

MÉTODO HÍBRIDO PARA AVALIAÇÃO DOS CUSTOS OPERACIONAIS DE DISTRIBUIDORAS BRASILEIRAS DE ENERGIA

HYBRID METHOD FOR EVALUATING THE OPERATIONAL COSTS OF BRAZILIAN ENERGY DISTRIBUTORS

Luís Filipe Azevedo de Oliveira*  E-mail: luisfilipeao@outlook.com

*Centro Universitário Ibmecc (IBEMEC), Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resumo: Este estudo propõe um modelo de avaliação de benchmarking voltado ao sistema regulatório brasileiro para determinar os custos operacionais eficientes das concessionárias de distribuição de energia elétrica. O modelo visa fornecer aos agentes reguladores um parâmetro robusto para o controle periódico de tarifas e para o monitoramento dos padrões de qualidade no fornecimento de energia, com base em uma avaliação precisa da eficiência operacional dessas concessionárias. A pesquisa adota um modelo híbrido de benchmarking que integra a Análise Envoltória de Dados (DEA) e a Análise de Fronteira Estocástica (SFA) em uma metodologia de avaliação de eficiência estruturada em Três Estágios. Essa abordagem ajusta os custos operacionais ao nivelar as condições de atuação de cada concessionária antes de reaplicar a análise DEA, resultando em uma avaliação mais consistente com as particularidades do mercado brasileiro. Como resultado, o desempenho das concessionárias é avaliado exclusivamente em termos de eficiência gerencial, com controle dos efeitos do ambiente operacional e do ruído estatístico. Esse método rigoroso incorpora tanto variáveis gerenciáveis quanto não gerenciáveis no cálculo da eficiência, oferecendo uma medida confiável e abrangente.

Palavras-chave: Distribuição de Energia Elétrica. Custos Operacionais Eficientes. Benchmarking. Análise Envoltória de Dados (DEA). Análise de Fronteira Estocástica (SFA).

Abstract: This research aims to propose a model for benchmarking evaluation, applied to the Brazilian regulatory system in establishing the efficient operational costs of electric power distribution utilities. The formulated model seeks to provide regulatory agents with a parameter for periodic control of tariffs and quality standards of supply, based on a real assessment of the operational efficiency of distribution companies. To conduct this research, it is proposed to use a benchmarking evaluation model that integrates the associated use of Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis, through a methodology that establishes efficiency evaluation in Three Stages. This methodology allows for the adjustment of operational costs by leveling the operating environment of each electric power distribution utility before repeating the DEA analysis, making the performance of the utilities more coherent with the characteristics of the Brazilian market. From this, it was possible to obtain an evaluation of performance exclusively expressed in terms of management efficiency, in which the effects of the operational environment and statistical noise are controlled, resulting in a rigorous measure of efficiency, by introducing manageable and unmanageable variables in the direct calculation of efficiency.

Keywords: Electric Power Distribution. Efficient Operational Costs. Benchmarking. Data Envelopment Analysis (DEA). Stochastic Frontier Analysis (SFA).

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, o processo de liberalização da economia influenciou, em escala global, o setor de energia elétrica, promovendo a segmentação e a privatização do setor, o que resultou em alterações significativas na sua estrutura, no ambiente operacional e na governança. A liberalização e a reestruturação têm como objetivo aumentar a eficiência e a competitividade do setor, assegurando o fornecimento de energia confiável e a custos mais acessíveis para a sociedade. Contudo, em setores caracterizados como monopólios naturais, torna-se imprescindível o desenvolvimento de um sistema regulatório que direcione as empresas a atenderem às demandas do mercado.

Um número crescente de reguladores tem adotado o benchmarking como ferramenta para estabelecer parâmetros no controle periódico de tarifas e nos padrões de qualidade do fornecimento, em conformidade com a regulação de monopólios baseada em incentivos (Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011; Kuosmanen *et al.*, 2013). A avaliação por benchmarking, no contexto de *yardstick competition*, promove o aumento da eficiência ao simular, para as empresas, um ambiente de mercado competitivo.

Diferentes abordagens para avaliação por benchmarking em sistemas de regulação têm sido amplamente discutidas (Jamasb; Pollitt, 2001; Jamasb *et al.*, 2004; Haney; Pollitt, 2009; Kuosmanen *et al.*, 2013; Mullarkey *et al.*, 2015). Cada metodologia apresenta vantagens e desvantagens, tornando a escolha da abordagem uma questão controversa, pois o Estado adota uma perspectiva fundamentada em seu ambiente, habilidades e experiências específicas (Saleem, 2007; Omrani *et al.*, 2015). No entanto, Haney e Pollitt (2009) destacam que as técnicas baseadas na construção de fronteiras de eficiência são as mais apropriadas para uma avaliação benchmarking, sendo as mais relevantes a Análise Envoltória de Dados (DEA, *Data Envelopment Analysis*) e a Análise de Fronteira Estocástica (SFA, *Stochastic Frontier Analysis*).

Fundamentada na programação linear, a Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma técnica não paramétrica que estima uma fronteira de eficiência linear por partes, considerando um conjunto de organizações similares que se diferenciam pelos diversos níveis de combinação de entradas e saídas em seus processos (Charnes *et al.*, 1978; Cook; Seiford, 2009; Liu *et al.*, 2013; Cook *et al.*, 2014). A principal vantagem

da abordagem DEA é a ausência de necessidade de especificar uma forma funcional explícita para os dados. No entanto, a fronteira estimada pode ser influenciada negativamente quando os efeitos do ambiente operacional, os erros estatísticos e a ineficiência gerencial não são devidamente considerados (Cordero *et al.*, 2009).

No campo das técnicas paramétricas, o modelo econométrico SFA (*Stochastic Frontier Analysis*) aborda a análise de fronteira de forma estocástica, impondo uma forma funcional explícita para os dados e assumindo que as incertezas seguem uma distribuição de probabilidade, introduzidas como ruído estatístico no modelo (Aigner *et al.*, 1977; Meeusen; Van Den Broeck, 1977). Além disso, essa abordagem permite o controle dos efeitos ambientais e a realização de testes de hipóteses convencionais. Entretanto, exige a especificação dos parâmetros em uma forma funcional, a identificação da distribuição de probabilidade associada à ineficiência e não é compatível com múltiplos produtos (Avkiran; Rowlands, 2008).

Com o objetivo de romper o paradigma relacionado à construção da fronteira, este estudo propõe a realização de benchmarking por meio de uma abordagem integrada que combina DEA e SFA. Para este desenvolvimento, adota-se uma metodologia estruturada em três estágios para avaliar a eficiência das empresas brasileiras de distribuição de energia. O modelo proposto considera o impacto dos efeitos externos sobre as variáveis gerenciáveis, realizando ajustes nos custos operacionais para nivelar o ambiente de atuação de cada concessionária de distribuição. Dessa forma, obtém-se uma avaliação de desempenho expressa em termos de eficiência gerencial, na qual os efeitos do ambiente operacional e do ruído estatístico são controlados. O resultado é uma medida rigorosa de eficiência, alcançada pela incorporação de variáveis gerenciáveis e não gerenciáveis no cálculo direto da eficiência.

Sob essa perspectiva, esta pesquisa contribui para a literatura ao apresentar um modelo capaz de lidar com entidades reguladas que operam em ambientes distintos, sejam eles favoráveis ou desfavoráveis ao desempenho. Por meio do ajuste dos dados de avaliação em relação ao ambiente operacional, o modelo oferece aos tomadores de decisão um parâmetro sólido para o controle periódico de tarifas e para os padrões de qualidade no fornecimento. Essa abordagem está fundamentada em uma avaliação real da eficiência operacional das companhias de distribuição, conforme discutido em Giannakis *et al.* (2005), Jamasb *et al.* (2004) e Ramos-Real *et al.* (2009).

Diante das limitações em estabelecer um conjunto universal de variáveis para a modelagem da atividade de distribuição de energia elétrica, este estudo propõe um arranjo de *inputs* e *outputs* que atende à avaliação de desempenho das entidades reguladas sob três perspectivas de atuação do órgão regulador, considerando os interesses de: (1) investidores, (2) consumidores e (3) governo. Essas três partes interessadas possuem características e interesses distintos no setor (Pedrosa, 2005). Além disso, o estudo considera que as variáveis ambientais exógenas desempenham um papel significativo na explicação da ineficiência na gestão dos custos operacionais. Assim, essas variáveis são classificadas em três categorias principais: (a) fatores de mercado; (b) fatores geográficos; e (c) fatores relacionados à estrutura e ao porte da empresa.

A seção a seguir apresenta uma visão geral sobre avaliação *benchmarking* na indústria de distribuição de energia elétrica. A seção 3 descreve o método de pesquisa utilizado para avaliar os custos operacionais eficientes das empresas de distribuição de energia, por meio de uma técnica que incorpora os fatores gerenciáveis e não-gerenciáveis na avaliação de performance. A seção 4 discute as variáveis identificadas como pertinentes na construção do modelo matemático. A seção 5 expõe os principais resultados e discussões geradas. Finalmente, a seção 6 resume e conclui o artigo.

2 AVALIAÇÃO BENCHMARKING NO SEGMENTO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O tema regulação do setor de energia elétrica é amplo. Mundialmente, verificam-se pesquisas com diferentes enfoques e procedimentos para avaliar os efeitos que a regulação por comparação pode ocasionar no segmento energético. Nesse contexto, destacam-se os estudos que utilizam DEA e SFA como procedimento avaliatório em esquemas de regulação no setor de fornecimento de energia elétrica.

Em um estudo conduzido com 43 reguladores de 40 países na Europa, Austrália e América Latina, Haney e Pollitt (2009) identificaram que, no setor de energia elétrica, 65% dos reguladores empregam métodos de benchmarking baseados em fronteiras. Entre essas técnicas, a DEA é a segunda mais utilizada, sendo amplamente adotada para avaliar companhias de distribuição e transmissão de energia elétrica em países como Áustria, Bélgica, Finlândia, Reino Unido, Holanda, Eslovênia, Islândia, Noruega, Argentina, Brasil e Colômbia. Embora não seja

implementada com a mesma frequência que outras abordagens, o uso da SFA em combinação com técnicas como a DEA permite incorporar fatores ambientais que estão fora do controle das entidades reguladas, mas que afetam seu desempenho relativo. Essa integração contribui para ajustar as incertezas e mitigar penalizações às empresas que operam muito abaixo da fronteira eficiente.

Estudos relacionados ao uso de DEA e SFA para avaliação em esquemas de regulação no setor de fornecimento de energia elétrica abrangem, essencialmente, três temáticas: (i) aprimorar a qualidade e a confiabilidade no fornecimento de energia ao estabelecer parâmetros para controle em sistemas de regulação baseados em penalidades e incentivos; (ii) avaliar o desempenho na gestão dos custos operacionais, utilizando metodologias que orientam a revisão tarifária; e (iii) analisar a evolução do setor em termos de produtividade e eficiência após o processo de reestruturação do setor de distribuição de energia elétrica em cada país.

A qualidade do serviço tornou-se uma questão central nos procedimentos de regulação após a reestruturação do setor de energia elétrica, considerando que o *trade-off* entre o custo de distribuição e a qualidade do fornecimento exige a adoção de sistemas economicamente eficientes e orientados ao mercado (Pessanha *et al.*, 2007). Simab e Haghifam (2012) destacam que, entre os aspectos relacionados à qualidade do fornecimento de energia elétrica, sobressaem os indicadores de continuidade do fornecimento, medidos pela duração e frequência das interrupções no serviço. Esses indicadores refletem o nível de disponibilidade do serviço prestado pela concessionária. Nesse sentido, busca-se estabelecer metas de continuidade do fornecimento, definindo limites máximos para o número de interrupções e para sua duração em cada concessionária.

Sob o aspecto das economias de escala, verifica-se que a sua presença no setor possibilita a expansão do mercado com custos incrementais decrescentes. Diante da presença desses ganhos de produtividade, cabe aos órgãos reguladores realizar revisões das tarifas periodicamente, de maneira que se possa garantir a cobertura dos custos operacionais eficientes, bem como a remuneração dos investimentos realizados pelas distribuidoras (Souza *et al.*, 2010a; 2010b). Essa estratégia segue as linhas gerais da regulação por comparação (Jamasp *et al.*, 2004), pois estimula as companhias de distribuição de energia a utilizarem eficientemente os seus recursos (Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011).

Quadro 1 – Framework das variáveis utilizadas para *benchmarking* no segmento de distribuição de energia elétrica

	Indicadores	Qualidade				Custos							Evolução do Setor							Resumo									
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	I	O	A			
Processo	Carregamento da rede	I/A				A																				1	0	2	
	Quantidade de transformadores				I																						1	0	0
	Capacidade do transformador							I					I				I		O	O	I					4	2	0	
	Tamanho da rede de distribuição	A	O		I	A/O	A/O	I	O				I		I	I	I		O	O	I					7	6	3	
	Número de funcionários									I			I	I	I	I					I	I				7	0	0	
	Quantidade de Subestações																I									1	0	0	
Financeiro	Custo Operacional		I			I	I		I		I	I		I				I	I	I	I	I				13	0	0	
	Despesas Totais		I	I																						2	0	0	
	Receitas								O	O																0	2	0	
	Valor de substituição																	I								1	0	0	
	Investimento por consumidor															A										0	0	1	
Mercado	Composição do mercado		A						A				A		A											0	0	4	
	Extensão área de concessão de atuação									O		O	I/O	O	A								O			0	1	1	
	Número de unidades consumidoras	I/A	O	O	I	I/A	A/O		O	O		O	O		O	O/A	O	O	O	O						3	13	3	
	Consumidor por área de concessão				I																					1	0	0	
	Consumo por consumidor	I/A				A																				1	0	2	
Serviço	Frequência de interrupção	O	I		O																					1	2	0	
	Energia elétrica distribuída	A	O	O	I	O/A	O/A	O	O		O	O		O		O/A	O	O	O	O	O	O	O	O	O	1	17	4	
	Perdas de energia				I									I	I	I		I								5	0	0	

I: variável de *input*; O: variável de *output*; A: Variável exógena

Fonte: Elaborado a partir de (1) Giannakis *et al.* (2005); (2) Pessanha *et al.* (2007); (3) Growitsch *et al.* (2010); (4) Simab e Haghifam (2012); (5) Jamasb *et al.* (2004); (6) Saleem (2007); (7) Pereira de Souza *et al.* (2010a); (8) Pereira de Souza *et al.* (2010b); (9) Saurin *et al.* (2013); (10) Martins *et al.* (2014); (11) Souza *et al.* (2014); (12) Moreno *et al.* (2015); (13) Resende (2002); (14) Edvardsen e Førsund (2003); (15) Estellita Lins *et al.* (2007); (16) Ramos-Real *et al.* (2009); (17) Pérez-Reyes e Tovar (2009); (18) Blázquez-Gómez e Grifell-Tatjé (2011); (19) Yadav *et al.* (2010); (20) Yadav *et al.* (2013); (21) Santos *et al.* (2011); (22) Altoé *et al.* (2017).

Com o objetivo de compreender melhor o processo de reestruturação do setor energético, diversos estudos (Ramos-Real *et al.*, 2009; Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011; Yadav *et al.*, 2013) têm utilizado técnicas de benchmarking para investigar se as reformas implementadas atingiram o objetivo de fornecer eletricidade acessível, eficiente e confiável ao longo do tempo. Essas aplicações avaliam os efeitos da reestruturação no setor de energia elétrica, abrangendo tanto a análise estática quanto a dinâmica do desempenho das concessionárias (Edvardsen; Førsund, 2003; Estellita Lins *et al.*, 2007; Saurin *et al.*, 2013). Além disso, mensuram a evolução da produtividade e as mudanças tecnológicas do setor ao longo do tempo (Pérez-Reyes; Tovar, 2009; Santos *et al.*, 2011; Altoé *et al.*, 2017).

O Quadro 1 sintetiza as informações obtidas na fundamentação teórica, sistematizando as variáveis empregadas em estudos que avaliam o setor de distribuição de energia elétrica. As variáveis de *input* (I), *output* (O) e ambientais (A) foram agrupadas em quatro categorias principais: *Processo*, que indica materiais ou recursos utilizados diretamente no processo de distribuição de energia; *Financeiro*, representado por indicadores monetários do setor; *Mercado*, que descreve medidas caracterizadoras do mercado atendido; e *Serviço*, composto por variáveis que avaliam a qualidade do serviço prestado.

A literatura sobre análise de eficiência relativa e *benchmarking* não assume um consenso universal no conjunto de variáveis para a modelagem da atividade de distribuição de energia elétrica. Em *survey* relativa a *benchmarking* nos setores de transmissão e distribuição de energia elétrica, Jamasb e Pollitt (2001) apontam para a disparidade presente entre as variáveis usadas, sendo essa um indicativo da ausência de uma conformidade acerca de como as funções básicas das concessionárias de energia elétrica devem ser modeladas.

No Quadro 1, a sistematização exposta corrobora com as descobertas previamente mencionadas de Jamasb e Pollitt (2001). Os recursos de entrada mais utilizados são os custos operacionais, número de funcionários, a capacidade dos transformadores de tensão e comprimento da rede de distribuição. Além disso, a presente revisão, com base em outros estudos (Edvardsen; Førsund, 2003; Estellita Lins *et al.*, 2007; Ramos-Real *et al.*, 2009; Growitsch *et al.*, 2010; Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011), destaca a inclusão da variável perdas de energia, uma vez que explica as diferenças entre o total de energia distribuída e o total faturado.

Observa-se ainda que as variáveis mais utilizadas para expressar as saídas são: quantidade de energia distribuída, número de unidades consumidoras atendidas e tamanho da área de concessão, conforme já discutido por Jamasb e Pollitt (2001). O Quadro 2 explicita as variáveis mais utilizadas.

Mediante a observação do Quadro 2, verifica-se o uso da variável extensão da rede tanto como *input* e *output*. Moreno *et al.* (2015) afirma que a sua utilização como entrada se apresenta plausível tendo em vista que a extensão da rede representa um dos principais, se não o principal, recurso das empresas de distribuição. Por outro lado, Ramos Real *et al.* (2009) e Pereira de Souza *et al.* (2010a) discutem que a variável extensão da área de concessão não é um fator gerenciável, dado que a região a ser atendida pelas distribuidoras é definida no ato de concessão do governo. Tal variável, nesse caso, não deve ser classificada como um input, visto que a capacidade de atendimento das distribuidoras é limitada pela área de concessão, por se tratar de uma variável não controlada.

Quadro 2 – Descrição das variáveis mais utilizadas para *benchmarking* no segmento de distribuição

	Variável	Descrição
Input	Custos operacionais	empregado em uma modelagem mais tradicional de regulação por incentivo, no intuito de expressar a redução potencial dos custos operacionais de cada concessionária
	Extensão da rede de distribuição	a rede de distribuição constitui um recurso fundamental a atividade de distribuição de energia, e o uso da sua extensão como variável funciona como proxy do capital investido pela concessionária
	Número de funcionários	utilizadas como proxy para estimar o capital humano necessário para desempenhar as funções dentro do sistema
	Perdas de Energia	remete a qualidade do sistema e do desperdício gerado, sendo um output indesejado e por vezes modelado como input, a fim de ser eliminado do processo de distribuição de energia
	Capacidade dos transformadores	os transformadores de tensão elétrica também constituem um recurso utilizado na atividade de distribuição de energia e o uso da sua capacidade na modelagem funciona como proxy do capital necessário para que as concessionárias possam desempenhar suas funções
Outputs	Extensão da rede de distribuição	Indicativo da dificuldade de operação relacionadas com a geografia da terra e a dispersão dos consumidores
	Unidades consumidoras atendidas	Expressa diretamente o tamanho do mercado atendido
	Energia elétrica distribuída	Mensura a quantidade de energia elétrica distribuída por cada concessionária

O uso como output também se justifica quando se deseja expressar um indicativo da dificuldade de operação relacionadas com a geografia e a dispersão dos consumidores (Edwardsen; Førsund, 2003; Jamasb *et al.* (2004); Moreno *et al.*, 2015). Considerando a similaridade das variáveis extensão da rede e custo operacional, torna-se redundante o emprego associado dessas variáveis como *input* em um modelo, haja vista que o custo operacional de uma concessionária depende diretamente do comprimento da sua rede de distribuição. Portanto, o emprego dessa variável para caracterizar o ambiente organizacional como um *output* ou uma variável exógena (Jamasb *et al.*, 2004; Pessanha *et al.*, 2007). No presente estudo, optou-se pela escolha de *output*.

As outras especificações requeridas para utilizar DEA também não apresentam uma concordância entre os autores estudados. Alguns autores (Edwardsen; Førsund, 2003; Jamasb *et al.*, 2004; Growitsch *et al.*, 2010) justificam o uso da abordagem com retornos constantes de escala, argumentando que os operadores de rede podem otimizar sua escala, considerando ineficiências devido a um desvio da escala ótima. Outros autores (Estellita Lins *et al.*, 2007; Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011) avaliam as unidades de distribuição de energia sob a hipótese de que as concessionárias utilizam tecnologia que proporciona retorno de escala variável.

Com relação a orientação dos modelos, observa-se que os modelos orientados ao *input* são geralmente considerados mais adequados para concessionárias de distribuição de energia elétrica, visto que a demanda por seus serviços é uma demanda derivada e deve ser cumprida (Resende, 2002; Jamasb *et al.*, 2004). A medida de eficiência, portanto, dependerá da habilidade do operador em minimizar as suas entradas, dado um vetor fixo de saídas (Edwardsen; Førsund, 2003; Blázquez-Gómez; Grifell-Tatjé, 2011).

3 MODELO CONCEITUAL

A presente pesquisa objetiva desenvolver um modelo para dimensionamento dos custos operacionais eficientes do fornecimento de energia. Para tanto, propõe-se a utilização de um modelo de avaliação *benchmarking* que integra o uso associado de DEA e SFA, baseando-se na metodologia proposta por Fried *et al.* (1999), Fried *et al.* (2002), Muñiz (2002) e Avkiran e Rowlands (2008). O estudo é desenvolvido seguindo uma abordagem que garanta uma medida rigorosa de eficiência para cada

concessionária, permitindo identificar e discriminar os fatores determinantes para o seu desempenho, por meio de uma avaliação de eficiência em *Três Estágios*.

O *Primeiro Estágio* inicia com a especificação da tecnologia de produção ao se determinar as características do modelo DEA utilizado para estimar a fronteira eficiente. Utiliza-se apenas dados quantitativos acerca das variáveis gerenciáveis, isto é, os *inputs* e *outputs* do sistema, no intuito de avaliar a conversão dos recursos em produtos (Liu *et al.*, 2013; Cook *et al.*, 2014).

Para garantir a comparabilidade das concessionárias, propõe-se a utilização do modelo com rendimentos variáveis de escala. Introduzido por Banker *et al.* (1984), o modelo VRS (*Variable Returns to Scale*) incorpora o conceito de retornos variáveis de escala ao DEA para avaliar a eficiência técnica de uma DMU (DMU, *Decision Making Unit*, que generaliza qualquer conjunto de unidades produtivas que seja analisada com DEA), assumindo que as unidades analisadas podem adotar tecnologias com rendimentos de escala constantes, crescentes e decrescentes.

A parcela dos custos operacionais de uma concessionária de fornecimento de energia representa o grande desafio do processo de regulação econômica, sobre o qual recai o foco dos mecanismos de incentivos, visto que depende diretamente das ações gerenciais das empresas distribuidoras. As medidas de eficiência devem, portanto, ser orientadas a redução dos recursos e insumos, para se ter um meio de incentivo a redução de custos operacionais.

Desse modo, a avaliação por *benchmarking* para estimar a fronteira de produção no primeiro estágio adota um modelo de programação linear utilizado para estimar uma fronteira de produção linear por partes e mensurar a eficiência produtiva de cada uma das j organizações em análise. O modelo é descrito pelo conjunto de expressões (1), (2), (3), (4) e (5).

$$\text{Min } \theta_0 - \varepsilon \left(\sum_{j=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \quad (1)$$

$$\text{Sujeit} \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \lambda_j + s_i^- = x_{i0} \cdot \theta_0 \quad i = 1, \dots, m; \quad (2)$$

o a:

$$\sum_{j=1}^n y_{rj} \cdot \lambda_j - s_r^+ = y_{r0} \quad r = 1, \dots, s; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (4)$$

$$\lambda_j \geq 0; s_i^- \geq 0; s_r^+ \geq 0; \theta_0 \geq 0 \quad \forall i, r, j \quad (5)$$

Os coeficientes y_{rj} e x_{ij} , são, respectivamente, os *outputs* e os *inputs* conhecidos das j organizações em análise ($j = 1, \dots, n$), valores constantes, obtidos por meio de observações passadas, em decisões tomadas quanto aos i *inputs* ($i = 1, \dots, m$), resultando em um conjunto r de *outputs* ($r = 1, \dots, s$). O escore de eficiência técnica da concessionária 0 , orientada ao *input*, é representado por θ_0 ; s_i^- e s_r^+ são as folgas observadas nos *inputs* e *outputs* e resultam da ineficiência gerencial da organização; e λ_j representa a contribuição da DMU j para projetar 0 na fronteira eficiente. O termo não arquimediano, $\varepsilon > 0$, é um elemento positivo, menor que qualquer número real e impede que a eficiência da unidade 0 seja calculada com base em uma face pareto-ineficiente. Maiores detalhes sobre a modelagem DEA adotada podem ser encontrados em Cooper *et al.* (2006), Cook e Seiford (2009) e Cook *et al.* (2014).

O objetivo do *Segundo Estágio* é redimensionar as variáveis de interesse, baseando-se nos fatores do ambiente operacional que impactam na eficiência das concessionárias. Para tanto, é necessária uma análise econométrica que determine a compensação existente em cada ambiente de atuação das empresas de fornecimento de energia, dada a relação existente entre as variáveis gerenciáveis e as variáveis de controle ou exógenas.

As folgas, obtidas anteriormente no *Primeiro Estágio*, serão decompostas em termos do efeito exógeno e do ruído estatístico, para que seja controlado o efeito externo sobre a ineficiência técnica e gerencial. Para tal, Avkiran e Rowlands (2008) indicam que seja usado um modelo de regressão estocástico, SFA. Realiza-se uma regressão das folgas sobre as variáveis exógenas com a presença de um termo de erro composto, capaz de identificar e distinguir a ineficiência gerencial do erro aleatório. A função geral das regressões SFA para o caso das folgas de entrada é representada pela Expressão (6),

$$s_{ij}^- = f_i(z_{ij}; \beta_i) + v_{ij} + u_{ij} \quad i = 1, \dots, m; \quad (6)$$

em que s_{ij}^- são as folgas do *input* i , calculadas no *Primeiro Estágio*; z_{ij} representam as variáveis exógenas que exercem efeito sobre o desempenho da gestão dos *inputs*; β_i são os parâmetros estimados para explicar as variáveis exógenas sobre as folgas dos *inputs*. O termo de erro composto é a soma entre u_{ij} e

v_{ij} , sendo u_{ij} uma estimativa do efeito da ineficiência gerencial, seguindo uma distribuição exponencial ou normal positiva, enquanto v_{ij} explica o ruído estatístico, normalmente distribuído.

O ajuste que se propõe nivela o ambiente de atuação de cada concessionária antes de repetir a análise DEA. Fried *et al.* (2002) e Avkiran e Rowlands (2008) indicam que as DMUs beneficiadas por operar em ambientes relativamente mais favoráveis ou por apresentar vantagem devido ao ruído estatístico devem ter suas variáveis de *inputs* ajustados para cima. Isto é, todas unidades avaliadas devem ter seus custos operacionais avaliados sob uma ótica pessimista, considerando o pior cenário competitivo.

Para isso, as estimativas dos parâmetros β_i , obtidos a partir de regressões SFA, são utilizadas para prever as folgas de *inputs* atribuíveis aos fatores externos. Assim, as variáveis de entradas, coletadas por dados históricos de cada organização, podem ser ajustadas pelo impacto do ambiente externo e ruído estatístico, conforme Expressão (7).

$$x_{ij}^A = x_{ij} + [Max_j(z_{ij} \cdot \hat{\beta}_i) - z_{ij} \cdot \hat{\beta}_i] + [Max_j(\hat{v}_{ij}) - \hat{v}_{ij}] \quad i = 1, \dots, m; \quad (7)$$

Onde x_{ij}^A é a quantidade ajustada do *input* i , da unidade j ; x_{ij} é o valor observado acerca do *input* i . O valor do produto $z_{ij} \cdot \hat{\beta}_i$ representa o valor previsto da folga no *input* atribuída ao ambiente operacional, enquanto \hat{v}_{ij} é a estimativa para o ruído estatístico. O primeiro ajuste na Expressão 7, $[Max_j(z_{ij} \cdot \hat{\beta}_i) - z_{ij} \cdot \hat{\beta}_i]$, nivela o ambiente operacional no tocante as variáveis exógenas, ao posicionar todas as unidades produtivas no contexto operacional menos favorável da amostra. O segundo ajuste, $[Max_j(\hat{v}_{ij}) - \hat{v}_{ij}]$, posiciona todas as unidades na situação desfavorável quanto a medição das variáveis. Assim, os insumos obterão ajustes para cima quando as concessionárias participam de um ambiente favorável.

O *Terceiro Estágio* consiste em repetir o *Primeiro Estágio*, substituindo os dados observados pelas variáveis ajustadas no *Segundo Estágio*. Isto é, a *performance* das concessionárias é reavaliada, considerando o impacto do efeito externo sobre as variáveis gerenciáveis. Como resultado, tem-se uma avaliação do desempenho exclusivamente expressa em termos de eficiência de gestão, nos quais são controlados os efeitos do meio ambiente operacional e do ruído estatístico.

4 SELEÇÃO DE VARIÁVEIS E COLETA DE DADOS

Para definição da tecnologia de produção do *Primeiro Estágio*, buscou-se medir a eficiência dos distribuidores em função do desenvolvimento do mercado de energia elétrica, em harmonia com as políticas governamentais e em benefício da sociedade. Nesse sentido, foram selecionadas variáveis que atendessem a avaliação do desempenho das concessionárias sob as três perspectivas de atuação do órgão regulador: *Investidores*, *Consumidores* e *Governo*.

O modelo contempla um único *input*, os custos operacionais das concessionárias (*opex_j*), em uma abordagem tradicional de regulação por incentivo que expressa a redução potencial dos custos operacionais de cada concessionária.

No tocante a avaliação de desempenho sob a perspectiva do *Investidor*, foram selecionadas as variáveis de saída que indicam o objetivo dos proprietários das concessionárias: maximizar faturamento, mesmo não tendo como influenciar a demanda pelos seus serviços. Para representar esse efeito, utilizou-se o indicador mercado faturado (*MF_j*) por cada concessionária *j*, que consiste na soma algébrica dos resultados do faturamento de cada empresa, para os mercados de baixa, média e alta tensão.

Outra preocupação do *Investidor* é eliminar as perdas não técnicas, que se referem as perdas de energia advindas de furtos, fraudes, erro nos processos comerciais de leitura, medição e faturamento. As perdas não técnicas (*PNT_j*) constituem um *output* indesejado sob a ótica dos investidores, pois consomem recursos para transportar a energia, mas não geram a devida receita, devendo ser eliminadas no processo de distribuição de energia.

Na perspectiva do *Consumidor*, o aspecto mais importante a ser observado no desempenho do distribuidor é a qualidade da energia fornecida. Diversos estudos tais como Pessanha *et al.* (2007), Growitsch *et al.* (2010), Simab e Haghifam (2012) e Xavier *et al.* (2015) enfatizam, entre os aspectos da qualidade da distribuição de energia elétrica, a continuidade do fornecimento deste serviço. A continuidade pode ser avaliada com base na duração das interrupções do fornecimento (*DEC_j*) e na frequência das interrupções do fornecimento (*FEC_j*) ocorridas na área de atuação da concessionária. Essas variáveis também são resultadas indesejados do processo de distribuição de energia elétrica, devendo ser mitigados, afim de não comprometer o fornecimento contínuo ao consumidor.

A dimensão do *Governo* avalia o alcance e a dispersão do serviço de fornecimento de energia elétrica, ou seja, as concessionárias devem promover a universalização do acesso à energia elétrica, no intuito de promover o desenvolvimento econômico e social. Para mensurar esse efeito, optou-se pelo número de unidades consumidoras (UC_j) atendidas em uma dada área de concessão j . Como meio de expressar a dispersão da infraestrutura para disponibilizar o serviço de energia na área de concessão, utilizou-se a extensão total da rede de distribuição (net_j) de cada uma das concessionárias j .

Deve-se ressaltar que as perdas não técnicas de energia (PNT_j), a duração das interrupções do fornecimento (DEC_j) e a frequência das interrupções do fornecimento (FEC_j) constituem *outputs* indesejados do processo de distribuição de energia das concessionárias, devendo ser minimizados no processo de distribuição de energia (Tschaffon; Meza, 2014). Em tais situações, Seiford e Zhu (2002) recomendam a transformação destes produtos pelo inverso aditivo trasladado, de modo que os valores permaneçam positivos e possam ser incorporados ao modelo de programação linear como *output*.

No que concerne a avaliação de empresas que operam sob retornos de escalas variáveis, as unidades que apresentam os menores níveis de insumos ou os maiores níveis de produtos, em pelo menos uma das variáveis, são classificadas como eficientes. Assim, uma concessionária pode ser considerada como eficiente por operar a maior rede de distribuição, não significando necessariamente maior eficiência.

Um dos métodos usados para contornar este problema é restringir o número de variáveis usadas no modelo (Wagner; Shimshak, 2007), evitando assim as possíveis falhas dos modelos DEA (Dyson *et al.*, 2001). Para que não sejam excluídas as variáveis de saída elencadas, que contemplam as três perspectivas de atuação do agente regulador, optou-se em efetuar a avaliação da performance das concessionárias nos três âmbitos separadamente. Isto implica utilizar três modelos de forma individual para avaliar as concessionárias em cada uma das áreas de interesse do órgão regulador. Ao final, determina-se o índice de eficiência combinado ($\bar{\theta}_j$) de cada concessionária j , por meio da média aritmética dos escores de eficiência obtidos pelas três dimensões avaliadas: *Investidor*, *Consumidor* e *Governo*.

Com relação as variáveis exógenas, utilizadas para nivelar o efeito ambiental entre as concessionárias no *Segundo Estágio*, são consideradas representativas dos fatores externos que influenciam os custos operacionais. Os custos de fornecimento

de energia dependem, segundo Pessanha *et al.* (2007), do tipo da rede de distribuição e das características do mercado atendido. Seguindo essa tendência, as variáveis ambientais exógenas utilizadas para explicar a ineficiência na gestão dos custos operacionais foram classificadas como: (i) fatores de mercado, que relacionam a composição do mercado aos custos; (ii) fatores geográficos, investigando quais as características locais podem influenciar os custos operacionais; e, (iii) fatores relacionados a estrutura e porte da empresa, para distinguir o aporte de cada concessionária.

A composição do mercado identifica os tipos de clientes atendidos por uma dada concessionária e de que modo essa composição influencia seus custos operacionais (Ramos-Real *et al.*, 2009). Para verificar o efeito do tamanho e da composição do mercado no desempenho das concessionárias, optou-se por utilizar três variáveis quantitativas: (i) mercado faturado de baixa tensão (BT_j); e (ii) mercado faturado de média tensão (MT_j); e, (iii) mercado faturado de alta tensão (AT_j).

Os fatores geográficos caracterizam as regiões atendidas por cada concessionária. Para Pérez-Reyes e Tovar (2009), a inclusão de variáveis exógenas para mensurar o efeito do clima, relevo e extensão da área atendida, contribuem na identificação das causas da ineficiência nos modelos da distribuição de energia elétrica. Cinco variáveis quantitativas foram selecionadas para mensurar o efeito das características geográficas no desempenho das concessionárias: (i) extensão da área de concessão ($area_j$); (ii) a declividade média do terreno de concessão ($decl_j$); (iii) a densidade de descarga atmosférica ($desc_j$); (iv) a extensão da área vegetativa remanescente (veg_j); e, (v) índice de precipitação ($chuva_j$).

Embora os fatores relacionados ao porte da concessionária não sejam classificados como exógenos, haja vista que são gerenciáveis pela unidade de distribuição, a empresa tem obrigação de prestar um serviço adequado para alcançar o nível de abastecimento exigido (Ginnakis *et al.*, 2005). Nesse sentido, considerou-se que as decisões relacionadas a estrutura tecnológica e os recursos produtivos necessários para a prestação de serviço são fatores representativos na composição da estrutura de custo das concessionárias de distribuição de energia elétrica (Jamashb *et al.*, 2004). Para mensurar esse efeito no desempenho da concessionária, foram utilizadas três variáveis: (i) número total de transformadores (V_j); (ii) o número de subestações de distribuição (sub_j); e, (iii) Capacidade dos transformadores (MVA_j).

No contexto brasileiro, a agência de regulação classifica o porte das concessionárias de energia de acordo com a quantidade de energia distribuída. Nesse caso, são classificadas como distribuidoras de grande porte aquelas que atuam em uma área de concessão com consumo superior a 1 TW (um terawatt). Caso a demanda seja inferior a este limite, a empresa é classificada como de porte pequeno. Baseando-se no critério de classificação do porte da empresa, incluiu-se uma variável *dummy* (*porte_j*) para verificar a diferenciação no desempenho das empresas de grande porte.

O mercado brasileiro de fornecimento de energia elétrica é composto por 64 empresas. As informações referentes as empresas que compõe esse mercado estão disponíveis nas bases de dados da ANEEL (2017) e ABRADDEE (2017). Dadas as limitações nas informações necessárias para compor esta pesquisa, a amostra foi restringida a 48 concessionárias de fornecimento de energia elétrica, distribuídas ao longo de todo o território brasileiro, em um horizonte de 10 anos, entre 2003 e 2012, totalizando 480 observações. A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva acerca das variáveis elencadas anteriormente.

Tabela 1 – Estatística Descritiva para as Variáveis de Avaliação das Concessionárias de Distribuição de Energia

Variável	Un.	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<i>Input</i>						
<i>opex_j</i>	R\$	228.456,23	139.884,46	287.369,98	2.731,29	1.873.436,00
<i>Output</i>						
<i>MF_j</i>	R\$	7.065.168,75	3.376.094,47	9.439.397,10	64.090,37	45.609.295,14
<i>PNT_j</i>	%	0,18	0,10	0,23	0	1,53
<i>DEC_j</i>	h/m ²	18,52	14,04	14,99	2,79	102,00
<i>FEC_j</i>	ocorrências/m ²	15,30	10,62	12,04	2,85	64,26
<i>UC_j</i>		1.281.442,54	821.713	1.496.652,61	12.021,00	7.460.089,00
<i>net_j</i>	km	57.209,04	35.855,03	77.164,78	0	497.665,79
<i>Exógena</i>						
<i>V_j</i>	-	66.935,73	33.887,50	110.142,14	0	790.777,00
<i>sub_j</i>	-	81,19	51,23	95,60	0	410,00
<i>MVA_j</i>	W	2.249,69	1.138,75	2.853,26	0	13.245,40
<i>AT_j</i>	R\$	1.622.070,02	438.894,49	2.971.688,92	0	19.923.040,77
<i>MT_j</i>	R\$	2.144.617,99	923.788,17	2.796.047,49	11.260,99	14.139.562,34
<i>BT_j</i>	R\$	3.298.480,74	1.803.271,18	4.234.774,54	35.740,58	25.155.421,13
<i>area_j</i>	km ²	55.454,02	17.718,99	79.593,30	283,47	425.628,31
<i>decl_j</i>	%	6,94	5,15	4,40	1,13	23,30
<i>desc_j</i>	descargas/km ²	6,50	6,95	3,17	0,54	15,43
<i>veg_j</i>	km ²	15.645,05	2.404,22	22.589,93	8,49	92.192,39
<i>chuva_j</i>	mm	1.409,12	1.444,90	344,61	697,45	2.169,67

5 RESULTADOS

5.1 Primeiro Estágio

O objetivo do *Primeiro Estágio* consiste em avaliar quantitativamente o nível de eficiência sob diferentes perspectivas: Investidores, Consumidores e Governo. A avaliação do desempenho em cada dimensão articulou diferentes combinações entre as variáveis de *inputs* e *outputs*, com o objetivo de classificar as concessionárias de distribuição de energia de acordo com seu score de eficiência. Com isso, obteve-se um índice médio entre as três dimensões para comparar os parâmetros mensuráveis das concessionárias, mediante a relação entre as condições oferecidas e respostas de produtividade, saídas desencadeadas por esses operadores. A estatística descritiva da eficiência em cada dimensão está representada na Tabela 2.

Para cada dimensão avaliada, bem como para o Índice de Eficiência Combinado – que consiste na média aritmética entre os resultados sob as três perspectivas de mensuração – são apresentados, para cada ano, os seguintes parâmetros: média, mediana, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e número de unidades eficientes na amostra.

Apenas uma unidade, das 48 que compõem a amostra, foi eficiente nas três perspectivas propostas ao longo do horizonte de avaliação. Uma análise dos seus indicadores revela que essa concessionária apresentou o menor custo operacional dentre as demais do conjunto, muito embora tenha apresentado resultados razoáveis ou não satisfatórios nas demais variáveis de avaliação.

Doyle e Green (1994) explicam que, ao se considerar retornos de escala variáveis, as unidades produtivas que apresentam os menores níveis de insumos ou os maiores níveis de produtos, em pelo menos uma das variáveis, são classificadas como fracamente eficientes ou *Maverick*. Angulo-Meza e Estellita Lins (2002) acrescentam que esse tipo de eficiência não resulta necessariamente de superioridade atestada em relação a outras unidades, mas decorre da insuficiência de informações que permitam estabelecer comparações relevantes, inerente ao modelo matemático DEA que considera retornos de escala variável.

O modelo adotado considera retornos variáveis de escala e é orientado a redução dos *inputs*, beneficiando a unidade que aloca menos recursos. Mesmo não apresentando resultados satisfatórios nos demais *outputs*, a única unidade eficiente

da análise dispendeu o menor registro de *input* ao longo dos 10 anos, denotando a não relação dos investimentos realizados com o desempenho das concessionárias, conforme explicam Giannakis *et al.* (2005), Ramos-Real *et al.* (2009) e Growitsch *et al.* (2010). Isto é, o bom desempenho de tal concessionária, por exemplo, não está relacionado aos resultados positivos que essa unidade apresentou perante os Investidores, Consumidores ou o Governo, mas sim a sua baixa alocação de recursos, não retratando o real desempenho das concessionárias.

Tabela 2 – Estatística Descritiva para os escores de eficiência obtidos no *Primeiro Estágio*

Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>Investimento</i>	<i>Média</i>	22,71	26,59	26,06	28,21	28,21	24,38	22,69	25,71	25,55	20,06
	<i>Mediana</i>	6,16	6,45	7,26	6,85	6,85	4,84	4,91	4,82	4,59	4,07
	<i>Desvio padrão</i>	32,82	35,69	35,29	36,97	36,97	34,94	32,96	36,23	37,13	31,90
	<i>Mínimo</i>	0,34	0,35	0,36	0,35	0,35	0,34	0,32	0,33	0,34	0,35
	<i>Máximo</i>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<i>Eficientes</i>	6	7	7	8	8	7	6	7	8	5
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>Consumidor</i>	<i>Média</i>	32,07	24,03	32,40	32,40	26,06	31,38	22,46	28,47	23,88	27,97
	<i>Mediana</i>	10,74	6,53	9,88	9,88	8,54	8,35	7,73	10,87	6,57	8,28
	<i>Desvio padrão</i>	38,67	34,14	39,38	39,38	33,59	38,70	29,94	36,13	33,51	35,11
	<i>Mínimo</i>	0,32	0,32	0,58	0,58	0,66	0,65	0,51	0,43	0,29	0,51
	<i>Máximo</i>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<i>Eficientes</i>	9	6	8	8	5	9	4	8	5	6
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>Governo</i>	<i>Média</i>	23,89	24,98	24,89	24,67	24,43	25,63	25,36	23,12	22,98	22,33
	<i>Mediana</i>	7,92	9,64	11,27	11,12	11,37	11,93	11,06	10,07	10,58	8,40
	<i>Desvio padrão</i>	33,44	34,30	33,64	32,25	31,61	33,14	32,23	31,70	30,97	31,20
	<i>Mínimo</i>	0,33	0,46	0,49	0,52	0,56	0,61	0,48	0,41	0,44	0,42
	<i>Máximo</i>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<i>Eficientes</i>	5	5	6	4	5	5	5	5	5	5
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
<i>Combinado</i>	<i>Média</i>	26,22	25,20	27,78	28,43	26,42	27,13	23,50	25,77	24,14	23,45
	<i>Mediana</i>	9,75	9,19	12,47	14,88	11,19	12,02	11,17	12,13	8,28	9,32
	<i>Desvio padrão</i>	30,39	28,99	31,09	30,42	27,89	29,42	26,94	28,71	28,43	28,02
	<i>Mínimo</i>	0,40	0,42	0,53	0,53	0,56	0,59	0,49	0,43	0,40	0,49
	<i>Máximo</i>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	<i>Eficientes</i>	2	2	2	2	1	3	2	2	1	1

Ao analisar a estatística descritiva das avaliações em cada perspectiva, percebe-se certa homogeneidade nos resultados ao se confrontar os resultados das dimensões entre si. Todos os parâmetros comparados apresentam resultados similares: os valores das médias variam entre 20% e 30%; as medianas, entre 4% e

15%; o desvio padrão permanece em torno de 30% e 40%; os valores máximos para todas as análises é de 100%; e, os valores mínimos são inferiores a 1%.

No entanto, o baixo valor da eficiência média e mediana; o alto valor dos desvios padrões; e, ainda, a grande diferença entre os valores mínimos e máximos denotam a grande heterogeneidade presente na amostra. Isto é, as concessionárias operam sob circunstâncias exógenas e gerenciais muito distintas, levando-as a variar significativamente em sua *performance* quanto a alocação dos seus recursos, mediante a tecnologia de produção adotada.

Dadas as circunstâncias existentes, alguns fatores e características do ambiente operacional favoráveis podem levar as concessionárias a alcançar custos operacionais menores, sem que a sua função produção seja desempenhada em conformidade com o exigido pelo mercado. Os resultados apontam, portanto, que as empresas operam em ambientes distintos, uns favoráveis e outros desfavoráveis ao seu desempenho, fazendo-se necessário ajustar os dados de avaliação quanto ao ambiente operacional (Fried *et al.*, 2002).

5.2 Segundo Estágio

Para quantificar os efeitos ambientais capturados pelas folgas da variável custo operacional é utilizado o modelo de regressão estocástica, com a finalidade de distinguir os efeitos da ineficiência gerencial dos efeitos aleatórios (Avkiran; Rowlands, 2008). Seguiu-se a regressão das folgas totais dos custos operacionais sobre um conjunto de variáveis exógenas, em sua forma funcional *Cobb-Douglas*, haja vista que o problema trata de uma única variável dependente. Tal forma considera a aplicação logarítmica nas variáveis quantitativas, em um modelo de fronteira de custo estocástica, para evitar o efeito da heterocedasticidade. Os coeficientes são estimados com base no método de Máxima Verossimilhança e os resultados da estimação são dispostos na Expressão 9.

A equação disposta em (9) apresenta o valor esperado pelo efeito de cada variável exógena. Os parâmetros estimados no modelo empírico são um indicativo do efeito do ambiente sobre o desempenho das unidades produtivas. Os coeficientes positivos sugerem que o ambiente é desfavorável ao desempenho das concessionárias, visto que o aumento marginal nessas variáveis representa um incremento na variável de folga total, indicador utilizado para avaliar a ineficiência das

unidades. Por outro lado, as variáveis que apresentam coeficiente negativo indicam que tal ambiente é favorável ao desempenho, dado que o seu aumento implica na redução da variável de folga.

$$\begin{aligned}
 \ln(\bar{s}_{opex}) = & -227,643 + 0,972 \ln(are\grave{a}) - 0,759 \ln(decl) \\
 & (1,012)^* \quad (0,067)^* \quad (0,140)^* \\
 & +0,603 \ln(desc) - 0,418 \ln(veg) - 0,415 \ln(chuva) + 0,082 \ln(BT) \\
 & (0,121)^* \quad (0,074)^* \quad (0,304)^* \quad (0,210) \\
 & +0,128 \ln(MT) + 0,101 \ln(AT) + 0,045 \ln(V) - 0,945 \ln(sub) \quad (9) \\
 & (0,117) \quad (0,017)^* \quad (0,049) \quad (0,136)^* \\
 & +0,094 \ln(MVA) + 1,197 \ln(porte) + 0,123 \ln(ano) + u + v \\
 & (0,022)^* \quad (0,157)^* \quad (0,001)^*
 \end{aligned}$$

Os valores numéricos entre parênteses representam o erro padrão do parâmetro previsto da variável correspondente. A partir da razão entre o valor esperado da variável e o seu respectivo erro padrão é possível inferir sobre a significância de cada variável para o modelo. Os parâmetros sinalizados com um asterisco (*) são estatisticamente significativos com um intervalo de confiança de 99%.

É interessante notar que há uma diferença entre o desempenho das unidades de pequeno e grande porte, isto é, as empresas de pequeno porte são favorecidas. Esse resultado é coerente com o tamanho da área de concessão (*área*): o porte da empresa é proporcional à área que atua. Logo, se as concessionárias de grande porte têm maior folga, as que atuam em áreas maiores também apresentam ineficiência maior.

Outra observação relevante é quanto ao ano de referência (*ano*). Houve um aumento das folgas totais ao longo do horizonte analisado, indicando que as concessionárias apresentaram redução no seu desempenho ao longo do tempo. Esse fato pode ser explicado pelo aumento dos custos médios que as empresas apresentaram entre 2002 e 2013, muito embora não se observe uma resposta proporcional nas suas saídas.

Deve-se notar que nem todos os efeitos das variáveis exógenas escolhidas foram estatisticamente significativos. O número de transformadores de tensão (*V*) e os mercados de média e baixa tensão (*MT* e *BT*) não têm efeito significativo sobre a amostra, apesar de seu efeito econômico ser referenciado na literatura (Jamash; Pollitt, 2001; Jamash *et al.*, 2004).

A partir da equação do modelo estocástico (9), pode-se calcular o valor da folga prevista. Para o cálculo dos custos operacionais ajustados, introduzido na seção 3, descrito pela equação (7), faz-se um ajuste para cima nos custos operacionais, em que o efeito exógeno é nivelado ao pior cenário que a amostra apresenta para o ambiente operacional e para o ruído aleatório. Desse modo, o ajuste eleva a variável de *input* de todas as unidades, colocando-as em um ambiente operacional comum e desfavorável.

5.3 Terceiro Estágio

O propósito do *Terceiro Estágio* é reavaliar a eficiência das concessionárias de distribuição de energia elétrica, utilizando as mesmas especificações empregadas no *Primeiro Estágio*. No entanto, a variável custo operacional foi substituída pela variável *Custo Operacional Ajustado*, calculado no *Segundo Estágio*.

Para fim de análise dos resultados obtidos no *Terceiro Estágio*, observou-se que um grupo de concessionárias apresentou uma variação positiva no escore de eficiência, enquanto outras unidades apresentaram uma redução no escore de eficiência e as demais apresentaram pouca ou nenhuma variação.

De maneira geral, as unidades que apresentaram um aumento no desempenho obtido pelo *Terceiro Estágio* (64,6%) apresentavam os maiores níveis de custos operacionais na amostra quando foram avaliadas no *Primeiro Estágio*. Tais unidades, mesmo apresentando bons resultados nos vetores de *output*, obtiveram um desempenho ruim no *Primeiro Estágio*, pois apresentaram elevados custos operacionais. Essas concessionárias já se encontravam em um ambiente operacional desfavorável, acarretando em uma variação pequena em seus custos operacionais ao se ajustar a variável *opex* aos efeitos exógenos, resultando, portanto, em uma alta eficiência na avaliação do *Terceiro Estágio*.

Outras unidades (18,8%), por sua vez, apresentaram uma queda significativa no escore de eficiência, uma vez que foram bem avaliadas no *Primeiro Estágio*. Esse resultado foi atribuído ao baixo nível dos custos operacionais, em decorrência dessas concessionárias operarem em um ambiente operacional favorável. Para essas unidades, no *Segundo Estágio*, o efeito exógeno na variável custos operacionais resultou em uma grande variação, haja vista que o valor previsto da ineficiência dos custos sobre as variáveis exógenas é muito baixo. Como esse efeito previsto é

comparado ao valor máximo dentre as observações, essa diferença acarretou em um acréscimo alto ao se ajustar os custos operacionais de tais concessionárias. Logo, se o bom desempenho dessas unidades no *Primeiro Estágio* devia-se ao baixo nível da variável *opex*, no *Terceiro Estágio* o escore de eficiência diminuiu significativamente, já que os custos operacionais aumentaram quando foi ajustado ao ambiente operacional.

Por fim, outras distribuidoras obtiveram pouca ou nenhuma variação no desempenho do escore de eficiência combinado (16,7%). Apesar de haver diferença entre o efeito exógeno máximo e o efeito exógeno observado, o ajuste na variável *opex* teve pouca influência na reavaliação da eficiência realizada no *Terceiro Estágio*, tal que os escores de eficiência combinado mantiveram-se semelhantes nas duas avaliações. A estatística descritiva da eficiência em cada dimensão está representada na Tabela 3.

Tabela 3 – Estatística Descritiva para os escores de eficiência obtidos no terceiro estágio

Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Investimento	Média	60,5	58,7	65,8	64,8	62,7	56,9	55,1	51,5	43,2	60,2
	Mediana	60,6	59,8	60,6	55,6	55,0	46,7	41,0	34,0	29,8	51,3
	Desvio padrão	20,1	21,8	13,3	18,5	18,5	21,2	25,7	29,7	26,9	18,9
	Mínimo	23,0	13,8	54,1	48,2	46,5	39,5	31,6	24,2	20,6	42,3
	Máximo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Eficientes	4	4	4	6	6	6	7	7	7	4
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumidor	Média	61,6	50,4	74,8	67,0	69,6	66,3	52,0	48,3	49,7	45,5
	Mediana	67,1	53,1	75,0	63,5	67,4	63,0	48,4	43,0	46,7	47,0
	Desvio padrão	28,0	31,8	17,2	16,3	14,6	19,6	18,1	21,2	22,1	23,7
	Mínimo	19,0	9,1	54,1	48,2	46,5	39,6	31,9	24,2	20,6	10,5
	Máximo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Eficientes	4	5	8	5	3	7	2	2	3	3
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Governo	Média	34,2	25,7	64,1	59,1	58,1	52,2	45,7	39,3	36,5	43,1
	Mediana	27,5	17,7	61,1	55,8	54,6	49,0	42,1	35,3	31,6	40,1
	Desvio padrão	20,3	22,9	11,2	12,4	13,0	14,7	16,5	18,1	19,1	16,1
	Mínimo	19,0	9,1	54,2	48,3	46,4	39,2	31,5	24,2	20,6	28,8
	Máximo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	Eficientes	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
Modelo	Parâmetro	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Combinado	Média	52,1	44,9	68,2	63,6	63,5	58,5	50,9	46,4	43,1	49,6
	Mediana	51,0	40,7	66,5	59,9	60,3	52,7	46,8	44,6	38,6	46,6
	Desvio padrão	16,5	18,8	11,1	12,0	11,6	14,2	15,4	16,2	17,5	14,1
	Mínimo	28,0	17,2	54,7	48,8	47,1	39,6	32,0	24,2	20,6	27,4
	Máximo	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95,3

De forma análoga ao observado no *Primeiro Estágio* (Tabela 2, Seção 5.1), a avaliação de eficiência obtida no *Terceiro Estágio* exprime certa homogeneidade nos resultados ao se comparar as dimensões entre si. Todos os parâmetros comparados apresentam resultados similares: (i) os valores das médias variam entre 40% e 70%; (ii) as medianas, entre 30% e 60%; (iii); o desvio padrão está em torno de 12% e 25%; (iv) os valores máximos para todas as análises é de 100%; e, (v) os valores mínimos são superiores a 20%.

Apesar de ainda haver um desvio padrão elevado e uma diferença grande entre os escores mínimos e máximos, é possível identificar que houve uma redução na dispersão dos indicadores de performance ao se comparar os resultados do *Primeiro* com o *Terceiro Estágio*. Ao confrontar os resultados dispostos nas Tabela 2 e Tabela 3, constata-se que: (i) os valores médios e das medianas aumentaram; (ii) os desvios padrões diminuíram; (iii) os valores mínimos aumentaram, reduzindo a diferença entre os valores mínimos e máximos; e, (iv) o número de unidades eficientes aumentou.

Em consonância com os resultados de Hsu e Hsueh (2009), o aumento da eficiência técnica indica que, sem o controle do ambiente operacional, a penalidade sofrida pelas empresas que operarem sob circunstâncias desfavoráveis foi superior ao benefício para aquelas que operam sob circunstâncias favoráveis. Após controlar os efeitos exógenos, o benefício dado às empresas que antes se encontravam em uma situação desfavorável, passa a superar o decréscimo na eficiência das empresas que foram penalizadas por operar em uma conjuntura mais conveniente.

Quanto a redução da dispersão dos escores de eficiência, Fried *et al.* (2002) explicam que as empresas operando em um ambiente favorável apresentam um desvio padrão enviesado para cima. O uso do *Terceiro Estágio*, portanto, reduz esse viés, fazendo com que os resultados da eficiência sejam menos dispersos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão tarifária é uma das principais atribuições do órgão regulador de energia. A alta complexidade dessa atividade é retratada pela periódica alteração nos procedimentos adotados para definição de custos eficientes, bem como nos diversos estudos encontrados na literatura. Diferentes abordagens têm sido discutidas e cada

metodologia tem suas vantagens e desvantagens, não havendo uma estratégia comum para avaliá-los.

O arcabouço teórico elucidada sobre a necessidade de incluir o impacto dos fatores exógenos sobre o desempenho das concessionárias (Muñiz, 2002), buscando entender como o efeito das adversidades e das características do ambiente operacional externo influenciam a eficiência técnica das empresas de distribuição de energia (Saleem, 2007). Diante desse contexto, a presente pesquisa estabeleceu uma metodologia que incorpora os efeitos ambientais na avaliação direta do desempenho das concessionárias de fornecimento de energia. Para conduzir esta pesquisa, foi adotada uma integração do modelo DEA com SFA, em um procedimento que estabelece três estágios para corrigir a eficiência em termos dos efeitos exógenos.

Os resultados encontrados no *Primeiro Estágio* indicaram um favorecimento as unidades que apresentaram os menores níveis de custo operacional, denotando a não relação entre os investimentos realizados com o desempenho das concessionárias. Isto é, o bom desempenho das unidades não necessariamente está atrelado ao nível de satisfação perante os Investidores, Consumidores ou o Governo. Tais resultados não indicam necessariamente a superioridade atestada em relação a outras unidades, mas sim a sua baixa alocação de recursos.

Considerando a heterogeneidade nas características das áreas de concessão em que as empresas distribuidoras estão instaladas e as diferenças regionais existentes no Brasil, o *Segundo Estágio* incorporou a influência de tais características nos custos operacionais. Como resultado dessa etapa, os custos operacionais foram elevados, colocando as distribuidoras em um mesmo patamar competitivo ao ajustá-los de acordo com o ambiente operacional menos favorável para que fosse feita uma reavaliação da eficiência no *Terceiro Estágio*, utilizando como variável de *input* o custo operacional ajustado. As demais variáveis e especificações utilizadas no modelo DEA do *Terceiro Estágio* são as mesmas usadas no *Primeiro Estágio*. Os resultados obtidos no *Terceiro Estágio* divergiram consideravelmente dos que foram encontrados anteriormente, no *Primeiro Estágio*.

A alta dispersão entre os escores de eficiência obtidos no *Primeiro Estágio* sugere a presença de ambientes operacionais distintos, favorecendo certas unidades a alcançar um alto índice de eficiência técnica, sem que na verdade apresentem boa resposta ao mercado. Em contrapartida, tais empresas que são favorecidas, passam então a receber penalizações, ao incluir o efeito do ambiente e do ruído estatístico,

reduzindo seus escores de eficiência, enquanto as empresas desfavorecidas pelo seu ambiente operacional são beneficiadas na nova avaliação, resultando em um aumento na sua eficiência técnica.

O resultado final, que diferencia o desempenho obtido no *Primeiro e Terceiro Estágio*, é a redução da heterogeneidade da amostra. O ajuste realizado no segundo estágio mostrou-se satisfatório, à medida que diminuiu o grau de dispersão dos resultados, bem como elevou a eficiência média das concessionárias. Deve-se ressaltar, portanto, a importância de se incluir os fatores exógenos no cálculo direto da eficiência ao utilizar técnicas de *benchmarking* na regulação do setor de distribuição de energia, tal que se garanta uma avaliação real da eficiência operacional das concessionárias.

REFERÊNCIAS

ABRADEE. *Relatório SIG: continuidade do fornecimento (DEC/FEC)*. Associação Brasileira dos Distribuidores de Energia Elétrica, Brasil, 2013.

AIGNER, D.; LOVELL, C. A. K.; SCHMIDT, P. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, v. 6, n. 1, p. 21-37, 1977. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304407677900525> . Acesso em: 10 jan. 2024.

ANEEL. **Consulta pública nº 11/2013**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasil, 2013. Disponível em: https://antigo.aneel.gov.br/web/quest/consultas-publicas-antigas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=34456&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jsPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp . Acesso em: 26 jun. 2023.

ANGULO-MEZA, L.; ESTELLITA LINS, M. P. Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis. *Annals of Operations Research*, v. 116, p. 225-242, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021340616758> . Acesso: em 6 jan. 2024.

AVKIRAN, N. K.; ROWLANDS, T. How to better identify the true managerial performance: state of the art using DEA. *Omega*, v. 36, p. 317-324, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030504830600017X>. Acesso em: 7 jan. 2024.

BANKER, R. D.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030504830600017X>. Acesso em: 7 jan. 2024.

BLÁZQUEZ-GÓMEZ, L.; GRIFELL-TATJÉ, E. Evaluating the regulator: winners and losers in the regulation of Spanish electricity distribution. **Energy Economics**, v. 33, p. 807-815, 2011. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2631725>. Acesso em: 1 nov. 2023.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 1, p. 429-444, 1978. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221778901388>. Acesso em: 15 dez. 2023.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data envelopment analysis (DEA): thirty years on. **European Journal of Operational Research**, v. 192, p. 1-17, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221708001586>. Acesso em: 15 dez. 2023.

COOK, W. D.; TONE, K.; ZHU, J. Data envelopment analysis: prior to choosing a model. **Omega**, v. 44, p. 1-4, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048313000947>. Acesso em: 7 mar. 2024.

COOPER, W.; SEIFORD, L. M.; TONE, K. **Introduction to data envelopment analysis and its uses: with DEA-Solver software and references**. New York: Springer, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048313000947>. Acesso em: 3 fev. 2024.

CORDERO, J. M.; PEDRAJA, F.; SANTÍN, D. Alternative approaches to include exogenous variables in DEA measures: a comparison using Monte Carlo. **Computers & Operations Research**, v. 36, p. 2699-2706, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054808002438>. Acesso em: 3 fev. 2024.

DOYLE, J. R.; GREEN, R. H. Efficiency and cross-efficiency in DEA: derivations, meanings and uses. **Journal of the Operational Research Society**, v. 45, p. 567-578, 1994. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2584392>. Acesso em: 26 jan. 2024.

DYSON, R. G. *et al.* Pitfalls and protocols in DEA. **European Journal of Operational Research**, v. 132, p. 245-259, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221700001491>. Acesso em: 26 jan. 2024.

EDVARDBSEN, D. F.; FØRSUND, F. R. International benchmarking of electricity distribution utilities. **Resource and Energy Economics**, v. 25, p. 353-371, 2003.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928765503000459>. Acesso em: 24 jan. 2024.

ESTELLITA LINS, M. P. *et al.* Integrating the regulatory and utility firm perspectives, when measuring the efficiency of electricity distribution. **European Journal of Operational Research**, v. 181, p. 1413-1424, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706001895>. Acesso em: 24 jan. 2024.

FRIED, H. O. *et al.* Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis. **Journal of Productivity Analysis**, v. 17, p. 157-174, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1013548723393>. Acesso em: 1 fev. 2024.

FRIED, H. O.; SCHMIDT, S. S.; YAISAWARNG, S. Incorporating the operating environment into a nonparametric measure of technical efficiency. **Journal of Productivity Analysis**, v. 12, p. 249-267, 1999. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007800306752>. Acesso em: 1 fev. 2024.

GIANNAKIS, D.; JAMASB, T.; POLLITT, M. Benchmarking and incentive regulation of quality of service: an application to the UK electricity distribution networks. **Energy Policy**, v. 33, p. 2256-2271, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142150400151X>. Acesso em: 1 fev. 2024.

GROWITSCH, C. *et al.* Social cost-efficient service quality: integrating customer valuation in incentive regulation. **Energy Policy**, v. 38, p. 2536-2544, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510000042>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HANEY, A. B.; POLLITT, M. G. Efficiency analysis of energy networks: an international survey of regulators. **Energy Policy**, v. 37, n. 12, p. 5814-5830, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509006351>. Acesso em: 25 jan. 2024.

HSU, F. M.; HSUEH, C. C. Measuring relative efficiency of government-sponsored R&D projects: a three-stage approach. **Evaluation and Program Planning**, v. 32, p. 178-186, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19056123/>. Acesso em: 15 nov. 2023.

JAMASB, T.; NILLESEN, P.; POLLITT, M. Strategic behaviour under regulatory benchmarking. **Energy Economics**, v. 26, p. 825-843, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988304000404>. Acesso em: 12 dez. 2023.

JAMASB, T.; POLLITT, M. Benchmarking and regulation: international electricity experience. **Utilities Policy**, v. 9, p. 107-130, 2001. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178701000108>. Acesso em: 2 mai. 2023.

KUOSMANEN, T.; SAASTAMOINEN, A.; SIPILAINEN, T. What is the best practice for benchmark regulation of electricity distribution? Comparison of DEA, SFA and StoNED methods. **Energy Policy**, v. 61, p. 740-750, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513004461>. Acesso em: 2 mai. 2023.

LIU, J. S. *et al.* Data envelopment analysis 1978–2010: a citation-based literature survey. **Omega**, v. 41, p. 3-15, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048312000291>. Acesso em: 2 mai. 2023.

MEEUSEN, W.; VAN DEN BROECK, J. Efficiency estimation from Cobb-Douglas production functions with composed error. **International Economic Review**, v. 8, p. 435-444, 1977. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2525757>. Acesso em: 1 nov. 2023.

MULLARKEY, S. *et al.* A framework for establishing the technical efficiency of Electricity Distribution Counties (EDCs) using data envelopment analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 94, p. 112-123, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415000618>. Acesso em: 27 abr. 2024.

MUÑIZ, M. A. Separating managerial inefficiency and external conditions in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 143, p. 625-643, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701003447>. Acesso em: 27 abr. 2024.

OMRANI, H.; BEIRAGH, R. G.; KALEIBARI, S. S. Performance assessment of Iranian electricity distribution companies by an integrated cooperative game data envelopment analysis principal component analysis approach. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 64, p. 617-625, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061514004803>. Acesso em: 4 jul. 2023.

PÉREZ-REYES, R.; TOVAR, B. Measuring efficiency and productivity change in the Peruvian electricity distribution companies after reforms. **Energy Policy**, v. 37, n. 6, p. 2249-2261, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509000731>. Acesso em: 4 jul. 2023.

PESSANHA, J. F. M.; SOUZA, R. C.; LAURENCE, L. C. Um modelo de análise envoltória de dados para estabelecimento de metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 1, p. 51-83, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pope/a/76GzxxmqdjfLh9bQfWNccNK/>. Acesso em: 30 jun. 2024.

RAMOS-REAL, F. J. *et al.* The evolution and main determinants of productivity in Brazilian electricity distribution 1998–2005: an empirical analysis. **Energy Economics**, v. 31, p. 298-305, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988308001679>. Acesso em: 30 jun. 2024.

RESENDE, M. Relative efficiency measurement and prospects for yardstick competition in Brazilian electricity distribution. **Energy Policy**, v. 30, p. 637-647, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142150100132X>. Acesso em: 2 set. 2023.

SALEEM, M. Benchmarking and regulation for the electricity distribution sector in Pakistan: lessons for developing countries. **South Asia Economic Journal**, v. 8, p. 117-138, 2007. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/139156140600800107>. Acesso em: 12 ago. 2023.

SANTOS, S. P.; AMADO, C. A. F.; ROSADO, J. R. Formative evaluation of electricity distribution utilities using data envelopment analysis. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, p. 1298-1319, 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1057/jors.2010.66>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SEIFORD, L. M.; ZHU, J. Modelling undesirable factors in efficiency evaluation. **European Journal of Operational Research**, v. 142, p. 16-20, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701002934>. Acesso em: 27 ago. 2023.

SIMAB, M.; HAGHIFAM, M. R. Quality performance based regulation through designing reward and penalty scheme for electric distribution companies. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 43, p. 539-545, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151200333X>. Acesso em: 9 jun. 2024.

PEREIRA DE SOUZA, M. V. P. *et al.* The cost efficiency of the Brazilian electricity distribution utilities: a comparison of Bayesian SFA and DEA models. **Mathematical Problems in Engineering**, 2010, artigo 2010a.

SOUZA, M. V. P.; SOUZA, R. C.; PESSANHA, J. F. M. Custos operacionais eficientes das distribuidoras de energia elétrica: um estudo comparativo dos modelos DEA e SFA. **Gestão & Produção**, v. 17, n. 4, p. 653-667, 2010b. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2010/593059>. Acesso em: 8 abr. 2023.

TSCHAFFON, P. B.; MEZA, L. A. Assessing the efficiency of the electric energy distribution using data envelopment analysis with undesirable outputs. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, Anais [...]**, v. 12, n. 6, p. 1027-1035, 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6893996/>. Acesso em: 21 mar. 2024.

WAGNER, J. M.; SHIMSHAK, D. G. Stepwise selection of variables in data envelopment analysis: procedures and managerial perspectives. **European Journal**

of **Operational Research**, v. 180, p. 57-67, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221706002839>. Acesso em: 8 fev. 2023.

YADAV, V. K. *et al.* A novel power sector restructuring model based on data envelopment analysis. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 44, p. 629-637, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512004498>. Acesso em: 10 mar. 2024.

YADAV, V. K.; PADHY, N. P.; GUPTA, H. O. A micro level study of an Indian electric utility for efficiency enhancement. **Energy**, v. 35, p. 4053-4063, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210003257>. Acesso em: 12 mar. 2022.

Biografia dos Autores

Luís Filipe Azevedo de Oliveira

Possui graduação e mestrado em Engenharia de Produção pela UFRN. Atualmente é professor assistente do Centro Universitário Ibmec e aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Atua na área de Pesquisa Operacional, com foco em avaliação de eficiência e benchmarking. Mestre em Engenharia de Produção, UFRN.



Artigo recebido em: 13/03/2024 e aceito para publicação em: 25/02/2025
DOI: <https://doi.org/10.4488/1676-1901.v25i2.5221>