RH14 – B, RH07 – A, HS04 – C, UN04 – B, RH01 – C, EDM1 – C que possuem, respectivamente, valores de 938%, 381%, 288%, 233%, 167% e 162%, e foram classificadas como mais eficientes pela modelagem *fuzzy-DEA BCC*.

Comparando o ranqueamento feito com base no OEE das dez DMU's mais eficientes, e disposto na Tabela 3, com os gerados utilizando-se o modelo *Fuzzy-DEA BCC*, encontrou-se três que são comuns: RH02 – B, RH03 – C, RH05 – B, porém não se encontram na mesma posição do ranking para ambos os casos. Observe-se, também, que na classificação por supereficiência, essas linhas de produção, ocupam, respectivamente, a sétima, oitava e décima colocação e com dados de OEE, ocupam, respectivamente, a oitava, nona e terceira colocação.

Tabela 3 – Ranking de máquinas por OEE

DMU	Supereficiência	OEE
RH17 - A	194%	84%
RH05 - B	148%	83%
RH12 - A	131%	83%
RH05 - A	127%	81%
RH07 - B	92%	80%
RH08 - C	147%	78%
RH02 - B	158%	76%
RH05 - C	93%	76%
RH03 - C	151%	74%
RH04 - C	97%	73%

É interessante notar que a linha RH03 – C se encontra na mesma posição para ambos ranqueamentos (com a supereficiência e com o OEE), outras três DMU's também ocupam o mesmo posicionamento em ambos os métodos, EDM2 – A, EDM2 – B e EDM2 – C. Esses dados indicam equivalência de apenas 5,7% entre a distribuição de eficiência obtida pelo modelo *fuzzy-DEA BCC* e pelo OEE.

Finalizando esta análise, entre aplicações práticas desta nova modelagem alternativa ao OEE, destaca-se entre as suas vantagens a identificação de opções que permitem aos gestores melhorar a eficiência de uma linha de produção ineficiente, tendo como base linhas de produção que sejam *benchmarking* para ela.

Além disto, a nova abordagem possibilita a identificação das linhas de produção mais sensíveis à variação nos parâmetros de entrada e saída, o desenvolvimento de um ranking de eficiência e, também, a estimação de novas metas para redução dos *inputs* que podem realimentar os cálculos OEE, se for de interesse dos gestores.

4. Conclusões e Recomendações para Futuras Pesquisas

Este trabalho visou a aplicação de otimização para um problema prático com a ocorrência de dados incertos e demonstrou a utilidade do modelo *fuzzy-DEA BCC* para a melhor gestão de ativos numa empresa. Percebe-se a possibilidade de utilizar o modelo proposto como ferramenta de tomada de decisão, sendo possível medir a eficiência de múltiplas linhas de produção e identificar a sua sensibilidade à imprecisão dos parâmetros de entrada e saída.

O modelo proposto pode ser utilizado como fonte de decisão por parte do gestor, e também, é capaz de estipular metas para tornar as linhas de produção ineficientes em eficientes, sendo, portanto muito interessante do ponto de vista da gestão.

Durante a realização deste estudo ficou evidente o porquê da necessidade das incertezas serem incorporadas ao modelo. O principal motivo encontrado foi o erro no processo de coleta dos dados de entrada e saída, que não era automatizado e muito afetado pelo fator humano (operadores das máquinas na linha de produção).

As aproximações de valores e muitas vezes até mesmo uma estimativa feita pelo operador, baseado em conhecimento adquirido por anos de empresa, impactam nos resultados, e isto fica mascarado no cálculo do OEE. Sugere-se a empresa que seja realizado um acompanhamento da obtenção dos valores dos *inputs*, e seja gerado um plano de ação para amenizar a influência dessas variações na eficiência das linhas de produção.

Em resumo, o modelo *fuzzy*-DEA BCC gerou resultados que facilitam a compreensão da realidade de cada linha de produção (DMU), além de identificar metas nítidas e viáveis para os *inputs*. Entende-se que o OEE deixa a desejar, pois acaba dificultando a percepção de que a piora do desempenho é gerada pela situação da linha em si (problemas tecnológicos) e quanto dessa piora é ocasionada pelo processo de medição de eficiência. Neste sentido, foi recomendado à empresa procurar automatizar a medição das grandezas de entrada e saída, podendo ser mantido o indicador OEE, mas realizando mudanças na manufatura para o atingimento de metas geradas pelo modelo *fuzzy*-DEA BCC.

Em novas pesquisas pretende-se incorporar conceitos da Teoria dos Jogos para representar os *trade offs* existentes neste tipo de problema e auxiliar nas decisões com o OEE.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi parcialmente financiada pelo CNPq (Processo No. 306214/2015-6), pela CAPES (PE-024/2008) e FAPESP (Processo No. 2015/12711-4).

Referências Bibliográficas

- ANDERSEN, P.; PETERSEN, N. C. A procedure for ranking efficient units in data envelopment analysis. *Management Science*, v.39, p.1261-1264, 1993.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 22, n. 2, pp. 241-264, 2002.
- BUSSO, C. M.; MIYAKE, D. I. Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) na gestão do desempenho global de uma fábrica. *Produção*, v. 23, n. 2, p. 205–225, jun. 2013.
- CHEN, C. B.; KLEIN, C. M. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, v. 27, n. 1, p. 26–35, 1997.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, vol. 2, n. 6, pp. 429-444, 1978.
- CHIARINI, A. Lean production: mistakes and limitations of accounting systems inside the SME sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 23, n. 5, p. 681–700, 2012.
- DE RON, A.; ROODA, J. OEE and equipment effectiveness: an evaluation. *Int. J. Prod. Res.*, v. 44, n. 23, p. 4987–5003, 2006.
- HATAMI-MARBINI, A., TAVANA., M., SAATI, S., AND AGRELL, P. J . Positive and normative use of fuzzy DEA-BCC models:A critical view on NATO enlargement.*International Transactions in Operational Research*, 20, 411-433, 2011.
- KAO, C.; LIN, P. H. Efficiency of parallel production systems with fuzzy data. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 198, p. 83–98, 2012.
- KAO, C.; LIU, S.-T. Fuzzy efficiency measures in data envelopment analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 113, n. 3, p. 427–437, 2000.
- PERGHER, I.; RODRIGUES, L. H.; LACERD, D. P. Discussão teórica sobre o conceito de perdas do Sistema Toyota de Produção: inserindo a lógica do ganho da Teoria das Restrições. *Gestão & Produção*, v. 18, n. 4, p. 673–686, 2011.
- SHERMAN, H. D.; ZHU, J. (2006): *Service Productivity Management - Improving Service Performance using Data Envelopment Analysis (DEA)*. New York: Springer.
- SHINGO 1909, S. A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint. Boca Raton: Boca Raton : CRC Press : Taylor & Francis Group, 2005.

- SILVA, A. F.; MARINS, F. A. S.; MONTEVECHI, J. A. B.** Aplicação de programação por metas binária - mista em uma empresa do setor sucroenergético. *Gestão & Produção*, vol. 20, n. 2, pp. 312-336, 2013.
- SILVA, A.F.; MARINS, F. A. S.; SANTOS, M. V.B.; MIRANDA, R. C. de.; FERRAZ, R. G.** Avaliação Da Eficiência Sob Incerteza por Meio da Programação por Metas, Análise por Envoltória de Dados e Teoria Fuzzy: Aplicação em Minifábricas do Segmento de Autopeças. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. SBPO, 2013.
- SILVA, A. F. DA., MIRANDA, R. DE C., MARINS, F. A. S.** Um modelo fuzzy-DEA-game para estratégias de produção sob incerteza. *RAE-Revista de Administração de Empresas*, 55(1), 78-94, 2015
- SILVA, T. D. F. A.** Desenvolvimento De Um Roteiro Para Implantação De Um Sistema De Medição De Desempenho Para Chão De Fábrica Para Ambientes De Produção Enxuta. Ufscar, 2010.
- SILVA, T.; FILHO, T.; KARAWEJCZYK, T. C.** O Sentido do trabalho no sistema toyota de produção: Um estudo exploratório, p. 26–48, 2014.
- TAO, L.; LIU, X.; CHEN, Y.** Online banking performance evaluation using data envelopment analysis and axiomatic fuzzy set clustering. *Quality & Quantity*, 2012.
- WEN, M.; QIN, Z.; KANG, R.** Sensitivity and stability analysis in fuzzy data envelopment analysis. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2011.
- XUE, M.; HARKER, P. T.** Note: Ranking DMUs with Infeasible Super-Efficiency DEA Models. *Management Science*, v. 48, n. 5, p. 705–710, 2002.
- ZADEH, L. A.** Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965
- ZAMMORI, F.** Fuzzy Overall Equipment Effectiveness (FOEE): capturing performance fluctuations through LR Fuzzy numbers. *Production Planning & Control*, n. July, p. 1–16, 2014.