

ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS APLICADA AO SETOR ELÉTRICO DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO

Matheus Alves Madeira de Souza

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Departamento de Engenharia de Produção
maijje20@hotmail.com

Lásara Fabrícia Rodrigues

Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Departamento de Engenharia de Produção
lasara@em.ufop.br

Gilson Ataliba de Faria

Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Departamento de Informática
gilataliba@yahoo.com.br

RESUMO

A energia elétrica tornou-se um bem essencial para o ser humano moderno, sendo importante em aspectos relacionados a bem-estar e qualidade de vida. Porém, antes que essa energia chegue ao consumidor, são necessárias três etapas: geração, transmissão e distribuição. Neste contexto, este trabalho teve como foco a etapa intermediária de transmissão, uma vez que ainda é pouco abordada na literatura. Para tanto, utilizou-se a Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação das eficiências das principais empresas pertencentes a este segmento. Sendo assim, custo operacional total foi tomado como único *input* e capacidade de transformação, comprimento de rede, número de módulos e número de trafos como *outputs*. A partir dos resultados de eficiência obtidos, mensurou-se o quanto as organizações poderiam ter economizado caso operassem de maneira mais eficiente. Essas possíveis reduções de custo seriam significativas dentro do setor elétrico de transmissão e, conseqüentemente, nas tarifas que foram cobradas do consumidor.

PALAVRAS CHAVE. DEA, Energia, Transmissão.

Paper topics Análise Envoltória de Dados, PO na Área de Energia

ABSTRACT

Electrical energy has become an essential good for the modern human, being important in aspects related to welfare and life quality. However, three steps are necessary before this energy reaches the consumer: generation, transmission and distribution. In this context, this paper focused on the intermediate step of transmission, since it is still rarely addressed in the literature. Thereby, Data Envelopment Analysis (DEA) was used to evaluate the efficiencies of the leading companies within this sector. Thus, total operating cost was taken as single input and processing capacity, network length, number of modules and number of transformers as outputs. From the efficiency results obtained, it was measured how much organizations could have saved if they had operated with higher levels of efficiency. These cost reductions would be significant within the power transmission industry and, consequently, regarding the fees that were charged to the consumer.

KEYWORDS. DEA, Power, Transmission.

Paper topics Data Envelopment Analysis, OR in Energy

1. Introdução

A eletricidade, embora na sua categoria de bem de consumo intangível, é responsável por atividades como iluminação, comunicação e movimentação de máquinas e equipamentos. Segundo [Brambilla e Mueller 2004], esse tipo de energia, além de ser essencial para o desenvolvimento econômico e industrial, também é muito importante no que diz respeito a aspectos como bem-estar e qualidade de vida. Neste caso, percebe-se a importância da eletricidade ao se pensar nela como responsável direta e/ou indireta das atividades realizadas pelo ser humano, uma vez que a maioria dos bens e serviços dos quais o homem desfruta necessita da energia elétrica, seja nos processos de fabricação ou utilização.

Esse tipo de energia passa por três etapas até que chegue aos seus respectivos consumidores finais: geração, transmissão e distribuição. Em relação à primeira, esta compreende a obtenção de eletricidade, seja via fontes renováveis como eólica e hidrelétrica ou via fontes não renováveis como queima de petróleo, carvão e gás natural. Quanto à segunda etapa, esta compreende a ação de transporte a alta tensão da energia gerada. Em relação à última, ao chegar em ambientes urbano, esta tensão será reduzida e a energia estará pronta para ser distribuída, seja para a área residencial ou industrial.

Em se tratando das fases iniciais e finais, geração e distribuição, respectivamente, estas já foram abordadas de maneira extensa na literatura, como por exemplo nos trabalhos de [Jha e Shrestha 2006], [Chien et al. 2007], [Sözen et al. 2010], [Dedoussis et al. 2010], [Lins et al. 2012] e [Sözen et al. 2012] relativos à primeira e nos de [Lins et al. 2007], [Galvão 2008], [Silva Sé 2012], [Goulart 2013], [Leme et al. 2014], [Pereira de Souza et al. 2014], [Rezende et al. 2014] e [Xavier et al. 2015] referentes à segunda. Porém, poucos estudos ainda se mostram disponíveis a respeito de avaliações sobre a etapa intermediária que é o processo de transmissão de energia elétrica, que, assim como os outros dois, também influencia as tarifas cobradas ao consumidor.

Logo, o fato do segmento de transmissão carecer de abordagens mais aprofundadas a respeito das eficiências das principais empresas que o integram e, também, em relação ao desempenho do setor como um todo justifica a sua escolha de objeto de estudo deste trabalho. Desse modo, a partir da definição de insumos e produtos para essas organizações, serão obtidos os seus respectivos valores de eficiência, sendo possível, assim, inferências a respeito do setor elétrico de transmissão brasileiro.

Neste caso, a Análise Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis – DEA*), um método de estimação não-paramétrico de fronteira Pareto-Koopman, torna-se um importante artifício para avaliação de desempenho. Nessa técnica de análise, as organizações serão representadas como Unidades Tomadoras de Decisão (*Decision Making Units – DMUs*), fazendo com que estas últimas, caso se mostrem com níveis não ótimos de eficiência, movam-se em direção à fronteira eficiente através de alterações nos valores dos *inputs* ou dos *outputs*. O objetivo é fazer com que essas DMUs ineficientes acompanhem aquelas que servirão como ponto de referência (“*benchmarks*”). A utilização desta metodologia apresenta várias vantagens, como por exemplo: abordagem não paramétrica que não exige uma forma funcional de relacionamento entre *inputs* e *outputs*; entradas e saídas de tipos diferentes podem ser utilizadas em unidades de medição diferentes, sem se alterar os resultados; a eficiência de cada DMU é obtida de forma individualizada, embora a atuação das demais seja considerada; diferenças de porte ou tamanho podem ser tratadas por modelos que incorporem retornos variáveis de escala; mais de uma DMU pode ser considerada eficiente e, para aquelas ineficientes, são apresentadas possíveis referências para suas respectivas melhorias; pode ser aplicada a diversos períodos, possibilitando avaliar a evolução da eficiência de cada organização ao longo do tempo.

Nesse contexto, como o sistema elétrico de transmissão brasileiro é composto por mais de cem concessionárias, a avaliação de todas elas seria inviável por conta da extensa coleta de dados necessária. Sendo assim, escolheu-se uma amostra de organizações, que, embora pequena, apresente representatividade elevada para o setor. As empresas pertencentes à amostra escolhida representam cerca de 76% das atividades do segmento em questão, permitindo, assim, análises a respeito de um cenário global. Percebe-se que, neste caso, parte-se da hipótese inicial que nem todas as concessionárias do setor elétrico de transmissão operam com níveis ótimos de eficiência,

o que, conseqüentemente, eleva o preço da tarifa pago por cada consumidor. Em relação à estrutura deste trabalho, esta se encontra dividida nas seguintes seções: Introdução, Análise Envoltória de Dados, Sistema Elétrico Brasileiro, Estudo de Caso, Análise dos Resultados, seguido das Conclusões e Referências Bibliográficas.

2. Análise Envoltória de Dados

A Análise Envoltória de Dados é um procedimento matemático, proposto inicialmente por [Charnes et al. 1978], utilizado para mensurar a eficiência das chamadas DMUs. Sendo assim, essa técnica pode ser considerada uma ferramenta de *benchmarking*, isto é, dado um conjunto de DMUs, a DEA é responsável por selecionar aquelas que desempenham seus respectivos papéis de maneira mais eficiente, agrupando-as em um Conjunto Eficiente de Referência (*Efficiency Reference Set* – ERS). Desta forma, o ERS pode ser utilizado para que falhas ou disfunções sejam identificadas nas demais DMUs, possibilitando a melhoria de atividades, processos e serviços.

Conforme [Cooper et al. 2007], a DEA utiliza técnicas de programação matemática, o que possibilita a manipulação de um grande número de variáveis e restrições. Isso faz com que esta ferramenta possa ser empregada em uma vasta gama de setores, tais como: saúde, energia, tecnologia da informação, cadeia de suprimentos, varejo, etc. Além disso, esta ferramenta em questão proporciona, entre analistas e tomadores de decisão, oportunidades de “colaboração”, onde esta última tem sua definição estendida e passa a ser avaliada em termos de *inputs* e *outputs*. Conforme [Sherman e Zhu 2006], a razão entre esses dois últimos define o conceito de “eficiência”. Neste contexto, cada *input* pode ser definido como uma entrada ou um insumo relativo a um determinado processo. De maneira análoga, os *outputs* são todas as saídas ou produtos obtidos a partir dos *inputs*.

Neste contexto, problemas como competições imperfeitas, regulamentações governamentais, restrições financeiras, tamanho das organizações, etc., podem acarretar à não aplicabilidade de retornos constantes de escala. Tais questões podem ser englobadas pelo modelo proposto por [Banker et al. 1984] que foi proposto inicialmente para se conseguir avaliar DMUs que operassem em escalas diferentes. Neste contexto, os autores propuseram a adaptação da modelagem de [Charnes et al. 1978] para retornos variáveis de escala (*variable returns to scale* – VRS). A partir disso, esse tipo de formulação passou a ser conhecida na literatura como VRS ou BCC, em homenagem aos três autores que desenvolveram tal abordagem.

[Coelli et al. 2005] ressaltam que a formulação BCC faz com que uma DMU possa tomar como *benchmark* apenas aquelas que apresentam tamanhos similares ao seu. Portanto, a projeção dessa unidade tomadora de decisão na fronteira de eficiência será obtida através de uma combinação convexa das firmas pertencentes ao seu ERS. Em se tratando desse tipo de modelagem, duas das formulações mais comuns são a primal (envelope) e a dual (multiplicador). Ambas estão apresentadas (com orientação a *input*) no Quadro 1.

Quadro 1 – Modelos BCC orientados a *input*

	Primal (Envelope)	Dual (Multiplicador)
Sujeito a	$\begin{aligned} & \text{Min}_{\theta_B, \lambda} \theta_B \\ & \theta_B x_o - X\lambda \geq 0 \\ & Y\lambda \geq y_o \\ & e\lambda = 1 \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Max}_{v, u, u_o} z = uy_o - u_o \\ & vx_o = 1 \\ & -vX + uY - u_o e \leq 0 \\ & v \geq 0, u \geq 0, u_o \text{ livre} \end{aligned}$

Fonte: [Cooper et al. 2007]

Neste contexto, torna-se válido ressaltar a importância da variável u_o do modelo multiplicador. Segundo [Benício e Mello 2014], ela é responsável por indicar se os retornos de escala serão crescentes, decrescentes ou constantes. Logo, tem-se que: (1) se $u_o = 0$, os retornos de escala serão constantes. Neste caso, para qualquer aumento nos níveis de recursos da organização, os níveis de produtos ou serviços serão aumentados na mesma proporção; (2) se

$u_o > 0$, a DMU apresentará retornos decrescentes de escala. Ou seja, tal organização está operando em níveis produtivos acima de sua capacidade, de maneira que um aumento β nos níveis de recursos acarretará um aumento desproporcional, menor que β , nos níveis de produção; (3) se $u_o < 0$, os retornos de escala serão crescentes. Isso significa que a DMU analisada detém níveis de produção abaixo de sua capacidade ótima. Dessa maneira, um aumento Ω nos níveis de *inputs* fará com que a quantidade de *outputs* seja aumentada em uma proporção maior que Ω .

3. Setor Elétrico Brasileiro

Em se tratando de aspectos operacionais, o setor elétrico brasileiro (SEB) pode ser dividido, como já citado anteriormente, em três segmentos: geração, transmissão e distribuição. Essa divisão é produto das reformas governamentais que começaram a ocorrer a partir da década de 1990. A ideia foi promover a livre concorrência, fazendo valer a regulação do Estado somente quando necessário.

Nessa divisão, o papel do segmento de geração é produzir e injetar a energia elétrica nos sistemas de transporte (transmissão e distribuição), de maneira que esta energia chegue até o consumidor final. De acordo com o Ministério de Minas e Energia – [MME 2015], em seu Balanço Energético Nacional (BEN), a produção de eletricidade no Brasil, em 2014, foi de 590,5 TWh, um valor 3,4% maior ao se comparar com o ano de 2013. Desse total de energia gerado, 65,2% foram obtidos a partir da produção hidráulica, uma redução de 4,5% em relação a 2013. Em contrapartida, a geração a partir de fontes não renováveis aumentou 3,6%, representando 26,9% da quantidade gerada. Isso significa que uma quantidade maior de energia foi obtida através do uso de usinas termelétricas, que apresentam maior custo de produção em relação às hidrelétricas, encarecendo, conseqüentemente, o valor cobrado do consumidor final.

Após gerada, a energia deve ser transportada através de linhas de alta tensão. Esse transporte de energia elétrica caracteriza o segmento de transmissão, que engloba uma faixa de tensões de 230 kV a 750 kV. De acordo com a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – [ABRADEE 2015a], apenas 1,7% da produção de energia elétrica brasileira, localizada em sistemas isolados, encontra-se fora do Sistema Interligado Nacional (SIN). Ou seja, o SEB é interligado, de maneira que seja possível o transporte de energia entre uma região e outra. Nesse âmbito, fica a cargo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) gerenciar, de forma centralizada, o transporte de energia elétrica.

Ainda em relação a esse segmento, mais de cem empresas realizam o transporte de energia. Porém, o mercado concentra-se em oito delas. Tais organizações apresentam domínio tanto no que se refere a quantidade de ativos quanto a questões sobre quantidade de energia transmitida e rentabilidade. Com base nos dados fornecidos pelo [MME 2015], através do BEN, e nos dados fornecidos pelas empresas Companhia Estadual de Energia Elétrica – [CEEE 2015], Companhia Energética de Minas Gerais – [CEMIG 2015], Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – [CHESF 2015], Companhia Paranaense de Energia – [COPEL 2015], Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – [CTEEP 2015], Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A – [ELETRONORTE 2015], Eletrosul Centrais Elétricas S.A – [ELETROSUL 2015] e Furnas Centrais Elétricas S.A. – [FURNAS 2015], foi possível a construção do Quadro 2, que mostra a participação do total de linhas de transmissão detido por essas organizações.

Quadro 2 – Principais Empresas do Segmento de Transmissão

Empresa	Linhas de Transmissão Instaladas (km)	Parcela do Total (%)
CEEE	6.055	4,80
CEMIG	9.748	7,70
CHESF	18.563	14,70
COPEL	2.204	1,75
CTEEP	13.724	10,80
ELETRONORTE	10.702	8,50
ELETROSUL	11.140	8,80
FURNAS	24.139	19,10
TOTAL	96.275	76,15

Observa-se que o segmento de transmissão é altamente concentrado, de maneira que essas instituições detêm pouco mais de 76% do total de linhas de transmissão. Sendo assim, embora o governo incentive a livre concorrência no SEB, essa concentração é impulsionada indiretamente, uma vez que os investidores com maiores recursos disponíveis em determinada região serão aqueles que vencerão as licitações naquela área, adquirindo, assim, a concessão de operação no sistema de transmissão.

Já o setor de distribuição é aquele que opera abaixo de 230 kV e é responsável por conectar fisicamente as linhas de transmissão ao consumidor final. Esse repasse de energia pode ocorrer por via aérea (postes) ou subterrânea. As empresas desse setor são responsáveis por distribuir a energia elétrica a pouco mais de setenta e sete milhões de “unidades consumidoras” (termo utilizado para caracterizar um ponto de entrega de energia elétrica), das quais 85% são residenciais.

Somados, estes três segmentos compõem, juntamente com encargos e impostos, as tarifas das contas de energia elétrica. Segundo a [ABRADEE 2015b], as tarifas de energia elétrica são constituídas por:

- Custos de aquisição de energia: são decorrentes da contratação de energia por meio de leilões. Sendo assim, a concessionária responsável pela distribuição de eletricidade compra um montante de energia que considera ser suficiente para suprir a demanda na sua respectiva área de atuação;

- Encargos e impostos: são pagos ao governo, sendo responsáveis por aproximadamente 30% do valor total pago nas contas de energia;

- Custo de perdas elétricas: as perdas podem ser técnicas ou não técnicas, respectivamente. Quanto ao primeiro tipo, qualquer tipo de fio condutor apresenta uma determinada resistência elétrica que irá transformar parte da corrente elétrica em calor. Sendo assim, os consumidores pagam pelas perdas técnicas decorrentes de seu próprio consumo. Quanto às perdas não técnicas, estas são provenientes de problemas de furto e medição;

- Custos relativos ao uso do sistema de distribuição: são custos como as despesas de capital e os de operação e manutenção da rede. Eles fazem parte da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD);

- Custo relativo ao uso do sistema de transmissão: são custos semelhantes àqueles presentes na TUSD, porém são relativos ao sistema de transmissão, compondo a Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST).

Percebe-se que todos os setores abordados do sistema de energia elétrica são importantes para a composição das tarifas cobradas de cada consumidor. Porém, merece destaque, neste caso, o segmento de transmissão, algo decorrente do fato da operação do setor ser concentrada em poucas empresas. Sendo assim, a maneira ou os níveis de eficiência com que essas organizações operam impactam no valor da TUST. No entanto, esse segmento em questão foi pouco abordado na literatura até então, carecendo, portanto, de estudos mais aprofundamentos em relação a seus agentes. Neste caso, a Análise Envoltória de Dados, mostra-se como uma ferramenta de grande potencial para realização de análises a respeito deste segmento.

4. Estudo de Caso

Como já apresentado anteriormente, o setor elétrico de transmissão brasileiro, foco deste trabalho, é composto por mais de cem empresas que atuam nesse segmento. Porém, a seleção de todas essas organizações, embora garantisse inferências mais concretas a respeito do setor, se tornaria algo inviável em decorrência do tempo a ser dispendido para análise e coleta de dados de todas essas organizações, além dos possíveis entraves na obtenção de informações. Sendo assim, decidiu-se pela seleção de uma amostra de empresas que tivesse representatividade suficiente para que a partir das análises a serem realizadas posteriormente fosse possível realizar inferências sobre o segmento de transmissão de energia elétrica como um todo.

Dessa forma, o critério principal de seleção foi o comprimento de linhas de transmissão detido por cada organização, uma vez que quanto maior este comprimento, maior também será a área de atuação da empresa e, conseqüentemente, um maior contingente populacional atendido

indiretamente por ela, uma vez que a atividade de distribuição é a etapa subsequente. Selecionaram-se, portanto, as oito empresas apresentadas no Quadro 2, sendo elas: CEEE, CEMIG, CHESF, COPEL, CTEEP, ELETRONORTE, ELETROSUL e FURNAS. Essas organizações representam cerca de 76% do total de linhas de transmissão no setor.

Em se tratando da seleção de variáveis, foram utilizadas as mesmas que o órgão regulador do setor, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), utiliza em suas análises. Sendo assim, tomou-se o custo operacional total (R\$) dessas organizações como único *input*, ao passo que capacidade de transformação (MVA), comprimento de rede (km), número de módulos e número de trafos (transformadores) foram definidos como *outputs*. Em seguida, foi definido um intervalo temporal de 2008 a 2014, ou seja, sete DMUs para cada empresa (uma para cada ano), totalizando cinquenta e seis unidades tomadoras de decisão. Neste caso, quanto maior o número de DMUs, maior será a amostra utilizada e, conseqüentemente, mais precisa será a análise. Segundo [Cooper et al. 2007], o número de DMUs deve ser pelo menos igual a $Max \{Núm. Inputs \times Núm. Outputs, 3(Núm. Inputs + Núm. Outputs)\}$. Sendo assim, a condição proposta por esses autores foi satisfeita.

Em se tratando da coleta de dados, utilizou-se como fonte principal de dados as notas técnicas N° 396/2009 e N° 383/2012 da ANEEL e os relatórios de sustentabilidade (das empresas) relativos ao período de 2009 a 2014. Além disso, ligações telefônicas e e-mails direcionados às empresas selecionadas e o Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão (e-SIC) também foram utilizados. De maneira a verificar a consistência dos dados finais obtidos, efetuou-se uma análise de correlação de Pearson através do *software* Minitab 16, verificando-se a relação entre cada par de variáveis, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Correlação das Variáveis

VARIÁVEIS	Custo Total	Comp. Rede	Cap. Tranf.	Qtd. Trafos	Qtd. Módulos
Custo Total					
Comp. Rede	0,652				
Cap. Tranf.	0,703	0,805			
Qtd. Trafos	0,482	0,817	0,738		
Qtd. Módulos	0,277	0,697	0,408	0,851	

O fato de todos os valores de correlação serem positivos mostra uma relação de monotonicidade, ou seja, aumentos de *input* não geram decréscimos nos níveis dos *outputs*. Além disso, a coerência dos dados ainda pode ser confirmada pelo fato de todas as saídas estarem correlacionadas com o custo total. Neste caso, a correlação positiva entre os *outputs* poderia representar alguma redundância nas suas respectivas escolhas. Porém, conforme mostrado por [Pessanha et al. 2010], embora essas variáveis estejam correlacionadas, elas estão associadas a produtos que, embora de naturezas distintas, contribuem para o aumento dos custos. Por fim, os dados foram analisados através dos dois modelos BCC, envelope e multiplicador, com orientação a *input* apresentados no Quadro 1. Essas formulações assemelham-se àquelas utilizadas pela ANEEL para análise do segmento de transmissão. A única diferenciação está no fato de serem permitidos retornos decrescentes, constantes ou crescentes de escala (u_o livre), ao passo que o órgão regulador permite apenas este último em suas análises. Para resolução dessas formulações matemáticas desenvolveu-se um *software* na linguagem C++ com utilização da biblioteca *glpk.h*.

5. Análise dos Resultados

Após resolução das modelagens BCC, obtiveram-se os valores das eficiências referentes às cinquenta e seis DMUs utilizadas na análise. Além disso, foram identificadas aquelas pertencentes ao ERS. Os resultados encontram-se na Figura 1.

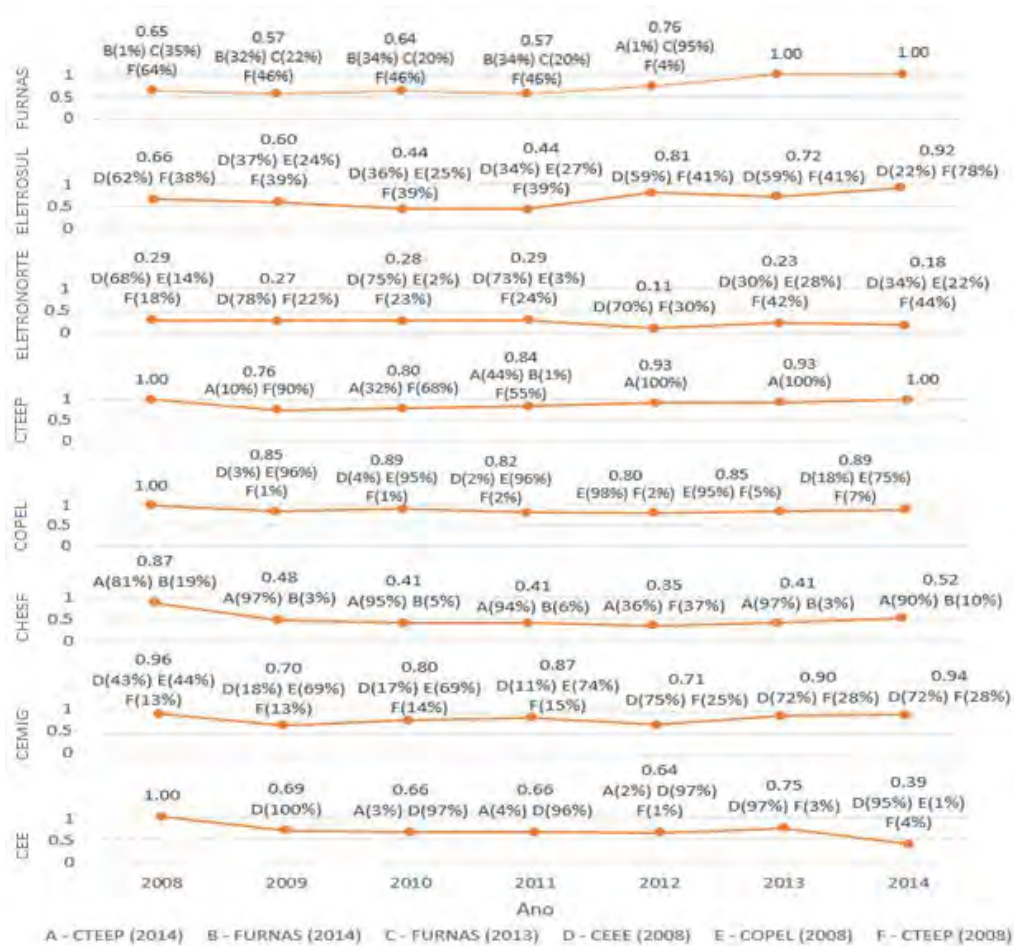


Figura 1 – Resultados Modelagens BCC

O eixo das abscissas representa o tempo em anos, de 2008 a 2014, enquanto que no eixo das ordenadas estão apresentadas cada uma das oito empresas analisadas e seus respectivos desempenhos ao longo desse intervalo temporal. Nesse caso, seis DMUs demonstraram valores máximos de eficiência, fazendo parte, portanto, do conjunto de eficiente de referência. Essas organizações estão representadas por letras de A até F, sendo elas: A – CTEEP (2014), B – FURNAS (2014), C – FURNAS (2013), D – CEEE (2008), E – COPEL (2008), F – CTEEP (2008). Em se tratando das importâncias das DMUs de referência para as demais, esta foi calculada da seguinte maneira:

$$Importância\ DMU_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} (100)$$

Os valores de λ são aqueles encontrados a partir da resolução do modelo envelope. Eles serão nulos para as DMUs que não fazem parte do conjunto de referência e positivos para aquelas que o fazem. Sendo assim, somente as seis DMUs tomadas como referência apresentaram valores não nulos para λ em relação às demais. Além disso, se uma DMU_k apresenta eficiência máxima, sendo tomada como referência, o valor de λ_k é unitário e os demais valores de λ em relação a esta DMU são nulos.

Neste caso, quanto maior a importância de uma DMU_k , maior será sua proximidade de porte ou tamanho organizacional em relação à DMU analisada. Sendo assim, o porte da empresa CHESF (2014) aproxima-se muito mais da CTEEP (2014) do que de FURNAS (2014), respectivamente. Isso significa que CHESF (2014), em relação à fronteira de eficiência, encontra-se muito mais próxima da primeira referência do que da segunda. Logo, torna-se mais fácil efetuar mudanças, dentro da organização em questão, tomando-se como base ou modelo a DMU CTEEP (2014), caso sejam consideradas apenas as entradas e saídas utilizadas. Além disso, é

válido ressaltar que o fato de uma DMU ser referência para uma determinada organização, não significa que também o será para outra. Por exemplo, COPEL (2008) é referência para ELETRONORTE (2014), mas não para ELETROSUL (2013).

Em relação aos resultados, as empresas FURNAS, ELETROSUL, CTEEP, COPEL e CEMIG obtiveram destaques positivos, uma vez que ou aprimoraram suas respectivas eficiências (no caso das duas primeiras) ao longo do período de análise ou obtiveram resultados considerados elevados (no caso das três últimas) durante todos os anos. Em contrapartida, as empresas CHESF, CEE e ELETRONORTE obtiveram destaques negativos. Neste caso, as duas primeiras apresentaram um declínio de desempenho ao decorrer dos anos, ao passo que a terceira demonstrou resultados muito abaixo da média em todo o intervalo de análise. Ademais, FURNAS e CHESF apresentaram, respectivamente, valores positivos de u_o em todos os anos de análise, embora os da primeira tenham sido baixos comparados aos da segunda. Isso indica retornos decrescentes de escala, sugerindo que, caso essas empresas planejem a expansão de suas atividades, reestruturações organizacionais serão necessárias.

Além disso, através da utilização do modelo envelope, foi possível analisar quais seriam os possíveis valores reduzidos de custo tomando-se como base o método sugerido por [El-Mahgary e Lahdelma 1995]. De forma genérica, esse método pode ser expresso por:

$$x_{ik} = \sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j \quad (i = 1, \dots, m) .$$

Sendo assim, o valor reduzido x_{ik} de uma *input* i de uma DMU $_k$ é o somatório do mesmo *input* i para cada DMU $_j$ ($j = 1, \dots, n$) multiplicado por λ_j . Neste caso, percebeu-se que quanto menor a eficiência, maior é o nível de redução necessário das entradas (somente custo total, no caso deste trabalho) do modelo, para que a DMU se torne eficiente. De maneira análoga, quanto maior o nível de eficiência, menor será a redução de *input* necessária. Ou seja, DMUs com níveis baixos de desempenho, como a ELETRONORTE (2014), encontram-se mais distantes da fronteira de eficiência e requerem, portanto, um maior nível de redução de *input*, enquanto que DMUs com desempenho elevado, como a CEMIG (2014), requerem reduções menores, pois estão mais próximas dessa fronteira. Já as DMUs que não necessitam de qualquer tipo de redução são aquelas que apresentam nível máximo de eficiência, como CTEEP (2014) e FURNAS (2014). As possíveis reduções de custo para cada empresa estão apresentadas no Quadro 5 deste trabalho. Já em relação a análises mais abrangentes sobre o setor abordado, estas estão apresentada no Quadro 4.

Quadro 4 – Custo Anual de Transmissão

Ano	Custo Total (R\$)	Custo Reduzido (R\$)	Redução de Custo (R\$)	Redução de Custo (%)
2014	4.034.415.779,00	2.608.968.962,62	1.425.446.816,38	35,33
2013	3.457.761.566,00	2.206.400.433,96	1.251.361.132,04	36,19
2012	4.545.492.433,00	2.126.004.105,96	2.419.488.327,04	53,23
2011	3.782.370.497,72	1.996.250.980,33	1.786.119.517,39	47,22
2010	3.650.897.797,18	1.969.183.916,17	1.681.713.881,01	46,06
2009	3.526.563.943,23	1.928.751.858,98	1.597.812.084,25	45,31
2008	2.667.128.443,54	1.874.681.424,27	792.447.019,27	29,71
TOTAL	25.664.630.459,67	14.710.241.682,30	10.954.388.777,37	42,68

Neste caso, o custo total para o ano de 2014, por exemplo, foi obtido somando-se os valores de custo total de cada empresa analisada naquele ano. De maneira semelhante foi obtido o valor de custo reduzido, enquanto que a redução de custo foi obtida fazendo-se a diferença entre custo total e custo reduzido e, por fim, dividindo-se o último valor encontrado pelo custo total foi encontrada sua porcentagem. Analisando-se os dados do quadro nota-se o quanto poderia deixar

de ser gasto caso todas as organizações operassem de maneira mais eficiente. No ano de 2012, por exemplo, R\$ 2,4 bilhões poderiam ter sido economizados e, já em 2014 R\$ 1,4 bilhão. Caso seja considerado o período total 2008 a 2014, aproximadamente R\$ 11 bilhões poderiam ter sido economizados, valor este que foi repassado aos consumidores via TUST.

Além disso, com base no procedimento apresentado por [El-Mahgary e Lahdelma 1995] e nos resultados obtidos a partir da análise do cenário geral, avaliaram-se as possíveis reduções de custo para cada organização, do período de 2008 a 2014. Os resultados estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Custo de Transmissão por Empresa

Empresa	Custo Total (R\$)	Custo Reduzido (R\$)	Redução de Custo	Redução de Custo (%)	Parcela do Total de Redução (%)
CEEE	1.447.897.708,88	925.139.597,07	522.758.111,81	36,10	4,77
CEMIG	1.218.383.316,99	1.011.764.820,53	206.618.496,46	16,96	1,89
CHESF	5.214.927.115,59	2.452.121.490,02	2.762.805.625,57	52,98	25,22
COPEL	843.878.676,96	731.265.307,84	112.613.369,12	13,34	1,03
CTEEP	2.250.810.148,68	1.992.665.012,21	258.145.136,47	11,47	2,36
ELETRONORTE	5.576.249.596,04	1.154.532.582,62	4.421.717.013,42	79,30	40,36
ELETROSUL	2.093.322.871,45	1.305.506.366,78	787.816.504,67	37,63	7,19
FURNAS	7.019.161.025,08	5.137.246.505,21	1.881.914.519,87	26,81	17,18
Total	25.664.630.459,67	14.710.241.682,28	10.954.388.777,39	42,68	100,00

O Quadro 5 mostra as possíveis reduções de custo que poderiam ter sido efetuadas em relação a cada empresa, do período de 2008 a 2014. Neste caso, ELETRONORTE e CHESF são as organizações que mais poderiam ter poupado gastos, cerca de 80% e 53%, respectivamente. Em contrapartida, CTEEP e COPEL foram as organizações que atingiram os melhores níveis de gerenciamento da relação entre *input* e *outputs*, uma vez que atingiram os menores níveis de redução de custo possível, aproximadamente 11% para a primeira e 13% para a segunda. Embora algumas organizações tenham apresentado níveis significativos de possíveis reduções, como CEEE e ELETROSUL, os valores encontrados apresentam pouco impacto na parcela total de redução. Neste caso, CHESF, ELETRONORTE e FURNAS representam os maiores níveis no total de redução, onde juntas representam aproximadamente 83% ou R\$ 9 bilhões da redução de custo total.

5. Conclusão

Como já apresentado, a energia elétrica, utilizada na iluminação pública, indústrias, escolas, residências, comunicação, etc., apresenta um papel importante não só para o desenvolvimento econômico de um país, mas também para o conforto da população em geral. Porém, a utilização desse bem de categoria intangível mostra-se cada vez mais dispendiosa (em termos monetários) ao longo dos últimos anos. Tal afirmação pode ser comprovada ao se analisar as tarifas cobradas nas contas de luz ao longo dos últimos anos. Sendo assim, o encarecimento da eletricidade, em termos econômicos, contribui para a desaceleração da economia brasileira, uma vez que os produtos ofertados apresentam em seus respectivos preços os gastos com energia elétrica que foram necessários para a sua confecção ou produção. Nesse contexto, as exportações são desaceleradas.

Em se tratando do mercado interno, este aspecto de desaceleração torna-se mais agravante devido a dois fatores, um direto e outro indireto. Quanto ao primeiro, de maneira semelhante ao caso das exportações, os preços dos produtos são aumentados, o que na relação de oferta e demanda, contribui para a redução das vendas. Em relação ao segundo fator, leva-se em consideração o fato da eletricidade ser um bem essencial à vida do homem moderno. Sendo

assim, uma vez que é gasto mais dinheiro para se pagar uma conta de luz, conseqüentemente, o montante restante para ser gasto na compra de alimentos, produtos eletrônicos, eletrodoméstico, utensílios domésticos, lazer, etc. é substancialmente menor. Percebe-se que os resultados tanto para mercado interno quanto para o externo, respectivamente, são negativos, porém os impactos no primeiro são muito maiores.

Sendo assim, tal perspectiva apresentada justificou o fato deste trabalho procurar analisar o comportamento das principais empresas que compõem o setor elétrico brasileiro de transmissão. Neste caso, a utilização da Análise Envoltória de Dados mostrou-se ser uma ferramenta simples, mas ao mesmo tempo bastante eficiente, no que diz respeito à identificação das eficiências das DMUs. Observou-se, através das análises, que se poderia ter economizado aproximadamente R\$ 11 bilhões. Neste caso, CHESF, ELETRONORTE e FURNAS se mostraram como sendo aquelas empresas que mais impactaram no possível montante de redução, uma vez que a diminuição de seus respectivos custos representaria um valor em torno de 83% do total de redução. Conclui-se, portanto, que estas organizações são as que mais carecem de mudanças nas políticas de custos e gerenciamento de ativos. Além disso, outras mudanças serão necessárias para FURNAS e CHESF caso estas planejem expandir suas atuações no mercado, uma vez que foram identificados retornos decrescentes de escala para as duas.

Além disso, é importante considerar que este trabalho não abordou todas as concessionárias que operam dentro do setor de transmissão. Caso todas fossem tomadas como objetos de estudo, possivelmente, os valores de redução de custo apresentados seriam maiores, partindo-se da premissa que nem todas as organizações operam com níveis máximos de eficiência. Segundamente, é válido lembrar que o estudo foi direcionado apenas ao segmento de transmissão de energia elétrica. Isso induz à reflexão das economias de gastos que poderiam ter sido identificadas caso fossem considerados e analisados os outros dois setores, geração e distribuição. Sendo assim, tais considerações podem ser utilizadas para trabalhos futuros, de maneira a se analisar não somente o segmento de transmissão de energia elétrica, mas também os de geração e distribuição, levando-se em consideração o maior número de organizações possível para a obtenção de resultados mais precisos sobre o SEB. Neste caso, análises que englobam fatores ambientais, podem vir a ser importantes, e conseqüentemente, ferramentas para análises de regressão e sensibilidade.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao PIP-UFOP pelo apoio financeiro.

Referências

ABRADEE. (2015a). *Sistema Interligado*. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/sistema-interligado>>. Acessado: 28-09-2015.

_____. (2015b) *Tarifas de Energia*. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>>. Acessado: 28-09-2015.

Banker, R. D., Charnes, A. e Cooper, W. W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, v. 30, n. 9, p. 1078–1092.

Benício, J., Mello, J. C. S. (2014). Retornos de Escala em DEA: Críticas ao BCC e Novo Modelo. *TeRCi*, v. 4, n. 2.

Brambilla, P. H. M. e Mueller, B. M. P. (2004). Impacto da Energia Elétrica no Crescimento Econômico. *Ciência Jurídicas Empresariais*, v. 5, p. 33-45.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional*. (2015). Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores>>. Acessado: 25-09-2015.

CEEE. Companhia Estadual de Energia Elétrica. (2015). *Relatório Anual e de Sustentabilidade*. Disponível em: <http://www.cee.com.br/PPortal/CEEE/Archives/Download/sustentabilidade/Relatorio_Anuar_de_Sustentabilidade_CEEE-D_2014.pdf>. Acessado: 25-09-2015.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. (2015). *Relatório Anual e de Sustentabilidade*. Disponível em: <http://relatorio2014.cemig.com.br/impressao_pt.pdf>. Acessado: 25-09-2015.

Charnes, A., Cooper, W. W. e Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, n. 6, p. 429–444.

CHESF. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. (2015). *Relatório Anual e de Sustentabilidade*. Disponível em: <https://sustentabilidade.chesf.gov.br/assets/files/Chesf_RS2_104_completo.pdf>. Acessado: 25-09-2015.

Chien, C. F., Chen, W. C., Lo, F. Y. e Lin, Y. C. (2007). A Case Study to Evaluate the Productivity Changes of the Thermal Power Plants of the Taiwan Power Company. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 3, p. 680–688.

Cooper, W. W., Seiford, L. M. e Tone, K. (2007). *Data Envelopment Analysis*. Boston, MA: Springer US.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. (2015) *Relatório de Sustentabilidade*. Disponível em: <http://www.cee.com.br/PPortal/CEEE/Archives/Download/sustentabilidade/Relatorio_Anuar_de_Sustentabilidade_CEEE-D_2014.pdf>. Acessado: 25-09-2015.

CTEEP. Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista. (2015). *Relatório de Sustentabilidade*. Disponível em: <<http://cteep.rweb.com.br/ri/listgroup.aspx?idCanal=0kgxMBWrQ43+bHRRIZf5+g==>>>. Acessado: 25-09-2015.

Dedoussis, V., Konstas, C., Kassimis, A. e Sofianopoulou, S. (2010). Efficiency evaluation of natural gas power plants using data envelopment analysis. *Journal of Applied Operational Research*, v. 2, p. 94–99.

ELETRONORTE. Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A. (2015). *Relatório de Sustentabilidade*. Disponível em: <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/export/sites/eletronorte/publicacoes/relatoria_sustentabilidade/Relatorio_Sustentabilidade_2014.pdf>. Acessado: 25-09-2015.

ELETROSUL. Eletrosul Centrais Elétricas S.A. (2015). *Relatório Anual e de Sustentabilidade*. Disponível em: <[http://www.eletrosul.gov.br/files/files/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/RELAT%C3%93RIO%20ANUAL%20E%20DE%20SUSTENTABILIDADE%20ELETROSUL%202014\(1\).pdf](http://www.eletrosul.gov.br/files/files/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/RELAT%C3%93RIO%20ANUAL%20E%20DE%20SUSTENTABILIDADE%20ELETROSUL%202014(1).pdf)>. Acessado: 25-09-2015.

El-Mahgary, S. e Lahdelma, R. (1995). Data Envelopment Analysis: Visualizing the Results. *European Journal of Operations Research*, v. 85, p. 700-710.

FURNAS. (2015). Furnas Centrais Elétricas. *Relatório Anual de Sustentabilidade*. Disponível em: <<http://www.furnas.com.br/arcs/pdf/RelatorioSocioAmbiental/2014/RS-Furnas-2014-Portugu%C3%AAs.pdf>>. Acessado: 25-09-2015.

Galvão, P. J. L. N. (2008). *Análise Envoltória de Dados Aplicada ao Setor Brasileiro de Distribuição de Energia Elétrica*. 109f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Ibmecc, Rio

de Janeiro.

Goulart, D. D. (2013). *Avaliação de Índices de Eficiência e Produtividade de Distribuidoras de Energia Elétrica no Brasil Aplicando Análise Envoltória de Dados (DEA)*. 2013. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UNIPAMPA, Alegrete.

Jha, D. K. e Shrestha, R. (2006). Measuring efficiency of hydropower plants in Nepal using data envelopment analysis. *Ieee Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 4, p. 1502–1511.

Leme, R. C., Paiva, A. P., Santos, P. E. S., Balestrassi, P. P. e Galvão, L. L. (2014). Design of experiments applied to environmental variables analysis in electricity utilities efficiency: The Brazilian case. *Energy Economics*, v. 45, p. 111–119.

Lins, M. E., Oliveira, L. B., Moreira da Silva, A. G., Rosa, L. P. e Pereira Jr., A. O. P. (2012). Performance assessment of Alternative Energy Resources in Brazilian power sector using Data Envelopment Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 898–903.

Lins, M. P. E., Sollero, M. K. V., Calôba, G. M. e Moreira da Silva, A. C. (2007). Integrating the regulatory and utility firm perspectives, when measuring the efficiency of electricity distribution. *European Journal of Operational Research*, v. 181, n. 3, p. 1413–1424.

Pereira de Souza, M. V. P., Souza, R. C., Pessanha, J. F. M., Oliveira, C. H. C. e Diallo, M. (2014). An application of data envelopment analysis to evaluate the efficiency level of the operational cost of Brazilian electricity distribution utilities. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 48, n. 3, p. 169–174.

Pessanha, J. F. M., Figueira de Mello, M. A. R., Barros, M. e Souza, R. C. (2010). Avaliação dos custos operacionais eficientes das empresas de transmissão do setor elétrico Brasileiro: uma proposta de adaptação do modelo dea adotado pela ANEEL. *Pesquisa Operacional*, v. 30, n. 3, p. 521–545.

Rezende, S. M., Pessanha, J. F. M. e Amaral, R. M. (2014). Avaliação cruzada das distribuidoras de energia elétrica. *Produção*, v. 24, n. 4, p. 820–832.

Sherman, H. D. e Zhu, J. (2006). *Service Productivity Management: Improving Service Performance using Data Envelopment Analysis (DEA)*. Nova York: Springer US.

Silva Sé, F. E. D. (2012). *Análise da produtividade das distribuidoras de energia elétrica utilizando Índice Malmquist e o método de bootstrap*. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

Sözen, A., Alp, İ. e Kilinc, C. (2012). Efficiency assessment of the hydro-power plants in Turkey by using Data Envelopment Analysis. *Renewable Energy*, v. 46, p. 192–202.

Sözen, A., Alp, İ. e Özdemir, A. (2010). Assessment of operational and environmental performance of the thermal power plants in Turkey by using data envelopment analysis. *Energy Policy*, v. 38, n. 10, p. 6194–6203.

Xavier, S. S., Lima, J. W. M., Lima, L. M. M. e Lopes, A. L. M. (2015). How Efficient are the Brazilian Electricity Distribution Companies? *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 26, n. 3, p. 283–296.