



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

Quão eficientes são as distribuidoras de energia elétrica brasileiras?

**SANDRA DE SOUSA XAVIER ⁽¹⁾; JOSÉ WANDERLEY MARANGON LIMA ⁽²⁾; LUANA MEDEIROS MARANGON LIMA ⁽³⁾; ANA LÚCIA MIRANDA LOPES ⁽⁴⁾;
IFPR (1); UNIFEI (2); Duke University (3); UFMG (4)**

RESUMO

Nos últimos anos, o setor elétrico sofreu grandes mudanças, principalmente na regulação econômica. Após receber diversas críticas, a regulação pela taxa de retorno foi substituída pela regulação por incentivos. O principal objetivo desta é incentivar a eficiência. O presente trabalho propõe uma aplicação alternativa da Análise Envoltória de Dados para o caso brasileiro, caracterizado por um extenso território: o uso de Redes Unificadas no segmento de distribuição para regionalizar área de concessão e, em seguida, analisar a eficiência separadamente. Muitos reguladores adotam a empresa como uma Unidade Tomadora de Decisão na regulação de preços, quando técnicas de *benchmarking* são aplicadas. No entanto, no Brasil, a qualidade é medida em detalhes através dos conjuntos de unidades consumidoras. Dado que a eficiência não pode ser avaliada sem considerar vários aspectos da qualidade e as características da área de concessão, o artigo busca encontrar o *trade-off* entre gestão, qualidade e ambiente. Portanto, a principal contribuição do artigo é apresentar uma alternativa para a redução do impacto da heterogeneidade na eficiência das distribuidoras brasileiras. Alguns exemplos são apresentados para mostrar as vantagens da aplicação proposta.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuidoras de energia, Regulação por Incentivos, *Data Envelopment Analysis*

1.0 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, foram propostas diversas reformas para o setor elétrico em todo o mundo, a fim de tornar as concessionárias mais eficientes por meio de mecanismos de concorrência, privatização e preços. Em geral, durante o processo de reestruturação, o setor é dividido em quatro atividades distintas: geração, transmissão, distribuição e comercialização. Na geração e na comercialização, a concorrência tornou-se possível graças ao desenvolvimento de novas tecnologias e ao aumento do número de agentes; enquanto a transmissão e a distribuição permanecem reguladas devido às suas características de monopólio natural. Este artigo tem como foco a regulação econômica das distribuidoras de energia elétrica.

Um dos principais problemas da regulação pela taxa de retorno é que as empresas são induzidas a investir massivamente com o intuito de obter maior remuneração de capital. Conseqüentemente, as tarifas pagas pelos consumidores aumentam. A regulação por incentivos busca, ao mesmo tempo, estimular as empresas a se tornarem mais eficientes (1) e evitar o efeito Averch-Johnson (2).

A regulação por incentivos utiliza técnicas de *benchmarking* para definir as empresas eficientes. Em termos gerais, essa técnica pode ser caracterizada como um método que compara um grupo de empresas, simulando o ambiente competitivo (3).

Resultados de uma pesquisa realizada entre 40 reguladores mostraram uma clara tendência de adoção da Análise Envoltória de Dados (do inglês, *Data Envelopment Analysis*) tanto na transmissão, quanto na distribuição de energia elétrica (4). Contudo, vale ressaltar que, apesar da popularidade da metodologia, sua aplicação é predominante nos países europeus, caracterizados por pequenos territórios e ambiente mais homogêneo. No Brasil, as condições são diferentes: *“existe uma grande variedade de tamanhos, escopos e características*

ambientais das distribuidoras brasileiras. Parece óbvio que a diversidade é maior no Brasil do que na maioria dos outros países onde a regulação baseada em benchmarking tem sido tradicionalmente utilizada (5)”.

Cook *et al.* (6) enfatizam que a metodologia DEA avalia a eficiência relativa de um conjunto homogêneo de Unidades Tomadoras de Decisão (do inglês, *Decision Making Unit* – DMU), ou seja, as empresas avaliadas são comparáveis. Em algumas situações, como em empresas que possuem uma extensa área de concessão, com diferentes características sociais, econômicas e/ou ambientais, a suposição de homogeneidade não se sustenta. A ausência de homogeneidade pode levar a uma comparação injusta.

Este artigo propõe uma nova aplicação da metodologia DEA para reduzir o impacto da heterogeneidade e permitir a inclusão de aspectos ambientais e de qualidade; a aplicação combina a metodologia DEA com o conceito de Redes Unificadas (RUs). As RUs são usadas para dividir a área de concessão em subgrupos mais homogêneos, que serão posteriormente, considerados DMUs.

2.0 REGULAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO

Regulação de preços

Desde 2003, as empresas de distribuição são reguladas através do regime *price cap* baseado na fórmula RPI-X, redefinida aproximadamente a cada 4 anos. O modelo especifica uma taxa média pela qual os preços das distribuidoras devem diminuir, após o ajuste pela inflação; esta taxa é chamada de Fator X. Até 2014, as revisões tarifárias eram definidas por ciclos, nos quais havia uniformidade de regras. O primeiro ciclo aconteceu entre 2003 e 2006, o segundo entre 2007 e 2010 e o terceiro entre 2011 e 2014. O novo ciclo de revisões tarifárias iniciou-se em 2015.

Durante a terceira revisão, a ANEEL muda de uma abordagem *bottom-up* para uma *top-down*, adotando a metodologia DEA e os Mínimos Quadrados Ordinários Corrigidos. O modelo DEA de dois estágios foi utilizado para considerar os aspectos ambientais da área de concessão. A partir da comparação com dados reais, o regulador define diferentes Fatores-X para repassar os custos operacionais para os consumidores através das tarifas, considerando a eficiência média do setor. O Fator X é aplicado no valor da Parcela B das distribuidoras. Assim, para empresas mais eficientes é possível obter ganhos acima dos custos reais, enquanto para empresas menos eficientes existem déficits que não podem ser repassados aos consumidores (7) (8).

Regulação da Qualidade do Serviço

No Brasil, a qualidade do serviço é analisada com base nas divisões da área de concessão, denominadas conjuntos de unidades consumidoras. Milhares de conjuntos são criados; comparações de desempenho são realizadas no nível dos conjuntos (9). Um conjunto de unidades consumidoras é composto pelas unidades alimentadas pelas mesmas.

A idéia central é que os conjuntos são mais comparáveis que as distribuidoras, porque as áreas de concessão no Brasil geralmente cobrem uma ampla gama de características sociais, econômicas e ambientais. A qualidade do serviço é avaliada usando os indicadores coletivos: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) (10).

Regulação combinada entre preço e qualidade

Considerando a regulação de preços, a ANEEL baseia sua análise na empresa como um todo; ou seja, as DMUs são as empresas de distribuição. No entanto, na regulação da qualidade, a análise é feita no nível dos conjuntos de unidades consumidoras. Considere o caso CEMIG. Sua rede de distribuição tem mais de 460.000 quilômetros de comprimento (11). A empresa opera no estado de Minas Gerais que possui uma área de aproximadamente 586.528 km², maior que países como França, Espanha e Reino Unido (12).

O conceito da RU introduzido neste artigo tenta minimizar a distância entre a regulação de preços e a regulação da qualidade. Os limites das RUs têm fortes conexões com as regionais, que geralmente estão presentes nas empresas de distribuição. Portanto, o regulador pode considerar a mesma unidade de análise, tanto para a regulação da qualidade quanto para a regulação de preços.

3.0 METODOLOGIA

Análise Envoltória de Dados

DEA é uma metodologia não paramétrica que usa dados reais para medir a eficiência relativa de uma DMU. Foi proposto por Charnes, Cooper e Rhodes em 1978 (13) para abordar a eficiência das empresas que operam em retornos constantes de escala e estendido ainda mais por Banker, Charnes e Cooper em 1984 (14) para retornos

variáveis de escala. Essa análise de eficiência pode ter enfoque na redução dos insumos ou maximização dos produtos. O resultado de um modelo orientado aos insumos é a redução máxima possível no nível de insumos para um determinado nível de produto. Já a orientação aos produtos, o modelo busca as quantidades máximas de produção que podem ser geradas pelo mesmo nível de insumos.

A eficiência pode variar de 0 a 1, sendo 1 a empresa eficiente. A maioria dos modelos DEA considera retorno constante (13) ou variável de escala (14). Para o retorno constante, insumos e produtos aumentam (ou diminuem) na mesma proporção ao longo da fronteira. Quando a tecnologia apresenta retorno crescente, constante ou decrescente ao longo da fronteira, o retorno variável de escala é mais apropriado (15). O modelo com retorno constante avalia a eficiência técnica e de escala, enquanto o variável mede apenas a eficiência técnica.

Se a empresa i tiver o valor de θ igual a 1, significa que a empresa usa o mínimo de insumos e é considerada eficiente. Caso contrário, se o valor de θ for menor que 1 significa que a empresa está usando mais insumos do que o necessário e é considerada ineficiente.

Banker, Charnes e Cooper (14) afirmam que uma das vantagens mais importantes dessa metodologia é que a eficiência é obtida diretamente, sem a necessidade de especificar previamente a função de produção. A metodologia lida diretamente com vários insumos e produtos, e o modelo de programação linear facilita a implementação e o processo de convergência para resolver o problema.

Os modelos tradicionais da DEA consideram que os insumos podem ser reduzidos e os produtos podem ser maximizados pela DMU em pouco tempo. No entanto, existem variáveis que estão além do controle da DMU, conhecidas como variáveis ambientais. Há muitas maneiras de incluir estas variáveis na metodologia DEA (16, 17), tais como o modelo de dois estágios utilizado neste trabalho.

Análise Envolvória de Dados em dois estágios

A análise em dois estágios é uma das técnicas mais populares na literatura para considerar as variáveis ambientais. Empregamos essa técnica da seguinte forma: na primeira etapa, determinamos a eficiência técnica das RUs ou distribuidoras, através da metodologia DEA. No segundo estágio, tratando esses escores de eficiência como variáveis dependentes, uma técnica de regressão foi utilizada para determinar se variáveis ambientais podem explicar a eficiência. Essa abordagem é defendida por (18). Os escores de eficiência calculados a partir do DEA assumem valores entre 0 e 1, limitando a variável dependente no segundo estágio. O modelo Tobit (19) é frequentemente usado para tratar uma variável dependente limitada e é seguido neste estudo.

O escore de eficiência calculado no primeiro estágio (θ_i) é corrigido pelas variáveis ambientais (z_i) neste segundo estágio. Portanto, uma variável latente (não observada) (θ_i^*) é calculada como na Equação 1. Temos z_i , um vetor $(r \times 1)$ de variáveis ambientais e β é um vetor $(r \times 1)$ de parâmetros a serem estimados.

$$\theta_i = \begin{cases} \theta_i^* & 0 \leq \theta_i^* \leq 1 \\ 0 & \theta_i^* < 0 \\ 1 & \theta_i^* > 1 \end{cases}$$

$$\theta_i^* = z_i \beta + \varepsilon_i$$

(1)

3.2 REDES UNIFICADAS

As análises tradicionais de eficiência geralmente consideram as empresas de distribuição como DMU. Dado que algumas têm grandes áreas de concessão com diferentes características e índices de qualidade, este artigo sugere o uso RUs como DMU. As RUs agregam os conjuntos de unidades consumidoras formando regiões na área de concessão (20). O procedimento para definir uma RU é realizado em duas etapas. Inicialmente se define a área de influência de cada ponto de conexão entre os sistemas de distribuição e transmissão. A segunda etapa agrega áreas de influência com base no conceito de elo forte e elo fraco.

Considere o sistema representado na Figura 1. A área vermelha representa a rede transmissão e a área verde representa a rede distribuição. Nos sistemas elétricos de potência, em geral, o fluxo de potência flui do sistema de transmissão para o sistema de distribuição. Nestes casos é possível simular um gerador fictício conectado na fronteira com a Rede Básica com despacho igual ao fluxo de potência observado no ponto de conexão e determinar a área do sistema onde este gerador impacta, segundo o critério da área de influência (21).

A área de influência de um ponto de conexão é formada por um conjunto de barras que são alcançadas pelo fluxo de potência que cruza o transformador de fronteira. O fluxo de potência alcança uma determinada barra quando é possível encontrar um caminho na rede que parte do ponto de conexão para a barra, onde o a direção do fluxo de potência permanece o mesmo. Um exemplo de uma área de influência com quatro pontos de conexão é

apresentado na Figura 2. Algumas redes de distribuição de média tensão possuem uma topologia em malha, portanto, é possível haver sobreposição entre áreas de influência, onde os pontos de conexão com a rede de transmissão estão próximos, como mostra a Figura 2. Quando este for o caso, a segunda etapa determina se essas duas ou mais áreas devem ser acopladas, usando o conceito de impedância equivalente de Thevenin.

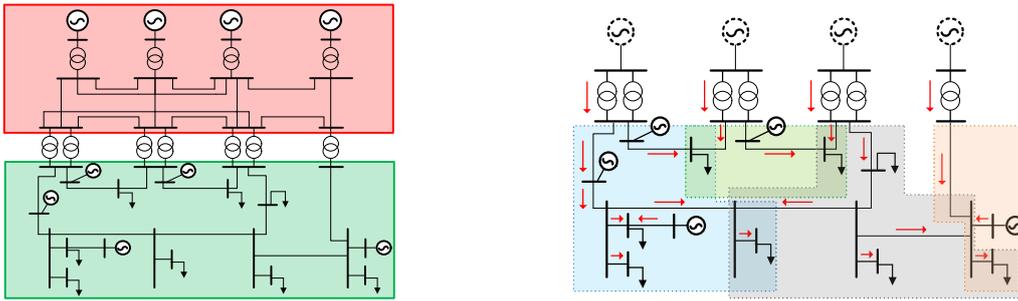


Figura 1. Conexão de redes de transmissão e distribuição

Figura 2. Área de domínio do ponto de conexão

A impedância equivalente representa a proximidade elétrica de duas barras. Se a impedância equivalente é baixa, há um elo forte entre os dois pontos de conexão. Portanto, eles devem ser acoplados para formar uma RU única. Caso contrário, se a impedância equivalente for alta, eles deverão permanecer separados. O conceito de impedância baixa ou alta depende das características do sistema (21).

4.0 DADOS E ESPECIFICAÇÃO DOS MODELOS

Escolha de variáveis

A escolha das variáveis de insumo e produto é uma etapa importante na metodologia DEA. No contexto da DEA, frequentemente surgem problemas relacionados à discriminação entre DMUs eficientes e ineficientes, principalmente se houver um grande número de variáveis (22). Não há consenso sobre quais variáveis melhor descrevem os processos distribuição de energia (15).

Jamasb e Pollitt (23) apresentam as variáveis mais usadas em 20 estudos de análise de eficiência de distribuidoras de energia. O número de funcionários, a capacidade do transformador e o comprimento da rede estão entre os insumos mais usados nos modelos. Quanto aos produtos mais utilizados, energia entregue e número de consumidores se destacam. A empresa de distribuição requer mão de obra e capital. O insumo de mão-de-obra foi considerado através do número de funcionários (*proxy*). O insumo de capital foi representado por outras duas variáveis: comprimento da rede e capacidade do transformador. Em relação aos produtos, consideramos número de consumidores e de energia entregue. Usamos variáveis físicas de insumos e produtos aplicados em estudos de *benchmarking* (23, 24, 25), juntamente com a qualidade do serviço e variáveis ambientais.

Muitos autores (15, 26, 27, 28) incorporaram a qualidade do serviço na análise usando o indicador de Tempo Total das Interrupções (TINT), que é calculado multiplicando os valores DEC pelo número de consumidores. As variáveis ambientais mais relevantes para a análise de eficiência são a densidade dos consumidores (para identificar áreas rurais e urbanas), a incidência de raios (para identificar a influência do clima) e a propriedade (representada por uma variável binária que é 0 para a empresa pública e 1 para empresa privada).

4.2 Exemplo brasileiro

Este artigo compara o desempenho de 10 concessionárias de distribuição no Brasil no período de 2006 a 2007. Os dados podem ser encontrados no *site* da ANEEL, onde foi considerada a última amostra consistente disponível. Cada conjunto de unidades consumidoras tem os seguintes atributos apresentados na Tabela 1. Com relação ao número de funcionários, os limites geográficos das RUs são muito semelhantes às regionais das distribuidoras, permitindo alocar os funcionários para cada RU com certa facilidade.

Tabela 1. Redes Unificadas – Resumo Estatístico

| <i>Descrição</i> | <i>Unidade</i> | <i>Mínimo</i> | <i>Máximo</i> | <i>Média</i> | <i>D. Padrão</i> |
|---------------------------------------|----------------|---------------|---------------|--------------|------------------|
| Extensão da rede (x_1) | km | 284 | 53.456 | 9.576 | 13.740 |
| Capacidade do transformador (x_2) | kVA | 14.866 | 12.577.411 | 1.160.368 | 2.057.648 |
| Número de funcionários (x_3) | Pessoas | 9 | 9.131 | 867 | 1.545 |
| TINT (x_4) | Horas | 171.980 | 40.862.936 | 4.356.342 | 5.808.652 |
| Energia entregue (y_1) | MWh | 26.191 | 24.763.333 | 1.839.310 | 3.592.334 |

| | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-------|-----------|---------|---------|
| Número de consumidores (y_2) | Pessoas | 4.988 | 4.850.254 | 391.979 | 706.657 |
| Incidência de raios (z_1) | Raios/ano | 561 | 169.954 | 38.696 | 42.433 |
| Densidade dos consumidores (z_2) | Pessoas/km ² | 2 | 1.631 | 147 | 313 |

4.3 Especificações dos modelos

Há três modelos na Tabela 2, todos usam a metodologia DEA, orientação insumo e retorno variável da escala:

Tabela 2. Síntese dos modelos avaliados

| <i>Variáveis</i> | <i>Modelo 1</i> | <i>Modelo 2</i> | <i>Modelo 3</i> |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Extensão de rede | I | I | I |
| Capacidade transformador | I | I | I |
| Número de funcionários | I | I | I |
| TINT | | I | I |
| Energia entregue | O | O | O |
| Número de consumidores | O | O | O |
| Raios | | | EV |
| Densidade consumidores | | | EV |
| Propriedade | | | EV |

I: Insumo. O: Produto. EV: Variáveis ambientais

5.0 RESULTADOS PRÁTICOS

5.1 Análise das Redes Unificadas

Os escores de eficiência técnica foram calculados para as 70 RUs no período de 2006 a 2007. No Modelo 3, no qual as variáveis ambientais são incluídas, a análise Tobit descrita na Seção 3.1 foi aplicada; A Tabela 3 apresenta os resultados da estimativa. A taxa de incidência de raios foi estatisticamente significativa e produziu um coeficiente negativo no modelo. Um aumento de uma unidade na taxa de incidência de raios leva a uma redução de 0,04 no escore de eficiência. O efeito da taxa de incidência de raios na eficiência das empresas de distribuição também foi confirmado por (28).

A densidade de consumidores é estatisticamente significativa e produz um coeficiente positivo. Um aumento de uma unidade na densidade dos consumidores leva a um aumento de 0,07 no escore de eficiência. A variável de propriedade não foi estatisticamente significativa, portanto não foi considerada.

Tabela 3. Resultados da análise Tobit - Rede Unificadas

| <i>Variável</i> | <i>Parâmetro</i> | <i>Coefficiente</i> | <i>t-ratio</i> | <i>p-valor</i> |
|------------------------|------------------|---------------------|----------------|----------------|
| Constante | β_0 | 0.80 | 48.34 | <0.00001 *** |
| Raios | β_1 | -0.04 | -2.84 | 0.00455 *** |
| Densidade consumidores | β_2 | 0.07 | 3.19 | 0.00141 *** |
| Propriedade | β_3 | -0.03 | -0.84 | 0.39885 |
| Número de observações | | 140 | | |
| Observações censuradas | | 0 | | |
| Log-likelihood | | 61.33 | | |

A Tabela 4 apresenta os escores de eficiência, índice TINT e características ambientais. Ao avaliar as variáveis ambientais, dois tipos de heterogeneidade podem ser identificados: (i) a heterogeneidade externa está relacionada às diferentes características entre as distribuidoras; (ii) a heterogeneidade interna está relacionada às diferentes características dentro de única empresa.

Os resultados indicam que as RUs são, em média, tecnicamente eficientes em aproximadamente 0,75 no Modelo 1, 0,79 no Modelo 2 e 0,79 no Modelo 3; refletindo que há espaço para melhorias.

A RU 9 da CEMIG possui o pior escore de eficiência (0,38). Ela é comparada com uma combinação linear entre a Aes Sul (RU 12), a Eletropaulo (RU 3) e a Light (RU 4). Ela possui um forte caráter rural, enquanto seus dois últimos *peers* têm características urbanas. Assim, é esperado que esta RU aumente a sua eficiência no Modelo 3, que inclui a densidade dos consumidores. A partir dessa comparação, os resultados do modelo indicam que deve haver uma redução de 65% no número de funcionários.

No Modelo 2, onde a qualidade do serviço foi inserida, 17 RUs são eficientes, sendo 11 localizadas em áreas de baixa incidência de raios. A eficiência média mostra que algumas Redes Unificadas têm um escore de eficiência elevado no Modelo 2, e baixo no Modelo 1. A Elektro tem melhores resultados. A RU 1 possui uma eficiência de 0,45 no Modelo 1, e 0,84 no Modelo 2, um aumento de 0,44 no escore de eficiência. Os seus *peers* são Aes Sul (RU 9), Eletropaulo (RU 3) e Piratininga (RU 1); esta última pertence à distribuidora com o menor DEC do Brasil. Assim, a RU 1 mostrou um aumento de eficiência devido à qualidade, pois possui um DEC de 6,8 h, e seus pares no Modelo 2 têm 16,7, 7,1 e 5,0 h, respectivamente. Comparando a RU 1 com outras da Elektro, ela possui o segundo menor DEC da empresa, superada apenas pela RU 8, que atua na região mais industrializada da área de concessão. A RU 5 da Light teve uma eficiência de 0,72 no Modelo 1; já no Modelo 2 atingiu a fronteira de eficiência, com um aumento de 0,28. Ela possui o menor DEC da empresa, com 6,4 horas; as outras Redes Unificadas possuem valores entre 8,6 e 14,5 horas.

No Modelo 3, existem apenas 7 RUs eficientes, contrastando com os resultados do Modelo 2. Algumas Redes Unificadas tiveram sua eficiência reduzida devido à localização em um ambiente mais favorável. Algumas Redes Unificadas melhoraram seu desempenho porque estão localizadas em uma área menos favorável. Por exemplo, todas as quatro RUs da Eletropaulo tiveram seu desempenho reduzido, já que estão em uma área de alta densidade.

TABELA 4. EFICIÊNCIA DAS REDES UNIFICADAS

| Empresa | RU | Modelos | | | Qualidade | Ambiente | |
|---------------|----|---------|------|------|-----------|-------------------------|---------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | DEC | Densidade Consumidor | Incidência Raios |
| Aes Sul | 1 | 0.39 | 0.41 | 0.42 | 28.6 | Baixa | Medio |
| Aes Sul | 2 | 0.39 | 0.41 | 0.49 | 41.6 | Baixa | Alta |
| Aes Sul | 3 | 0.47 | 0.47 | 0.60 | 32.7 | Baixa | Alta |
| Aes Sul | 4 | 0.62 | 0.62 | 0.75 | 21.9 | Baixa | Alta |
| Aes Sul | 5 | 0.80 | 0.83 | 0.85 | 19.4 | Baixa | Medio |
| Aes Sul | 6 | 0.55 | 0.55 | 0.59 | 24.8 | Medio | Medio |
| Aes Sul | 7 | 0.59 | 0.62 | 0.62 | 19.8 | Medio | Baixa |
| Aes Sul | 8 | 0.63 | 0.66 | 0.67 | 20.0 | Medio | Medio |
| Aes Sul | 9 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 16.7 | Baixa | Baixa |
| Aes Sul | 10 | 0.71 | 0.75 | 0.73 | 10.9 | Alta | Medio |
| Aes Sul | 11 | 0.99 | 0.99 | 0.90 | 12.7 | Alta | Baixa |
| Aes Sul | 12 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 41.7 | Baixa | Baixa |
| Bandeirante | 1 | 0.72 | 0.76 | 0.72 | 10.8 | Alta | Baixa |
| Bandeirante | 2 | 0.84 | 0.91 | 0.90 | 8.6 | Alta | Medio |
| Bandeirante | 3 | 1.00 | 1.00 | 0.79 | 10.3 | Alta | Baixa |
| Bandeirante | 4 | 0.91 | 0.98 | 0.97 | 7.0 | Medio | Medio |
| Ceco | 1 | 0.73 | 0.73 | 0.74 | 23.6 | Medio | Medio |
| Ceco | 2 | 0.82 | 0.82 | 0.81 | 19.3 | Medio | Baixa |
| Ceco | 3 | 0.65 | 0.65 | 0.68 | 48.4 | Medio | Medio |
| Ceco | 4 | 0.59 | 0.59 | 0.63 | 28.1 | Baixa | Medio |
| Ceco | 5 | 0.69 | 0.69 | 0.77 | 41.5 | Medio | Alta |
| Ceco | 6 | 0.47 | 0.47 | 0.48 | 50.9 | Baixa | Medio |
| Ceco | 7 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 32.6 | Medio | Medio |
| Ceco | 8 | 0.89 | 0.89 | 0.88 | 35.8 | Medio | Baixa |
| Ceco | 9 | 1.00 | 1.00 | 0.85 | 12.2 | Alta | Baixa |
| Ceco | 10 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 38.6 | Medio | Baixa |
| Cemig | 1 | 0.94 | 0.94 | 0.98 | 15.4 | Baixa | Medio |
| Cemig | 2 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 10.9 | Medio | Alta |
| Cemig | 3 | 0.72 | 0.73 | 0.77 | 16.1 | Medio | Medio |
| Cemig | 4 | 0.72 | 0.73 | 0.82 | 14.9 | Medio | Alta |
| Cemig | 5 | 0.86 | 0.86 | 0.87 | 14.9 | Medio | Medio |
| Cemig | 6 | 0.84 | 0.86 | 0.95 | 9.4 | Medio | Alta |
| Cemig | 7 | 0.57 | 0.68 | 0.81 | 8.8 | Baixa | Alta |
| Cemig | 8 | 0.46 | 0.52 | 0.59 | 13.1 | Baixa | Alta |
| Cemig | 9 | 0.38 | 0.38 | 0.45 | 33.2 | Baixa | Alta |
| Cemig | 10 | 0.76 | 0.76 | 0.84 | 23.9 | Baixa | Alta |
| Cemig | 11 | 0.73 | 0.73 | 0.76 | 13.7 | Medio | Medio |
| Elektro | 1 | 0.45 | 0.84 | 0.86 | 6.8 | Medio | Medio |
| Elektro | 2 | 0.59 | 0.64 | 0.63 | 11.7 | Alta | Medio |
| Elektro | 3 | 0.52 | 0.59 | 0.58 | 13.3 | Medio | Medio |
| Elektro | 4 | 0.46 | 0.70 | 0.74 | 8.7 | Medio | Medio |
| Elektro | 5 | 0.42 | 0.51 | 0.53 | 16.4 | Medio | Medio |
| Elektro | 6 | 0.45 | 0.80 | 0.82 | 8.8 | Baixa | Medio |
| Elektro | 7 | 0.66 | 0.68 | 0.76 | 16.2 | Medio | Alta |
| Elektro | 8 | 0.68 | 1.00 | 1.02 | 4.5 | Medio | Medio |
| Eletropaulo | 1 | 1.00 | 1.00 | 0.83 | 13.3 | Alta | Baixa |
| Eletropaulo | 2 | 1.00 | 1.00 | 0.66 | 8.0 | Alta | Medio |
| Eletropaulo | 3 | 1.00 | 1.00 | 0.82 | 7.1 | Alta | Baixa |
| Eletropaulo | 4 | 1.00 | 1.00 | 0.89 | 11.6 | Alta | Baixa |
| Light | 1 | 0.82 | 0.82 | 0.76 | 14.5 | Alta | Baixa |
| Light | 2 | 0.81 | 0.89 | 0.90 | 8.6 | Medio | Medio |
| Light | 3 | 1.00 | 1.00 | 0.69 | 9.0 | Alta | Baixa |
| Light | 4 | 1.00 | 1.00 | 0.96 | 14.5 | Alta | Baixa |
| Light | 5 | 0.72 | 1.00 | 0.88 | 6.4 | Alta | Baixa |
| Paulista | 1 | 0.90 | 0.90 | 0.95 | 6.2 | Medio | Alta |
| Paulista | 2 | 0.85 | 0.91 | 0.92 | 6.3 | Medio | Medio |
| Paulista | 3 | 1.00 | 1.00 | 1.14 | 6.9 | Medio | Alta |
| Piratininga | 1 | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 5.0 | Alta | Baixa |
| Piratininga | 2 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 9.6 | Alta | Medio |
| Rge | 1 | 0.70 | 0.70 | 0.79 | 19.9 | Baixa | Alta |
| Rge | 2 | 0.55 | 0.56 | 0.61 | 20.4 | Baixa | Alta |
| Rge | 3 | 0.58 | 0.74 | 0.73 | 8.7 | Medio | Medio |
| Rge | 4 | 0.54 | 0.65 | 0.64 | 13.0 | Medio | Medio |
| Rge | 5 | 0.79 | 0.79 | 0.82 | 22.4 | Medio | Medio |
| Rge | 6 | 0.89 | 0.89 | 0.91 | 21.8 | Medio | Medio |
| Rge | 7 | 0.93 | 0.93 | 0.95 | 21.6 | Medio | Medio |
| Rge | 8 | 1.00 | 1.00 | 1.02 | 29.6 | Baixa | Medio |
| Rge | 9 | 1.00 | 1.00 | 1.06 | 26.0 | Baixa | Alta |
| Rge | 10 | 0.69 | 0.69 | 0.68 | 16.9 | Medio | Baixa |
| Rge | 11 | 0.66 | 0.66 | 0.68 | 20.9 | Medio | Medio |
| Média | | 0.75 | 0.79 | 0.79 | | | |
| Desvio Padrão | | 0.19 | 0.18 | 0.15 | | | |

Além disso, a CEMIG melhorou seu desempenho, mas se mantém distante da fronteira de eficiência. A RU 4 da CEMIG possui uma eficiência de 0,72 no Modelo 1 e 0,73 no Modelo 2, onde o ambiente não é considerado. No Modelo 3, a mesma Rede de Unificada possui uma eficiência de 0,82, um aumento no escore de eficiência de 0,12 e 0,11, respectivamente. Essa mudança pode ser explicada pela sua área com menor densidade de consumidores e com alta incidência de raios. Este resultado indica que os Modelos 1 e 2 podem penalizar as Redes Unificadas localizadas em uma área com condições adversas.

Outro resultado interessante da Tabela 4 são as diferenças no desempenho das Redes Unificadas que pertencem à mesma empresa. O gerente pode priorizar o acompanhamento das Redes Unificadas menos eficientes e preparar um plano para melhoria de desempenho (*benchmarking* interno). Por exemplo, a RU 2 da Aes Sul obteve uma eficiência de 0,41 no Modelo 2. Seu ambiente pode explicar parte dessa ineficiência: a região possui a terceira maior incidência de raios da empresa e uma densidade de 3 consumidores por km². Essas características ambientais se refletem na qualidade do serviço: seus consumidores sofrem em média 42 horas por ano sem energia elétrica.

5.2 Análise das distribuidoras

Os resultados dos três modelos são comparados sob as duas abordagens: (i) RU como DMU e (ii) empresa como DMU. Para a primeira abordagem, os resultados da Seção 5.1 foram ponderados pelo número de consumidores de cada RU que pertencem a empresa.

Tabela 5. Comparação entre as diferentes abordagens

| <i>Rede Unificada</i> | | | | <i>Distribuidora</i> | | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <i>Empresa</i> | <i>Modelo 1</i> | <i>Modelo 2</i> | <i>Modelo 3</i> | <i>Empresa</i> | <i>Modelo 1</i> | <i>Modelo 2</i> | <i>Modelo 3</i> |
| Aes Sul | 0.68 | 0.70 | 0.72 | Aes Sul | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| Bandeirante | 0.91 | 0.95 | 0.85 | Bandeirante | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| CEEE | 0.83 | 0.83 | 0.79 | CEEE | 0.84 | 0.84 | 0.84 |
| CEMIG | 0.76 | 0.79 | 0.87 | CEMIG | 0.98 | 0.98 | 0.98 |
| Elektro | 0.60 | 0.79 | 0.81 | Elektro | 0.66 | 0.78 | 0.78 |
| Eletropaulo | 1.00 | 1.00 | 0.69 | Eletropaulo | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Light | 0.88 | 0.98 | 0.79 | Light | 0.92 | 0.95 | 0.95 |
| Paulista | 0.97 | 0.97 | 1.09 | Paulista | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Piratininga | 0.93 | 0.93 | 0.86 | Piratininga | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| RGE | 0.69 | 0.73 | 0.76 | RGE | 0.92 | 0.92 | 0.92 |
| <i>Média</i> | 0.83 | 0.87 | 0.82 | <i>Média</i> | 0.93 | 0.94 | 0.94 |
| <i>D. Padrão</i> | 0.14 | 0.11 | 0.11 | <i>D. Padrão</i> | 0.11 | 0.08 | 0.08 |

Com base na tabela à esquerda, a CEMIG melhora sua posição e eficiência no Modelo 3. Nos Modelos 1 e 2, a CEMIG ocupa a sétima posição, enquanto no Modelo 3 a mesma empresa ocupa a segunda posição. A CEMIG aumentou sua eficiência em 0,11 em comparação com o Modelo 1 e 0,08 quando comparado com o Modelo 2.

A Eletropaulo sai da fronteira de eficiência quando comparada aos Modelos 1 e 2, com uma queda de 0,31 no seu escore de eficiência. Isso ocorre porque a CEMIG possui uma ampla área de concessão com características diferentes, principalmente quanto aos aspectos ambientais. O mesmo não é observado na Eletropaulo, que possui uma pequena área de concessão caracterizada por uma alta densidade de carga.

CPFL Paulista também teve sua eficiência elevada com a inclusão de variáveis ambientais. A empresa aumentou sua eficiência em 0,12 em comparação aos Modelos 1 e 2. Apesar de um ambiente com densidade de consumidores média, a empresa opera em uma área com alta incidência de raios.

6.0 CONCLUSÃO

A análise de eficiência está recebendo atenção considerável dos reguladores do setor de energia elétrica, especificamente no segmento de distribuição. Devido às características de monopólio natural do segmento de distribuição, as concessionárias não estão sujeitas às forças do mercado. Este artigo simulou um cenário

competitivo entre empresas de serviços públicos. A Análise Envolvória de Dados auxilia neste propósito, calculando a eficiência relativa das empresas. A metodologia constrói uma fronteira de eficiência empírica a partir dos dados de insumo e de produto de uma DMU. Essa análise fornece uma estrutura para analisar o efeito do ambiente no desempenho da distribuidora, especialmente no caso de países com grandes extensões territoriais.

A novidade do artigo foi o uso das Redes Unificadas para dividir a área de concessão da empresa em subgrupos mais homogêneos, que serão considerados DMUs, diferindo da abordagem tradicional, onde empresas são vistas como DMUs. As distribuidoras brasileiras estão sujeitas a heterogeneidade externa e interna devido à sua grande área de concessão. Esta proposta busca reduzir o impacto do problema de heterogeneidade externa e interna das empresas brasileiras de distribuição.

Embora possa parecer estranho considerar as Redes Unificadas como independentes administrativamente, muitas empresas com uma grande área de concessão já criaram suas regionais. As empresas podem diferir no grau de liberdade de tomada de decisão concedida a cada regional. Essa questão também pode surgir até para a abordagem tradicional, porque existem muitas empresas de distribuição no Brasil que pertencem à mesma *holding* e teriam as mesmas diretrizes em termos de administração.

Outra melhoria importante do método proposto é que a qualidade e as características ambientais podem ser mais bem representadas quando a empresa é dividida em Redes Unificadas. Estudamos três modelos diferentes (Modelos 1, 2 e 3) e duas análises foram feitas: uma tratou as Redes Unificadas como Unidades Tomadoras de Decisão e a outra tratou as empresas com DMU. Considerando a análise das RUs, descobrimos que algumas tiveram um baixo desempenho no Modelo 1 e obtiveram um alto desempenho no Modelo 2.

Esses resultados mostram que é necessário integrar a qualidade do serviço nos modelos de *benchmarking*. Encontramos evidências de significância estatística na relação entre variáveis ambientais e eficiência no Modelo 3. Considerando a análise orientada para a empresa, também descobrimos que a eficiência é afetada pela inclusão da qualidade. Com relação às variáveis ambientais, o efeito nos escores de eficiência é insignificante.

A definição do produto “eletricidade” e seu preço não podem ser desassociados da qualidade do serviço e das características do ambiente. A tarifa de distribuição deve levar em consideração a localização, o nível de tensão, a qualidade do serviço e o ambiente. Dado que a metodologia DEA é usada para determinar a receita permitida, o regulador não pode ignorar esses fatores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) H. E RGAs, J. S centro comercial . “ Limites de preços e regulação da taxa de retorno ” . Grupo de Consultoria em Economia de Redes, 2001.
- (2) H. Averch, LL Johnson. "Comportamento da empresa sob restrição regulatória", *American Economic Review*, vol. 52, n. 5, pp. 1052-1069, 1962.
- (3) MN Lowry, L. Getachew. “*Benchmarking* estatístico na regulação de utilidades: papel, normas e métodos”, *Energy Policy*, vol. 37, n. 4, pp. 1323-1330, 2009.
- (4) AB Haney, MG Pollitt. “Análise de eficiência de redes de energia: uma pesquisa internacional de reguladores”, *Energy Policy*, vol. 37, n. 12, pp. 5814-5830, 2009.
- (5) P. Bogetoft. “Comentários sobre o modelo de *benchmarking* brasileiro para regulação da distribuição de energia Quarto ciclo de revisão tarifária - NT 192/2014”. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>, 2014.
- (6) WD Cook, J. Harrison, R. Imanirad, P. Rouse, J. Zhu. “Análise de envelope de dados com DMUs não homogêneas”. *Pesquisa Operacional*, vol. 61, n. 3, pp. 666–676, 2013.
- (7) Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2006), Segunda Revisão de Controle de Preço das concessionárias de distribuição de eletricidade no Brasil. Nota técnica nº 262. (Online). Disponível: <http://www.aneel.gov.br>
- (8) G. Matos, ALM Lopes, MA Costa. “Uma Análise Crítica do Modelo de *Benchmarking* Proposto pelo Regulador Brasileiro de Eletricidade para o 3º ciclo (2011-2015) da Revisão Tarifária das Empresas de Distribuição”. In: 10ª Conferência Internacional sobre Análise por Envelope de Dados, Natal, 2012.
- (9) ES Tanure, MO Tahan, JWM Lima. “Estabelecimento do desempenho de qualidade das empresas de distribuição com base no regulamento Yardstick”, *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 21, n. 3, pp. 1148 - 1153, 2006.
- (10) R. Billinton, RN Allan. "Avaliação de confiabilidade de sistemas de energia". Nova Iorque: 1984.
- (11) CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. (Conectados). Disponível em: <http://www.cemig.com.br>.
- (12) IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (Conectados). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>
- (13) A. Charnes, W. Cooper, E. Rhodes. “Medindo a eficiência das unidades de tomada de decisão”, *European Journal of Operational Research*, vol. 2, n. 6, pp. 429-444, 1978.
- (14) RD Banker, RF Charnes, W. Cooper. “Alguns modelos para estimar ineficiências técnicas e de escala na análise de envoltórios de dados”, *Management Science*, vol. 30, pp. 1078-1092, 1984.
- (15) D. Giannakis, T. Jamasb, M. Pollitt. “*Benchmarking* e regulação por incentivos da qualidade de serviço: uma aplicação às redes de distribuição de eletricidade do Reino Unido”, *Energy Policy*, vol. 33, n. 17, pp. 2256-2271, 2005.

- (16) RC Subhash. "Análise do envelope de dados, insumos não discricionárias e eficiência: uma interpretação alternativa". Ciências do Planejamento Socioeconômico, vol. 22, n. ° 4, pp. 167-176, 1988.
- (17) Simar, PW Wilson. "Estimativa e inferência em modelos semi-paramétricos de dois estágios de processos de produção". Journal of Econometrics, vol. 136, n. 1, pp. 31-64, 2007.
- (18) J. Ruggiero. "Avaliação de desempenho na educação: modelando a produção educacional". In: Manual sobre Análise de Envelope de Dados. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2004.
- (19) J. Tobin. Estimacão de relacionamentos para variáveis dependentes limitadas. Econometrica, vol. 26, pp. 24-36, 1958.
- (20) LMM Lima, AR Queiroz, AR e JWM Lima. "Do nível de tensão ao preço local da rede de distribuição: a experiência brasileira", Conferência: Power Engineering Society, IEEE General Meeting, 2011.
- (21) Kirschen, R. Allan, G. Strbac. "Contribuições para geradores individuais para cargas e fluxos", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, n. 1, pp. 52-60, 1997.
- (22) RG Dyson, R Allen, como Camanho, VV Podinovski, CS Sarrico, E. Um. Xisto. "Armadilhas e Protocols in DEA." Europeia J ournal de ó peracional R ESQUISA, vol. 132, n. 2, pp. 245-259, 2001.
- (23) T. Jamasb, M. Pollitt. "Benchmarking e regulação: experiência internacional em eletricidade", Utilities Policy, vol. 9, n. 3, pp. 107-130, 2001.
- (24) A. Estache, MA Rossi, CA Ruzzier. "O caso da coordenação internacional da regulação da eletricidade: evidências da medição da eficiência na América do Sul". Journal of Regulatory Economics, vol. 25, n. 3, pp. 271-295, 2004.
- (25) C. Pombo, R. Taborda. "Desempenho e eficiência no sistema de distribuição de energia da Colômbia: efeitos das reformas de 1994". Energy Economics, vol. 28, n. 3, pp. 339-369, 2006.
- (26) C. Cambini, E. Fumagalli, A. Croce. "Regulação por incentivos baseados em produtos: benchmarking com qualidade de fornecimento na distribuição de eletricidade", Energy Economics, 2012.
- (27) C. Growitsch, T. Jamasb, M. Pollitt. "Qualidade de serviço, eficiência e escala nas indústrias de rede: uma análise da distribuição europeia de eletricidade", Applied Economics, vol. 41, n. 20, pp. 2256-2570, 2009.
- (28) T. Jamasb, L. Orea, MG Pollitt. "Estimando o custo marginal da melhoria da qualidade: o caso das empresas de distribuição de eletricidade do Reino Unido", Energy Economics, vol. 34, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS

| | |
|---|---|
|  | <p>Sandra de Sousa Xavier, doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2015). Atuou como Professora Substituta na Universidade Federal de Ouro Preto e atualmente é Professora Efetiva no Instituto Federal do Paraná. Tem experiência em Regulação Econômica do Setor Elétrico, atuando durante o quarto ciclo de revisão tarifária sob os seguintes temas: análise de eficiência das empresas, produtividade, base de anuidade regulatória e receitas irre recuperáveis. Além de ter sido coordenadora do projeto de Pesquisa & Desenvolvimento sobre o cálculo do custo marginal da qualidade nas regionais de uma distribuidora de energia, com aplicação de técnicas de benchmarking.</p> |
|  | <p>José Wanderely Marangon Lima, Doutor pela UFRJ (1994), Engenheiro Senior na Eletrobrás (1980 a 1994), Pós-Doutor pela University of Texas (2006), Prof. Titular pela UNIFEI (1994 a 2005), Assistente Diretoria da ANEEL (1998 a 2000), Grupo de Elaboração do Modelo Setor Elétrico no MME (2003 a 2004), 10 orientações de doutorado, 40 orientações de mestrado pela UNIFEI. Consultor da MC&E. Mais de 150 artigos em seminários e revistas internacionais.</p> |
|  | <p>Luana Medeiros Marangon Lima, doutora pela Universidade do Texas em Austin (2010), professora adjunta na UNIFEI (2015 a 2016), professora assistente na Duke University (2018).</p> |
|  | <p>Ana Lucia Miranda Lopes, é Professora Associada do Departamento de Ciências Administrativas da Faculdade de Ciências Econômicas - FACE/UFMG e membro permanente dos cursos de mestrado e doutorado do Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração - CEPEAD/UFMG. Possui graduação em Engenharia Civil pela PUC/RS (1987), mestrado e doutorado em Engenharia de Produção pela UFSC/SC (1992, 1998) e Pós-Doutorado pela Aston Business School, Birmingham, UK.</p> |