

# A UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA DEA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UM PROCESSO DE MANUFATURA CELULAR

**Marcos Roberto Gois de Oliveira**

*Mestre em Administração de empresas PROPAD/DCA/UFPE  
Doutorando em economia pelo PIMES/UFPE e Université Panthéon  
Sorbonne Paris 1. Experiência de 5 anos em produção e manutenção.  
E-mail: mrgois@hotmail.com*

**Charles De Montreuil Carmona**

*Doutor em Engenharia da Produção – PUC/RJ. Professor e  
Pesquisador do PROPAD/DCA/UFPE.  
E-mail: carmona@ufpe.br*

## RESUMO

Este artigo propõe um modelo para avaliar a eficiência do processo de manufatura celular aplicado a uma empresa de fabricação de pilhas, apresentando algumas metodologias, entre modelos paramétricos e não paramétricos, sendo o modelo escolhido o *Data Envelopment Analysis* – DEA. Neste modelo, a taxa de eficiência é calculada relativa a uma fronteira não paramétrica, estimada com a ajuda da programação linear (princípio da metodologia DEA). O presente trabalho apresenta as células de manufatura (CM) como um importante aliado às empresas, surgindo o conceito de eficiência como fator importante de melhoria contínua e incremento da posição competitiva empresarial. Os resultados obtidos demonstraram a possibilidade de aplicação do DEA de forma consistente para a análise de eficiência das CM de uma unidade fabril, fornecendo informações valiosas de modo a subsidiar a tomada de decisão gerencial.

## ABSTRACT

*This study proposes a methodology for evaluation of the efficiency of the use of cellular manufacturing process (CM) in a firm that manufactures batteries. After consideration of a variety of methods, both parametric or nonparametric, the methods of Data Envelopment Analysis (DEA) was selected. In accordance with this methodology, the rate of efficiency is calculated relative to a nonparametric frontier, estimated by means of linear programming. The present study suggest that cellular manufacturing can be a useful instrument in the quest for continuous improvement of the production process and improved competitive position. The results demonstrate that DEA can be used to analyse the efficiency of CM in a industrial plant, providing valuable information for the support of the managerial decision-making process.*

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo propõe um modelo para avaliar a eficiência do processo de manufatura celular aplicado a uma empresa de fabricação de pilhas, apresentando algumas metodologias, entre modelos paramétricos e não paramétricos, sendo o modelo escolhido o *Data Envelopment Analysis* – DEA. Neste modelo, a taxa de eficiência é calculada relativa a uma fronteira não paramétrica, estimada com a ajuda da programação linear (princípio da metodologia DEA). O presente trabalho apresenta as células de manufatura (CM) como um importante aliado às empresas, surgindo o conceito de eficiência como fator importante de melhoria contínua e incremento da posição competitiva empresarial. Os resultados obtidos demonstraram a possibilidade de aplicação do DEA de forma consistente para a análise de eficiência das CM de uma unidade fabril, fornecendo informações valiosas de modo a subsidiar a tomada de decisão gerencial.

A implementação do sistema de manufatura celular tem mostrado uma série de benefícios para as empresas, entre os quais destacam-se: redução de inventário, redução dos *setup's*, redução do *lead time*, incremento na qualidade, melhoria do relacionamento interpessoal, incremento da experiência operacional, e simplificação dos procedimentos de controle e planejamento.

Embora haja significantes pesquisas direcionadas às estratégias do planejamento, programação e controle da produção, os pesquisadores, de modo geral, não têm se preocupado com as considerações sobre a implementação do sistema de manufatura celular; como por exemplo: a avaliação do desempenho das células e o processo de melhoria. É justamente a necessidade de analisar essas importantes questões que motivaram a realização da presente pesquisa.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

A importância das células de manufatura (CM) ocorre em função de sua implementação ser o passo inicial de novas tecnologias como o *flexible manufacturing systems* (FMS) e *computer integrated manufacturing* (CIM) (Talluri, Huq e Pinney, 1997: 2157). Estas novas tecnologias são a base para os modelos de produção flexíveis como o toyotismo (um dos motivos do sucesso da Toyota a partir de 1949) e o *volvismo*.

A adoção das CM nem sempre é seguido de sucesso, como na empresa Toyota citada anteriormente. Muitas pesquisas sobre o sucesso na implantação das CM foram desenvolvidas, é o caso do trabalho de Burbidge e Dale (1984), Wemmerlov e Hyer (1989) e Olorunniwo (1997).

O trabalho desenvolvido por Olorunniwo (1997) contou com dados de 57 empresas americanas que adotaram o sistema de manufatura por células. O resultado desta pesquisa apontou quais as características que influenciaram o sucesso na implantação das CM.

Duas características foram identificadas como importantes: a primeira é o número de linhas de produto, quanto maior o número de linhas de produto, maior tende a ser o

sucesso das CM. A segunda característica é o número de células nas plantas, quanto maior a quantidade, maior a possibilidade de sucesso.

Normalmente quando um outro tipo de layout é convertido ao layout celular ou quando um sistema de produção celular é implementado, os gerentes devem avaliar o desempenho e o sistema celular sob certas condições com o objetivo de identificar e implementar as melhores práticas de operação das células (TALLURI, HUQ e PINNEY, 1997: 2158).

A determinação da eficiência das CM vai além dos conceitos básicos de produtividade. As metodologias modernas para análise da eficiência utilizam-se dos conceitos apresentados por Farrell em 1957 no seu trabalho *The Measurement of Productive Efficiency*. Os princípios apresentados por Farrell utilizam as fronteiras de produção.

Os modelos de análise de eficiência mais conhecidos adotam como premissa fundamental às fronteiras de eficiência nas suas análises. Na literatura há duas abordagens apoiadas nas fronteiras de eficiência: técnicas econométricas (modelos paramétricos) e técnicas de programação matemática (modelos não paramétricos) (LOVELL, 1993: 19).

Existem muitas diferenças entre estas duas abordagens, as principais são (LOVELL, 1993: 19):

- A abordagem econométrica procura distinguir os erros randômicos dos erros de ineficiência. A abordagem de programação matemática não distingue os erros de mensuração da ineficiência, esta abordagem denomina ineficiência a combinação dos dois efeitos;
- A abordagem econométrica, por ser paramétrica, confunde o efeito do erro de especificação da forma funcional com ineficiência. A abordagem não paramétrica é menos propensa a esse tipo de erro.

Nos modelos econométricos as fronteiras são definidas por meio do método dos mínimos quadrados, ou seja, esta fronteira é baseada em medidas de tendência central. Estes modelos podem ser categorizados de acordo com o tipo de dados, o tipo de variáveis que usam e com o número de equações do modelo.

Os modelos não paramétricos definem as fronteiras de eficiência baseada na performance de todas as unidades do grupo, sujeita à condição de que a eficiência de cada unidade está sobre ou abaixo da fronteira de eficiência.

De acordo com Coelli, Rao e Battese (1998: 243), os modelos de análise mais conhecidos na literatura são: Método dos mínimos quadrados (LS); Fronteiras estocásticas (SF); os Índices de produtividade total (TFP); e o *Data Envelopment Analysis* (DEA). Os dois primeiros são modelos paramétricos, enquanto que os outros dois são não paramétricos.

O modelo matemático adotado neste paper é o *Data Envelopment Analysis* (DEA). O DEA é um modelo de programação fracional que avalia a eficiência relativa de unidades homogêneas na presença de múltiplos *inputs* e *outputs*. O DEA foi utilizado inicialmente para comparar a eficiência de unidades homogêneas de trabalho, ou *decision making units* (DMUs), como em hospitais, escolas, aeroportos, companhias de manufatura, rede de lojas, e agências bancárias (TALLURI, HUQ e PINNEY, 1997: 2159).

Charnes, Cooper e Rhodes (1978) foram os criadores do DEA, estes perceberam as dificuldades em determinar os pesos que deveriam ser dados a cada um dos múltiplos *inputs* e *outputs* das DMUs. Os autores acima reconheceram que para cada DMU os múltiplos *inputs* e *outputs* tinham valores diferentes e conseqüentemente adotar pesos diferentes para cada um. Determinaram desta forma que cada DMU adotaria seus pesos de forma que sua eficiência produtiva fosse a mais favorável possível.

Exemplo de aplicação dos modelos paramétricos e não paramétricos é o trabalho de Cowie e Riddington (1996), neste os autores aplicaram o DEA e o método dos mínimos quadrados no serviço público Europeu de transporte ferroviário. A conclusão final deste trabalho é que a eficiência no transporte ferroviário é o produto do bom gerenciamento.

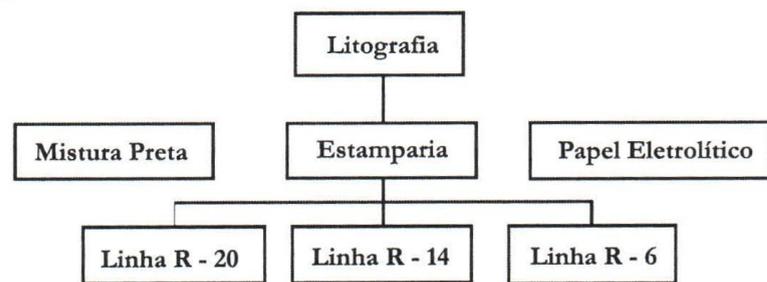
Um grande número de trabalhos utilizando o DEA foi realizado em agências bancárias. É o caso de Lozano-Vivas (1998) que aplicou o modelo às agências bancárias na Espanha no período de 1985 a 1991. Outro trabalho foi o de Queiroz (2000) que avaliou a eficiência das agências do Banco do Brasil no Estado de Pernambuco.

Na área industrial, um exemplo de aplicação do DEA às células de manufatura é o trabalho de Talluri, Huq e Pinney (1997), este trabalho utilizou seis células de manufatura.

### 3. OS DADOS UTILIZADOS

A empresa escolhida foi a Microlite unidade de Jaboatão dos Guararapes, fabrica de pilhas zinco carvão, que possui sete células de manufatura, quatro produzem componentes enquanto que as outras três são linhas de montagem. A figura a seguir mostra um exemplo de um esquema de produção, este esquema de produção é o utilizado pela empresa objeto deste trabalho.

Fig. 1 Esquema de produção: Exemplo de uma fabrica de pilhas - zinco-carvão:



Para Talluri, Huq e Pinney (1997: 2157), um importante aspecto em qualquer análise de dados é a importância e acurácia destes. No seu trabalho, Wemmerlov e Hyer (1987) apresentaram alguns *inputs* e *outputs* críticos para as células de manufatura. Os *inputs* podem ser: número de trabalhadores, número de máquinas, custos operacionais (que incluem gastos com manutenção, retrabalhos e matéria-prima). Os *outputs* podem variar desde a quantidade de produtos fabricados em cada célula ao *lead time* (tempo que o produto passa para ser fabricado); ou ainda ser a taxa de utilização da mão-de-obra, ou inventário de cada célula.

Para cada uma das sete células de manufatura da empresa serão utilizados quatro *inputs* controláveis, um *input* não controlável e dois *outputs*. Os *inputs* controláveis são: mão-de-obra direta, mão-de-obra indireta, matéria-prima e manutenção; o *input* não controlável é a cotação mensal do dólar. E os *outputs*: quantidade produzida por cada célula e os inventários.

O esquema abaixo apresenta, resumidamente, os *inputs* e *outputs* a serem utilizados neste trabalho:

<i>Inputs</i>		<i>Outputs</i>
Matéria-prima	➔	Produção Inventário
Mão-de-obra direta		
Mão-de-obra indireta		
Manutenção		
Dólar ( <i>input</i> não controlável)		

### 4. METODOLOGIA

Como já referenciado anteriormente neste paper, o modelo de análise de eficiência a ser utilizado será o DEA. Alguns aspectos intrínsecos da metodologia devem ser apresentados antes da sua aplicação. O primeiro ponto é a escala de retorno.

A escala de retorno (*returns to scale*) reflete o grau de relacionamento dos *inputs* e *outputs* (COELI, RAO e BATTESE, 1998: 140-158). Há duas situações: a primeira é o *constant returns to scale* (CRS) que ocorre quando um incremento de *input* é seguido pelo mesmo incremento proporcional de *output*; a segunda é o *variable return to scale* (VRS), que ocorre quando um incremento de *input* não é seguido pelo incremento proporcional de *output*.

Os resultados obtidos quando se adota o CRS e o VRS tendem a ser diferentes, isto porque a eficiência ou ineficiência de uma DMU é em parte explicada pela escala na qual a unidade opera. Sob a condição de VRS as unidades ineficientes são determinadas pela comparação desta com unidades de tamanho (escala de operação) similar. Já sob a condição de CRS, as unidades são comparadas umas com as outras independentes do tamanho da escala na qual cada uma opera. O uso de CRS implica que todas as DMU operam em uma escala ótima (COELI, RAO e BATTESE, 1998: 150).

O segundo aspecto é o conceito de orientação. Há duas possibilidades: *input* orientado ou *output* orientado. Os modelos *input* orientados propõem identificar ineficiências como uma redução proporcional na utilização de *inputs*, mantendo constante o nível de *outputs*. O segundo caso trata de ineficiências como uma possibilidade de ganho de produção proporcional de *outputs*, mantendo constante o nível de *inputs*; estes modelos são conhecidos como modelos *output* orientados (COELI, RAO e BATTESE, 1998: 158).

Os modelos *input* orientado e *output* orientado apontam para um mesmo valor de eficiência e ineficiência quando sujeitos às condições de CRS, mas assumem valores diferentes quando sujeitos às condições de VRS (COELI, RAO e BATTESE, 1998: 158). Como a programação linear não sofre com os problemas estatísticos, a escolha da orientação não é

tão crucial quando comparadas com as técnicas econométricas (COELI, RAO e BATTESE, 1998: 158).

O DEA surgiu em 1978, a partir de um modelo *input* orientado e CRS. Se há  $n$  DMUs cada uma com  $m$  *inputs* e  $s$  *outputs*, a eficiência relativa de uma DMU, em particular  $i$ , pode ser obtida resolvendo-se o seguinte problema de programação fracional linear, proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978):

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \sum u_k y_{ki} / \sum v_p x_{pi} \\ & \text{Sujeito a: } \sum u_k y_{kj} / \sum v_p x_{pj} \leq 1 \quad \forall j \\ & u_k, v_p \geq 0 \quad \forall k \in p \end{aligned} \quad (\text{Modelo 1})$$

Onde  $i$  é a DMU que está sendo avaliada e:

$$\begin{aligned} k \Rightarrow 1 \text{ até } s & \quad y_{kj} \Rightarrow \text{quantidade do } \textit{output} \textit{ k produzido pelo DMU } i \\ p \Rightarrow 1 \text{ até } m & \quad x_{pj} \Rightarrow \text{quantidade do } \textit{input} \textit{ j usado pelo DMU } i \\ j \Rightarrow 1 \text{ até } n & \quad u_k \Rightarrow \text{peso dado ao } \textit{output} \textit{ k} \\ & \quad v_p \Rightarrow \text{peso dado ao } \textit{input} \textit{ j} \end{aligned}$$

O modelo 1 é um problema de programação fracional linear, e como tal, apresenta um número infinito de soluções ótimas. Para resolvê-lo é necessário transformá-lo em uma forma linear, onde possa ser utilizada a programação linear (PL). Impondo a condição  $\sum v_p x_{pi} = 1$  e simplificando a notação. Tem-se o modelo de PL mostrado abaixo:

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \sum \mu_k y_{ki} \\ & \text{Sujeito a: } \sum v_p x_{pi} = 1 \\ & \sum \mu_k y_{kj} - \sum v_p x_{pj} \leq 0 \quad \forall j \\ & \mu_k, v_p \geq 0 \quad \forall k \in p \end{aligned} \quad (\text{Modelo 2})$$

A mudança de notação de  $v$  e  $u$  para  $n$  e  $m$  é feita para ressaltar que os modelos 1 e 2 são diferentes problemas de programação linear. A forma da equação 2 é conhecida como a forma multiplicativa do DEA.

Convém observar que a eficiência encontrada pelo DEA é uma eficiência "relativa", isto significa que uma DMU eficiente para um grupo, nem sempre o será quando se trata de outro grupo. Reescrevendo o modelo 2, com uma simplificação dos índices temos o modelo 3 a seguir.

O objetivo do modelo 3 é identificar os melhores valores para  $\mu$  e  $n$  de maneira a maximizar a expressão  $\mu y_i$ , sujeita

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \mu y_i \\ & \text{Sujeito a: } v x_i = 1 \\ & \mu y_j - v x_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \mu, v \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{Modelo 3})$$

à restrição que todas as medidas de eficiência sejam menores ou iguais a 1. Em outras palavras, cada DMU  $i$  tem a liberdade para determinar  $\mu$  e  $n$  de tal modo que  $i$  tenha o melhor escore de eficiência relativo possível.

Utilizando-se da dualidade da programação linear pode-se derivar o modelo 4:

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \theta, \lambda \quad \theta \\ & \text{Sujeito a: } -y_i + Y\lambda \geq 0 \\ & \theta x_i - X\lambda \geq 0 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{Modelo 4})$$

Onde  $X$  é a matriz dos *inputs*,  $Y$  é a matriz dos *outputs*,  $\theta$  é um escalar e  $\lambda$  é o vetor das constantes. O valor de  $\theta$  determinado será a eficiência para a DMU  $i$  em estudo e irá satisfazer  $\theta \leq 1$ , onde 1 indica um ponto situado na fronteira de eficiência.

Ali e Seiford (1993: 130) inseriram ao modelo 4 as variáveis  $s$  e  $e$ , as quais representam respectivamente a folga de *output* e o excesso de *input*. Para as DMUs eficientes, os valores de  $s$  e  $e$  são zero. O modelo 4 transforma-se em:

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \theta, \lambda \quad \theta \\ & \text{Sujeito a: } Y\lambda - s = y_i \\ & \theta x_i - X\lambda - e = 0 \\ & \lambda, s, e \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{Modelo 5})$$

A solução do dual envolve um número menor de expressões comparado com o equivalente primal, sendo esta forma a mais utilizada na determinação dos escores de eficiência.

O modelo utilizado para o CRS é o apresentado anteriormente (modelo 4 e 5, para o primal e o dual respectivamente), conhecido como CCR em homenagem aos seus descobridores. Já para o VRS, algumas alterações devem ser feitas. A primeira é a inclusão da variável  $w \neq 0$  na função objetivo e nas restrições do primal. Tem-se o modelo primal 6 com a especificação VRS (BANKER, CHARNES e COOPER, 1984), também conhecido como BCC (iniciais dos seus descobridores):

$$\begin{aligned} & \text{Max. } \mu y_i + w \\ & \text{Sujeito a: } v x_i = 1 \\ & \mu y_j - v x_j + w \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \mu, v \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{Modelo 6})$$

A segunda alteração é na forma do dual. Neste é incluindo a restrição  $1\lambda = 1$ , a equação 5 torna-se (BANKER, CHARNES e COOPER, 1984):

$$\begin{aligned} & \text{Min. } \theta, \lambda \quad \theta \\ & \text{Sujeito a: } Y\lambda - s = y_i \\ & \theta x_i - X\lambda - e = 0 \\ & 1\lambda = 1 \\ & \lambda, s, e \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{Modelo 7})$$

Em função do exposto acima surgem três grandes diferenças entre a especificação CRS e VRS. A restrição de convexidade  $1\lambda = 1$ , presente no dual do VRS, implica na combinação convexa para determinar as DMUs virtuais (eficiência 100%), em contraste à combinação linear do CRS. A equação objetivo do modelo primal forma um hiperplano em um espaço  $R^{m+s}$ , a não inclusão de  $w$  no modelo CRS implica que o hiperplano formado deve passar pela origem, o mesmo não acontece com o VRS. A terceira diferença entre o VRS e o CRS é que como o CRS é menos restritivo (restrição de convexidade ausente), menores eficiências são possíveis, e como é de se esperar, uma quantidade menor de DMU será considerada eficiente (ALI e SEIFORD, 1993: 131).

Face ao grande número diferentes empresas e diferentes realidades destas, surgem extensões da modelagem DEA com o objetivo de atender a particularidade de cada organização.

As principais extensões da modelagem são: agrupamento de variáveis, variáveis não controláveis, e a aplicação de restrições. Elas podem ser utilizadas individualmente ou associadas entre si. O modelo surgirá em função da necessidade de aplicação.

O agrupamento de variáveis surge porque, freqüentemente, as variáveis possuem representações naturais em níveis discretos (por exemplo: categorias de populações) ou podem refletir a presença ou ausência de alguma característica em particular (ALI e SEIFORD, 1993: 148). Após separar as DMUs por categorias, o DEA determinará a eficiência de cada DMU relativo a sua categoria, procedendo com cada categoria como um grupo de DMUs distinto dos demais.

O modelo com a inclusão do agrupamento de variáveis é como descrito a seguir: seja  $C$  uma quantidade de agrupamento de variáveis de *input* determinada, e  $D = \{1, 2, \dots, C\} = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_C$ , onde  $D_a = \{t \mid t \in D \text{ com valor de input } a\}$  e  $D_a \cap D_b = 0, a \neq b$  (Ali e Seiford, 1993: 148).

$$\text{Min. } \theta, \lambda \quad \theta \quad (\text{Modelo 8})$$

$$\text{Sujeito a: } Y_j \lambda_j - s = y_i \quad j = 1, 2, \dots, C$$

$$\theta x_i - X_j \lambda_j - e = 0$$

$$1\lambda = 1$$

$$\lambda, s, e \geq 0$$

A segunda variação do modelo é a inclusão de variáveis não controláveis. Variáveis não controláveis são aquelas sobre as quais as DMU não possuem controle. Por exemplo, a variação cambial é um *input* onde as DMUs não possuem controle, o número de competidores é uma outra variável.

O modelo 9 mostra a utilização de variáveis não controláveis no DEA, onde o índice  $c$  significa controlável.

$$\text{Min. } \theta, \lambda \quad \theta^c \quad (\text{Modelo 9})$$

$$\text{Sujeito a: } Y\lambda - s = y_i$$

$$\theta x_i - X\lambda - e = 0$$

$$1\lambda = 1$$

$$\lambda, s, e \geq 0$$

Essencialmente o modelo acima omite as variáveis não controláveis na função objetivo, estas participam apenas das restrições.

Em algumas aplicações, é desejável analisar as eficiências com algumas restrições às variáveis  $\mu$  e  $v$ . Um caso claro de restrição é quando este está relacionado com o orçamento. Algumas restrições podem aumentar o poder e flexibilidade do DEA e refinar a análise por incorporar informações gerenciais ao modelo. As restrições são incorporadas ao modelo do DEA sob a forma de inequações, tornando-se o modelo (ALI e SEIFORD, 1993: 153):

$$\text{Max. } \mu y_i + \omega \quad (\text{Modelo 10})$$

$$\text{Sujeito a: } v x_i = 1$$

$$\mu y_j - v x_j + \omega \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$\mu A + v B \leq 0$$

$$\mu, v, \omega \geq 0$$

Onde  $A$  e  $B$  são os vetores restrição das variáveis  $\mu$  e  $v$ , respectivamente.

O modelo a ser aplicado na empresa em questão levou em consideração todos os aspectos relacionados com a metodologia. O primeiro aspecto é o da orientação, para o caso específico desta empresa utilizar-se-á a eficiência *input* orientada. Esta decisão está fundamentada no fato das programações da produção desta companhia ter como alicerce básico à previsão de vendas para um dado período. O que gera como objetivo primário do departamento de produção o atendimento à solicitação do departamento de vendas/marketing, utilizando-se para tal do mínimo de recursos, ou de *inputs*.

No tocante ao retorno de escala, foram trabalhados ambos os modelos CRS e VRS. A finalidade de tal aplicação é identificar qual a influência do trabalho em escala para cada célula da Microlite.

As células de manufatura da empresa não foram agrupadas por categorias em virtude da quantidade de células ser pequena e por não haver características, que na visão do autor desta dissertação, justificasse tal procedimento. A única variável não controlável deste trabalho é a variação cambial e as restrições irão obedecer à tabela 1, apresentada abaixo. Os valores da tabela foram determinados em comum acordo entre o autor desta dissertação e com profissionais da área de produção da Microlite.

**Tabela 1:** PESOS MÁXIMOS E MÍNIMOS PARA CADA INPUT E OUTPUT UTILIZADO.

<i>Input ou output</i>	<i>Peso Mínimo</i>	<i>Peso Máximo</i>
Matéria – prima	10	100
Mão – de – obra direta	40	100
Mão – de – obra indireta	10	100
Manutenção	0	10
Inventário	0	15
Produção	15	100

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Foram calculadas as eficiências para cada célula de manufatura da empresa com o uso de três modelos, a saber:

- O modelo básico do DEA;
- O modelo com a adição de variáveis não controláveis;
- O modelo com a incorporação de restrições.

O modelo básico do DEA aplicado mostrou que a quantidade de DMU pequena comparada com a de variáveis, o resultado foi uma grande quantidade de células de manufatura atingindo a fronteira de produção, ou seja, 100% eficientes. Não fornecendo, desta forma, subsídio à tomada de decisões.

A inclusão do dólar como variável não controlável aumentou ainda mais a quantidade de células de manufatura na fronteira de produção. No entanto, pode-se perceber que a eficiência a partir de janeiro de 1999 reduziu-se em 7% (média), em função da desvalorização do real perante o dólar.

A inclusão das restrições às variáveis fez com que o número de células eficiente diminuísse, aumentando a confiabilidade dos resultados. A tabela a seguir apresenta os valores médios das eficiências das células de manufatura.

TABELA 2: VALORES MÉDIOS DAS EFICIÊNCIAS DAS CÉLULAS DE MANUFATURA.

Células	CRS	VRS	(VRS-CRS)/ VRS
Estamparia	77,24	80,26	3,77
Litografia	91,34	94,02	2,86
Mistura Preta	100,00	100,00	0,00
Papel Eletrolítico	92,39	100,00	7,61
R - 14	57,33	66,00	13,13
R - 20	61,83	100,00	38,17
R - 6	55,83	87,03	35,85

Determinada a eficiência de cada célula de manufatura, o próximo passo é a determinação de qual a importância de cada *input-output* para cada uma das células de manufatura da Microlite. O resultado é obtido com o *Frontier Analyst*, sendo apresentado um resumo no quadro abaixo (tabela 3). Não há diferença significativa entre os pesos dos *inputs/outputs* sob CRS ou VRS e há uma homogeneidade dos pesos para cada célula. A exceção fica por conta da célula de manufatura Papel Eletrolítico, a qual apresenta um resultado diferente para a MOD, MOI e Matéria-prima; quando comparadas às demais células.

TABELA 3: QUADRO RESUMO COM OS PESOS DE CADA INPUT/OUTPUT PARA AS CÉLULAS.

Células/ variáveis	Estamparia	Litografia	Mistura Preta	Papel Eletrolítico	R - 14	R - 20	R - 6	
CRS	Matéria-Prima	19	28	37	17	33	27	34
	MOD	44	41	39	72	49	40	52
	MOI	35	30	23	12	18	31	13
	Manutenção	1	2	1	0	0	1	0
	Inventário	1	0	1	13	13	0	0
	Produção	99	100	99	87	87	100	100
VRS	Matéria-Prima	20	25	32	15	30	23	39
	MOD	43	44	41	71	51	46	53
	MOI	37	30	27	14	18	29	11
	Manutenção	0	1	1	0	1	2	0
	Inventário	2	1	0	1	9	1	6
	Produção	98	100	100	99	91	99	95

De uma forma geral, o *output* com maior importância é a produção (aproximadamente 96% de peso), podendo inclusive excluir o *output* inventário de trabalhos futuros para a empresa em questão. No grupo dos *inputs*, a Mão-de-obra mostra-se como principal fator para a eficiência das células com 71% de importância (48 da MOD e 23% da MOI) contra 28% das Matérias-primas. Futuros trabalhos podem excluir a variável manutenção (neste trabalho apenas 1% de importância).

A tabela 4 indica o potencial de melhoria de cada unidade de manufatura para cada *input* e *output* utilizado na análise de eficiência. De uma forma geral, o potencial de melhoria dos *outputs* é baixo<sup>2</sup> (o valor alto das metas do inventário é compensado pela pequena importância dada a este *output*, observar a tabela 3).

Os *inputs* mão-de-obra (direta e indireta) apresentam uma grande possibilidade de melhoria, em especial para as células R-14, R-20 e R-6. Em segundo plano, encontra-se o input matéria-prima (com a variável manutenção utiliza-se o mesmo raciocínio da variável inventário).

TABELA 4: METAS PARA CADA CÉLULA DE MANUFATURA DA EMPRESA.

Células/ Variável	Estamparia	Litografia	Mistura Preta	Papel Eletrolítico	R-14	R-20	R-6
Matéria-prima	42	5	0	0	20	31	16
Mão-de-obra direta	47	19	0	0	56	56	68
Mão-de-obra indireta	30	15	0	0	63	30	45
Manutenção	45	26	0	0	62	48	70
Inventário	0	7	0	0	39	98	11
Produção	0	0	0	0	7	0	0

## 6. CONCLUSÃO

O método escolhido para análise das eficiências foi o DEA em função da simplicidade do seu uso e das outras vantagens citadas anteriormente. Mesmo quando a eficiência é tratada em períodos diversos (o método dos mínimos quadrado não absorve mudanças tecnológicas, sendo necessário à determinação de novas funções de produção para cada nova situação).

Uma das condições para a adoção do DEA na análise de eficiência é que o número de unidades (DMU) seja no mínimo o dobro do número de variáveis, soma da quantidade de *inputs* com *outputs*. Este trabalho mostra que é possível aplicar o DEA na situação de igualdade entre o número de DMU e de variáveis (neste trabalho: sete DMU contra seis variáveis). Para se trabalhar com uma quantidade menor de DMU deve-se recorrer às informações gerenciais que são incorporadas ao modelo como restrições às variáveis.

Os resultados da aplicação do modelo indicam em uma análise mais detalhada sobre o desempenho de cada célula especificamente qual a taxa de eficiência mês a mês no período estudado. Mostram, também, as possíveis metas médias para desempenho das células estudadas, as quais são calculadas a partir da projeção das células ineficientes sobre a fronteira de produção empiricamente determinada. As metas devem ser encaradas como indicativos de potencial de melhoria, uma vez que, estas em alguns casos

podem não ser aplicáveis na situação real, não invalidando seu valor como auxiliar para a melhoria das unidades.

Deve ser ressaltado que a eficiência determinada neste trabalho é uma eficiência relativa, e como tal, sujeita a mudanças quando ocorrer alterações nos valores e nos parâmetros do estudo. Outra observação importante é o fato das unidades mais beneficiadas com os resultados do estudo serem as células tidas como ineficientes, em função das sugestões de melhoria que o modelo apresenta para estas.

Os resultados obtidos demonstram claramente a possibilidade de utilizar a metodologia DEA para avaliar as eficiências de unidades produtivas, mesmo quando o número de unidades produtivas seja praticamente igual ao de inputs e outputs, reduzindo desta forma a limitação teórica da modelagem. Logo, é possível não só identificar quais unidades não são eficientes, mas também, apresentar uma indicação clara do potencial de crescimento que às unidades não eficientes possuem (em cada input e output em particular) e por conseguinte, deverão receber um maior controle por parte da gerência. Assim sendo, o método permite a avaliação da eficiência em diversas situações produtivas, como em uma rede de agências bancárias, entre universidades, rede de agência de automóveis, rede de lojas, entre setores de uma empresa, etc..

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, A. I., SEIFORD, L. M.. The mathematical programming approach to efficiency analysis. In: FRIED, H. O., LOVELL, C. A. K., SCHMIDT, S. S. (Orgs.). *The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Application*. New York: Oxford University Press, 1993. cap. 3, p. 120-159.
- BANKER, R. D., CHARNES, A. e COOPER, W. W.. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*. v. 30, 1984.
- BURBIDGE, J. L., DALE, B.G. Planning the introduction and predicting the benefits of group technology. *Engineering Costs and Production Economy*. v. 8, p. 117-128, 1984.
- BLACK, J. T. *The design of a factory with a future*, New York: McGraw-Hill, 1991.
- CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E.. Measuring the efficiency of making units. *European Journal of Operational Research*. v. 2, 1978.
- COELLI, T., RAO, D. S. P., BATTESE, G. E.. *An introduction to efficiency and productivity analysis*, Klumer Academic Publisher, 1998.
- FARRELL, M. J.. The measurement of productive efficiency. *Journal of Royal Statistical Society*. v. 120, part. 3, 1957.
- LOVELL, C. A. K.. Production frontier and productive efficiency. In: FRIED, H. O.; LOVELL, C. A. K., E SCHMIDT, S. S. (org.). *The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Application*. New York: Oxford University Press, 1993.
- OLORUNNIWO, F. O.. A framework for measuring success of cellular manufacturing implementation. *International Journal of Production Research*. v. 35, n. 11, p. 3043-3061, 1997.
- TALLURI, S.; HUQ, F.; PINNEY, W. E.. Application of data envelopment analysis for cell performance evaluation and process improvement in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*. v. 35, n. 8, p. 2157-2170, 1997.
- WEMMERLOV, U.. Production planning and control procedures for cellular manufacturing systems: concepts and practice. Falls Church, Va.: *American Production and Inventory Control Society*, 1987.
- WEMMERLOV, U.; E A. J. VAKHARIA. Dynamic and intermittent job and family structure of a flow line manufacturing cell. *Working Paper*. University of Wisconsin, 1986.
- WEMMERLOV, U.; HYER, N.. Research issues in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*. v. 25, n. 3, p. 413-431, 1987.
- WEMMERLOV, U.; HYER, N.. Cellular manufacturing in the US industry: a survey of users. *International Journal of Production Research*. v. 27, p. 1511-1530, 1989.