

USO DE ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE TORNOS MECÂNICOS

Fabiana Rodrigues Leta

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ
fabiana@ic.uff.br

João Carlos Correia Baptista Soares de Mello

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24240-240, Niterói, RJ
jcsmello@producao.uff.br

Eliane Gonçalves Gomes

Embrapa Monitoramento por Satélite
Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803, Parque São Quirino, 13088-300, Campinas, SP
eliane@cnpm.embrapa.br

Lidia Angulo Meza

Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Veiga de Almeida
Rua Ibituruna, 108, 4º andar, Maracanã, 20271-020, Rio de Janeiro, RJ
lidia_a_meza@yahoo.com

Resumo. *Este trabalho faz um estudo preliminar da qualidade de máquinas-ferramenta com Análise Envoltória de Dados (DEA). O objeto de estudo é um conjunto de quatro tornos do Laboratório de Usinagem da UFF. No presente trabalho, a avaliação destas máquinas é feita apenas a partir de medidas estáticas. Estas medidas devem ser agregadas em um único índice, devendo-se, no entanto, evitar interferência de avaliações subjetivas sobre a importância de cada medida. A técnica Análise Envoltória de Dados presta-se a este fim, já que calcula os pesos atribuídos a cada fator através de um modelo matemático de Programação Linear. Devido ao fato de se disporem de poucas máquinas para avaliar, as características matemáticas do DEA conduziam a um empate. Para desempatar, utilizaram-se os métodos de avaliação cruzada, restrições aos pesos, supereficiência e fronteira invertida. Destes métodos, três deles, por serem baseados em avaliações otimistas, favoreceram uma das máquinas previamente eficientes. Enquanto o método da fronteira invertida, por ser baseado em avaliação pessimista, favoreceu a outra máquina. Assim este é considerado o melhor método para situações em que se deseja minimizar o risco de obter produtos de má qualidade em tornos mecânicos.*

Palavras chave: *DEA, Incremento da discriminação, Máquinas-ferramenta.*

1. INTRODUÇÃO

Na fabricação de uma peça, suas dimensões, seu acabamento superficial e seus desvios geométricos devem satisfazer às condições de projeto, que envolvem em muitos casos tolerâncias estreitas. Alcançar tal objetivo 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 fatores e, portanto, a medida de qualidade considera múltiplos critérios, com a necessária subjetividade da atribuição de maior ou menor importância a alguns fatores, dependendo da opinião de um decisor.

Para conseguir uma medida mais confiável é recomendável usar um método que permita considerar vários fatores com um mínimo de subjetividade. A Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*) permite esse tipo de avaliação, já que os diversos fatores em análise são ponderados por meio de problemas de programação linear, sem a interferência dos decisores. No entanto, esse método pode não descriminar suficientemente bem as opções analisadas. Assim, são necessários modelos adicionais que promovam uma melhor discriminação. Neste trabalho são usadas quatro dessas abordagens, com variações teóricas em relação aos modelos clássicos, de forma a melhor adaptarem-se ao problema abordado.

2. VERIFICAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

É necessário que a qualidade de fabricação da peça dependa apenas dos seguintes fatores (Agostinho et al., 1977):

- Rrigidez da máquina, das partes componentes e dos dispositivos de fixação;
- Alinhamento entre as várias partes da máquina;
- Qualidade e exatidão dos dispositivos de controle e dos mecanismos motores.

O alinhamento relativo das partes da máquina é considerado um dos itens mais importantes nesse contexto, pois a execução de peças de geometria de formas variadas é baseada no movimento relativo entre as várias partes da máquina.

Logo, a qualidade de fabricação de peças depende da qualidade de fabricação da máquina. Por isso, cada máquina é submetida a testes de aceitação relativos aos itens citados acima. Os testes de aceitação constituem-se de procedimentos de verificação aos quais a máquina é submetida para avaliar a sua qualidade construtiva e consequente capacidade funcional. Ao conjunto de testes de aceitação relativos a máquinas de diferentes categorias chama-se Verificação de Máquinas-Ferramenta.

A Verificação de Máquinas-Ferramenta divide-se em duas classes: verificações geométricas e provas práticas. 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 afetam esses componentes e fazem referência apenas aos elementos que possam prejudicar a qualidade de trabalho da máquina. Já nas provas práticas, os testes são realizados com a máquina submetida a carregamentos dinâmicos e excitações na freqüência de trabalho, considerando-se a influência de vibrações e deflexões das várias partes.

É importante ressaltar que o conjunto de verificações citado nas normas é estabelecido apenas para recepção de máquinas-ferramenta, e não consideram critérios de aceitação para máquinas em uso (DIN, 1964).

No estudo de caso 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.

2.1. Paralelismo entre as Guias da Contra Ponta e as Guias do Carro

O procedimento de verificação de paralelismo entre as guias da contra ponta e as guias do carro verifica se, ao usinar cilindros de comprimentos diferentes, estes terão o mesmo desvio de cilindricidade. Em 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 próximo ao 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).

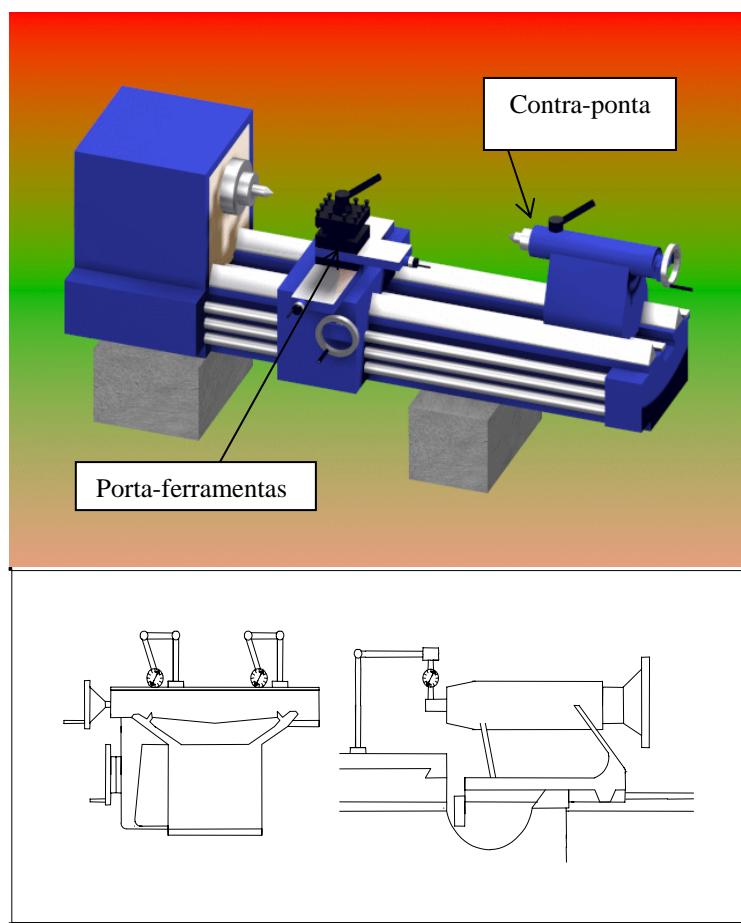


Figura 1. Verificação do paralelismo entre as guias da contra ponta e as guias do carro.

3. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

A Análise Envoltória de Dados (DEA) tem como objetivo medir a eficiência de unidades tomadoras de decisão, designadas por DMUs (*Decision Making Units*), na presença de múltiplos *inputs* (entradas, recursos ou fatores 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.

Mediante alguns artifícios matemáticos, esse modelo pode ser linearizado, transformando-se em um Problema de Programação Linear (PPL) apresentado em (1), onde h_o é a eficiência da DMU o em 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.

$$\max h_o = \sum_{j=1}^s u_j y_{jo}$$

sujeito a

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

Embora os modelos DEA tenham 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.

3.1. Modelos para Aumento de Discriminação em DEA

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 ou usuário, 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 multiobjetivo.

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.

3.1.1. Supereficiência

A idéia básica desse modelo é comparar a unidade que está sendo 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 está sendo avaliada 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 fato 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.

Em (2) apresenta-se o modelo (formulação do envelope) para o cálculo da supereficiência.

$$\text{Min } \theta - e's^- - e's^+$$

sujeito a

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

Nesse modelo θ é a eficiência; s^+ e s^- são as folgas; e é um vetor 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.

3.1.2. 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 diretas 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 diretas 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 objetivo de não superestimar ou ignorar *inputs* e *outputs* na análise.

Seja $I_o = \sum_i v_i x_{io}$ o numerador da função objetivo 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.

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

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.

3.1.3 Avaliação cruzada

A idéia para esta abordagem, introduzida por Sexton (1986) e ampliada por Doyle e Green (1994), é a 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, maximiza-la (formulação benevolente). Doyle e Green (1994) estabeleceram o PPL (5) para o cálculo dos pesos na formulação agressiva, onde a eficiência da DMU s usando os pesos da DMU k é dada em (4).

$$E_{ks} = \frac{\sum_i u_{ki} y_{si}}{\sum_j v_{kj} x_{sj}} \quad (4)$$

$$\text{Min } \sum_i \left(u_{ki} \sum_{s \neq k} y_{si} \right) - \sum_j \left(v_{kj} \sum_{s \neq k} x_{sj} \right)$$

sujeito a

$$\begin{aligned} \sum_j v_{kj} x_{kj} &= 1 \\ \sum_i u_{ki} y_{ki} - E_{kk} \sum_j v_{kj} x_{kj} &= 0 \\ \sum_i u_{ki} y_{si} - \sum_j v_{kj} x_{sj} &\leq 0, \forall s \neq k \\ u_{ki}, v_{kj} &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

3.1.4. 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). O conceito de fronteira invertida consiste em considerar os *outputs* como *inputs* e os *inputs* como *outputs* e, assim, consiste das 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 ótica 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.

4. MODELAGEM E RESULTADOS

4.1. Modelagem

Para a avaliação dos quatro tornos considerando as medidas efetuadas de paralelismo entre guias foi usado o modelo DEA CCR. Ao usar DEA é permitido que cada torno busque sua eficiência ao se especializar na sua melhor medida, ou seja, escolher a 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 nenhum *output*, já que nada foi produzido. Essa é uma situação que conduz a paradoxos (Lovell e Pastor, 1999) que podem ser contornados assumindo-se que o *output* é constante e unitário para todos os tornos. O *output* representaria, assim, a própria existência do torno, numa abordagem semelhante à usada por Gomes et al. (2002). Esses modelos são equivalentes a modelos multicritério de utilidade aditiva, com a particularidade de que as próprias alternativas atribuem pesos a cada critério, ignorando qualquer opinião de um eventual decisor.

A Tabela 1 resume os dados utilizados. Na modelagem 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

4.2. Resultados

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

Tabela 2. Resultados do modelo DEA CCR clássico.

DMU	Eficiência (%)
T1	67,83
T2	100,00
T3	85,71
T4	100,00

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

Tabela 3. Resultados do modelo de supereficiência DEA CCR.

DMU	Eficiência (%)
T1	67,83
T2	600,00
T3	85,71
T4	159,09

Para confirmar esse resultado de superioridade da DMUT T2 em relação à DMU T4, foram rodados outros dois modelos: restrições aos pesos e avaliação cruzada. Em ambos os casos, a avaliação foi conduzida de maneira diferente da que é usual na literatura.

No caso do modelo de restrições aos pesos, foram usadas restrições diretas 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 subjetiva.

O torno T2 deixou de ser eficiente quando foi imposto que o valor mínimo do peso de cada *inputs* 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. (2002) de só usar como unidades avaliadoras as eficientes. 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 fronteria invertida. Para os cálculos deste método foi usado o programa SIAD (Angulo-Meza et al., 2003), 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	100,00	52,76
T2	100,00	77,78
T3	100,00	66,67
T4	71,43	100,00

Nota-se que este método inverteu a ordenação relativa de T2 e T4, quando comparado com os métodos anteriores. Este resultado é explicável pelo fato 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. CONCLUSÕES

A qualidade de uma máquina ferramenta depende de vários fatores. Esses fatores podem ser avaliados conjuntamente utilizando-se a abordagem DEA, que realiza uma avaliação sem informação adicional dos decisores, através do 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 distinguisse entre as duas. Para desempata-las foram utilizadas abordagens adicionais, que conduziram, em sua maioria, ao resultado de superioridade da DMU T2 em relação à unidade T4.

A questão da escolha entre T2 e T4 fica condicionada ao objetivo 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.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S. e Lirani, J., 1997, "Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões", Edgard Blücher, São Paulo, 295 p.
- Allen, R., Athanassopoulos, A., Dyson, R.G. and Thanassoulis, E., 1997, "Weights restrictions and value judgements in data envelopment analysis: evolution, development and future directions", *Annals of Operations Research*, Vol. 73, pp. 13-34.
- Angulo-Meza, L, Biondi Neto, L, Soares de Mello, J C B, Gomes, E G. e Coelho, P H G, 2003, "SIAD – Sistema Integrado de Apoio à Decisão: Uma Implementação Computacional de Modelos de Análise Envoltória de Dados", *Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção*, Vol. 3, No.20. Disponível em: http://www.producao.uff.br/rpep/relpesq303/relpesq_303_20.doc.
- Angulo-Meza, L., Gomes, E.G., Soares de Mello, J.C.C.B. e Biondi Neto, L., 2003, "Fronteira DEA de dupla envoltória no estudo da evolução da ponte aérea Rio-São Paulo", *Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2003 - Anais do XVII ANPET*, Vol. 2, pp.1158-1166.
- Angulo-Meza, L. and Estellita Lins, M., 2002, "Review of Methods for Increasing Discrimination in Data Envelopment Analysis", *Annals of Operations Research*, Vol. 116, pp. 225-242.
- Branco, D. F. e Leta F. R. "Avaliação de Tornos Mecânicos em Uso." - 2º Congresso Internacional de Engenharia Industrial, e XVI ENEGEP. 1996, Piracicaba, SP.
- Charnes, A., Cooper, W.W. and Rhodes, E., 1978, "Measuring the efficiency of decision-making units", *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, pp. 429-444.
- DIN, 1964, "Condições de Recepção de Máquinas-Ferramenta: tornos até 800 mm de diâmetro", Norma 8606.
- Doyle, J. and Green, R., 1994, "Efficiency and cross-efficiency in DEA derivations, meanings and uses", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, pp. 567-578.
- Dyson, R.G. and Thanassoulis, E., 1988, "Reducing Weight Flexibility in Data Envelopment Analysis", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 39, No. 6, pp. 563-576.
- Entani, T., Maeda, Y. and Tanaka, H., 2002, "Dual Models of Interval DEA and its extensions to interval data", *European Journal of Operational Research*, Vol. 136, pp. 32-45.
- Estellita Lins, M.P. and Angulo-Meza, L., 2000, "Análise Envoltória de Dados e perspectivas de integração no ambiente de Apoio à Decisão", Editora da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Estellita Lins, M.P. and Silva, A.C.M., 2001, "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.
- Gomes, E.G., Soares de Mello, J.C.C.B. e Biondi Neto, L., 2002, "Medidas comparativas de eficiências aeroportuárias", *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, pp. 3-9.
- Lovell, C.A.K. and Pastor, J.T., 1999, "Radial DEA models without inputs or without outputs", *European Journal of Operational Research*, Vol. 118, No. 1, pp. 46-51
- Roll, Y., Cook, W.D. and Golany, B., 1991, "Controlling factor weights in DEA", *IIE Transactions*, Vol. 23, No. 1, pp. 2-9.
- Sexton, T. R., 1986, "Measuring Efficiency: An assessment of Data Envelopment Analysis", *New Directions For Program Evaluation*, No. 32, San Francisco, Jossey-Bass.
- Soares de Mello, J.C.C.B, Lins, M.P.E. and Gomes, E.G., 2002, "Construction of a smoothed frontier", *Pesquisa Operacional*, Vol 22, No. 2, pp. 183-201.
- Yamada, Y, Matui, T. and Sugiyama, M., 1994, "New analysis of efficiency based on DEA", *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 37, No. 2, pp. 158-167.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DATA ENVELOPMENT ANALYSIS TO EVALUATE MACHINE TOOLS

Fabiana Rodrigues Leta

Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ
fabiana@ic.uff.br

João Carlos Correia Baptista Soares de Mello

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24240-240, Niterói, RJ
jcsmello@producao.uff.br

Eliane Gonçalves Gomes

Embrapa Monitoramento por Satélite
Av. Dr. Júlio Soares de Arruda, 803, Parque São Quirino, 13088-300, Campinas, SP
eliane@cnpm.embrapa.br

Lidia Angulo Meza

Instituto de Ciência e Tecnologia – Universidade Veiga de Almeida
Rua Ibituruna, 108, 4º andar, Maracanã, 20271-020, Rio de Janeiro, RJ
lidia_a_meza@yahoo.com

Abstract. This paper uses Data Envelopment Analysis to evaluate the quality of machine tools. These models are applied to four turning machine from one of Fluminense Federal University mechanical laboratory. The aim is to aggregate some static error measures in one unique measure, taking not into consideration subjective judgments. To that end Data Envelopment Analysis is a very reliable technique, since it evaluates each criteria weight with a mathematical model based on linear programming. Due to some mathematical characteristics of the model a tie occurred. This is an expected result, since we have a very few numbers of machines to evaluate. In order to avoid this drawback we used some additional techniques as: weight restrictions, super efficiency models, cross evaluation and inverted frontier. The first three techniques are optimistic ones, and they pointed out the same machine as the best one. The inverted frontier is a pessimist approach and chooses another machine as the best one. So, this is the preferred method in situations when we desired to minimize the risk of obtained bad quality products from turning machines.

Key-words: DEA, Improving discrimination, Machine tools.