AVALIAÇÃO DE EFICÊNCIA DE DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS COM RESTRIÇÕES AOS PESOS

Maria Karla Vervloet Sollero
Escola Politécnica/Coppe/UFRJ
Escola Politécnica/UFRJ-CP68529- karla@dee.ufrj.br

Marcos Pereira Estellita Lins
Coppe/UFRJ
lins@pep.ufrj.br

Resumo
A Análise Envoltória de Dados-DEA (*Data Envelopment Analysis*) tem sido amplamente empregada na avaliação e melhoria do desempenho de processos de fabricação e execução de serviços em vários setores. Porém uma das vantagens do modelo DEA clássico, que é permitir total liberdade aos pesos dados às entradas e saídas da DMU (*Decision Making Units*) sob análise, pode levar a índices de eficência artificialmente elevados, em contradição com pareceres prévios ou informações adicionais disponíveis.

Os vários estudos aplicando DEA na determinação da eficiência de concessionárias de distribuição de energia elétrica têm sido feitos, em grande parte, empregando os modelos clássicos, o que resulta na atribuição incorreta de eficiências elevadas, ao não considerarem fatores importantes de entrada ou saída e permitindo que fatores de menor importância predominem. Ao contrário desta abordagem usual, este artigo faz uma apresentação dos métodos tradicionais de incorporação de informações preferenciais do tipo restrição aos pesos à análise de eficiência através de DEA. Esta abordagem é ilustrada através de um exemplo simplificado onde são calculadas e comparadas as eficiências de 22 distribuidoras brasileiras de Energia Elétrica.

PALAVRAS-CHAVES: Análise de Envoltória de Dados, Restrição aos pesos, Distribuidoras de Energia Elétrica

Abstract
Data Envelopment Analysis has been widely used in the evaluation and performance increment of manufacturing processes and in many areas of the service sector. Nevertheless, one of the greatest advantages of classic DEA, i.e., to allow total freedom do allocate data input and output weights to the Decision Making Units (DMU) under analysis, can lead to artificially high efficiency indexes, in contradiction to value judgements or additional available information.

Many studies using DEA in determining electricity distribution utilities have been made, most of them using classical models. This results in incorrect high efficiency indexes, as they ignore important input and output factors, allowing for the predominance of less important factors. In a different approach, this paper proposes the traditional methods for incorporating preferential information, of the weighs restriction type, to efficiency analysis through DEA. This approach is illustrated through a simplified example where 22 Brazilian distribution utilities have their efficiencies calculated and compared.

KEYWORDS: Data Envelopment Analysis, weighs restriction, electricity distribution utilities.

1. Introdução

O método de Análise Envoltória de Dados (DEA), é um método não-paramétrico baseado em programação linear, introduzido por Charnes e outros (1978) e amplamente aplicado na análise de eficiência comparativa entre unidades homogêneas de produção (DMU–Decision Making Units). Isto é, as unidades podem ser analisadas em conjunto desde que usem as mesmas entradas e produzam as mesmas saídas com tecnologias similares de produção. Essas unidades têm sua eficiência dada pela razão ponderada da soma das saídas e entradas e são comparadas entre si identificando-se as unidades eficientes. Sendo que uma das vantagens de DEA é que nenhuma informação preferencial é necessária, i.e. existe liberdade na escolha dos pesos por parte das unidades analisadas (DMU) de modo a se posicionarem o melhor possível na análise de eficiência. Entretanto, em alguns casos, variáveis importantes podem ser desprezadas (peso zero) o que não seria aceitável.
É freqüente casos em que alguma informação sobre a importância relativa ou preços relativos as entradas e saídas está disponível. Não seria razoável excluí-la da análise. Restrições aos pesos são um meio claro de incorporar informações preferenciais em análise de DEA

A aplicação de DEA a situações concretas motivou o uso de restrições aos pesos no sentido de limitar sua a liberdade completa de variação permitida pelo modelo original DEA.Vários estudos com restrições aos pesos têm sido propostos desde Thompson e outros (1986).

Nesse artigo utilizamos restrição proporcional às entradas e saídas virtuais na análise de eficiência de 22 concessionárias de energia elétrica do Brasil.

O Setor de Energia elétrica de muitos países, desenvolvidos e em desenvolvimento, tem passado por profundas reformas na sua estrutura institucional, organização e operação, desde os anos 80. As atividades de geração, distribuição, transmissão e comercialização têm sido separadas em produto (a energia) e serviços (transmissão e distribuição), visando introduzir a competição na geração e na comercialização. Em geral, o objetivo principal destas reformas é o de introduzir padrões de mercado na geração e fornecimento de eletricidade, além de melhorar a eficiência das atividades de transmissão e distribuição, tidas como monopólios naturais.

Ainda que guardando certa similaridade, estes processos de reestruturação apresentam particularidades locais. Observa-se que os EUA e a maioria dos países da Europa ocidental que promoveram a reestruturação do Setor Elétrico privilegiaram a busca pela eficiência. A China e o Leste Europeu enfatizaram a descentralização. Já os países da América Latina, inclusive o Brasil, embora também buscassem maior eficiência (via competição), precisaram privilegiar meios de reduzir a necessidade de investimentos do setor público e atrair investimentos privados.
Como um resultado importante da reforma do setor, a fixação de regras tarifárias passou a ser de responsabilidade do Agente Regulador (ANEEL), com objetivos que pretendem conciliar o interesse dos consumidores e da concessionária regulada, dentre os quais destacam-se: incentivo à eficiência, manutenção do equilíbrio econômico financeiro da concessão, qualidade adequada do produto e do serviço.
O sistema em vigor no Brasil, hoje, é o de regulação de preço. Este sistema viabiliza a inclusão de um fator de incentivo à eficiência no índice de reajuste de tarifa (o chamado fator X). A tendência moderna é de incluir neste índice o conceito de qualidade de fornecimento (comercial, continuidade de fornecimento e qualidade de tensão).

Na regulação do preço, *price-cap*, define-se um preço-teto para os preços médios da empresa, corrigido de acordo com a evolução de um índice de preços ao consumidor, no Brasil o IGP-M, menos um percentual equivalente ao fator X de produtividade, para um período prefixado de anos.
Isso significa um incentivo necessário à elevação da produtividade e dos níveis de eficiência da concessionária. Por outro lado, os ganhos de eficiência só poderão ser apropriados pela concessionária na medida em que ultrapassarem o Fator X. Portanto, quanto maior for a eficiência da concessionária, tanto maior será seu benefício. Se, porém, a concessionária não explorar seu potencial de eficiência, o resultado será a sujeição a uma perda (Aneel NT 30/2003 SRE).

Nos itens a seguir, a metodologia DEA com incorporação de restrições aos pesos será analisada como alternativa para estabelecimento deste índice de eficiência.

2. Restrição aos pesos na Análise Envoltória de Dados

2.1 Modelo DEA clássico

DEA é uma técnica não-paramétrica que emprega programação matemática para construir fronteiras de produção das unidades produtivas (DMU) homogeneas, isto é, unidades que utilizam processos tecnológicos semelhantes para transformar os mesmos insumos e recursos em produtos e resultados semelhantes. Tais fronteiras são empregadas para avaliar a eficiência relativa dos planos de operação executados pelas DMU e servem, também, como referência para o estabelecimento de metas eficientes para cada unidade produtiva.
A eficiência na presença de múltiplas entradas e saídas, é definida como:

$$Eficiência = \frac{soma\ ponderada\ das\ saídas}{soma\ ponderada\ das\ entradas} \tag{1}$$

Considerando que temos *n* DMU a serem avaliadas, cada uma com *m* entradas e *s* saídas, o grau de eficiência relativa para uma DMU *o* testada é obtido resolvendo o seguinte modelo proposto por Charnes e outros (1978):

$$\max \quad \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io}}$$

$$\text{sujeito a} \quad \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij}} \leq 1 \quad \forall j$$

onde
r = 1,...,s
i = 1,...,m
j = 1,...n
y_{rj} = saída r produzida pela DMU j
x_{ij} = entrada i utilizada pela DMU j
u_r = peso dado a saída r
v_i = peso dado a entrada i

(2)

O modelo CCR acima pode ser transformado no problema de programação linear mostrado em (3) – modelo dos multiplicadores.

$$Max \sum_{r=1}^{s} u_r y_{ro}$$

$$sujeito\ \ a$$

$$\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io} = 1$$

$$\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j,$$

$$vi, ur \geq 0, \forall i, r. \tag{3}$$

O problema (3) é resolvido *n* vezes de modo a obter a medida de eficiência (relativa) de todas DMUs. Assumimos retorno constante de escala e que todas entradas e saídas são estritamente positivas.

Para cada DMU analisada (DMU_o) são atribuídos pesos as entradas e saídas de modo a maximizar sua medida de eficiência. Em geral a DMU_o é considerada eficiente se essa medida é igual a 1 e ineficiente se menor que 1.

Para cada DMU ineficiente o modelo DEA identifica um conjunto de unidades eficientes que pode ser utilizado como referência. As DMU deste conjunto podem ser utilizadas como "*benchmarks*" para melhorar a eficiência da DMU observada. As referências são obtidas com a formulação do dual do modelo CCR-multiplicadores (3), conhecido como CCR-envelope (4). A partir do modelo envelope, a DMU observada é ineficiente se a "DMU referência", utiliza menos insumos mantendo pelo menos o mesmo nível de saída que ela.

$$
\begin{aligned}
&Min\ \theta \\
&sujeito\ a \\
&\sum_{i=1}^{n} \lambda_i y_{ji} \le \theta\, x_{ko}\ , \quad \forall k, \\
&\sum_{i}^{n} \lambda_i y_{ji} \ge y_{jo}\ , \qquad \forall j. \\
&\lambda_i \ge 0 \quad \forall i \\
&\theta \quad irrestrita.
\end{aligned}
\tag{4}
$$

θ = medida de eficiência relativa, proporção em que os inputs podem ser reduzidos,
λ = intensidade da participação da DMU j na construção da DMU composta, variável dual.

Baseada no modelo acima, a DMU observada é ineficiente se a DMU referência utiliza menos insumo mantendo pelo menos o mesmo nível de saída que ela.
As unidades envolvidas na construção da DMU referência (target) podem ser utilizadas como "benchmarks" para melhorar a eficiência da DMU observada.

2.2 Restrição aos pesos em DEA

A estrutura matemática dos modelos DEA faz com que, em muitos casos, uma DMU seja considerada eficiente por serem atribuídos pesos nulos a algumas variáveis, ou atribuindo pesos considerados inaceitáveis por especialistas. Isto ocorre devido a irrestrita flexibilidade de alocação dos pesos na determinação da medida de eficiência das DMU tornando possível obter taxas elevadas de eficiência desprezando entradas ou saídas indesejáveis.

Os pesos representam um sistema relativo de valor para cada DMU avaliada (DMU_o) que fornece a melhor medida possível para a DMU_o mantendo a coerencia do sistema, ou seja, que resulte valores viáveis para todas as outras DMU.

Thompson e outros (1986) foram os primeiros a propor incorporação de restrições aos pesos para aumentar a discriminação dos resultados de um problema de DEA aplicado a localização de um laboratório de física de alta energia no Texas. Desde então restrições aos pesos têm sido largamente empregada na análise envoltória de dados como podemos constatar em Cooper e outros (2000) e Thanassoulis (2001).

A restrição aos pesos permite incorporar preferências gerenciais em termos de nível relativo de importância das várias entradas e saídas.

Allen e outros (1997) apontam três modos distintos de incorporar juízo de valor em DEA:

- *Restrição direta aos pesos.*

A imposição de restrição aos pesos pode ser incorporada ao modelo DEA básico (3) com a inclusão das seguintes restrições adicionais:

$$
\begin{aligned}
& k_i v_i + k_{i+1} v_{i+1} \leq v_{i+2}, && \text{r1} \\
& \alpha_i \leq \frac{v_i}{v_{i+1}} \leq \beta_i, && \text{r2} \\
& \gamma_i v_i \geq u_r, && \text{r3} \\
& \delta_i \leq v_i \leq \tau_i, && \text{r4} \\
& \rho_r \leq u_r \leq \eta_r, && \text{r5} \\
& -v_i \leq -\varepsilon, \\
& -u_r \leq -\varepsilon, \\
& v_i, u_r \geq 0, \ \forall i, r. && (5)
\end{aligned}
$$

ε é um infinitesimal não-Arquimediano e as letras (κ_i, α_i, β_i, γ_i, δ_i, τ_i, ρ_r, η_r) são constantes especificadas pelo usuário para refletir juízos de valor concernente a importância relativa de fatores da entrada ou saída.
Além das restrições acima também deve-se alterar o segundo termo do PPL ($\sum_{i=1}^{m} v_i x_{io} = 1$) substituindo a constante "1" pela constante "C". A constante de normalização, C, é escolhida pelo usuário como um limite máximo na avaliação da eficiência. (tipicamente 1 ou 100.)

As cinco restrições adicionais, r1 a r5, foram classificadas em três categorias:

(a) Restrição aos pesos absolutos;
Limites numéricos aos multiplicadores são estabelecidos de forma a não permitir que variáveis sejam super estimadas ou ignoradas na análise. Este tipo de restrição pode resultar em um PPL inviável levando a relaxar os limites até se atingir a viabilidade (Lins e outros, 2000).

Um dos problemas com restrição direta aos multiplicadores (Sarico e Dyson, 2003), restrição direta aos pesos, é a dependência desses das unidades de medida das entradas /saídas. Muitas vezes é difícil dar um significado a restrição direta aos pesos.

(b) Região de Segurança Tipo I-ARI (Assurance Region)
As restrições r1 e r2 são introduzidas para incorporar a análise a ordenação relativa ou valores relativos das entradas e saídas permitindo introduzir a opinião de especialistas. Thompson e outros (1990) denominaram esse tipo de restrição de "Região de Segurança tipo I ".

(c) Região de Segurança Tipo II - AR II
É introduzida ao modelo DEA a restrição r3 que relaciona os pesos das entradas e saídas.
Segundo Allen e outros isso pode resultar em inviabilidade além, das regiões de segurança ARI e ARII dependerem das escalas das entradas e saídas. Os limite usados nas restrições são dependentes da constante de normalização, C.

- *Ajuste dos níveis observados de entrada-saída para incorporar juízos de valor. Regiões de segurança.*

São citadas duas abordagens, Charnes e outros (1990) e Golany (1988), ambas transformações derivadas do dual de (3) acrescido das restrições r1 e r5:

(a) O método Cone Ratio (Charnes e outros, 1990)
Nesse método é gerado um conjunto artificial de dados o qual produz as mesmas medidas relativas de eficiência que a restrição r2 no modelo citada anteriormente.

(b) o método de Golany (1988)
Procurou incorporar relações ordinais da forma $v_1 \geq v_2 \geq v_3 \geq \varepsilon$ entre os pesos de DEA. Sem permitir aos pesos assumirem valor zero.

- *Restrição às entradas e saídas virtuais.*

Entradas e saídas virtuais de uma DMU, produtos dos níveis de entrada /saída pelos seus respectivos pesos ótimos, indicam a contribuição de cada entrada e saída a sua taxa de eficiência e são adimensionais. Quanto maior o nível de entrada/saída virtual mais importante sua contribuição a taxa de eficiência da DMU analisada. Portanto usar entradas e saídas virtuais pode ajudar a identificar areas fracas e fortes de desempenho. Restrições aos pesos virtuais pode ser particularmente interessante quando valores "externos" necessitam ser traduzidos em restrições de pesos num modelo de DEA.

Conforme Sarrico e Dyson (2003) o método desenvolvido inicialmente por Wong and Beasley's (1990) para restringir a flexibilidade dos virtuais em DEA é baseado no uso de proporções aplicadas ao modelo CCR (3), onde o operador pode impor limites que reflitam juizo de valor, como a seguir:

$$a_r \leq \frac{y_{rj}u_r}{\sum_{r=1}^{s} y_{rj}u_r} \leq b_r \qquad para\ um\ fator\ da\ saída$$

e

$$c_i \leq \frac{x_{ij}v_i}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}v_i} \leq d_i \qquad para\ um\ fator\ da\ entrada.$$

$$u_r,\ v_i \geq \varepsilon \qquad \forall r\ e\ i,$$

onde $\sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj}$ representa a saída virtual total da DMUj.

No lugar de restringir os pesos reais de DEA, restringe-se a proporção da saída virtual total da DMUj relativa saída r, i.e. a " importância" atribuída a saída r pela DMUj, ao intervalo $[a_r,\ b_r]$, sendo os limites determinados por especialista ou pelo usuário.

Deve-se observar que tais restrições proporcionais às entradas e saídas virtuais em DEA são específicas de cada DMU tornando a implementação desse tipo de restrição não tão simples. Wong e Beasley's (1990) sugeriram algumas alternativas analisadas por Sarrico e Dyson (2003):

i) Impor restrições às entradas e saídas virtuais somente para a DMU analisada

$$a_r \leq \frac{y_{rjo}u_r}{\sum_{r=1}^{s} y_{rjo}u_r} \leq b_r \quad e \quad c_i \leq \frac{x_{ijo}v_i}{\sum_{i=1}^{m} x_{ijo}v_i} \leq d_i \qquad u_r, v_i \geq \varepsilon \quad \forall r\ e\ i,$$

ii) Restrições às entradas e saídas virtuais aplicadas a todas j DMUs

Para cada fator de entrada ou saída sendo restringido são adicionadas duas inequações ao modelo DEA

$$a_r \le \frac{y_{rj}u_r}{\sum_{r=1}^{s} y_{rj}u_r} \le b_r \quad \forall r, j \qquad e \qquad c_i \le \frac{x_{ij}v_i}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}v_i} \le d_i \quad \forall i, j \qquad u_r, v_i \ge \varepsilon$$

iii) Restrições proporcionais aos pesos das entradas e saídas virtuais

$$a_r \le \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{y_{rj}}{n}\right)u_r}{\sum_{r=1}^{s}\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{y_{rj}}{n}\right)u_r} \le b_r \quad \forall r \qquad e \qquad c_i \le \frac{\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{x_{ij}}{n}\right)v_i}{\sum_{i=1}^{m}\left(\sum_{j=1}^{n} \frac{x_{ij}}{n}\right)v_i} \le d_i \quad \forall i.$$

Quando esta abordagem é implementada cada DMU é analisada com quatro restrições adicionais ao modelo DEA para cada fator restringido.

Neste trabalho foi aplicada "restrições às entradas e saídas virtuais somente para a DMU analisada".

3 Aplicação de DEA ao setor de Distribuição de Energia Elétrica

3.1 Setor Elétrico Brasileiro

O enfoque deste trabalho é no setor de distribuição de energia elétrica brasileiro. Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. A ABRADEE (Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica) agrega 64 distribuidoras. Destas 64, este trabalho analisa 22.

3.2 Empresas de Distribuição analisadas-DMU

Várias idéias surgiram ao longo deste trabalho quanto ao conjunto de distribuidoras (DMU) a ser analisado: considerar por região geográfica; por número de consumidores atendidos, por MVA instalado, etc. Existe porém uma relação mínima que a ser considerada entre o número de DMU e o número de variáveis no modelo DEA (Lins e outros 2000). Assim procurou-se incluir o maior número possível de concessionárias (DMU). Das 64 empresas associadas a ABRADEE apenas 22 entraram no estudo devido a dificuldades na obtenção dos dados.

3.3 Escolha das variáveis

Um dos pontos importantes na metodologia de avaliação da eficiência das distribuidoras de energia elétrica é a escolha adequada das variáveis que serão consideradas para este fim.
Após um levantamento de vários estudos de eficiência realizados tanto nacionalmente como internacionalmente em companhias de distribuição de energia elétrica foi feita uma seleção preliminar de variáveis. Esta seleção foi feita com o objetivo de definir um conjunto de variáveis capaz de caracterizar adequadamente o desempenho de uma concessionária de distribuição de energia elétrica e influenciar na sua eficiência porém obedecendo a restrição quanto a relação entre o número de variáveis e de DMU, como mencionado anteriormente.

As seguintes váriáveis foram selecionadas:

Variáveis de entrada:
CO: Custo Operacional
NE: Número de empregados
Per: perdas técnicas
DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal.
FEC:Freqüência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc).

Variáveis de saída:
NC: Número de consumidores
GWh: Energia entregue, GWh

Os dados correspondentes as variáveis acima relacionadas, para as concessionárias sob análise, foram obtidos de várias fontes, destacando-se o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Social), a ABRADEE (Associação Brasileira das Distribuídoras de Energia Elétrica), a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e os balancetes das empresas consideradas, disponíveis na internet. Esses dados referem-se ao ano de 2000.

3.4 Modelos DEA utilizados

Foi adotada orientação a insumos, devido a devido à natureza das Companhias de Distribuição de Energia Elétrica, e retorno constante de escala, nos dois modelos analisados:

- modelo CCR clássico com orientação a insumos sem restrições aos pesos
- e modelo CCR anterior acrescido de restrições as entradas e saídas virtuais somente para a DMU analisada.

3.4.1 Modelo CCR clássico sem restrições aos pesos:

As medidas de eficiência e os multiplicadores foram obtidos através da simulação, com o software **OPL studio/ILOG** , do modelo CCR clássico. Os resultados estào listados na Tabela 2.

3.4.2 Modelos DEA com restrições

Para aumentar o poder discriminatório do modelo foram acrescentadas restrições às entradas e saídas virtuais somente para a DMU analisada. Este tipo de restrição permite limitar ou garantir a participação de determinada entrada ou saída. Através da avaliação dos pesos, obtidos na abordagem clássica pode-se refinar a análise, por exemplo, impedindo distorções de avaliação que levam a imputar índices de eficiência máxima a algumas distribuidoras por não se considerar seus custos operacionais, como mostrado na Tabela 2 acima.

Entradas e saídas virtuais de uma DMU, que são os produtos dos níveis das entradas e saídas pelos seus respectivos pesos ótimos, indicam a contribuição das mesmas a sua taxa de eficiência e são adimensionais. Quanto maior o nível de entrada ou saída virtual mais importante sua contribuição à taxa de eficiência da DMU analisada. Portanto, usar entradas e saídas virtuais pode ajudar a identificar áreas fracas e fortes de desempenho.

A análise de sensibilidade auxilia na determinação dos limites a serem adotados bem como a matriz de correlação das variáveis no estabelecimento de proporções das participações de “quantidades” de entrada e saída, e pode ser uma ferramenta para o gestor, ao tornar possível estabelecer faixas de variação para insumos e produtos.

Restrições testadas: $a_r \le \frac{y_{ro}u_r}{\sum_{r=1}^{s} y_{ro}u_r} \le b_r \quad e \quad c_i \le \frac{x_{io}v_i}{\sum_{i=1}^{m} x_{io}v_i} \le d_i \qquad u_r, v_i \ge \varepsilon \quad \forall r \; e \; i$

Para cada fator sendo restringido são adicionadas duas inequações ao modelo DEA.

4. Análise dos resultados

4.1 Modelos sem restrições

Os modelos sem restrições aos pesos costumam atribuir altas eficiências a um grande número de DMU, uma vez que as mesmas têm liberdade de escolher a combinação de pesos mais favorável, como pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2 Eficiências obtidas com os modelos CCR/E/I e CCR/M/I e pesos alocados

		Eficiências		CO	NE	Per	DEC	FEC	NC	GWh
	DMU	**CCR/E/I**	**CCR/M/I**	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	u_1	u_2
1	**AES**	**100.00%**	**100.00%**	0.000000	0.126263	0.000000	0.000000	0.000000	0.001081	0.000000
2	**Band**	**100.00%**	**100.00%**	0.008879	0.010358	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.004018
3	**CEB**	41.01%	41.01%	0.000000	0.063372	0.009605	0.004917	0.000000	0.000723	0.000172
4	**CEEE**	64.06%	64.06%	0.000000	0.038242	0.030358	0.000000	0.000000	0.000522	0.000109
5	**Celesc**	56.76%	56.76%	0.000000	0.009268	0.074588	0.000000	0.000000	0.000332	0.000000
6	**Celg**	65.54%	65.54%	0.000000	0.036392	0.006506	0.002698	0.000000	0.000421	0.000070
7	**Celpe**	93.09%	93.09%	0.000894	0.038529	0.000000	0.005411	0.000000	0.000465	0.000000
8	**Cemat**	33.02%	33.02%	0.000000	0.047623	0.007218	0.003695	0.000000	0.000543	0.000129
9	**Cemig**	**100.00%**	**100.00%**	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.152672	0.000195	0.000000
10	**Cerj**	**100.00%**	**100.00%**	0.000000	0.069702	0.000000	0.001366	0.000000	0.000633	0.000000
11	**CFLCL**	31.65%	31.65%	0.000000	0.134046	0.000000	0.002627	0.000000	0.001217	0.000000
12	**Coelba**	**100.00%**	**100.00%**	0.000398	0.031695	0.000000	0.000000	0.002501	0.000345	0.000000
13	**Coelce**	**100.00%**	**100.00%**	0.000458	0.060160	0.000000	0.000000	0.000000	0.000556	0.000000
14	**Copel**	87.83%	87.83%	0.000000	0.008665	0.069739	0.000000	0.000000	0.000310	0.000000
15	**CPEE**	34.34%	34.34%	0.000000	0.206189	0.000000	0.021465	0.000000	0.001629	0.008804
16	**CPFL**	**100.00%**	**100.00%**	0.000000	0.032312	0.000000	0.007929	0.000000	0.000370	0.000000
17	**Elektro**	77.09%	77.09%	0.000000	0.034144	0.027105	0.000000	0.000000	0.000466	0.000097
18	**Eletropaulo**	**100.00%**	**100.00%**	0.005674	0.006985	0.000000	0.000000	0.000000	0.000005	0.002604
19	**Enersul**	44.94%	44.94%	0.000000	0.083194	0.000000	0.000000	0.010939	0.000817	0.001441
20	**Escelsa**	59.99%	59.99%	0.003007	0.051896	0.000000	0.000000	0.000000	0.000179	0.006647
21	**Light**	**100.00%**	**100.00%**	0.005674	0.006985	0.000000	0.000000	0.000000	0.000005	0.002604
22	**RGE**	59.17%	59.17%	0.000000	0.059972	0.000000	0.000000	0.007886	0.000589	0.001039

Das 22 companhias avaliadas, 9 obtiveram eficiência máxima, número relativamente alto.

Com alocação de peso apenas às três variáveis CO, NE e GWh, 5 companhias obtiveram eficiência máxima e só uma das 17 DMU ineficientes não prioriza o número de empregados (NE) em relação ao custo operacional (CO): a DMU 14.

Observa-se que:

- Foi atribuído peso zero à variável custo operacional (CO) de 16 empresas, sendo que aqueles diferentes de zero foram valores muito pequenos se comparados aos das outras variáveis;
- A variável de saída energia entregue, (GWh), teve peso zero na análise de 15 concessionárias;
- Com excessão da **CEMIG,** foi atribuído peso diferente de zero à variável NE;
- A **AES** obteve medida de eficiência máxima com todo peso concentrado nas variáveis de entrada NE e de saída NC;
- Apenas 5 empresas tiveram pesos alocados às duas variáveis de saída. As outras 17, só a uma delas.

4.2 Modelos com restrições aos pesos

Como citado anteriormente, foram testadas restrições às entradas e saídas virtuais aplicadas à DMU sob análise. Foram incluídas as seguintes restrições:

$a_r \leq$ PVIR $Y_r \leq b_r$ PVIR Y_r = participação da saída vrtual Y_r, $\forall r \quad em\ s$

$c_i \leq$ PVIR $Xi \leq d_i$ PVIR Xi = participação da entrada virtual Xi, $\forall i \quad em\ m$

Após um estudo de sensibilidade, o caso **A** foi tomado como referência e várias alternativas foram testadas. A Tabela 3 identifica os casos cujos resultados são listados na Tabela 4.

Tabela 3 - Intervalos testados

	Intervalos	
Caso A (Referência)	a = [0.3, 0.3] b = [0.7, 0.7]	c = [0.4, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1] d = [0.9, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3]
Caso B	a = [0.3, 0.3] b = [0.7, 0.7]	c = [**0.2**, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1] d = [0.9, 0.3, 0.3, 0.3, 0.3]
Caso C	a = [0.3, 0.3] b = [0.7, 0.7]	c = [**0.3**, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1] d = [0.9, **0.4**, 0.3, 0.3, 0.3]

Tabela 4 - Medidas de eficiência obtidas

DMU		**Eficiências %**			
		S/ restrições	**C/ restrições**		
			A	**B**	**C**
1	**AES**	**100**	60.78	64.19	72.90
2	**Band**	**100**	21.08	22.80	22.14
3	**CEB**	41.01	23.12	23.95	27.06
4	**CEEE**	64.06	35.93	40.09	41.37
5	**Celesc**	56.76	40.05	41.83	42.14
6	**Celg**	65.54	34.43	35.84	38.52
7	**Celpe**	93.09	47.67	47.67	52.66
8	**Cemat**	33.02	17.18	17.24	20.41
9	**Cemig**	**100**	**100**	**100**	**100**
10	**Cerj**	**100**	50.91	50.91	60.27
11	**CFLCL**	31.65	13.63	13.79	16.36
12	**Coelba**	**100**	58.51	58.51	61.84
13	**Coelce**	**100**	46.44	46.44	53.31
14	**Copel**	87.83	65.01	67.72	69.79
15	**CPEE**	34.34	16.92	16.92	20.13
16	**CPFL**	**100**	84.49	95.33	90.43
17	**Elektro**	77.09	55.42	57.81	60.12
18	**Eletropaulo**	**100**	95.40	**100**	**100**
19	**Enersul**	44.94	22.80	22.80	27.23
20	**Escelsa**	59.99	37.98	37.98	42.56
21	**Light**	**100**	76.74	84.98	83.19
22	**RGE**	59.17	33.53	34.11	38.92

Nesta análise, o problema dos pesos zero não ocorre, sendo eliminados os resultados indesejáveis na avaliação de concessionárias de energia elétrica ocorridos no caso sem restrições.

Observa-se que no Caso A (referência) apenas uma concessionária, a **CEMIG**, tem índice de eficiência 100 %, uma, a **ELETROPAULO**, entre 90 % e 100% e mais uma, a **CPFL,** entre 80 % e 90%.

Quando o limite inferior da *entrada virtual* **CO** (custo operacional) é relaxado de 0.1, a eficiência calculada para 6 concessionárias não é alterada enquanto a das demais aumenta. Ao ser relaxado este

limite de 0.2, (Caso B), a **ELETROPAULO** alcança eficiência 100%, enquanto as 6 que não haviam tido alterações permanecem inalteradas e as demais têm a medida de eficiência aumentada. Mesmo quando nenhuma restrição é imposta ao limite inferior da *entrada virtual* **CO** somente as concessionárias **CEMIG** e **ELETROPAULO** permanecem com medida de eficiência 100 %.

Ao relaxar-se o limite superior da parcela relativa ao número de consumidores somente a **CEMIG** continua com eficiência 100%. Se o limite superior da saída virtual **GWh** é diminuído em 0,2 a **CEMIG** continua com eficiência máxima e todas as outras eficiências ficam inalteradas.

Estas variações são melhor observadas na Figura 1 abaixo.

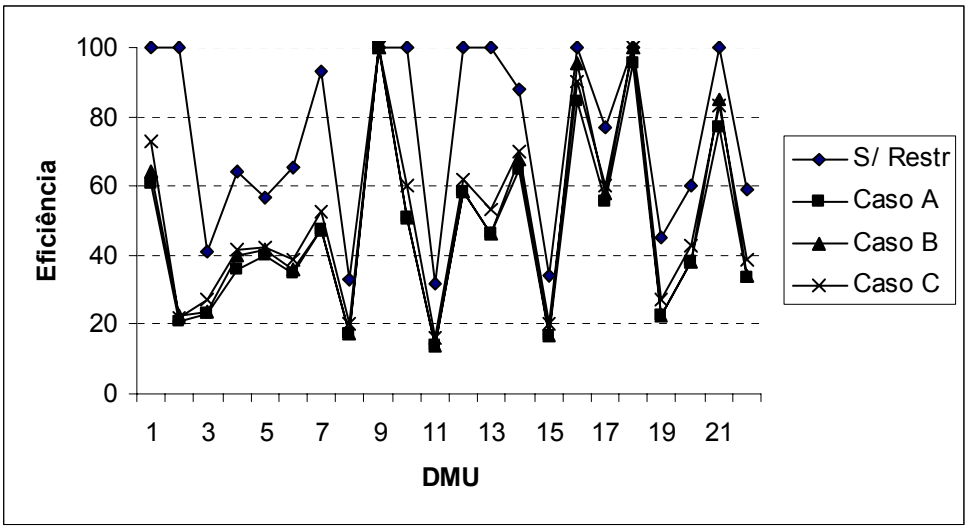

Fig. 1 Comparação das eficiências

Observa-se que a **CEMIG** (DMU 9) é a única concessionária avaliada que mantém eficiência máxima em todos intervalos testados o que indica a robustez das observações em relação a esta empresa. Além disto, fica clara a consistência dos resultados obtidos para diferentes valores de restrição aos pesos.

5 Conclusões

O trabalho confirma que a Análise Envoltória de Dados é uma ferramenta importante para a avaliação do desempenho das companhias de distribuição de eletricidade, ao ajudar a identificar as metas que devem ser perseguidas com o objetivo de melhorar o desempenho das empresas. A inclusão de restrições aos pesos mostrou-se um refinamento fundamental do modelo DEA clássico nesta análise.

As restrições incorporadas ao modelo clássico CCR possibilitam ao gestor analisar várias alternativas para melhorar o desempenho de sua empresa ao tornar possível estabelecer faixas de variação para insumos e produtos. É de grande importância a possibilidade de serem consideradas múltiplas variáveis, abrangendo aspectos técnicos e ambientais.

Estes estudos abrem a perspectiva de se perseguir maior confiabilidade nos resultados obtidos através de metodologias mais sistemáticas para atribuição de níveis de restrição aos pesos nos modelos DEA.

Referências:

Allen, R., Athanassopoulos, A.D., Dyson, R.G., Thanassoulis, E., 1997a. Weights restrictions and value judgements in data envelopment analysis: Evolution, development and future directions. Annals of Operations Research 73.

Banker ,R.D., A. Charnes and W.W. Cooper (1984) Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. Management Science 30, 1078-1092.

Coopers & Lybrand, - *Relatório Consolidado Etapa IV-1, Vol. II: Projeto Comercial e regulamentar*, Jun./1997.

Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E, 1978. Measuring the efficiency of decision making units. European Journal of Operacional Reseach 2, 429-444.

Chen, Tser-yieth – An assessment of technical efficiency and cross-efficiency in Taiwan's electricity distribution sector. European Journal of Operacional Research. February, 2001.

Cooper, W.W., L.M. Seiford and K. Tone**.** (2000). Data Envelopment Analysis. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

DTE(2000), - Choice of model and availability of data for efficiency analysis of Dutch network and supply businesses in electricity sector, Netherlands Eletricity Regulatory Service.

Europe Economics – Critical Review of Ofgem's Consultation Document on Merges in Eletricity Distribution - Report by Europe Economics for Eletricity Association - Dec/ 2001.

Garber, D., Hogan, W.W., Ruff, L., "*An Efficient Electricity Market Using a Pool to Support Real Competition*", The Electrical Journal, Fev./1996, pp. 48-60;

Hattori, Toru; Jamasb, Tooraj; Pollitt, Michael – A comparison of UK and Japanese electricity distribution performance 1985-1998: lessons for incentive regulation – DAE Working paper WP 0212 – june 2002.

Jamasb, T; Pollit, M.-Benchmarking and regulation: international electricity experience, utilities Policy 9,2001.

Jamasb, T.; Pollitt, M. -International Utility Benchmarking & Regulation: An Application to European Eletricity Distribution Companies, University of Cambridge, June 2002.

Knivsfla, K.H. & Rud, L., "*Markets for Electricty: Structure, Pricing and Performance*", 17th Annual International Energy Conference, International Association for Energy Economics, Noruega, 1994.

Korhonen, Pekka; Syrjanen, Mikko – Evaluation of cost Efficiency in Finnish Electricity Distribution / Helsing School of Economics, 2002.

Lins, M.P.E. Meza, L.A. Análise Envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente de apoio a Decisão. COPPE/UFRJ-2000.

Halme, Merja**;** Korhonen, Pekka. Theory and Methodology – Restricting weights in value efficiency analysis. . European Journal of Operacional Reseach 126 (2000) 175-188.

Millan, Jaime; lora, Eduardo; Micco, Alejandro – Sustainability of the Electricity Sector Reforms in Latin America – Annual Meetings of the Board of Governors-Santiago, Chile, 2001.

Preetum Demah (*DAE Working Paper WP 0232)*

Rudnick, H.; Varela, R.; Hogan, W., "*Evaluation of Alternatives for Power System Coordination and Pooling in a Competitive Environment*", IEEE Trans. Power Systems, vol. 12, N. 2, Maio/1997, pp. 605-613.

Sarrico, C.S., Dyson, R.G. 2003 Restricting virtual weights in data envelopment analysis. European Journal of Operational Research.

Scarsi, Gian Carlo – Local Eletricity Distribution in Italy: Comparative Efficiency Analysis and Methodological Cross-Checking; London Economics (1999).

Srinivas T., Data Envelopment Analysis: Models and Extensions. Decision Line, maio/2000.

Sueyoshi, Toshiyuki – Tariff structure of Japanese electric power companies: An empirical analysis using DEA – European Journal of Operational research – August 1998.

Susila Munisamy – Benchmarking Performance of UK Elertricity Distribution Utilities: A Study of Quality Efficiency and Produtivity Changes using DEA– Warwick Business School (1999-2002).

Thanassoulis, E., Dyson, R.G. Estimating preferred target input-output levels using data envelopment analysis. European Journal of Operational Research 56(1992) 80-97.

Thompson, R.G., Singleton, F., Thrall, R., Smith, B., 1986. Comparative site evaluations for locating a right-energy physics lab in Texas. Interfaces 16, 35-49.

Thomas G. Weyman-Jones Stochastic Non-parametric Efficiency Measurement and Yardstick Competition in Electricity Regulation UK

Weyman-Jones, T.G., "*RPI-X Price Cap Regulation: The Price Controls Used in UK Electricity*", Utilities Policy, Out./1990, pp. 6L-77;

Wong, Y.-H.B., Beasley, J. E. 1990. Restricting weight flexibility in data envelopment analysis. Journal of the Operational Research Society 41, 829-835.

Yunos, J.; Hawdon, D. The efficiency of national electricity board in Malaysia: an intercountry comparison using DEA. Energy Economics, 1997.