

A PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO NA ENGENHARIA ELÉTRICA

Jancer Destro
João Dallamuta
Marcelo Granza
(Organizadores)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Jancer Destro
João Dallamuta
Marcelo Granza
(Organizadores)

A produção do Conhecimento na Engenharia Elétrica

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de
Oliveira Diagramação: Karine de Lima
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof.^a Dr.^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof.^a Dr.^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof.^a Dr.^a Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.^a Dr.^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof.^a Dr.^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof.^a Dr.^a Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof.^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
P964	A produção do conhecimento na engenharia elétrica [recurso eletrônico] / Organizadores Jancer Destro, João Dallamuta, Marcelo Granza. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-365-1 DOI 10.22533/at.ed.651192905 1. Engenharia elétrica – Pesquisa – Brasil. I. Destro, Jancer. II. Dallamuta, João. III. Granza, Marcelo. CDD 623.3
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná - Brasil

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX. Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é portando pesquisar em uma gama enorme de áreas, subáreas e abordagens de uma engenharia que é onipresente em praticamente todos os campos da ciência e tecnologia.

Neste livro temos uma diversidade de temas, níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos, científicos e humanos. Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura.

Jancer Destro
João Dallamuta
Marcelo Granza

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
A TENDÊNCIA DE CRESCIMENTO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Frank Wesley Rodrigues Joel Adelaide Medeiros Kaique Rhuan de Azevedo Albuquerque Diego Henrique da Silva Cavalcanti Rafael Pereira de Medeiros Jean Torelli Cardoso Hugo Rojas Espinoza	
DOI 10.22533/at.ed.6511929051	
CAPÍTULO 2	13
AVALIAÇÃO ENERGÉTICA PREDIAL DO BLOCO I DO CENTRO UNIVERSITÁRIO DE PATOS DE MINAS	
Bruna Maria Pereira de Sousa	
DOI 10.22533/at.ed.6511929052	
CAPÍTULO 3	30
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO EM ESTABELECIMENTO DE ENSINO LOCALIZADO EM TERESINA-PI	
Cristiana de Sousa Leite Emerson Ribeiro Rodrigues Hericles Araújo Lima Marcus Vinicius Sampaio de Sousa	
DOI 10.22533/at.ed.6511929053	
CAPÍTULO 4	40
TARIFA BINÔMIA PARA CONSUMIDORES DO GRUPO B: UMA PROPOSTA ADERENTE AO ATUAL ARCABOUÇO REGULATÓRIO BRASILEIRO	
Lorena Cardoso Borges dos Santos Cristiano Silva Silveira Rafael de Oliveira Gomes Carlos Cesar Barioni de Oliveira Denis Antonelli Jairo Eduardo de Barros Alvares	
DOI 10.22533/at.ed.6511929054	
CAPÍTULO 5	52
NOSTANDBY – ELIMINAÇÃO DO CONSUMO STAND BY EM APARELHOS ELETRÔNICOS	
Tiago Terto de Oliveira Marcony Esmeraldo de Melo Odailton Silva de Arruda Lucas Félix Magalhães Eveni Pereira Cosme	
DOI 10.22533/at.ed.6511929055	

CAPÍTULO 6	65
RESSARCIMENTO DE DANOS ELÉTRICOS CARIMBO DO TEMPO COMO FERRAMENTA PARA MITIGAÇÃO DO RISCO DE TRANSGRESSÃO DE PRAZOS REGULADOS	
Alex Calvo Vieira Neiva Beatriz Ferreira Silva Vicentin	
DOI 10.22533/at.ed.6511929056	
CAPÍTULO 7	72
PROJETO DE OUVIDORIA DA DISTRIBUIÇÃO DA EDP SÃO PAULO – ANÁLISE DE DEMANDA DE MAIOR IMPACTO	
Márcia Lúcia Lopes de Souza Jesus	
DOI 10.22533/at.ed.6511929057	
CAPÍTULO 8	80
SOOA – SISTEMÁTICA OTIMIZADA DE OPERAÇÃO DE ATIVOS	
Edcarlos Andrade Amorim Lorenzo Zandonade Carnielli Mikaelle Lucindo do Nascimento	
DOI 10.22533/at.ed.6511929058	
CAPÍTULO 9	89
SISTEMA GESTOR DE AJUSTES DE MEDIÇÕES DE FRONTEIRA – COPEL DISTRIBUIÇÃO	
Frank Toshioka	
DOI 10.22533/at.ed.6511929059	
CAPÍTULO 10	102
FERRAMENTA PARA AUXILIAR EQUIPE DE CAMPO NA LOCALIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE LINHAS DE ALTA TENSÃO	
Mariana Spadetto Leão Helion da Silva Porcari	
DOI 10.22533/at.ed.65119290510	
CAPÍTULO 11	111
APLICAÇÃO DE TECNOLOGIA PRÉ-FABRICADA EM SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO COMPACTAS DA ELEKTRO	
José Augusto Ferraz Gabriel Vinicius Caciatore de Souza	
DOI 10.22533/at.ed.65119290511	
CAPÍTULO 12	119
EFICIÊNCIA DAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LIMITES AOS PESOS PARA DEA E REA	
Lorena Cardoso Borges dos Santos Rafael de Oliveira Gomes Luana Medeiros Marangon Lima Anderson Rodrigo de Queiroz Giulia Oliveira Santos Medeiros José Wanderley Marangon Lima	
DOI 10.22533/at.ed.65119290512	

CAPÍTULO 13	133
ANÁLISE E PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS NA ESTIMAÇÃO DO TEMPO DE TRÂNSITO ULTRASSÔNICO BASEADO NO MÉTODO DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO VISANDO A MEDIÇÃO DE VELOCIDADE DO VENTO	
Felipe Augusto Oliveira dos Santos Juan Moises Mauricio Villanueva	
DOI 10.22533/at.ed.65119290513	
CAPÍTULO 14	149
DIVERSIDADE E INCLUSÃO: GESTÃO DE PESSOAS COM DEFICIÊNCIA NO AMBIENTE DO TRABALHO	
Ana Paula Pinheiro de Azambuja Amaral Ligia Regina Pauli Regina Maria Joppert Lopes Yvy Karla Bustamante Abbade	
DOI 10.22533/at.ed.65119290514	
CAPÍTULO 15	161
ROTAS INTELIGENTES - UTILIZAÇÃO DE GPS DE NAVEGAÇÃO PARA GEOLOCALIZAÇÃO DE ATIVOS E CONSUMIDORES DA ENERGISA A PARTIR DE PONTOS DE INTERESSE _POI_	
Cleyson Cloves do Carmo	
DOI 10.22533/at.ed.65119290515	
CAPÍTULO 16	164
ENGAJAMENTO DE ESTUDANTES DE ESCOLAS PÚBLICAS NA ÁREA DAS GRANDES ENGENHARIAS: UMA PROPOSTA DE MOTIVAÇÃO E REDUÇÃO DA DISPARIDADE NA PRESENÇA DE ESTUDANTES DE ESCOLAS PÚBLICAS NO ENSINO SUPERIOR	
Anyelle Keila F. de Queiroz Rayanna Maria de O. Francklim Raimundo Carlos S. Freire	
DOI 10.22533/at.ed.65119290516	
SOBRE OS ORGANIZADORES	174

EFICIÊNCIA DAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO LIMITES AOS PESOS PARA DEA E REA

Lorena Cardoso Borges dos Santos

Companhia Paulista de Força e Luz, Gerência de
Regulação Estratégica
Campinas – SP

Rafael de Oliveira Gomes

Companhia Paulista de Força e Luz, Gerência de
Regulação Estratégica
Campinas – SP

Luana Medeiros Marangon Lima

Marangon Engenharia LTDA
Itajubá – MG

Anderson Rodrigo de Queiroz

Marangon Engenharia LTDA
Itajubá – MG

Giulia Oliveira Santos Medeiros

Universidade Federal de Itajubá, Instituto de
Sistemas Elétricos e Energia
Itajubá – MG

José Wanderley Marangon Lima

Marangon Engenharia LTDA
Itajubá – MG

RESUMO: A revisão tarifária periódica é o principal mecanismo de definição das tarifas de uso do sistema de distribuição de energia elétrica. No Brasil, a metodologia utilizada para obtenção do custo operacional (OPEX) regulatório é a técnica de Data Envelopment Analysis (DEA). Esse trabalho procura analisar o modelo DEA quando incorpora os limites aos

pesos inseridos por ocasião do quarto ciclo de revisão tarifária. Esta análise faz uso do Ratio-based Efficiency Analysis (REA) como uma ferramenta para mensurar o efeito da eficácia destes pesos. Os dados das empresas de distribuição do são utilizados para exemplificar e sugerir melhorias.

PALAVRAS-CHAVE: Distribuição de energia elétrica; benchmarking; DEA; limites aos pesos; REA.

ABSTRACT: The periodic tariff revision is the main mechanism for the definition of tariffs for the use of the electricity distribution system. In Brazil, the methodology used to obtain regulatory operational cost (OPEX) is the Data Envelopment Analysis (DEA) technique. This paper seeks to analyze the DEA model when it incorporates the limits to the weights inserted in the fourth tariff revision cycle. This analysis makes use of Ratio-based Efficiency Analysis (REA) as a tool to measure the effectiveness of these weights. The distribution companies data are used to exemplify and suggest improvements.

KEYWORDS: Distribution of electricity; benchmarking; DEA; weights limits; REA.

1 | INTRODUÇÃO

A RGE Sul possui em andamento o projeto de P&D intitulado “Metodologia DEA e REA como Indicador da Eficiência de Concessionárias de Distribuição” (Projeto P&D ANEEL – PA3027), que está sendo executado pelas entidades MC&E e Fupai. O presente trabalho apresenta os resultados parciais do projeto, que teve início em julho de 2017 e tem seu término previsto para junho de 2019.

O interesse pelo estudo da regulação econômica não é recente e visa estabelecer as tarifas que serão aplicadas aos consumidores e garantir que esses serviços sejam realizados com boa qualidade, confiabilidade e continuidade (Brasil, 1996; Sales, 2011). No caso da distribuição, os custos aos quais as concessionárias farão jus a uma receita, são divididos em duas parcelas: a Parcela A e a Parcela B. A Parcela A é constituída pelos custos “não gerenciáveis”, ou seja, ela é formada pela parcela dos custos que não estão sob o controle das distribuidoras: aquisição de energia, conexão e uso do sistema de transmissão e encargos setoriais. Já a Parcela B é constituída pelos custos “gerenciáveis”, que são divididos em custos de administração, operação e manutenção (CAOM) e custos anual dos ativos (CAA). O CAA representa a remuneração dos investimentos e depreciação associados aos ativos elétricos da concessão, enquanto o CAOM representa os custos operacionais e receitas irre recuperáveis vinculadas ao serviço de distribuição de energia (ANEEL, 2015; Ferreira, 2003) e é tratado no decorrer do artigo como OPEX.

Toda distribuidora, para assumir o fornecimento de energia em uma região, deve assinar um contrato de concessão. Neste contrato fica estabelecido que ela deve cumprir um conjunto de regras emanadas pelo poder concedente e pela agência reguladora. Além disto, para viabilizar a concessão, a concessionária passa por processo de revisão ordinária periódica e, se necessário, revisão extraordinária de suas tarifas, além dos reajustes tarifários anuais. A Revisão Tarifária Periódica (RTP) é realizada com o intuito de analisar o comportamento dos custos das distribuidoras e recalcular a receita total (Parcela A + Parcela B). O processo de RTP ocorre em períodos de 4 anos em média, variando conforme o contrato de concessão firmado. No reposicionamento tarifário é estabelecida a Receita Requerida da distribuidora, mediante o seu nível eficiente dos custos operacionais, remuneração de investimentos e na definição da Componente T que associa às metas de eficiência individuais (Xavier, 2015).

Para o reposicionamento tarifário é necessário analisar o quão bem as distribuidoras vêm utilizando suas receitas requeridas. Isto é feito por meio de análises de eficiência (Jamasb e Pollitt, 2003; Zakaria e Noreen, 2016; Filippinia et al., 2014). O Brasil se encontra no 4º ciclo de revisão tarifária periódica (CRTP) e, a cada ciclo, a metodologia de análise de eficiência das distribuidoras tem sido aprimorada pela ANEEL.

Basicamente, no 1º e 2º CRTP foi utilizada a metodologia de empresa de referência (ER) para definição da eficiência das distribuidoras. No 3º CRTP (3CRTP)

para definição do ponto de partida foram utilizados resultados da ER do 2CRTP, já para definição da meta de custos operacionais utilizou-se uma análise em dois estágios: no primeiro estágio foi feita a média dos resultados obtidos por dois modelos de *benchmarking* (*Data Envelopment Analysis* – DEA e *Corrected Ordinary Least Square* – COLS) considerando apenas variáveis tradicionais de produto e insumo; o segundo estágio realiza uma regressão dos escores de eficiência obtidos pelo primeiro estágio contra variáveis externas à gestão da empresa – variáveis ambientais (Xavier, 2015). A partir do 4º CRTP (4CRTP), passou-se a utilizar somente o modelo DEA com alguns aprimoramentos. Uma das modificações no DEA foi a incorporação das restrições de limites aos pesos (Podinovsky, 2004) das variáveis de controle que estabelecem a proporção ótima de cada “input” com o “output” do modelo.

O Brasil é um país de dimensões continentais. As áreas de concessão das distribuidoras diferem em características geográficas, demográficas e perfis de consumo, tais diferenças refletem nos custos de operação e manutenção das redes. Pode-se, assim, afirmar que o conjunto de distribuidoras analisado para determinação da fronteira de eficiência é heterogêneo. No 4CRTP, a ANEEL adotou limites aos pesos para mitigação de erros devido a heterogeneidade na comparação das distribuidoras, visto que todas as empresas são analisadas em um mesmo conjunto, porém nenhuma metodologia de cálculo para a definição desses limites foi apresentada, gerando insatisfações por parte dos agentes.

Os questionamentos quanto a esses limites foram destaque na Audiência Pública nº 023/2014 (AP 023/2014), em que foi definida a metodologia para o 4CRTP (ANEEL, 2015b). Nela, algumas empresas contribuíram com a apresentação de metodologias para a definição dos limites aos pesos. Apesar disso a ANEEL decidiu manter os limites propostos. Apesar do indeferimento da proposta apresentada nas contribuições, o regulador afirmou na ocasião que poderia rever a metodologia futuramente (ANEEL, 2015b).

Apesar dos avanços ocorridos ao longo dos ciclos de revisões metodológicas, aperfeiçoamentos podem ser realizados com intuito de mitigar a heterogeneidade do conjunto de distribuidoras, como em (Xavier, 2015; Agrella e Brea-Solís, 2017). Neste contexto, esse trabalho avalia a sensibilidade dos resultados obtidos no 4CRTP com o DEA e propõe a utilização de outra metodologia de *benchmarking* para a análise e comparação da homogeneidade entre dados de conjuntos, o *Ratio-based Efficiency Analysis* (REA) (Salo e Punkka, 2011). São verificadas as influências da adoção de limites aos pesos na determinação da eficiência das distribuidoras e se essa adoção é adequada para o caso brasileiro.

2 | DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

A. Metodologia do 4CRTP

A AP 023/2014 teve como resultado a metodologia utilizada no 4CRTP e definiu que o DEA seria utilizado como método de análise de eficiência para definição dos custos operacionais eficientes das distribuidoras, a partir de maio de 2015. O método DEA é uma técnica de *benchmarking* baseada em programação linear e no conceito de fronteira de eficiência. A fronteira de eficiência busca identificar o melhor resultado dentro de uma amostra de unidades tomadoras de decisão (*Decision Making Units* – DMUs), que utilizam os mesmos insumos e geram produtos semelhantes (Xavier, 2015). Para o segmento de distribuição de energia, considera-se como insumo o OPEX e como produtos são considerados dois grupos: os produtos efetivos da distribuidora e os produtos de qualidade do serviço. Como produtos efetivos das distribuidoras são adotados comprimento de rede de alta tensão, distribuição aérea e subterrânea, em quilômetros, mercado ponderado em MWh e número de unidades consumidores. Como produtos da qualidade do serviço são utilizados consumidor hora interrompido (CHI) em horas e perdas não técnicas em MWh, que, por serem considerados produtos negativos, reduzem a produtividade das distribuidoras (ANEEL, 2015b; Mesquita, 2017).

O modelo DEA possui dois tipos de orientação: a orientação ao insumo e a orientação ao produto. Na orientação ao insumo, as comparações entre as empresas são feitas pelos insumos utilizados, para um valor de produto fixo. Já na orientação ao produto, as comparações são pelos produtos possíveis para valores de insumos fixos. A escolha da orientação é baseada em quais variáveis são consideradas gerenciáveis. Na avaliação das distribuidoras, adota-se a orientação ao insumo, pois se considera que os custos operacionais apresentam um maior poder de atuação pelas empresas (Anjos et al., 2010). As empresas são comparadas pelo seu OPEX, quantidade de ativos e qualidade de atendimento aos consumidores de sua área de concessão. A fronteira de eficiência é formada pelas DMUs com a melhor relação entre produtos e insumos (Mello et al., 2005; Medeiros et al., 2015). Essa relação resulta em diferentes tipos de função de produção: retornos constantes de escala (CRS), retornos não decrescentes de escala (NDRS), retornos não crescentes de escala (NIRS) e retornos variáveis de escala (VRS) (Medeiros, 2018). O tipo de retorno adequado varia com a aplicação (Gavgani e Zohrehbandian, 2014). No caso da avaliação dos custos operacionais das distribuidoras de energia elétrica, decidiu-se por adotar o modelo NDRS, conforme modelo (1).

$$w_p = \max_{u,v} \sum_{j \in J} v_j y_j^p + \varphi$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{j \in J} v_j y_j^k - \sum_{i \in I} u_i x_i^k + \varphi \leq 0 \quad \forall k \in K \\
& \sum_{i \in I} u_i x_i^p = 1 \\
& \varphi \geq 0, v_i, u_j \geq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J
\end{aligned} \tag{1}$$

Onde p é a DMU em análise; I e J são os conjuntos de insumos e produtos respectivamente; K é o conjunto de DMUs; u_i e v_j são as variáveis de decisão, ou seja, os pesos do insumo i e produto j ; x_i^k e y_j^k são os valores do insumo i e do produto j relativos à DMU k ; w_p é a eficiência da DMU p ; e φ é o retorno de escala, neste caso não decrescente.

Sabendo que as perdas e a qualidade impactam negativamente nos custos das distribuidoras, o regulador optou por utilizar essas duas variáveis como produtos negativos, pois a utilização de produtos negativos é equivalente a adoção de insumos sob os quais não há possibilidade de redução (ANEEL, 2015b; Mesquita, 2017). Considerando o modelo (1), incluir as variáveis de qualidade como insumo ou como produtos negativos não altera o resultado da otimização.

Uma particularidade do modelo do 4CRTP é a incorporação de restrições aos pesos das variáveis insumos e produtos. Apesar da flexibilidade do modelo DEA ser considerada uma de suas vantagens, em casos particulares, esta flexibilidade pode tornar o modelo pouco intuitivo. Por exemplo, é possível que uma empresa 100% eficiente tenha alcançado este desempenho por possuir uma única variável que possua representatividade bem superior à das demais DMUs. Assim, com base na proposição de (Podinovsky, 2004), foram incorporadas ao modelo (1) restrições adicionais que limitam os pesos, conforme Tabela 1. As restrições dadas pelas equações (1.1) e (1.2) foram adicionadas ao modelo (1).

$$-v_r + \alpha_r u_i \leq 0 \quad r \in R \tag{1.1}$$

$$v_t - \beta_t u_i \leq 0 \quad t \in T \tag{1.2}$$

Onde, α_r e β_t são os limites inferior e superior da razão v_j/u_i , R e T são os conjuntos de restrições inferiores e superiores. Para simplificar a notação, foram representadas na Tabela 1 somente as restrições que relacionam os insumos e produtos, porém restrições entre os produtos também existem no modelo da ANEEL. Esta mesma abordagem é utilizada com o modelo REA no item B.

A vantagem da utilização dos limites aos pesos está no fato de impossibilitar que toda a eficiência de uma distribuidora seja atribuída a somente um dos produtos, fazendo com que uma DMU que possua características diferentes das demais seja dada como eficiente erroneamente. Por outro lado, ao se atingir um grau de rigor alto demais a análise também pode ser prejudicada pela dificuldade em satisfazer as restrições impostas ao modelo. Portanto, o desafio é como calibrar essas restrições

de pesos de forma correta. O fato de várias distribuidoras terem sido prejudicadas pela limitação dos pesos gerou questionamentos sobre o quanto esses pesos restringem os resultados. A ANEEL afirma que os pesos foram atribuídos de forma a restringirem o mínimo possível a análise, porém não foi disponibilizada a metodologia de cálculo utilizada para a construção desses limites, o que impõe certo grau de subjetividade à escolha do regulador.

Variáveis restringidas	Relação
Insumo X Rede distribuição (R\$/km rede)	$580 \leq \frac{v_{rdist}}{u} \leq 2200$
Rede sub. X Rede convencional	$1 \leq \frac{v_{sub}}{v_{rdist}} \leq 2$
Rede aérea X Rede convencional	$0,4 \leq \frac{v_{aerea}}{v_{rdist}} \leq 1$
Insumo X Consumidores (R\$/cons)	$30 \leq \frac{v_{cons}}{u} \leq 145$
Insumo X MWh entregue (R\$/MWh)	$1 \leq \frac{v_{MWh}}{u} \leq 60$
Insumo X Perdas NT (R\$/MWh)	$10 \leq \frac{v_p}{u} \leq 150$
Insumo X Interrupção (R\$/h)	$\frac{v_Q}{u} \leq 2$

Tabela 1 - Limites Adotados pela ANEEL

B. Metodologia REA

O REA também é um método de *benchmarking* que pode ser utilizado para avaliar a eficiência de um conjunto de empresas. O método faz uma avaliação da relação de dominância entre um conjunto de DMUs por meio dos vários valores de eficiência que podem ser obtidos variando os pesos associados aos insumos e produtos. Esta metodologia obtém o comportamento das eficiências da distribuidora frente ao conjunto de DMUs analisados e não somente sobre a melhor eficiência que pode ser atingida, ou seja, não se baseia apenas na fronteira de eficiência. Mesmo o número de DMUs sendo pequenos, os resultados obtidos podem ser considerados confiáveis, pois, diferentemente do DEA, os resultados não são tão sensíveis a entrada ou retirada de uma DMU da amostra (Salo e Punkka, 2011). Os critérios de avaliação utilizados pelo REA são divididos em:

- Definição dos intervalos de classificação;
- Definição das relações de dominância;
- Definição das eficiências sob diferentes perspectivas.

Neste trabalho será abordado apenas o primeiro critério. Vale destacar, também, que o DEA e o REA são semelhantes, pois usam o mesmo método de otimização,

sendo que, a diferença é que o DEA se baseia somente no conceito de fronteira de eficiência e o REA se baseia também na comparação aos pares, comparações relativas e programação preferencial.

A relação de eficiência obtida pela aplicação do DEA pode variar de acordo com o conjunto de pesos obtidos para as DMUs. Dessa forma, as DMUs podem variar de posição. O intervalo de classificação tem por objetivo estabelecer uma faixa de classificação para as DMUs. Por exemplo, ao se estabelecer a melhor posição, julga-se o peso que, aplicado a todo o conjunto de DMUs, pode colocar a DMU em análise na melhor posição frente às demais, ou seja, obtém-se a melhor posição possível de ser ocupada por cada DMU do conjunto (Salo e Punkka, 2011).

Uma característica deste método é que se um intervalo de classificação, diferença entre os resultados do modelo (3) e modelo (2), for extenso para DMU k esta é considerada *outlier* ao conjunto e se todos os intervalos de classificação forem extensos em todo conjunto o conjunto é definido como heterogêneo. O modelo (2) estabelece a melhor posição no intervalo de classificação possível de ser ocupada pela DMU p .

$$\begin{aligned}
 r_{min}^p &= \min_{u,v,z} 1 + \sum_{k \in K \setminus p} z^k \\
 \text{s. t. } \sum_{j \in J} v_j y_j^k &\leq \sum_{i \in I} u_i x_i^k + M z^k && \forall k \in K \setminus p \\
 \sum_{i \in I} u_i x_i^p &= 1 \\
 \sum_{j \in J} v_j y_j^p &= 1 \\
 v_i, u_j &\geq 0, && \forall i \in I, \forall j \in J \\
 z^k &\in \{0,1\} && \forall k \in K \setminus p
 \end{aligned} \tag{2}$$

Onde M é uma constante numérica de alto valor e z^k são variáveis de decisão binária que definem a melhor posição das DMUs de k . Analogamente, a pior posição r_{max}^p no intervalo de classificação da DMU p é definida através do modelo (3).

$$\begin{aligned}
r_{max}^p &= \max_{u,v,z} 1 + \sum_{k \in K \setminus p} z^k \\
\text{s. t. } \sum_{i \in I} u_i x_i^k &\leq \sum_{j \in J} v_j y_j^k + M(1 - z^k) && \forall k \in K \setminus p \\
\sum_{i \in I} u_i x_i^p &= 1 \\
\sum_{j \in J} v_j y_j^p &= 1 \\
v_i, u_j &\geq 0, && \forall i \in I, \forall j \in J \\
z^k &\in \{0,1\}, && \forall k \in K \setminus p
\end{aligned} \tag{3}$$

Nota-se que nos modelos (2) e (3), $z^k, \forall k \in K \setminus p$ são variáveis de decisão binárias. Portanto, os modelos (2) e (3) são modelos de programação linear inteira mista (Salo e Punkka, 2011). Para que os resultados fossem coerentes com o modelo do 4CRTP, as mesmas restrições aos pesos (1.1) e (1.2) são adicionadas aos modelos (2) e (3).

2.2 Resultados

Para o estudo de caso, foram utilizados os dados de insumo e produtos disponíveis na AP 023/2014 para as 61 distribuidoras reguladas, que são os mesmos utilizados no 4CRTP, e correspondem aos valores médios para o triênio 2011-2013. Os resultados apresentados foram obtidos utilizando o Pyomo da Sandia National Labs (Woodruff et al., 2017) e o solver CPLEX (IBM, 2010).

A. Análise DEA Utilizando Restrições aos Pesos

A primeira análise foi feita para avaliar a influência do limite de pesos e tipo de retorno de escala nos escores de eficiência das distribuidoras. Assim, os dados do 4CRTP foram testados para o DEA NDRS e CRS, com e sem limites de pesos. A Figura 1 apresenta os resultados das simulações.

Observa-se que as linhas em azul (NDRS sem Pesos) e laranja (CRS sem Pesos) praticamente se sobrepõem, assim como a cinza (NDRS com Pesos) e a marrom (CRS com Pesos), mostrando que a consideração acerca do tipo de retorno de escala influencia algumas distribuidoras apenas. Já a influência das restrições de peso é mais evidente com variações significativas para um maior número de empresas. De forma geral, no modelo DEA NDRS sem restrições de pesos, 20 das 61 distribuidoras são eficientes, enquanto no modelo DEA NDRS com restrições de pesos apenas 8 distribuidoras atingiram a fronteira de eficiência. No modelo DEA NDRS a eficiência de todas as distribuidoras diminui ou permanece inalterada como era esperada já o modelo restringe mais a região de aplicabilidade.

A Figura 1 mostra a influência dos limites aos pesos de forma conjunta na

eficiência de cada distribuidora. Porém, é importante avaliar a influência individual de cada restrição. Como os limites são na razão máxima e mínima da relação entre os pesos, optou-se por avaliar as restrições em blocos. Ou seja, empregar o modelo DEA NDRS sem restrição aos pesos e incluir as restrições de mínimo e máximo de cada relação separadamente. Ao todo são 7 simulações e os resultados são mostrados na Figura 2. Como pode ser visto pela legenda, a série em amarelo ‘●’ representa a restrição de Insumo X Rede distribuição, a série em preto ‘●’ representa a restrição Rede subterrânea X Rede convencional, a verde ‘●’ representa a Rede aérea X Rede convencional, a azul ‘●’ representa a restrição Insumo X Consumidores, marrom ‘●’ representa a restrição de Insumo X MWh entregue, a cinza ‘●’ representa a restrição de Insumo X Perdas NT, a vermelha ‘●’ representa a restrição de Insumo X Interrupção e a roxa ‘●’ representa a eficiência do DEA NDRS sem considerar restrições aos pesos.

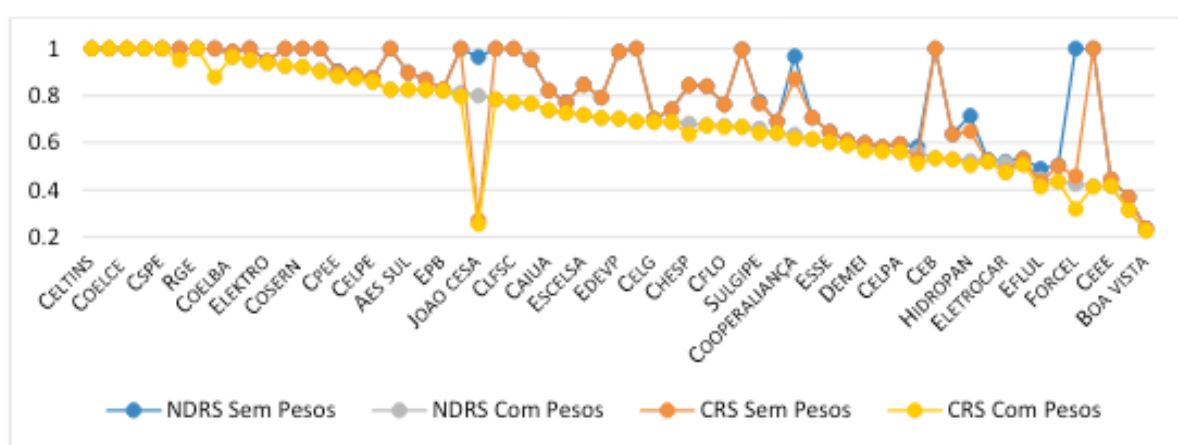


Figura 1 - Eficiências calculadas para os diferentes modelos DEA

Observa-se que para as oito primeiras distribuidoras, nenhuma das restrições de pesos tem influência no resultado, ou seja, a solução do DEA NDRS já satisfaz as restrições aos pesos. Existe também um segundo grupo de empresas na mesma situação. Porém para algumas distribuidoras, a consideração de apenas uma restrição já gera um impacto significativo na eficiência.

Sabendo-se que as restrições aos pesos que mais influenciam a análise de eficiência são restrições Rede subterrânea X Rede convencional e Insumo X Interrupção, uma simulação foi realizada para observar o impacto da retirada desses dois conjuntos de restrição do modelo de análise de eficiência DEA NDRS. Os resultados são apresentados na Figura 3, onde a série em cinza ‘●’ especifica os resultados do DEA NDRS com pesos, a série em azul ‘●’ representa o resultado sem a consideração dos limites aos pesos no modelo da ANEEL, em amarelo ‘●’ especifica os resultados da retirada do conjunto de restrições de Rede subterrânea X Rede de convencional, a verde ‘●’ especifica os resultados da retirada do conjunto de restrições de Insumo X Interrupção e em vermelho ‘●’ estão representados os valores de eficiência se retirados ao mesmo tempo as restrições Rede subterrânea X Rede convencional

e Insumo X Interrupção que restringem de forma clara e isolada o desempenho de algumas distribuidoras.

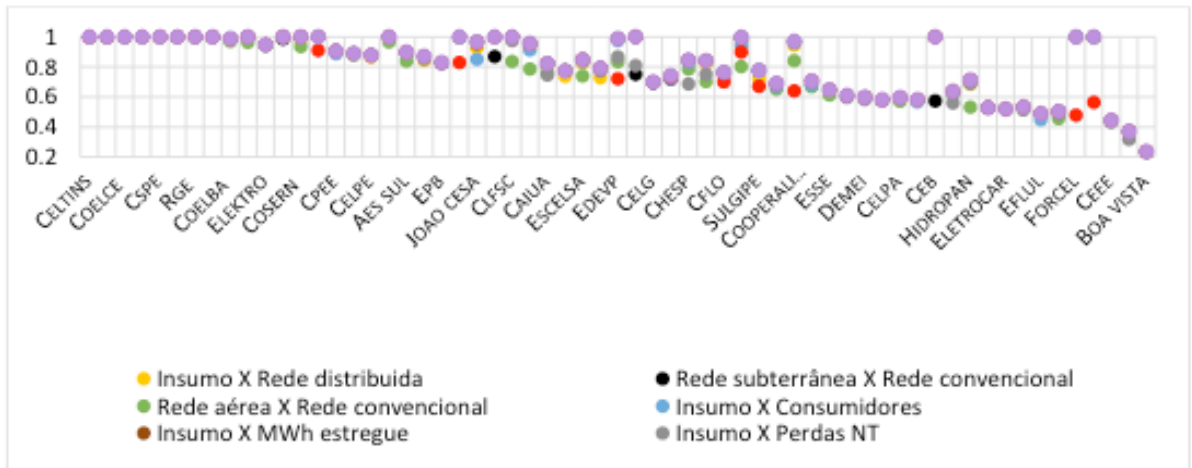


Figura 2 - Eficiência das distribuidoras no DEA NDRS considerando cada uma das restrições

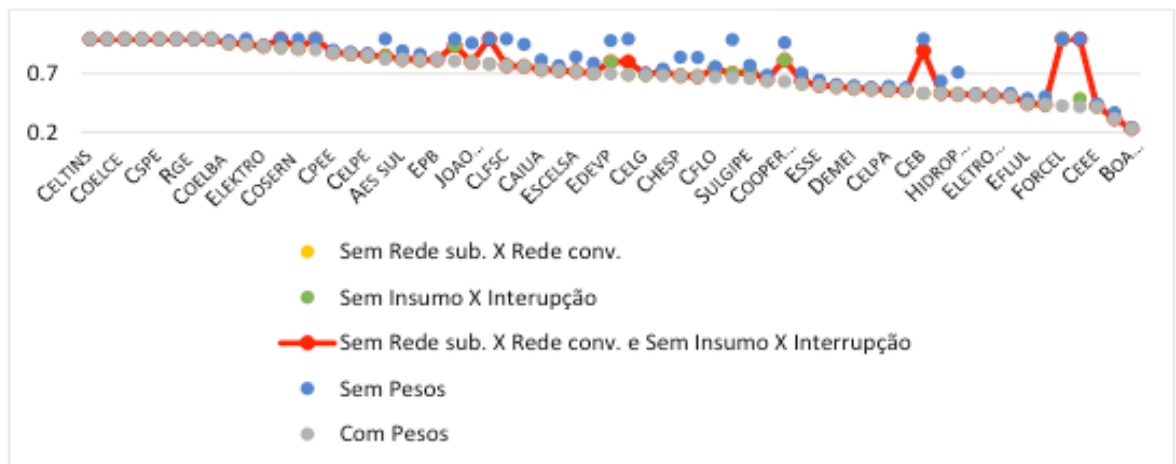


Figura 3 - Eficiência das distribuidoras no DEA NDRS com a retirada de 2 conjuntos de restrições

Na Figura 3 nota-se que com a retirada dos dois conjuntos de restrições aos pesos, outras distribuidoras atingem a fronteira de eficiência. Alguma característica particular da área de concessão dessas distribuidoras deve estar provocando essa variação nos resultados, enfatizando a necessidade de uma metodologia para obtenção desses limites de pesos. Os resultados relacionados à restrição Rede subterrânea X Rede convencional são ainda mais contraditórios. Poucas distribuidoras possuem rede subterrânea, a instalação das mesmas é mais cara que a rede convencional aérea, mas oferece maior confiabilidade a seus clientes. É importante observar que a distribuidora não pode ser penalizada por possuir rede subterrânea. Os resultados observados nessa análise servem para reforçar a necessidade de definição de uma metodologia adequada para estabelecimento dos limites.

B. Análise Utilizando o REA

Para aprofundar a análise, foram aplicados os critérios de avaliação do REA à base de dados. O REA é essencialmente um modelo com retornos constantes de escala (CRS) e, como já mostrado anteriormente, a adoção do CRS e NDRS não influencia muito os resultados. Na Figura 1, nota-se que, com a mudança para CRS, duas distribuidoras saíram da fronteira da eficiência, porém, uma única eficiência que modificou consideravelmente. A eficiência desta distribuidora passa de 0,80 no DEA NDRS com limite aos pesos para uma eficiência de 0,25 no DEA CRS com limite aos pesos e de 0,96 no DEA NDRS sem limite aos pesos para 0,27 no DEA CRS sem limite aos pesos.

Outro aspecto que deve ser levado em conta ao gerar os resultados do REA, são as entradas dos parâmetros de qualidade no modelo. A ANEEL considera esses parâmetros como produtos negativos, mas matematicamente a representação de produtos negativos no DEA é equivalente a representação de insumos. Porém no REA, a adoção de produtos negativos pode gerar problemas na convergência do modelo e, por isso, as variáveis de qualidade foram consideradas como insumos nas análises a seguir.

Os intervalos de classificação obtidos com e sem as novas restrições de pesos são representados na Figura 4. Observa-se que os intervalos de classificação com limite de pesos, estão contidos dentro dos intervalos sem limites de peso. Apesar de ainda bem acentuada para algumas distribuidoras, os intervalos diminuíram com a inclusão dos limites aos pesos, demonstrando a forte influência de sua utilização no modelo. A inclusão de limites aos pesos aumentou a homogeneidade da amostra das distribuidoras, porém a amostra ainda continua bastante heterogênea e ainda fica a incerteza quanto o grau de discricionariedade da ANEEL ao não justificar estes limites.

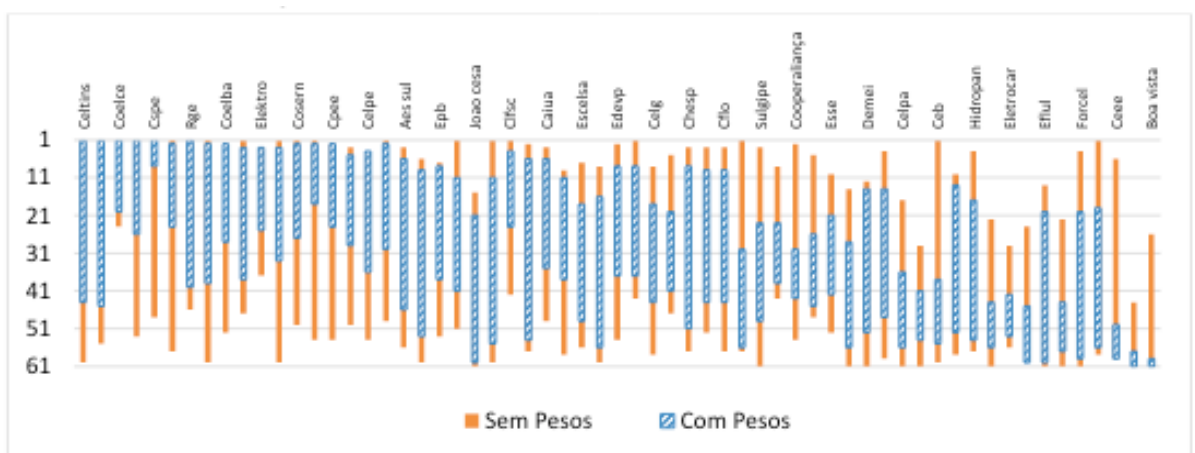


Figura 4 - Intervalo de Classificação das Distribuidoras.

3 | CONCLUSÃO

O conjunto de distribuidoras no Brasil é bastante complexo e heterogêneo. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos de forma a elaborar uma regulação mais consistente e justa para as concessionárias de distribuição. Do 3CRTP para o 4CRTP a inclusão dos limites aos pesos na análise foi uma tentativa de melhorar o desempenho do DEA, porém esses limites aos pesos, até o momento, possuem caráter subjetivo, necessitando de embasamento metodológico, pois seu dimensionamento é importante na análise. Uma análise quanto a sensibilidade do modelo DEA NDRS aos diferentes limites de pesos foi realizada neste trabalho e este procedimento mostrou que o mau desempenho de alguma distribuidora pode ser causado somente por uma restrição considerada no modelo, de forma que, para que os resultados sejam confiáveis, é necessário o conhecimento da origem desses limites.

Este trabalho fez uma análise do impacto da incorporação dos limites de pesos no modelo. Os resultados obtidos pela aplicação do REA, no modelo de análise de eficiência das distribuidoras do 4CRTP, comprovam que a amostra se mantém ainda heterogênea, a metodologia REA, portanto, pode contribuir quanto a esta perspectiva na análise de dados. Durante o processo de análise do REA, também, foi observado que dois limites de eficiência de superioridade tornavam os problemas do REA sem solução, não permitindo que uma comparação entre a distribuidoras fosse realizada de maneira adequada. Isto sinaliza que os critérios adotados pela ANEEL na definição desses limites aos pesos podem ser aprimorados, evitando que alguns valores estejam mal dimensionados, além daqueles detectados pelo uso do REA.

O problema da inclusão do limite aos pesos no 4CRTP é que devido a heterogeneidade das distribuidoras a aplicação deles diretamente no conjunto de 61 distribuidoras pode apresentar oportunidades de aprimoramento.

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do setor elétrico (ANEEL), por meio do Projeto de P&D intitulado “Metodologia DEA e REA como Indicador da Eficiência de Concessionárias de Distribuição” do grupo CPFL Energia, e à CAPES pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

AGRELLA, P.J. & BREA-SOLÍS, H., **Capturing heterogeneity in electricity distribution operations: A critical review of latent class modelling**. Energy Policy, vol. 104, 2017, p. 361-372.

ANEEL, **Nota Técnica nº 101/2011-SRE/ANEEL: Metodologia de Cálculo dos Custos Operacionais**. Agência Nacional de Energia Elétrica, Audiência Pública 040/2010, 2011, p. 44.

ANEEL, **Procedimentos de Regulação Tarifária – Submódulo 2.2: Custos Operacionais**. 06/05/2015, 2015, p. 28.

ANEEL, **Nota Técnica nº 66/2015 - SRE/SGT/ANEEL: Metodologia de Custos Operacionais**, Agência Nacional de Energia Elétrica. Audiência Pública nº 023/2014, 2015, p. 149.

ANJOS, M., BORDIN, B. & MELLO, J. **Avaliação de empresas de distribuição de energia elétrica com Análise Envolvória de Dados**. Relatórios de Pesquisa em Engenharia de Produção v. 10 n. 08, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010, p. 11.

Brasil, **Lei nº 9.427**, de 26 de **dezembro de 1996**, Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências, p. 7.

FERREIRA, F. C. **Regulação Econômica, Fronteira Eficiente e Clusters Dinâmicos: Desenvolvimento e Aplicação para o Cálculo do Fator X**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003, p. 137.

FILIPPINIA, M., HROVATINC, N. & ZORIC, J. **Efficiency and regulation of the Slovenian electricity distribution companies**. Energy Policy, vol. 32, nº 3, Fevereiro 2004, p. 335-344.

GAVGANI, S. S. & ZOHREHBANDIAN, M. **A Cross-Efficiency Based Ranking Method for Finding the Most Efficient DMU**. Hindawi Publishing Corporation - Mathematical Problems in Engineering, Abril 2014, p. 6-12.

IBM, **ILOG CPLEX ver. 12.2 User's Manual. Book 12.2 User's Manual**, Series 12.2 User's Manual, 2010, p. 102.

JAMASB, T. & POLLITT, M. **International benchmarking and regulation: an application to European electricity distribution utilities**. Energy Policy, vol. 31, nº 15, 2003, p. 1609-1622.

MEDEIROS, G. O. S., QUEIROZ, A. R. De & LIMA, L. M. M. **Técnicas de Benchmarking para Análise de Eficiência de Empresas de Distribuição de Energia Elétrica**. XLVII Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional, Porto de Galinhas, 2015, p. 1110-1117.

MEDEIROS, G.O.S. **Análise de Desempenho de Empresas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando DEA e REA**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2018, p.111.

MELLO, J. C. C. B. S., MEZA, L. A., GOMES, E. G. & NETO, L. B., **Curso de Análise Envolvória de Dados**. XXXVII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Rio Grande do Sul, 2005, p. 2520-2547.

MESQUITA, R.B. **Regulação de custos de distribuição de energia elétrica: uma análise comparativa das abordagens de benchmarking utilizadas em países europeus e latino-americanos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017, p. 211.

PODINOVSKY, V. **Production trade-offs and weight restrictions in data envelopment analysis**. Journal of the Operational Research Society, vol. 55, nº 12, 2004, p. 1311–1322.

SALES, G. M. D. A. **Proposta de um modelo utilizando análise envolvória de dados - DEA na definição das metas dos indicadores da qualidade comercial das distribuidoras de energia elétrica - DER E FER**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Humanas, Brasília, 2011, p. 106.

SALO, A. & PUNKKA, A. **Ranking Intervals and Dominance Relations for Ratio-Based Efficiency Analysis**. Management Science, vol. 57, nº 1, 2011, p. 200-214.

WOODRUFF, D., HACKEBEIL, G., LAIRD, C.D., NICHOLSON, B.L., HART, W.E., SIIROLA, J.D., & WATSON, J.P. **Pyomo v5. 0** (No. Pyomo v5. 0; 005323MLTPL00). Sandia National Laboratories (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2017.

XAVIER, S.S. **Contribuição à Análise dos Custos Operacionais Eficientes das Concessionárias**

de Distribuição de Energia Elétrica. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2015, p. 187.

ZAKARIA, M. & NOUREEN, R. **Benchmarking and regulation of power distribution companies in Pakistan.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, 2016, p. 1095-1099.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Jancer Destro: Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Eletricista com ênfase em Eletrônica e Telecomunicações pelo INATEL Mestre em Engenharia Industrial pela UNESP Campus de Bauru. Doutorando em Energia Aplicada a Agricultura pela UNESP Campus de Botucatu Coordenador do curso de especialização em engenharia de segurança do trabalho na UTFPR Campus de Cornélio Procópio. Trabalha com temas: Sistema de Telecomunicações, Segurança do trabalho e Energia Solar.

João Dallamuta: Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Trabalha com Gestão da Inovação, Empreendedorismo e Inteligência de Mercado.

Marcelo Henrique Granza: Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Eletrônico. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Doutorando em Engenharia Elétrica. Trabalha com os temas: conversores estáticos com alto fator de potência, acionamento e controle de motores e geradores elétricos de indução.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-365-1



9 788572 473651