



Grupo de Estudo de Aspectos Empresariais e de Gestão Corporativa e da Inovação e da Educação e de Regulação do Setor Elétrico-GEC

CÁLCULO DOS CUSTOS OPERACIONAIS REGULATÓRIOS DAS CONCESSIONÁRIAS DE TRANSMISSÃO DO BRASIL POR MEIO DE METODOLOGIA DEA BASEADA EM EFICIÊNCIA CRUZADA

**JOSÉ FRANCISCO MOREIRA PESSANHA(1,2); ALBERT CORDEIRO GEBER DE MELO(1,2);
CEPEL (1) , UERJ (2);**

RESUMO

Discutem-se os principais aspectos dos modelos de Análise Envoltória de Dados, incluindo a Avaliação de Eficiência Cruzada, a qual prescinde da pré-definição de restrições aos pesos das variáveis insumos e produtos. Também, os principais avanços da Nota Técnica 126/2018-SRM/ANEEL. Em seguida, considerando os principais elementos da base de dados das concessionárias de transmissão disponibilizada pela Agência para o período de 2013 a 2016, diferentes modelos DEA são descritos, aplicados e analisados, incluindo a metodologia ANEEL. Dada a dispersão dos resultados obtidos, propõe-se e analisa-se a média geométrica como índice final de eficiência dos custos operacionais regulatórios das concessionárias de transmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Envoltória de Dados, Custos Operacionais, Eficiência, Regulação, Transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

Em vários países, a regulação econômica da transmissão se dá pelo controle da receita das transmissoras, fortemente atrelada aos custos operacionais regulatórios. Por exemplo, no Brasil, os ativos de transmissão são remunerados pelas suas disponibilidades, independentemente da utilização plena das suas capacidades, e cada instalação tem direito a uma receita anual permitida (RAP) determinada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [1-3].

Um problema associado ao cálculo dos custos operacionais regulatórios, está na assimetria de informação entre o regulador e as concessionárias. Uma estratégia para mitigar os efeitos da assimetria de informação consiste na comparação entre os custos operacionais das concessionárias com uma fronteira de eficiência. A avaliação de fronteiras de eficiência pode ser realizada, e.g., por meio de modelos econométricos, em especial os modelos de fronteira estocástica - SFA (*Stochastic Frontier Analysis*) [4], ou por modelos de Análise Envoltória de Dados - DEA (*Data Envelopment Analysis*) [5], uma técnica baseada em Programação Linear. A abordagem SFA requer a especificação de uma equação para a fronteira de custo, tratando-se, portanto, de um método paramétrico. Por outro lado, a abordagem DEA prescinde da especificação de equação para a fronteira de custos e requer apenas a indicação das variáveis insumos e produtos associadas ao problema; logo, a abordagem DEA é não paramétrica. Por exemplo, no caso das transmissoras o insumo é o custo operacional, enquanto os produtos incluem a extensão total (km) das linhas de transmissão, a capacidade de transformação (MVA), a quantidade de módulos de manobras, a quantidade de equipamentos nas subestações e o indicador de qualidade para cada concessionária [2,3].

Os métodos DEA e SFA partem de pressupostos diferentes e apresentam vantagens e limitações de acordo com a aplicação em que são empregados, não havendo um método superior a priori. Contudo, a abordagem DEA, constitui uma estrutura ideal para implementação de estratégias de regulação de concessionárias por meio de *benchmarking* [6], pois quantifica índices de eficiência para cada concessionária e identifica os melhores padrões de desempenho (*benchmarks*) a serem seguidos por cada concessionária ineficiente.

Basicamente, no caso da regulação da transmissão, um modelo DEA identifica uma fronteira de custo e calcula a eficiência de uma transmissora a partir da sua distância até a fronteira. Proposta inicialmente por Charnes, Cooper e Rhodes [7], o primeiro modelo DEA admitia uma função fronteira com rendimentos constantes de escala (*Constant Return to Scale - CRS*) [7]. Posteriormente, Banker, Charnes e Cooper introduziram o modelo DEA que permite identificar uma fronteira com rendimentos variáveis de escala (*Variable Return to Scale - VRS*) [8].

No caso do Brasil, desde 2007, com a edição da Nota Técnica 182/2007-SRE/ANEEL [1], a metodologia adotada pela Agência na definição dos custos operacionais regulatórios, tem sido baseada no método DEA, mais especificamente no modelo DEA com fronteira de eficiência sem rendimentos decrescentes de escala (*Non Decreasing Return to Scale - NDRS*) [5], uma variação do modelo DEA VRS. Desde então, a ANEEL vem adquirindo experiência na aplicação da abordagem DEA para definição dos níveis eficientes dos custos operacionais das concessionárias de distribuição e de transmissão, culminando com a edição da Nota Técnica 126/2018-SRM/ANEEL [3], que se constitui em uma evolução dos modelos adotados nas revisões tarifárias anteriores e incorpora diversos aprimoramentos advindos das audiências públicas. Cita-se, por exemplo, a consideração de restrições aos pesos como forma de evitar a atribuição de pesos nulos e irrealistas aos insumos e produtos, conforme já havia sido apontada em [9]. Apesar dos avanços alcançados e da maior sofisticação do modelo DEA adotado, a imposição de restrições aos pesos traz consigo, intrinsecamente, algum grau de arbitrariedade e depende de informação a priori da importância relativa de cada variável, uma informação que, na maioria dos casos, não é de fácil obtenção [5].

Uma alternativa à imposição de restrições aos pesos é o método baseado em análise de eficiência cruzada (*Cross Efficiency Analysis CEA*) [10]. De forma distinta dos modelos DEA em que o cálculo da eficiência de uma concessionária se baseia nos seus pesos ótimos (*self-appraisal evaluation*), na avaliação cruzada a eficiência de cada concessionária é avaliada de acordo com os esquemas de pesos ótimos das outras concessionárias, i.e., os escores de eficiência são avaliados do ponto de vista de outras concessionárias (*peer appraisal evaluation*). Por outro lado, o método CEA pode se mostrar mais rigoroso ao calcular as eficiências.

O presente trabalho descreve os principais aspectos metodológicos dos modelos DEA CRS, VRS e NDRS e, em especial, a metodologia baseada em avaliação de eficiência cruzada (CEA), a qual prescinde da pré-definição de restrições aos pesos das variáveis insumos e produtos. Também discute os principais avanços da Nota Técnica 126/2018-SRM/ANEEL com relação à edição de 2007. Em seguida, considerando os principais elementos da base de dados das concessionárias de transmissão disponibilizada na Audiência Pública ANEEL 041/2017 para o período de 2013 a 2016, os métodos DEA descritos são aplicados e analisados comparativamente quanto ao seu desempenho, incluindo a metodologia ANEEL. Dada a dispersão dos resultados obtidos, foi utilizada a média geométrica como índice final de eficiência, verificando-se a adequação desta proposta.

2.0 - MODELOS CLÁSSICOS DE ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA

A abordagem DEA é uma técnica amplamente utilizada para avaliar a eficiência de organizações que atuam em um mesmo setor (DMU - *Decision Making Units*) e que convertem quantidades $x_i \forall i=1,s$ de insumos em quantidades $y_j, \forall j=1,m$ de produtos. No caso geral, uma DMU usa múltiplos insumos $X = (x_1, \dots, x_s)$ para produzir múltiplos produtos $Y = (y_1, \dots, y_m)$ e sua pontuação (escore) de eficiência é definido pelo seguinte quociente:

$$(1) \quad \text{eficiência} = \theta = \frac{(u_1 y_1 + \dots + u_m y_m)}{(v_1 x_1 + \dots + v_s x_s)}$$

em que $U=(u_1, \dots, u_m)$ e $V=(v_1, \dots, v_s)$ correspondem aos vetores de pesos atribuídos aos produtos e aos insumos, respectivamente.

2.1 Rendimentos Constantes de Escala - CRS

Sob a abordagem de conservação de recursos (orientação ao insumo), a medida de eficiência técnica θ ($0 \leq \theta \leq 1$) de uma DMU é definida como a contração radial máxima do vetor de insumos X que pode produzir o mesmo vetor Y de quantidades de produtos:

$$\text{Eficiência} = \text{Min} \{ \theta \mid (\theta X, Y) \in \text{conjunto de possibilidades de produção } T(X, Y) \} \quad (2)$$

O problema de otimização em (2) é modelado pelo problema de programação linear (PPL) descrito em (3) na Tabela 1, denominado por modelo DEA na formulação envelope orientado ao insumo, em que j_0 é o índice da DMU avaliada. Assim, a DMU_{j_0} é eficiente se e somente se θ assume um valor igual a 1 e todas as folgas das restrições são nulas. Porém, se $\theta = 1$ e alguma variável de folga é não nula, a DMU_{j_0} é fracamente eficiente [11]. Se $\theta < 1$; a DMU_{j_0} é ineficiente, neste caso, as DMU eficientes estão associadas às variáveis $\lambda_j > 0 \forall j=1, N$ e formam o conjunto de referência (*peer set*) da DMU_{j_0} . Adicionalmente, a fronteira de eficiência identificada pelo modelo DEA em (3) admite rendimentos constantes de escala (*Constant Returns to Scale - CRS*).

A partir da teoria da dualidade da programação linear, tem-se que o dual do modelo DEA em (3) é o PPL em (4), o modelo DEA orientado ao insumo na formulação dos multiplicadores u e v . O PPL (3) ou o PPL (4) deve ser resolvido para cada DMU, a fim de calcular o seu escore de eficiência. No caso do PPL (4), uma determinada DMU, e.g. DMU_{j_0} , é totalmente eficiente se $\theta = 1$ e todos os pesos em U e V são positivos na solução ótima. Porém, se $\theta = 1$, mas alguns pesos são iguais a zero, o DMU_{j_0} é considerada fracamente eficiente; caso contrário, se $\theta < 1$ a DMU é ineficiente.

Tabela 1 – Modelos DEA/CRS orientados ao insumo

$\text{eficiência} = \text{Min}_{\lambda, \theta} \theta \quad (3)$ <p>s.a.</p> $\theta X_{j_0} \geq \sum_{j=1}^N \lambda_j X_j$ $Y_{j_0} \leq \sum_{j=1}^N \lambda_j Y_j$ $\lambda_j \geq 0 \forall j = 1, \dots, j_0, \dots, N$	$\text{eficiência} = \theta = \text{Max}_{u, v} \sum_{i=1}^m u_i y_{i, j_0} \quad (4)$ <p>s.a.</p> $-\sum_{i=1}^s v_i x_{ij} + \sum_{i=1}^m u_i y_{ij} \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, j_0, \dots, N$ $\sum_{i=1}^s v_i x_{i, j_0} = 1$ $u_i \geq 0, v_j \geq 0, \forall i = 1, m, \forall j = 1, s$
---	---

2.2 Rendimentos Variáveis de Escala - VRS

Nas situações em que há heterogeneidade entre as DMU – como é o caso do porte das concessionárias de transmissão que operam no setor elétrico brasileiro [12], a adoção de um modelo DEA com rendimentos constantes de escala (CRS) poderá levar à comparação de uma DMU com outras substancialmente maiores ou menores. Uma tentativa de contornar este problema se dá por meio do modelo DEA que admite uma fronteira de eficiência com rendimentos variáveis de escala (VRS) [5,13]. No entanto, o modelo VRS possui a propriedade indesejável de classificar como eficiente as DMU com os menores níveis de insumos ou os maiores níveis de produto, em pelo menos uma das variáveis. Por exemplo, no modelo VRS uma concessionária de transmissão pode ser considerada eficiente pelo simples fato de operar a maior rede de transmissão, o que não significa necessariamente maior eficiência [9]. O modelo DEA VRS é obtido por meio da introdução de uma restrição de convexidade ($\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = 1$) no PPL (3) ou pela inclusão de uma variável irrestrita no PPL (4), conforme indicado em [5].

2.3 Rendimentos Não Decrescentes de Escala - NDRS

Uma crítica ao modelo DEA VRS é que, em função da hipótese de convexidade, a fronteira de eficiência VRS é caracterizada por rendimentos que não são crescentes ao longo de toda fronteira e a produtividade diminui à medida que o nível de atividade aumenta para além da escala ótima. Tal característica da fronteira VRS pode levar a avaliações otimistas da eficiência, dificultando o atendimento aos objetivos de um esquema de regulação por incentivo [9], cuja proposta é construir mecanismos que estimulem os ganhos de produtividade.

Uma alternativa, então é o modelo com rendimentos não decrescentes de escala – NDRS, uma variante do modelo VRS [5] em que a restrição de convexidade $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N = 1$ é substituída pela desigualdade $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N \geq 1$. Tal modelo reconhece que as DMU de menor porte operam na faixa de rendimentos crescentes de escala (operam em uma escala subótima) e por esta razão não devem ser penalizadas com a imposição da fronteira CRS; para estas empresas a fronteira é definida pelo modelo VRS. Adicionalmente, para as DMU de maior porte (que operam na faixa de rendimentos decrescentes de escala), o modelo NDRS impõe a fronteira CRS como forma de incentivar a redução de custos destas.

2.4 Fronteiras de eficiência segundo os modelos CRS, VRS e NDRS

A Figura 1 ilustra a fronteira de eficiência dos modelos DEA analisados, a partir dos diferentes regimes de rendimentos de escala para o caso de um insumo e um produto.

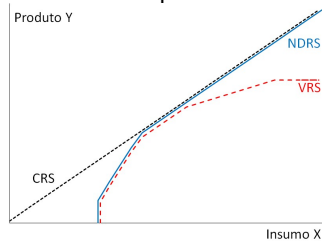


FIGURA 1 - Formas da fronteira de eficiência segundo diferentes regimes de rendimentos de escala

3.0 - AVALIAÇÃO CRUZADA

Os modelos DEA descritos na seção 2 podem atribuir ponderações nulas ou irrealistas aos insumos e produtos, podendo resultar em eficiências superestimadas [5]. Uma forma de mitigar este problema consiste em incluir restrições aos pesos no PPL do modelo DEA. No entanto, a imposição de restrições aos pesos traz consigo, intrinsecamente, algum grau de arbitrariedade e depende de informação a priori da importância relativa de cada variável que, na maioria dos casos, não é de fácil obtenção [5]. Uma alternativa à imposição de restrições aos pesos é a abordagem baseada em análise de eficiência cruzada (*Cross Efficiency Analysis CEA*) [5,10], em que a eficiência de uma DMU é avaliada de acordo com os esquemas de pesos ótimos das outras concessionárias, i.e., os escores de eficiência são avaliados do ponto de vista de outras concessionárias (*peer appraisal evaluation*).

A eficiência cruzada de uma DMU s com base nos pesos de uma DMU k é definida pelo seguinte quociente:

$$E_{ks} = \frac{\sum_i^{outputs} u_{ik} y_{is}}{\sum_j^{inputs} v_{jk} x_{js}} \quad (5)$$

onde u_{jk} e v_{jk} são os pesos ótimos da DMU k aplicados aos produtos y_{js} e insumos x_{js} da DMU s .

Em um conjunto com N DMU, os escores de eficiência calculados pelo modelo CRS e a eficiência cruzada podem ser dispostos em uma *matriz*, como a apresentada na Tabela 2. As eficiências resultantes do modelo CRS são dispostas na diagonal. A k -ésima linha mostra a eficiência cruzada computada com pesos da DMU k , enquanto que a k -ésima coluna guarda as eficiências cruzadas da k -ésima DMU, calculadas com os pesos das outras DMUs.

Tabela 2 – Matriz de eficiências cruzadas

DMU	1	2	3	...	K	...	N
1	E_{11}	E_{12}	E_{13}	...	E_{1k}	...	E_{1N}
2	E_{21}	E_{22}	E_{23}	...	E_{2k}	...	E_{2N}
...
k	E_{k1}	E_{k2}	E_{k3}	...	E_{kk}	...	E_{kN}
...
N	E_{N1}	E_{N2}	E_{N3}	...	E_{Nk}	...	E_{NN}

No modelo DEA CRS podem existir múltiplas soluções ótimas para os esquemas de pesos associados com o mesmo nível de eficiência [5], logo as eficiências cruzadas calculadas com pesos obtidos pelo DEA CRS seriam geradas arbitrariamente [14]. Para contornar esse inconveniente, alguns critérios secundários adicionais têm sido propostos para a seleção do conjunto de pesos entre as múltiplas soluções ótimas [14-18], dentre os quais destacam-se as *formulações agressivas e benevolentes* propostas em [18]. Na formulação benevolente busca-se um esquema de pesos que mantenha a eficiência resultante da autoavaliação (*self-appraisal evaluation*) da DMU em análise e maximize a eficiência cruzada das demais DMU. Já na formulação agressiva busca-se um esquema de pesos que também mantenha a eficiência resultante da autoavaliação da DMU avaliada, mas que minimize a eficiência das outras DMU.

Para acentuar a discriminação entre as eficiências das DMU, recomenda-se adotar a formulação agressiva. A mesma formulação foi utilizada na avaliação da eficiência do setor de distribuição de energia elétrica de Taiwan [19] e na avaliação dos níveis eficientes dos custos operacionais das distribuidoras brasileiras [20].

Na formulação agressiva, o índice de eficiência cruzada da DMU s , segundo o ponto de vista da DMU k (E_{ks}), pode ser calculado com base nos pesos u e v determinados pela solução ótima do PPL (6.1) [5]. Note que no PPL (6.1) se considera o índice de eficiência da DMU k (E_{kk}) calculado pelo modelo DEA CRS. A restrição (6.2)

faz parte da linearização do modelo CRS, a restrição (6.3) é a linearização da equação (5) com s igual a k , as restrições em (6.4) garantem que todas as eficiências são menores ou iguais a 1 e as restrições em (6.5) garantem pesos não negativos. A versão benevolente da avaliação cruzada corresponde a maximização do PPL (6.1).

$$\underset{u,v}{\text{Min}} \quad \sum_i^{\text{outputs}} u_{ik} \sum_{s \neq k} y_{is} - \sum_j^{\text{inputs}} v_{jk} \sum_{s \neq k} x_{js} \quad (6.1)$$

s.a.

$$\sum_j^{\text{inputs}} v_{jk} x_{jk} = 1 \quad (6.2)$$

$$\sum_i^{\text{outputs}} u_{ik} y_{ik} - E_{kk} \sum_j^{\text{inputs}} v_{jk} x_{jk} = 0 \quad (6.3)$$

$$\sum_i^{\text{outputs}} u_{ik} y_{ik} - \sum_j^{\text{inputs}} v_{jk} x_{jk} \leq 0, \forall s \neq k \quad (6.4)$$

$$u_{ik}, v_{ik} \geq 0 \quad (6.5)$$

Na avaliação cruzada, a eficiência de uma DMU k corresponde à média de todos os valores na coluna k da matriz de eficiências cruzadas, mas sem levar em conta a autoeficiência E_{kk} , i.e., a eficiência é a média das eficiências cruzadas, conforme indicado em (7), o que contribui para incrementar a discriminação entre as DMU eficientes. Dessa forma, em geral, as eficiências resultantes da abordagem CEA são menores que as obtidas pelos modelos DEA sem restrições aos pesos.

$$e_k = \frac{1}{N-1} \sum_{i \neq k} E_{ik} \quad (7)$$

4.0 - MODELO DEA UTILIZADO NAS REVISÕES TARIFÁRIAS

A Nota Técnica ANEEL 182/2007-SRE [1] inovou ao estabelecer a primeira especificação de um modelo DEA para definição dos níveis eficientes dos custos operacionais das transmissoras.

Conforme descrito em [9], os determinantes dos custos operacionais de uma concessionária de transmissão relacionam-se com o serviço de transporte de energia elétrica, i.e., com a operação e a manutenção da disponibilidade das capacidades de transmissão dos ativos, representada pelas quantidades de quatro agregados físicos: capacidade de transformação (MVA), o comprimento das linhas de transmissão (km), a quantidade de transformadores e a quantidade de módulos de manobra. Estas variáveis caracterizam o porte da rede de transmissão, uma medida aproximada da capacidade disponível, o principal produto de uma transmissora. Para um determinado nível de produto, uma transmissora deve produzi-lo com o menor custo possível. Logo, visando a obtenção de uma medida de eficiência que indique o quanto cada concessionária deverá reduzir seus custos operacionais, a ANEEL propôs um modelo DEA com orientação ao insumo, no qual o custo operacional total (PMSO) é o único insumo (*input*) e as quantidades dos quatro agregados físicos supracitados são os produtos (*outputs*) [9,12].

No que tange ao rendimento de escala, a ANEEL adotou o modelo com rendimentos não decrescentes de escala ou DEA NDRS. Conforme descrito na seção 2.3, trata-se de uma variante do modelo VRS.

O modelo DEA proposto na primeira revisão tarifária das concessionárias de transmissão tem sido aprimorado por meio de sucessivas audiências públicas. Não obstante, a sua versão mais recente descrita na Nota Técnica ANEEL 204/2018 preserva as principais características do modelo DEA pioneiro. Por exemplo, a versão atual manteve a orientação ao insumo, o rendimento não decrescente, o PMSO como único insumo e os produtos caracterizados pelos mesmos agregados físicos (extensão das linhas, capacidade de transmissão em MVA, número de módulos de manobras e número de transformadores). As principais diferenças entre o modelo DEA atual e o modelo DEA pioneiro reside em cinco pontos básicos, comentados a seguir:

- inclusão da potência interrompida (MVA interrompido) com a finalidade de introduzir a qualidade de serviço de transmissão entre as variáveis produtos no modelo DEA.
- a capacidade instalada passou a ser definida pela soma das capacidades em MVA e MVA_r.
- segregação das variáveis extensão das linhas nas faixas menor que 230 kV e maior ou igual a 230 kV.
- segregação das variáveis número de módulos de manobras e número de transformadores nas faixas menor que 230 kV e maior ou igual a 230 kV.
- inclusão de restrições aos pesos das variáveis insumos e produtos.
- cálculo das eficiências em dois estágios.

Como interrupções mais longas diminuem a disponibilidade dos serviços de transmissão, do ponto de vista da abordagem DEA, a potência interrompida é um produto indesejável, i.e., um produto que deve ser minimizado. Na literatura técnica encontram-se diversas abordagens para inclusão de produtos indesejáveis em um modelo DEA [21]. A abordagem utilizada pela ANEEL consiste em tratar a potência interrompida como um insumo não discricionário [25]; embora seja uma abordagem possível, talvez fosse preferível manter os custos operacionais como o único insumo.

Conforme indicado em [9], o primeiro modelo DEA especificado pela ANEEL não considerava o efeito dos níveis de tensão das linhas. Dada a relevância deste atributo na diferenciação entre as empresas e seus impactos sobre o PSMO, a versão mais recente do modelo DEA proposto pela ANEEL procurou capturar o efeito dos níveis de tensão. Para tanto, segregou as variáveis extensão de rede, número de módulos de manobras e número de transformadores em duas classes de tensão: menor que 230 kV e maior ou igual a 230 kV. Porém, como algumas concessionárias de transmissão não possuem ativos com tensão menor que 230 kV, esta segregação faz com que algumas variáveis *outputs* possuam valores nulos - uma característica incompatível com a premissa de positividade das variáveis insumos e produtos em um modelo DEA. Uma alternativa atraente para introduzir o efeito dos níveis de tensão das linhas de transmissão na avaliação da eficiência foi proposta em [9].

Outro aspecto a destacar diz respeito à possibilidade de atribuição de pesos nulos na solução ótima do PPL do DEA, e.g., em (2). Quando isto acontece, há a indicação de que os índices de eficiência resultantes são decorrentes de ponderações irrealistas e, em alguns casos, as eficiências podem ser superestimadas [5]. Como a abordagem DEA consiste na formulação de um problema de programação linear, a atribuição de pesos nulos pode ser evitada por meio da inclusão de restrições aos pesos. As restrições podem ser inseridas por meio de diferentes formas [5, 25]: por exemplo, restrições aos produtos virtuais foram sugeridas em [9], já a ANEEL introduziu restrições às razões entre os pesos de insumos e produtos. Entretanto, cabe observar que a inclusão de restrições aos pesos depende de informação a priori da importância relativa de cada variável, uma informação nem sempre disponível [5]. Na Nota Técnica 126/2018 ANEEL [3] são informadas as restrições aos pesos adicionadas ao modelo DEA, mas não foi possível verificar as premissas que originaram as restrições impostas.

Por fim, a ANEEL passou a definir os índices de eficiência por meio de um processo em dois estágios: no primeiro, o modelo DEA NDRS com restrições aos pesos calcula um índice de eficiência para cada concessionária; na sequência, no segundo estágio ajusta-se um modelo de regressão em que a variável dependente é o índice de eficiência resultante do modelo DEA e as variáveis explicativas são variáveis ambientais, i.e., fatores não gerenciáveis pelas concessionárias.

5.0 - APLICAÇÃO DE MODELOS DEA NA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS TRANSMISSORAS

Para ilustrar a aplicação dos modelos DEA na avaliação dos níveis eficientes dos custos operacionais das transmissoras considerou-se o conjunto de dados anuais, ao longo do período 2013-2016, disponibilizados pela ANEEL (Audiência 041/2017) para 13 grupos econômicos que atuam na transmissão de energia elétrica. Os modelos DEA analisados incluem os modelos CRS, VRS, NDRS e CEA. Visando contribuir para o aprimoramento dos modelos DEA considerados pela ANEEL, propõe-se a seguinte lista de modificações no conjunto das variáveis produtos:

- substituição das variáveis extensão das linhas com tensão menor que 230 kV e das linhas com tensão maior ou igual a 230 kV por apenas uma variável definida pela soma ponderada das extensões das linhas por nível de tensão, na qual os pesos são determinados a partir dos custos modulares, conforme descrito em [9]. A nova variável é calculada com base na seguinte equação:

$$Extens\tilde{o}daslinhas = \sum_{i=69kV}^{750kV} \left(\frac{custoderefer\tilde{e}nciamedianonon\tilde{e}veldetens\tilde{a}oi}{custoderefer\tilde{e}nciamedianonon\tilde{e}vel69kV} \right) km_i \quad (8)$$

Na equação (8), as ponderações das extensões das linhas (km_i) são ponderadas pelos coeficientes apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Ponderações dos comprimentos de linha por nível de tensão [9]

69 kV	88 kV	138 kV	230 kV	345 kV	440 kV	500 kV	600 kV	750 kV
1,0000	1,0013	1,2906	1,7657	2,2472	3,0369	3,5946	3,9621	4,8070

- substituição da variável capacidade instalada (MVA + MVar) pela capacidade instalada esperada, cujo valor já considera a duração média das interrupções em horas no período 2013-2016.

$$Capacidade\ instalada\ esperada = (MVA + MVAr) \left(1 - \frac{duração\ média\ das\ interrupções\ em\ hora}{8760\ hora} \right) \quad (9)$$

- remoção da variável *MVA interrompido* do conjunto de variáveis produtos (*output*).

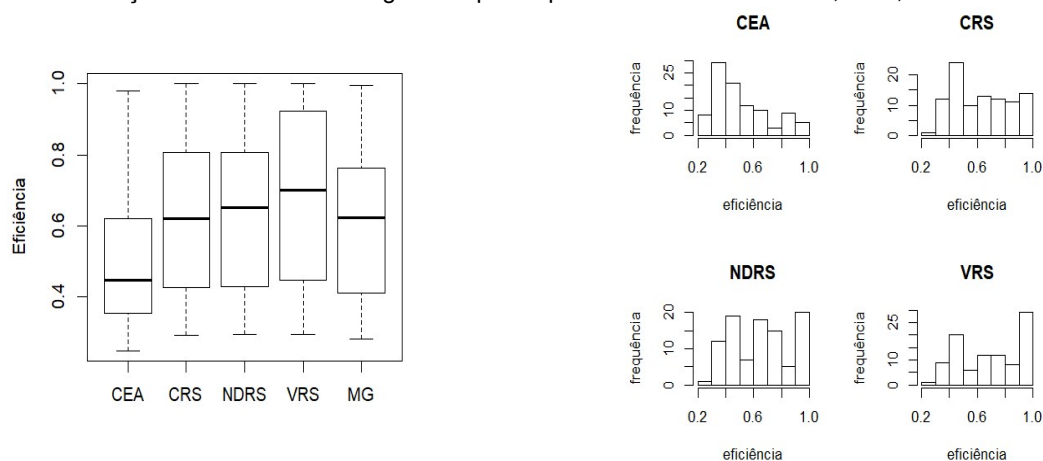
No modelo DEA usado pela ANEEL as linhas de transmissão são segregadas em duas faixas de tensão: <230 kV e ≥ 230 kV. Apesar da praticidade desta abordagem, observa-se a presença de valores nulos em algumas transmissoras que não operam linhas abaixo de 230 kV, não atendendo, portanto, a premissa de positividade das variáveis insumos e produtos assumida pelos modelos DEA. A substituição destas duas categorias pela extensão ponderada da linhas de transmissão evita este problema.

Adicionalmente, de forma distinta do tratamento dado pela ANEEL, a variável potência interrompida (*proxy* da qualidade) não será tratada como um insumo. Por se tratar de um produto indesejável [21] preferiu-se calcular um fator de indisponibilidade definido pela razão entre a média da interrupção (horas) no período 2013-2016 e o total de horas de um ano (8760 horas), e utilizá-lo como um fator de desconto da variável capacidade instalada (MVA + MVAr) no cálculo de uma nova variável produto denominada capacidade disponível esperada. Tal abordagem é semelhante ao índice de indisponibilidade programada.

Como consequência, os resultados com modelo DEA descritos neste trabalho foram obtidos considerando apenas um insumo - o PMSO, e quatro produtos - extensão ponderada das redes (km), capacidade instalada esperada, número de módulos de manobra e número de equipamentos de subestações. Dessa forma, não é possível uma comparação direta destes resultados com aqueles apresentados nas Notas Técnicas ANEEL em [2] e [3].

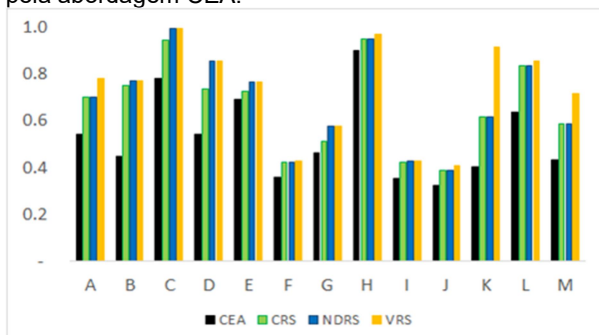
Da mesma forma que a ANEEL, considerou-se que cada transmissora, em um determinado ano, corresponde a uma DMU. Assim, por exemplo, o desempenho de uma concessionária em 2016 é comparado com o desempenho de suas congêneres ao longo dos quatro anos do painel de dados e também com o seu próprio desempenho nos demais anos do histórico analisado. Ao todo, foram analisadas 97 DMU. Essa abordagem possibilita a análise da evolução temporal de cada concessionária, considerando-se que não houve mudança tecnológica significativa ao longo do período analisado, uma hipótese plausível para a transmissão de energia elétrica [9].

A Figura 2 apresenta os *boxplots* e os histogramas dos índices de eficiência obtidos para cada concessionária, segundo os diferentes modelos DEA analisados e a média geométrica (MG) das eficiências calculadas pelos quatro modelos analisados. Vale destacar que na abordagem CEA considerou-se rendimento constante de escala [22]. Os resultados foram gerados com o auxílio de pacotes *Benchmarking* e *Multiplier* DEA disponíveis para o ambiente R [23]. Conforme ilustrado na Figura 2(a), o modelo VRS apresentou os resultados mais otimistas para as eficiências, enquanto as menores estimativas, i.e., as mais pessimistas, foram geradas pela abordagem CEA. Adicionalmente, observa-se a similaridade entre os resultados dos modelos CRS e NDRS, um indicativo de que poucas DMU operam na região da fronteira de eficiência com rendimentos crescentes de escala, e que são avaliadas com maiores níveis de eficiência pelo modelo NDRS. Os histogramas na Figura 2(b) ressaltam as diferenças entre os resultados gerados pelos quatro modelos DEA - CEA, CRS, NDRS e VRS.

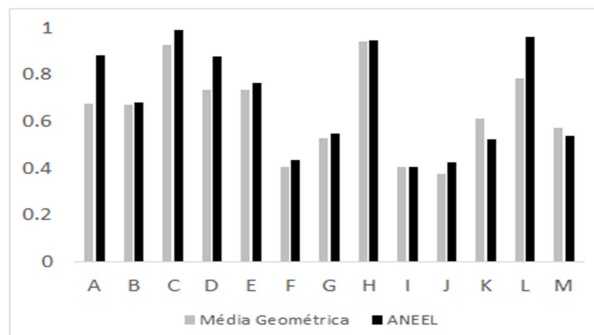


(a) *Boxplots* das eficiências (b) *Histogramas* das eficiências
 FIGURA 2 - *Boxplots* e *histogramas* das eficiências calculadas pelos diferentes modelos DEA

Na Figura 3 apresentam-se resultados individualizados para as *holdings* de transmissão avaliadas. Mais uma vez destacam-se as eficiências otimistas calculadas pelo modelo VRS e a avaliação extremamente rigorosa realizada pela abordagem CEA.



(a) Médias das eficiências em cada *holding* no período 2013-2016 segundo diferentes modelos DEA



(b) Médias geométricas das eficiências obtidas pelos modelos DEA em cada *holding* e resultados da ANEEL [2]

FIGURA 3 - Eficiência das *holdings* avaliadas segundo diferentes modelos DEA

Do ponto de vista pragmático, muitas vezes é difícil justificar qual o rendimento de escala mais apropriado. Nestas situações, uma boa medida consiste na combinação dos resultados obtidos pelos distintos modelos DEA por meio da definição do índice final de eficiência para cada concessionária de transmissão como sendo a média geométrica dos seus resultados. Esta proposta foi utilizada com sucesso ao se analisar o desempenho de ferrovias na Europa [24]. Assim, para cada *holding*, foi calculada a média geométrica das eficiências obtidas pelos diferentes modelos DEA apresentados na Figura 3(a). Os resultados desses índices finais de eficiência estão apresentados na Figura 3(b), onde se nota, como esperado, que as médias geométricas agregam os resultados de modelos individuais. A Figura 3(b) ainda apresenta as eficiências publicadas pelo modelo DEA de primeiro estágio da Nota Técnica ANEEL 164/2017 [2]. Apesar da semelhança entre os resultados provenientes das duas abordagens, ressalta-se, novamente, que não é possível compará-los diretamente, devido principalmente ao conjunto distinto de premissas adotadas em cada modelo.

6.0 - CONCLUSÃO

Visando aperfeiçoar o modelo adotado pela ANEEL na regulação dos custos operacionais das concessionárias de transmissão, baseado em Análise Envoltória de Dados - DEA, o presente trabalho buscou analisar quatro especificações alternativas. Inicialmente foram analisados os resultados para diferentes regimes de rendimento de escala da fronteira de eficiência, i.e, os modelos CRS (constante), VRS (variável) e NDRS (não decrescente). Adicionalmente, para contornar o problema de atribuição de pesos irrealistas aos produtos, sem a necessidade de incluir restrições aos pesos - que envolve algum grau de discricionariedade, foi utilizada a técnica de avaliação cruzada. A abordagem da avaliação cruzada resultou em um excesso de rigor na estimação das eficiências quando comparadas com as eficiências calculadas pelos modelos CRS, VRS e NDRS. Visando a formulação de uma metodologia mais robusta o presente trabalho propõe um índice de eficiência dos custos operacionais das transmissoras definido pela média geométrica dos escores de eficiência dos quatro modelos analisados. Adicionalmente, foram propostas novas definições das variáveis *outputs* capacidade instalada e extensão das linhas no contexto do modelo DEA, incorporando, respectivamente, os efeitos da qualidade e dos níveis de tensão das linhas. Apesar da impossibilidade de uma comparação direta com os resultados publicados pela ANEEL (1º estágio), os resultados obtidos mostram que as propostas alternativas são promissoras e merecem maior aprofundamento.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL (2007) Nota Técnica, nº 182/2007-SRE.
- (2) ANEEL (2017) Nota Técnica, nº 164/2017-SRM.
- (3) ANEEL (2018) Nota Técnica, nº 126/2018-SRM.
- (4) KUMBHAKAR, S.C., LOVELL, C.A.K. (2000). Stochastic Frontier Analysis. Cambridge University Press.
- (5) ESTELLITA LINS, M.P., MEZA, L.A. (2000) Análise Envoltória de Dados e Perspectivas de Integração no Ambiente de Apoio à Decisão, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

- (6) BOGETOFT, P., NIELSEN, K. (2003). DEA based yardstick competition in natural resource management. In: Recent Accomplishments in Applied Forest Economics Research, edited by F. Helle, N. Strange and L. Wichmann], Kluwer Academic Publisher.
- (7) CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E. (1978) Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*, v. 2, p. 429-444.
- (8) BANKER, R.D., CHARNES, A., COOPER, W.W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies. *Management Science*, 39.
- (9) PESSANHA, J.F.M., FIGUEIRA de MELLO, M.A.R., BARROS, M., 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*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 521-545.
- (10) SEXTON, T.R., SILKMAN, H.R., HOGAN, A.J. (1986). Data Envelopment Analysis: Critique and extensions. In *Measuring Efficiency: an assessment of Data Envelopment Analysis*. San Francisco: Jossey-Bass.
- (11) COOK, D.W.; ZHU, J. *Modelling Performance Measurement: applications and implementations issues in DEA*, New York: Springer, 2005.
- (12) LOPES, A.L.M., VILELA, B.A., COSTA, M.A., CARDOSO, M.L. (2018) O problema da homogeneidade na regulação das transmissoras de energia elétrica brasileiras, *Revista de Negócios*, v. 23, n. 2, p. 38-56.
- (13) COELLI, T.J., RAO, D.S.P., O'DONNELL, C.J., BATTESE, G. E. (2005). *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis* (2nd ed). Springer.
- (14) LIANG, L.; WU, J.; COOK, W. D.; ZHU, J. Alternative secondary goals in DEA cross-efficiency evaluation. *International Journal of Production Economics*, v. 113, n. 2, p. 1025-1030, jun. 2008.
- (15) RAMÓN, N., RUIZ, J.L., SIRVENT, I. (2010). On the choice of weights profiles in cross-efficiency evaluations. *European Journal of Operational Research*, 207, 1564- 1572.
- (16) WANG, Y.M.; CHIN, K.S. Some alternative models for DEA cross-efficiency evaluation. *International Journal of Production Economics*, v. 125, n. 1, p. 332-338, nov. 2010.
- (17) RUIZ, J.L., SIRVENT, I. (2012) On the DEA total weight flexibility and the aggregation in cross-efficiency evaluations. *European Journal of Operational Research*, v. 223, n. 3, p. 732-738.
- (18) DOYLE, J. R.; GREEN, R. H. (1994) Efficiency and Cross-efficiency in DEA: Derivations, Meanings and Uses. *Journal of the Operational Research Society*, v. 45, n. 5, p. 567-578.
- (19) CHEN, T.Y. (2002). An Assessment of technical efficiency and cross-efficiency in Taiwan's electricity distribution sector. *European Journal of Operational Research*, 137, 421-433.
- (20) REZENDE, S.M., PESSANHA, J.F.M., AMARAL, R.M. (2014). Cross evaluation of electric distribution utilities. *Produção*, 24, pp. 820-832.
- (21) SEIFORD, L.M., ZHU, J. (2000). Modelling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142, 16-20.
- (22) SOARES de MELLO, J.C.C.B., ANGULO-MEZA, L., SILVEIRA, J.Q., GOMES, E.G. (2013) About negative efficiencies in cross evaluation BCC input oriented models. *European Journal of Operational Research*, v. 229, n. 3, p. 732-737.
- (23) R DEVELOPMENT CORE TEAM R A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena: Austria, 2014. Disponível em <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 27 mai. 2019.
- (24) COELLI, T., PERLEMAN, S. (1999) A Comparison of Parametric and Non-parametric Distance Functions : With Applications to European Railways , *European Journal of Operational Research* 177, pp. 326-339.
- (25) COOPER, W.W., SEIFORD, L.M., TONE, K. (2000). *Data Envelopment Analysis, A Comprehensive Text with Models Applications, Reference and DEA-Solver Software*. Kluwer Academic Publishers.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Francisco Moreira Pessanha é Estatístico pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas (1992) e Engenheiro Eletricista pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Uerj (1994), mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (1999) e doutorado em Engenharia Elétrica pela PUC-Rio (2006). Pesquisador do CEPEL desde 2002, tem atuado em estudos e no desenvolvimento de ferramentas computacionais para o setor elétrico brasileiro, em especial, na análise de confiabilidade de sistemas de potência, tarifação de sistemas de distribuição, previsão de mercado de longo prazo, previsão probabilística da geração eólica e previsão de carga para operação em tempo real e programação da operação. Também é Professor Adjunto da Uerj desde 1999, onde tem ministrado disciplinas nos cursos de graduação em Estatística e no Programa de Pós Graduação em Ciências Contábeis. Em 2016 realizou estágio pós-doutoral no INESC TEC Porto em Portugal.



Albert Cordeiro Geber de Melo é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1983), possuindo o título de mestre (1986) e doutor (1990) em Ciências em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Pesquisador sênior do CEPEL, onde atua desde 1985 na coordenação e no desenvolvimento de projetos e sistemas computacionais nas áreas de confiabilidade; planejamento da expansão e da operação, incluindo novas renováveis; otimização estocástica; alocação eficiente de custos; tarifação de sistemas de transmissão e distribuição; análise de agrupamentos; análise de riscos; análise de investimentos; comercialização de energia elétrica; desenvolvimento sustentável; mudanças climáticas; política tecnológica; e política energética. Exerceu vários cargos gerenciais no CEPEL, incluindo Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento (Jan 2005 – Jul 2008) e Diretor-Geral (Ago 2008 – Jan 2017). Também é Professor Adjunto da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, membro do CIGRÉ e IEEE, e membro titular da Academia Nacional de Engenharia.

