

Métodos de Melhora de Ordenação em DEA Aplicados à Avaliação Estática de Tornos Mecânicos

Fabiana Rodrigues Leta [‡] João Carlos C. B. Soares de Mello ^{*†}

Eliane Gonçalves Gomes [‡] Lidia Angulo Meza [§]

[‡] Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ, Brasil
fabiana@ic.uff.br

[†] Departamento de Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense
Av. Dr. Júlio Soares de Arruda 803, Parque São Quirino, 13088-300, Campinas, SP, Brasil
jcsmello@producao.uff.br

[‡] Embrapa – Parque Estação Biológica
Av. W3 Norte final, Asa Norte, 70770-901, Brasília, DF, Brasil
eliane.gomes@embrapa.br

[§] Departamento de Ciência dos Materiais - Universidade Federal Fluminense
Av. dos Trabalhadores 420, 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil
lidia_a.meza@yahoo.com

Abstract

In this paper we present a turning machine study with the use of Data Envelopment Analysis (DEA). The main goal is to obtain a unique performance measure aggregating all the partial measures without personal opinions. We use DEA CCR classic model together with certain techniques for ranking improvement. We include a brief description of those techniques as well as some new developments in order to achieve the goal of our problem. The models are used to evaluate four turning machines belonging to Machine-Tools Laboratory of Universidade Federal Fluminense.

Resumo

Este artigo faz um estudo preliminar da qualidade de máquinas-ferramenta com Análise Envoltória de Dados (DEA). O objectivo é agregar várias medidas de erro estáticas em uma única medida, mas sem incorporar opiniões subjectivas. Para este fim, além do modelo DEA CCR são usadas técnicas adicionais para melhorar a discriminação. Para adequar-se

* Autor correspondente.

à especificidade do problema, foi necessário introduzir algumas alterações à forma clássica de aplicação dos métodos mencionados. Os modelos são aplicados a um conjunto de quatro tornos do Laboratório de Usinagem da Universidade Federal Fluminense.

Keywords: DEA; Ranking improvement; Machine tools.

Title: Turning Machine Statica Evaluation using Methods for Ranking Improvement of DEA Models

1 Introdução

Na fabricação de uma peça, suas dimensões, seu acabamento superficial e seus desvios geométricos devem satisfazer ao exigido no projecto, o que envolve, em muitos casos, tolerâncias estreitas. Alcançar tal objectivo depende sobremaneira da qualidade de fabricação da máquina-ferramenta utilizada. Desse modo, o aumento da demanda de componentes fabricados com maior qualidade tem conduzido a consideráveis pesquisas sobre os meios de melhorar e preservar a qualidade de fabricação das máquinas-ferramenta (Branco e Leta, 1996).

Para melhorar a qualidade é necessário ter meios de medi-la. Ora, a qualidade de uma máquina-ferramenta depende de vários factores e, portanto, a medida de qualidade considera múltiplos critérios, com a necessária subjectividade da atribuição de maior ou menor importância a alguns factores, dependendo da opinião de um decisor.

Para conseguir uma medida mais confiável é recomendável usar um método que permita considerar vários factores com um mínimo de subjectividade. A Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis* – DEA) permite esse tipo de avaliação, já que os diversos factores em análise são ponderados por meio de problemas de programação linear, sem a interferência dos decisores.

Neste artigo são avaliados quatro tornos do Laboratório de Usinagem da Universidade Federal Fluminense com um modelo DEA CCR (Charnes et al., 1978) de *output* constante (Lovell e Pastor, 1999) e orientado a *inputs*. Devido à relação entre o número de variáveis e o número de DMUs não seguir a recomendação empírica de ao menos três DMUs para cada variável, surgem empates entre as unidades. Assim, são necessários modelos adicionais que promovam uma melhor discriminação.

Para promover o desempate entre as unidades eficientes são usadas quatro abordagens, com variações teóricas em relação aos modelos clássicos, de forma a melhor adaptarem-se ao problema abordado. As abordagens em questão, cujos aspectos teóricos são revistos na secção 5, são: supereficiência (Andersen e Petersen, 1993; Seiford e Zhu, 1999), restrições directas aos pesos (Dyson e Thanassoulis, 1988), avaliação cruzada (Sexton, 1986) e fronteira invertida (Yamada et al., 1994; Entani et al., 2002; Angulo Meza et al., 2003; Soares de Mello et al., 2005). Os resultados obtidos pelas diversas abordagens são então comparados com o objectivo de justificar a escolha da melhor máquina de acordo com o perfil de cada decisor.

2 Verificação de Máquinas-Ferramenta

2.1 Principais aspectos

Ao planejar o procedimento de fabricação de uma peça, o engenheiro de fabricação deve conhecer o estado das máquinas em relação à qualidade de fabricação, com o objectivo de reduzir o seu custo operacional. Em conjunto com outras actividades para prevenção de paradas e falhas, o controle de qualidade sobre a máquina é parte importante de qualquer sistema organizado de produção. Este controle pode ser chamado de Avaliação da Integridade Funcional da Máquina-Ferramenta, e seu objectivo é determinar que variações ocorrem na máquina e qual a sua influência nas tolerâncias de fabricação. Essa determinação deve ser objectiva e exacta.

Uma vantagem deste tipo de avaliação é a garantia da rastreabilidade da máquina aos padrões de qualidade, permitindo, deste modo, a uniformização da produção. Se os padrões de qualidade forem estabelecidos por normas internacionais, pode-se vislumbrar esta uniformização segundo parâmetros mundiais de qualidade, ou seja, um produto manufaturado em qualquer país seguindo tais normas possuirá aceitação internacional. Entretanto, ainda não existem normas que tratem especificamente da avaliação funcional de máquinas-ferramenta durante seu uso. O objectivo fundamental desta análise é minimizar o erro geométrico da máquina-ferramenta, que gera peças não conformes.

Os fabricantes de máquinas-ferramenta são cada vez mais solicitados a reduzir o tempo de produção de componentes nas máquinas, e melhorar a sua a qualidade. Em outras palavras, as máquinas-ferramenta devem ser capazes de produzir peças respeitando-se as tolerâncias de projeto cada vez mais estreitas, em condições econômicas de usinagem, quando manipuladas por um operador qualificado.

É necessário que a qualidade de fabricação da peça dependa apenas dos seguintes factores (Agostinho et al., 1977): a) fixação na base, rigidez da máquina, das partes componentes e dispositivos de fixação; b) alinhamento das várias partes da máquina em relação umas às outras, já que a execução de uma geometria de formas variadas é baseada no movimento relativo entre várias partes da máquina e, por isso, no alinhamento destas partes; c) qualidade e exactidão dos dispositivos de controle e dos mecanismos motores.

Cada máquina é submetida a testes de aceitação para avaliar sua qualidade construtiva. O conjunto destes testes é denominado de Verificação de Máquinas-Ferramenta e é dividido em verificações geométricas e provas práticas. As verificações geométricas avaliam o alinhamento das várias partes de uma máquina-ferramenta e são realizadas sob condições estáticas. Nas provas práticas os testes de alinhamento são realizados com a máquina submetida a carregamentos dinâmicos e excitações na frequência de trabalho. Consideran-se a influência de vibrações e deflexões das várias partes.

Vários parâmetros são definidos para avaliar cada máquina. Mesmo para um único parâmetro, a medida pode ser efetuada em diversos pontos, fornecendo assim uma série de critérios de avaliação que, no presente estudo, serão agregados considerando-se o modelo de Análise Envolvória de Dados de *output* constante. No caso de estudo aqui apresentado será considerada a avaliação de tornos mecânicos, destacando-se em especial a verificação geométrica referente ao paralelismo entre as guias da contra ponta e as guias do carro.

2.2 Verificações geométricas

Entende-se por verificação geométrica a confirmação das dimensões, formas e posições dos componentes da máquina, bem como dos seus movimentos relativos no campo de trabalho. Inclui todas as operações de medida que afectam esses componentes e fazem referência apenas aos elementos que possam prejudicar a qualidade de trabalho da máquina. São verificações ou testes de precisão e não têm relação com os testes ou com as verificações de funcionamento, como vibrações, ruídos anormais, movimento de prende solta de componentes, verificações de torque residual, etc., nem com as verificações das características das máquinas, tais como velocidades e avanços.

A apreciação das definições de dimensões, forma, posições e movimentos relativos conduz a uma necessária distinção entre definições geométricas e definições metrológicas. “As definições geométricas são abstractas e relatam somente linhas e planos imaginários” (Jain, 1981). Na prática, as definições geométricas geralmente não são aplicáveis, pois não consideram os meios de execução nem as possibilidades de verificação.

As verificações geométricas geralmente feitas em máquina-ferramenta são (Mateus, 1974): nivelamento de barramento e mesa; movimento rectilíneo ou perpendicular de linha recta e plano; paralelismo, equidistância e coincidência; retilineidade; rotações.

2.3 Provas práticas

As provas práticas constituem, na sua essência, em pôr a máquina em funcionamento e verificar se trabalha sob as condições especificadas. Dessa forma, as verdadeiras provas práticas devem ser estabelecidas pelo utilizador da máquina. Apesar disso, e como muitas vezes as máquinas não são adquiridas para executar um único tipo de trabalho, é necessário estabelecer uma série de trabalhos-tipo, com tolerâncias tais que, executados por um operário neutro, possam definir a qualidade da máquina.

As provas práticas incluem a usinagem de peças de teste, apropriadas para os propósitos fundamentais a que a máquina tenha de ser designada, tendo já pré-determinado limites e tolerâncias (Jain, 1981). Para determinar a exactidão da máquina-ferramenta, devem ser executados ensaios práticos com operações de acabamento condizentes com o projeto da máquina.

Caso seja dispendioso ou difícil conduzir ambos os tipos de testes, a máquina pode ser avaliada somente por verificações geométricas ou somente por provas práticas (Branco e Leta, 1996). Quando ambos os métodos não fornecerem as mesmas indicações, “os resultados obtidos por testes práticos devem ser aceites como válidos” (Jain, 1981).

As provas práticas representam com maior realidade as condições de operação da máquina e por isso os seus resultados são de maior valor do que as verificações geométricas. Entretanto, um ensaio não exclui o outro, sendo ambos de grande importância para avaliar a qualidade de fabricação da máquina-ferramenta.

2.4 Paralelismo entre as guias da contra ponta e as guias do carro

O procedimento de verificação deste paralelismo verifica se, ao usinar cilindros de comprimentos diferentes, estes terão o mesmo desvio de cilindricidade. Para máquinas em uso permite descrever o desgaste do barramento em relação às guias da contra ponta. Pode-se esperar que o desgaste no barramento concentre-se na região próxima ao cabeçote, enquanto o desgaste das guias da contra ponta terá maior intensidade na região próxima ao outro extremo do barramento.

No recebimento de uma máquina nova, os seguintes erros são aceitáveis: a) no plano vertical, 40 mm; b) no plano horizontal, 30 mm.

A metodologia para obtenção das medidas consiste na execução das seguintes etapas: fixa-se o relógio comparador no suporte e este no adaptador para o porta ferramentas; o sensor do relógio é posicionado sobre a guia da contra ponta, tomando-se cuidado para que fique na região de deslizamento da base da contra ponta, que é a região de atrito e desgaste; desloca-se o carro e a cada 100 mm realiza-se a leitura das indicações do relógio. Na Figura 1 tem-se um desenho esquemático da montagem dos instrumentos para verificação (em perspectiva e em vista lateral).

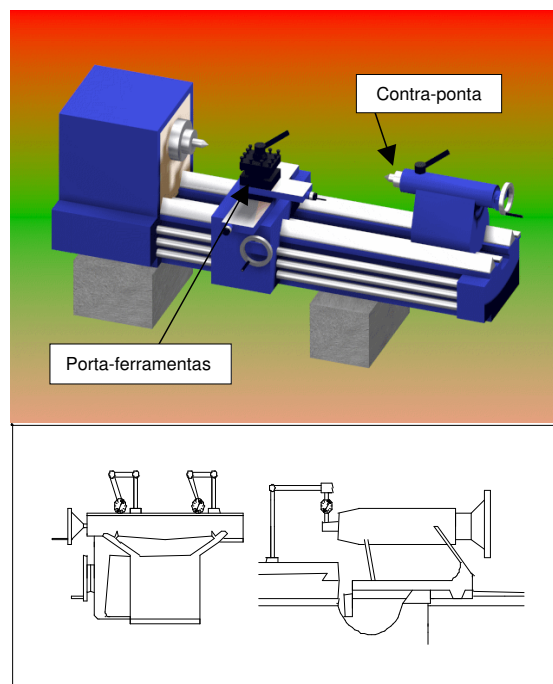


Figura 1: Verificação do paralelismo entre as guias da contra ponta e as guias do carro.

3 Análise Envolvatória de Dados

A Análise Envolvatória de Dados (DEA) tem como objectivo medir a eficiência de unidades tomadoras de decisão, designadas por DMUs (*Decision Making Units*), na presença de múltiplos *inputs* (entradas, recursos ou factores de produção) e múltiplos *outputs* (saídas ou produtos).

Neste artigo, o modelo DEA a ser usado é o CCR (também conhecido por CRS ou *constant returns to scale*), que trabalha com retornos constantes de escala (Charnes et al., 1978). Em sua formulação matemática considera-se que cada DMU k , $k = 1, \dots, n$, é uma unidade de produção que utiliza m *inputs* x_{ik} , $i = 1, \dots, m$, para produzir s *outputs* y_{jk} , $j = 1, \dots, s$. Esse modelo maximiza o quociente entre a combinação linear dos *outputs* e a combinação linear dos *inputs*, com a restrição de que para qualquer DMU esse quociente não pode ser maior que 1.

Esse modelo de programação fracionária pode ser linearizado, transformando-se em um Problema de Programação Linear (PPL) apresentado em (2), onde h_o é a eficiência da DMU oem análise; x_{io} e y_{jo} são os *inputs* e *outputs* da DMU o ; v_i e u_j são os pesos calculados pelo modelo para *inputs* e *outputs*, respectivamente.

$$\begin{aligned} \max h_o &= \sum_{j=1}^s u_j y_{jo} \\ \text{sujeito a} & \\ \sum_{i=1}^m v_i x_{io} &= 1 \\ \sum_{j=1}^s u_j y_{jk} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ik} &\leq 0, \quad k = 1, \dots, n \\ v_i, u_j &\geq 0 \quad \forall i, j \end{aligned} \tag{1}$$

Apesar de os modelos DEA apresentarem a vantagem de permitir fazer ordenações sem depender de opiniões de decisores, são extremamente benevolentes com as unidades avaliadas. Estas podem ser eficientes desconsiderando vários dos critérios de avaliação. Assim, é comum haver um grande número de unidades com eficiência 100%. Tradicionalmente, considera-se que o número de unidades deve ser, pelo menos, o dobro ou o triplo do número de variáveis para que seja obtida uma boa classificação. No presente artigo, o número de variáveis é maior que o número de unidades. Tal situação não inviabiliza o uso de DEA, mas recomenda a utilização de técnicas adicionais para aumentar a discriminação.

4 Modelamento

Para a avaliação de quatro tornos do Laboratório de Usinagem da Universidade Federal Fluminense, considerando as medidas efectuadas de paralelismo entre guias, foi usado o modelo DEA CCR. Ao usar DEA é permitido que cada torno busque sua eficiência ao especializar-se na sua melhor medida, ou seja, escolher sua melhor faixa de operação.

Os desvios de paralelismo são interpretados como um preço a pagar para o torno funcionar, sendo, portanto, considerados *inputs*. Como trata-se de uma avaliação estática, não há nenhuma *output*, já que nada foi produzido. Essa é uma situação que conduz a paradoxos que podem ser contornados assumindo-se que o *output* é constante e unitário para todos os tornos (Lovell e Pastor, 1999). O *output* representaria, assim, a própria existência do torno, numa abordagem semelhante à usada por Soares de Mello e Gomes (2004). Esses modelos são equivalentes a modelos multicritério aditivo, com a particularidade de que as próprias alternativas atribuem pesos a cada critério, ignorando qualquer opinião de um eventual decisor. Ou seja, DEA é usado apenas como ferramenta multicritério, e não como uma medida de eficiência clássica. Estudos sobre este tipo de uso para DEA podem ser encontrados em Farinaccio e Ostanello (1999), Belton e Stewart (1997), Soares de Mello et al. (2002b, 2004b) e Senra (2004).

A Tabela 1 resume os dados utilizados. No modelamento do problema foram ignoradas as medidas entre 0 e 100 mm, já que apresentam erros pequenos e semelhantes, não contribuindo para distinguir as máquinas entre si.

Tabela 1. *Inputs e Output* para o modelo DEA CCR.

DMU	<i>Output</i>	<i>Input</i>			
	Existência do torno	d200	d300	d400	d500
T1	1	35	58	52	35
T2	1	2	5	40	50
T3	1	10	30	48	49
T4	1	25	40	35	22

A Tabela 2 apresenta os resultados do modelo DEA CCR clássico. Verifica-se um empate para duas DMU, T2 e T4. Para que haja uma distinção entre essas duas DMUs eficientes, devem-se empregar modelos adicionais.

Tabela 2. Resultados do modelo DEA CCR clássico.

DMU	Eficiência (%)
T1	67,8
T2	100,0
T3	85,7
T4	100,0

5 Desempate entre Unidades Eficientes

5.1 Formulação teórica

Angulo Meza e Estellita Lins (2002) apresentam uma revisão dos modelos para aumento de discriminação em DEA. Os autores dividem esses modelos em dois grandes grupos: modelos que incorporam a informação *a priori* do decisor, e modelos que não usam aquela informação para seus cálculos. Dentro do primeiro grupo temos os modelos de restrições aos pesos e um modelo DEA surgido de uma fusão com o apoio multicritério à decisão, chamado de Análise de Eficiência do Valor. Já o segundo grupo compõe-se de três modelos: supereficiência, avaliação cruzada e um modelo multiobjectivo. O método da supereficiência, não estudado pelos autores referidos, enquadra-se no segundo grupo.

Neste artigo optou-se por usar quatro modelos de aumento de discriminação em DEA, cujos resultados são comparados. Os modelos usados, supereficiência, restrições aos pesos, avaliação cruzada e fronteira invertida, são descritos sucintamente a seguir.

5.1.1 Supereficiência

A ideia básica desse modelo é comparar a unidade que é avaliada com uma combinação linear de todas as outras unidades da amostra, sendo que a unidade de referência é excluída. Assim, dado que a unidade que em avaliação é retirada do conjunto das unidades de comparação, a eficiência obtida pode ser maior que 100%. Como este modelo permite que as DMUs obtenham eficiências superiores a 100%, ele consegue desempatar as unidades eficientes.

O método tem como vantagem o facto de fornecer uma discriminação entre as unidades eficientes, sem alterar a ordenação das ineficientes. A desvantagem é que a ordenação obtida depende apenas de condições locais da fronteira, não de propriedades gerais das DMUs ou da fronteira. A Figura 2 mostra a avaliação da unidade C utilizando o modelo da supereficiência.

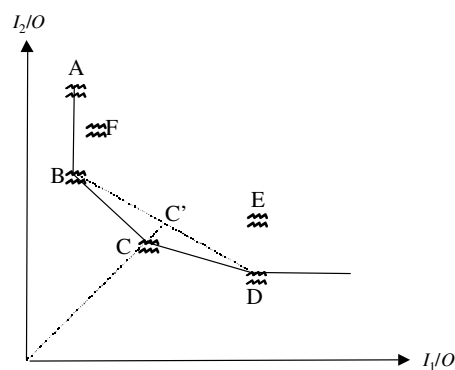


Figura 2: Exemplo da supereficiência.

Em (2) apresenta-se o modelo (formulação do envelope) para o cálculo da supereficiência (Charnes et al., 1994). Nesse modelo θ é a eficiência; s^+ e s^- são as folgas; e é um vector unitário; X_k e Y_k representam, respectivamente, o conjunto dos *inputs* e dos *outputs*; λ_k representa a contribuição da DMU k na formação do alvo da DMU em avaliação.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \theta - e' s^- - e' s^+ \\
 & \text{sujeito a} \\
 & \theta X_j = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k X_k + s^- \\
 & Y_j = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \lambda_k Y_k - s^+ \\
 & \lambda_k, s^+, s^- \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

5.1.2 Restrições aos Pesos

Quando há julgamentos de valor sobre a importância relativa entre os *inputs* e/ou *outputs*, estes podem ser incorporados aos modelos DEA através de restrições aos pesos associados aos *inputs* e/ou aos *outputs* das unidades avaliadas. Allen et al. (1997) apresentam uma completa revisão da evolução da incorporação de julgamentos de valor através de restrições aos pesos.

A incorporação de julgamentos de valor através de restrições aos pesos pode ser dividida em três grupos de métodos (Estellita Lins e Angulo Meza, 2000): restrições directas sobre os multiplicadores; ajuste dos níveis de *input-output* observados para a captura de julgamentos de valor; restrição a *inputs* e *outputs* virtuais.

Neste artigo foram usadas restrições directas aos pesos. Nesse enfoque, desenvolvido por Dyson e Thanassoulis (1988) e generalizado por Roll et al. (1991), são impostos limites numéricos aos multiplicadores com o objectivo de não superestimar ou ignorar *inputs* e *outputs* na análise.

Seja $I_o = \sum_i v_i x_{io}$ o numerador da função objectivo na formulação original, no qual I_o é o *input* virtual consumido pela DMU o . Os limites impostos aos multiplicadores de *inputs*, v_i , e de *outputs*, u_j , são dados pelas relações apresentadas em (3), onde II , SI , IO , SO são os limites inferior e superior para *inputs* e *outputs*, respectivamente.

$$\begin{aligned} II_i &\leq v_i \leq SI_i \\ IO_i &\leq u_i \leq SO_i \end{aligned} \quad (3)$$

Esse tipo de restrição pode levar à inviabilidade do PPL, já que estabelecer um limite superior ao peso de um *input* implica em um limite inferior no *input* virtual do restante das variáveis. Estellita Lins e Silva (2002) discutem em que condições as restrições aos pesos não tornam o PPL inviável. Neste artigo buscam-se, por tentativas sucessivas, os valores máximos que não inviabilizam os PPLs.

5.1.3 Avaliação Cruzada

Esta abordagem, introduzida por Sexton (1986) e ampliada por Doyle e Green (1994), faz uma avaliação de conjunto, isto é, na avaliação cruzada as DMUs têm uma avaliação própria (DEA clássico) e também são avaliados pelas outras DMUs utilizando os pesos ótimos dados pelo modelo. Dessa forma, cada DMU determina os pesos para o cálculo de seu índice de eficiência e utiliza esses pesos para determinar os índices de eficiência das outras DMUs.

Pode-se dizer que enquanto em DEA clássico cada DMU é avaliada segundo seu próprio ponto de vista, na avaliação cruzada ela também é avaliada segundo os pontos de vista das outras DMUs. Chama-se eficiência cruzada à média dos pontos de vista de todas as DMUs.

Por outro lado, os PPLs que determinam a eficiência de cada DMU podem ter múltiplas soluções ótimas para determinar o índice de eficiência, ou seja, os pesos (ou multiplicadores) podem não ser únicos. Para escolher entre os vários possíveis valores para os pesos ótimos de cada DMU, arbitra-se que estes quando aplicados às outras DMUs devem minimizar a sua eficiência (formulação agressiva) ou, ao contrário, maximizá-la (formulação benevolente). Doyle e Green (1994) estabeleceram o PPL (4) para o cálculo dos pesos na formulação agressiva, onde a eficiência da DMU s usando os pesos da DMU k é dada em (5).

$$\begin{aligned}
& \text{Min } \sum_i \left(u_{ki} \sum_{s \neq k} y_{si} \right) - \sum_j \left(v_{kj} \sum_{s \neq k} x_{sj} \right) \\
& \text{sujeito a} \\
& v_{kj} x_{kj} = 1 \\
& \sum_j \\
& u_{ki} y_{ki} - E_{kk} \sum_j v_{kj} x_{kj} = 0 \\
& \sum_i \\
& u_{ki} y_{si} - \sum_j v_{kj} x_{sj} \leq 0 \\
& \sum_i, \forall s \neq k \\
& u_{ki}, v_{kj} \geq 0
\end{aligned} \tag{4}$$

$$E_{ks} = \frac{\sum_i u_{ki} y_{si}}{\sum_j v_{kj} x_{sj}} \tag{5}$$

5.1.4 Fronteira Invertida

O quarto modelo proposto para aumento da discriminação entre as unidades em avaliação é a fronteira invertida (Yamada et al., 1994; Entani et al., 2002). O uso de fronteira invertida para contornar o problema da baixa discriminação foi proposto inicialmente por Angulo Meza et al. (2003).

A fronteira invertida é uma avaliação pessimista das DMUs. Para tanto é feita uma troca dos *inputs* com os *outputs* do modelo original. Esta fronteira invertida é composta pelas DMUs com as piores práticas gerenciais (e pode ser chamada de fronteira ineficiente). Pode-se igualmente afirmar que as DMUs pertencentes à fronteira invertida têm as melhores práticas sob uma óptica oposta.

Para ordenar as DMUs é, então, calculado um índice de eficiência agregado, que é a média aritmética entre a eficiência em relação à fronteira original e a ineficiência (1 menos eficiência) em relação à fronteira invertida. Este índice pode ser apresentado de forma normalizado, para o que basta dividir todos os valores pelo maior índice calculado.

5.2 Adaptações e resultados

O primeiro modelo adicional usado para desempatar as DMUs T2 e T4 foi o modelo de super-eficiência. Na Tabela 3, que apresenta os resultados, verifica-se que o torno 2 é melhor que o torno 4.

São, em seguida, apresentados os outros três modelos: restrições aos pesos, avaliação cruzada e fronteira invertida. Nos dois primeiros casos a avaliação foi conduzida de maneira diferente da que é usual na literatura, com alterações metodológicas propostas pelos autores para este caso particular.

Tabela 3. Resultados do modelo de supereficiência DEA CCR.

DMU	Eficiência (%)
T1	67,8
T2	600,0
T3	85,7
T4	159,0

No caso do modelo de restrições aos pesos foram usadas restrições directas aos pesos dos *inputs* em vez de usar regiões de segurança. Considerou-se como a melhor DMU aquela que permitiu restrições mais rígidas aos pesos, sem inviabilizar o PPL. Com este procedimento não foi necessário que o decisor arbitrasse relações entre pesos, o que permitiu que a avaliação continuasse independente de qualquer opinião subjectiva.

Para este caso, o torno T2 deixou de ser eficiente quando foi imposto que o valor mínimo do peso de cada *input* fosse, pelo menos, 0,01. Já para o torno T4, este parâmetro foi 0,005 e, dessa forma, o torno T2 é o melhor, já que permitiu restrições mais rígidas aos pesos, sem perder a eficiência. Registre-se que, neste caso, perder a eficiência significa tornar inviável o PPL que a calcula.

Tal como foi descrito, no modelo de avaliação cruzada todas as DMUs avaliam-se mutuamente obtendo-se uma média final das avaliações. Isso torna a classificação extremamente sensível à inclusão ou exclusão de qualquer alternativa, mesmo que ineficiente. Para reduzir essa desvantagem, foi usada a abordagem proposta por Soares de Mello et al. (2002a) de só usar as DMUs eficientes como unidades avaliadoras. Ao fazer com que a DMU T2 avalie a DMU T4, a eficiência de T4 foi igual a 8%. No caso contrário, ao T4 avaliar T2, a eficiência de T2 foi de 44%. Como há apenas duas DMUs avaliadoras, não é necessário calcular eficiências médias para ratificar-se a conclusão anterior de superioridade do torno T2.

Finalmente foi usado o método da fronteira invertida. Para os cálculos deste método foi usado o programa SIAD (Angulo Meza et al., 2004), que fornece o índice agregado, já normalizado. A Tabela 4 resume os resultados obtidos:

Tabela 4. Resultados obtidos com o uso da fronteira invertida.

DMU	Eficiência invertida (%)	Índice agregado normalizado (%)
T1	100,0	52,8
T2	100,0	77,8
T3	100,0	66,7
T4	71,4	100,0

Nota-se que este método inverteu a ordenação relativa de T2 e T4, quando comparado com os métodos anteriores. Este resultado é explicável pelo facto de que os outros métodos usaram informação relativa a todos os *outputs*. Já o índice agregado usa apenas as informações mais otimistas (eficiência DEA clássica) e pessimistas (fronteira invertida). No caso presente, observa-se que os tornos T1, T2 e T3 apresentam eficiência de 100% em relação à fronteira invertida, o que significa que cada um deles é o que apresenta pior resultado em relação a, pelo

menos, uma medida. Como o torno T4 nunca é o pior e, tal como T2, é o melhor em relação a alguma medida, teve o melhor resultado neste método.

5.3 Comparação de resultados

Os resultados obtidos por três dos quatro métodos usados foram idênticos. Isto decorre do facto de que esses métodos (supereficiência, avaliação cruzada e restrições aos pesos) mantêm o carácter optimista das avaliações feitas por DEA. Decisores que queiram que a melhor peça fabricada por um dos tornos seja a melhor possível, devem usar esses métodos.

Já o método da fronteira invertida considera, com igual importância, uma avaliação optimista e outra pessimista. Ou seja, além de se exigir que as melhores peças sejam muito boas (embora não sejam as melhores possíveis), exige-se ainda que as piores não sejam de qualidade muito baixa

As alterações introduzidas no método da avaliação cruzada resultaram em uma simplificação dos cálculos. O uso apenas das DMUs eficientes pode ser estendido a outros casos, desde que se lida rigorosamente com o problema da multiplicidade de soluções óptimas do modelo dos multiplicadores. Em Soares de Mello et al. (2004a) é mostrado um caso em que a técnica aqui proposta não pode ser usada. A outra alteração proposta, de não fazer médias, só foi possível porque apenas duas DMUs eram eficientes.

Já as alterações ao método de restrição aos pesos são válidas em qualquer problema em que não se deseja levar em conta opiniões de decisores ou de especialistas. No entanto, a sua aplicação a casos em que haja um grande número de DMUs eficientes, pode tornar-se extremamente morosa, ou exigir o uso de técnicas de análise de sensibilidade.

O método da supereficiência tem a desvantagem de ser baseado em propriedades locais da fronteira e não tem interpretação prática. Embora sempre possa ser usado, os resultados não são muito fiáveis.

Por outro lado, o método da fronteira invertida pode ter aplicação quase universal. A excepção é quando se deseja permitir que as unidades em avaliação especializem-se em algumas tarefas. O método tem encontrado várias aplicações práticas (Angulo Meza et al., 2003; Pimenta et al., 2004; Gomes et al., 2004) e teóricas (Soares de Mello et al., 2005).

6 Conclusões

A qualidade de uma máquina-ferramenta depende de vários factores. Esses factores podem ser avaliados conjuntamente utilizando-se a abordagem DEA, que realiza uma avaliação sem informação adicional dos decisores com uso de Problemas de Programação Linear.

No caso em estudo, devido ao grande número de variáveis em relação às unidades avaliadas, duas DMUs foram consideradas eficientes, sem que o modelo básico distinguísse entre as duas. Para desempata-las foram utilizadas abordagens adicionais, que conduziram, em sua maioria, ao resultado de superioridade do torno T2 em relação ao T4.

A questão da escolha entre T2 e T4 fica condicionada ao objectivo do decisor. Caso ele

deseje garantir que no pior dos casos a máquina não terá o funcionamento muito deficiente (atitude pessimista) deve preferir o T4. Qualquer outra posição do decisor conduz à escolha de T2.

Os resultados aqui apresentados constituem um estudo preliminar, já que outros parâmetros devem ser considerados numa avaliação completa de máquinas-ferramenta. Em especial, a avaliação de provas práticas deve ser objecto de estudo posterior, onde DEA será usado como uma verdadeira medida de eficiência, já que em vez de *output* unitário poderá ser levado em conta, por exemplo, a velocidade de usinagem.

7 Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio financeiro, processo 301095/2003-5.

8 Referências

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S., Lirani, J. Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões. Edgard Blücher, São Paulo, 1977.
- Allen, R., Athanassopoulos, A., Dyson, R.G., Thanassoulis, E. Weights restrictions and value judgements in data envelopment analysis: evolution, development and future directions. *Annals of Operations Research*, v. 73, p. 13-34, 1997.
- Andersen P., Petersen N.C. A Procedure for Ranking Efficient Units in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, v. 39, n. 10, p. 1261-1264, 1993.
- Angulo Meza, L., Estellita Lins, M.P. Review of Methods for Increasing Discrimination in Data Envelopment Analysis. *Annals of Operations Research*, v. 116, p. 225-242, 2002.
- Angulo Meza, L., Biondi Neto, L., Soares de Mello, J. C. C. B., Gomes, E. G., Coelho, P. H. G. FSDA - Free Software for Decision Analysis (SLAD - Software Livre de Apoio à Decisão): A software package for Data Envelopment Analysis models. *Memórias del XII Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación de Operaciones y Sistemas - CLAIO*, 2004.
- Angulo Meza, L., Gomes, E.G., Soares de Mello, J.C.C.B., Biondi Neto, L. Fronteira DEA de dupla envoltória no estudo da evolução da ponte aérea Rio-São Paulo. *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes* 2003, v. 2, p.1158-1166, 2003.
- Belton, V., Stewart, T. J. DEA and MCDA: competing or complementary approaches?. Working Paper, University of Strathclyde, Scotland, 1997.
- Branco, D.F., Leta, F.R. Avaliação de Tornos Mecânicos em Uso. *Anais do 2º Congresso Internacional de Engenharia Industrial e XVI ENEGEP*, Piracicaba, SP,1996.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E. Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, p. 429-444, 1978.
- Charnes, A., Cooper, W.W., Lewin, A.Y., Seiford, L.M. *Data Envelopment Analysis: Theory, methodology and applications*. Kluwer Academic Publishers, USA, 1994.
- Doyle, J., Green, R. Efficiency and cross-efficiency in DEA derivations, meanings and uses. *Journal of the Operational Research Society*, v. 45, p. 567-578, 1994.
- Dyson, R.G., Thanassoulis, E. Reducing Weight Flexibility in Data Envelopment Analysis. *Journal of the Operational Research Society*, v. 39, n. 6, p. 563-576, 1988.

- Entani, T., Maeda, Y., Tanaka, H. Dual Models of Interval DEA and its extensions to interval data. *European Journal of Operational Research*, v. 136, p. 32-45, 2002.
- Estellita Lins, M.P., Angulo Meza, L. *Análise Envoltória de Dados e perspectivas de integração no ambiente de Apoio à Decisão*. Editora da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.
- Estellita Lins, M.P., Silva, A.C.M. Evitando a inviabilidade em modelos DEA com restrições aos pesos. Relatório Técnico EP03/01-PO, Programa de Engenharia de Produção/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.
- Farinaccio, F., Ostanello, A. Evaluation of DEA Validity as a MCDA/M Tool: Some Problems And Issues. Technical Report TR-99-06, Dipartimento de Informatica, Università di Pisa, Itália, 1999.
- Gomes, E.G., Mangabeira, J.A.C., Soares de Mello, J.C.C.B., Angulo Meza, L. The use of Data Envelopment Analysis in agriculture in the presence of interval data. *Memorias del XII Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa – CLAIO*, 2004.
- Jain, R. K. *Engineering Metrology*. Khanna Publisher, New Delhi, 1981.
- Lovell, C.A.K., Pastor, J.T. Radial DEA models without inputs or without outputs. *European Journal of Operational Research*, v. 118, n. 1, p. 46-51, 1999.
- Mateus, A G. *Tolerâncias e Ajustes*. Editora Polígono, 1974.
- Pimenta, H.L.N., Macedo, M.A., Soares de Mello, J.C.C.B. Decisão de realização de investimentos em tecnologia da informação com análise envoltória de dados. *Revista Produção On Line*, v. 4, n. 2, p. 1-16, 2004.
- Roll, Y., Cook, W.D., Golany, B. Controlling factor weights in DEA. *IIE Transactions*, v. 23, n. 1, p. 2-9, 1991.
- Seiford, L.M., Zhu, J. Infeasibility of super efficiency data envelopment analysis models. *Information Systems and Operational Research*, v. 27, p. 174-187, 1999.
- Senra, L.F.A.C. *Métodos de seleção de variáveis em DEA: Estudo de Caso no Setor Elétrico*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.
- Sexton, T.R. *Measuring Efficiency: An assessment of Data Envelopment Analysis*. New Directions For Program *Evaluation*, n. 32, San Francisco, Jossey-Bass, 1986.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Gomes, E.G., Angulo Meza, L., Biondi Neto, L., Coelho, P.H.G. A modified DEA model for Olympic evaluation. *Memorias del XII Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa – CLAIO*, 2004a.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Gomes, E.G., Angulo Meza, L., Estellita Lins, M.P. Selección de Variables Para el Incremento del Poder de Discriminacion de los Modelos DEA. *Revista de La Escuela de Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, n. 24, p. 40-52, 2004b.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Gomes, E.G., Angulo Meza, L., Biondi Neto, L., Sant'Anna, A.P. Fronteiras DEA difusas. *Investigação Operacional*, v. 25, n. 1, p. 85-103, 2005.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Estellita Lins, M.P., Gomes, E.G. Construction of a smoothed DEA frontier. *Pesquisa Operacional*, v. 22, n. 2, p. 183-201, 2002a.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Gomes, E.G., Soares de Mello, M.H.C., Estellita Lins, M.P. Método Multicritério para Seleção de Variáveis em modelos DEA. *Pesquisa Naval*, v. 15, p.55-66, 2002b.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Gomes, E.G. Eficiências Aeroportuárias: Uma Abordagem Comparativa com Análise de Envoltória de Dados. *Revista de Economia e Administração*, v. 3, n. 1, p. 15-23, 2004.
- Yamada, Y, Matui, T., Sugiyama, M. New analysis of efficiency based on DEA. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, v. 37, n. 2, p. 158-167, 1994.