

Aplicação DEA para avaliar a eficiência técnica da energia eólica dos países europeus

Paulo Ellery Alves de Oliveira (UFRN) pauloellery@hotmail.com
Alessandro Jackson Teixeira de Lima (UFRN) alessandro.jk@hotmail.com
Nathaly Silva de Santana (UFRN) nathalysilvaa@gmail.com
Arthur Arcelino de Brito (UFRN) arthurbritoep@gmail.com
Mariana Simião Brasil de Oliveira (UFRN) marianabr4sil@gmail.com

Resumo:

Este artigo tem como objetivo avaliar a eficiência técnica e identificar *benchmarkings*, por meio da representação bidimensional, entre os países europeus na geração e consumo de energia eólica com o uso do método DEA. O modelo proposto contempla 19 países como unidades tomadoras de decisão (DMU), avaliados de modo global. No presente estudo foram consideradas as seguintes variáveis de entrada: capacidade instalada *onshore* e *offshore*, Potência das turbinas e Taxa de penetração do vento. E duas variáveis de saída: Geração líquida de eletricidade eólica e Consumo de energia oriunda do vento. Os resultados indicam que os países europeus se mantêm a frente como as potências mundiais em geração de eletricidade eólica, no entanto, os *scores* DEA apontam para a necessidade de alinhar as nações quanto o equilíbrio da produção e o consumo.

Palavras chave: Energia eólica, DEA, Países europeus, Benchmarking

DEA application to assess the technical efficiency of wind energy in European countries

Abstract

This article aims to evaluate the technical efficiency and to identify benchmarkings, through the two-dimensional representation, of European countries in the generation and consumption of wind energy using the DEA method. The proposed model contemplates 19 countries as decision making units (DMU), evaluated globally. In the present study, the following input variables were considered: installed capacity onshore and offshore, turbine power and wind penetration rate. In addition, two output variables: Net wind power generation and Wind energy consumption. The results indicate that European countries remain the world's leading wind power generators, however the DEA scores point to the need to align production and consumption equilibrium nations.

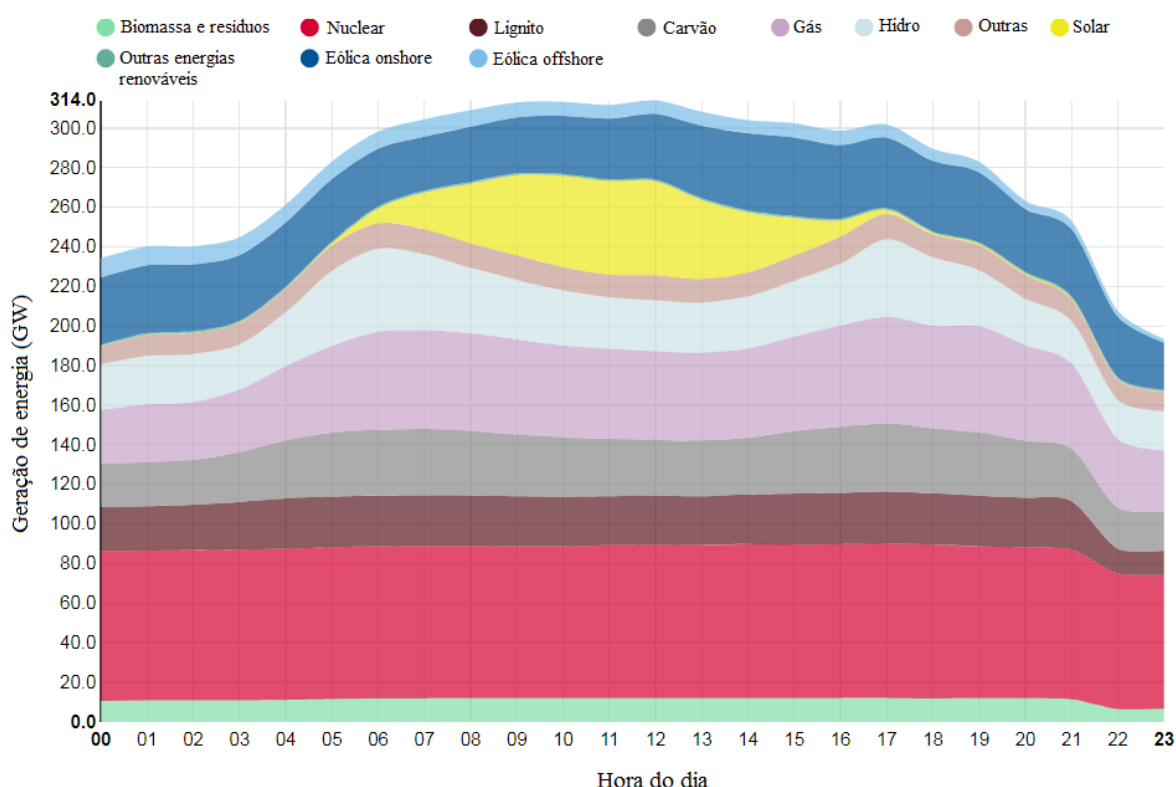
Key-words: Wind Energy, DEA, European Countries, Benchmarking

1. Introdução

Nos últimos anos, a energia eólica vem impulsionando o nicho tecnológico a uma transição industrial em virtude do fornecimento energético sustentável, competitividade e confiabilidade do serviço. Um dos fatores que colabora ao fortalecimento dos investimentos neste negócio é a busca do suprimento de eletricidade por meio de fontes renováveis. Disto, o mercado europeu se insere como uma das potências mundiais na geração deste recurso, devido às instalações de multinacionais na fabricação de turbinas eólicas, alavancagem de tecnologias padronizadas e a intensificação da Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

A geração e o consumo deste tipo de energia na União Europeia contribuíram significativamente a economia. O relatório Local impact, global leadership (2017) indica a contribuição aos cofres públicos de 4,9 bilhões de euros em impostos corporativos, regionais, locais e impostos sobre propriedades, no qual este recolhimento atingiu um crescimento de 46% entre 2011 e 2016. Ademais, as vantagens desta transição energética impulsionariam gradativamente a taxa de empregabilidade, bem como a redução de emissão dióxido de carbono (CO₂).

Seguindo estas tendências mundiais, a comparação do comportamento da variabilidade energética entre as fontes de geração de energia se torna cada vez mais relevante. Dessa forma, a geração de energia eólica *onshore* e *offshore*, de acordo com a Figura 1, depreende-se de uma alta oscilação durante todo o dia.



Fonte: Wind Europe (2018)

Figura 1: Variação de geração de energia em 2018

Visto que a viabilidade deste tipo de energia está intimamente ligada a capacidade das instalações e o consumo, pesquisas orientadas a investigação de efetividade dos países com

potenciais em integrar sua matriz energética a outras fontes, se torna de extrema relevância. Uma das técnicas mais indicada para isto é a Análise Envoltória de Dados (DEA), cuja foi introduzida por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) com o objetivo de medir a eficiência relativa de Unidades Tomadoras de Decisão (DMU). O DEA se baseia em um modelo de programação linear, portanto, pode-se sistematizar e resolver os problemas com as ferramentas existentes. Devido sua aplicabilidade ao longo dos anos fez-se necessário o surgimento de novos modelos em detrimento da complexidade de capturar a realidade.

Dessa forma, o objetivo deste estudo é avaliar a eficiência técnica e identificar *benchmarking*, por meio da representação bidimensional, entre 19 países europeus na geração e consumo de energia eólica com o uso do método DEA. Disto, para captar as ineficiências das unidades analisadas foram utilizados dados de três variáveis de entrada (capacidade instalada *onshore* e *offshore*, Potência das turbinas e Taxa de penetração do vento) e duas variáveis de saída (Geração líquida de eletricidade eólica e Consumo de energia oriunda do vento).

Este trabalho está organizado em seis tópicos. Em primeiro lugar é abordado a problemática e a situação dos países europeus no setor de energia elétrica renovável, bem como introduz o método em uso. Em segundo, exibe uma breve revisão literatura a respeito da Análise Envoltória de dados (DEA). Em terceiro lugar, o artigo traz aplicações do método no setor de energia eólica. O quarto tópico sistematiza e estrutura o método da pesquisa. Em quinto lugar, são discutidos os scores e o ranking dos países analisados. E por fim, o estudo faz um apanhado quanto o cenário da eficiência técnica da geração de eletricidade por meio do vento.

2. Análise Envoltória de dados (DEA) em energia elétrica

A Análise Envoltória de Dados (Data Envelopment Analysis - DEA) é uma técnica não-paramétrica de mensuração de desempenho que utiliza a programação linear para comparar unidades de tomada de decisão (Decision Making Units - DMUs). As DMUs precisam apresentar, portanto, as mesmas características funcionais, uma vez que a homogeneidade garante a equidade de variáveis a serem adotadas. Desse modo, assume-se que os mesmos insumos (inputs) geram os mesmos produtos (outputs), independente da tecnologia ou operação interna de cada DMU.

As principais características do DEA, de modo geral, remetem à flexibilidade. A técnica permite a utilização de múltiplas variáveis de entrada e saída (em unidades de medida diferentes ou não) e oferece opções relacionadas à orientação e modelos a serem utilizados. Então, dependendo do problema abordado, maximiza-se variáveis de saída (outputs) ou minimiza-se variáveis de entrada (inputs). Ademais, disponibiliza-se a seleção de modelos, os mais tradicionais proporcionam retornos de escala constantes (CRS – Constant Returns to Scale) e variáveis (VRS - Variable Returns to Scale), desenvolvidos por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e Banker, Charnes e Cooper (1984), respectivamente.

A aplicação de DEA na indústria de energia elétrica pode ser rastreada em diversos estudos como o de Cote (1989), Hjalmarsson e veiderpass (1992) e Golany, Roll e Rybak (1994). Desde então, a DEA tem sido amplamente aplicada tanto aos aspectos de distribuição das operações quanto à geração elétrica. Yunos e Hawdon (1997) consideraram as comparações de eficiência organizacional no nível internacional e Goto e Tsutsui (1998) usaram o modelo DEA para medir a eficiência de custo geral e a eficiência técnica entre as empresas de eletricidade japonesas e americanas. Forsund e Kittelsen (1998) aplicaram os scores de eficiência da DEA para medir o índice de produtividade de Malmquist nas empresas norueguesas de distribuição de eletricidade e Sueyoshi e Goto (2001) investigaram o desempenho da geração de energia elétrica no Japão.

Por outro lado, Resende (2002) usou um modelo DEA não paramétrico voltado para insumos para avaliação de empresas brasileiras de distribuição de eletricidade e Chen (2002) apresentou uma avaliação de eficiência técnica e eficiência cruzada no setor de distribuição de eletricidade de Taiwan. Jamasb e Pollitt (2003) comparou 63 empresas de distribuição de eletricidade de seis países europeus e Korhonen e Syrjanen (2003) analisaram a eficiência de custos na distribuição finlandesa de eletricidade e Nemoto e Goto (2003) a eficiência dinâmica da produção de energia elétrica no Japão. Pahwa, Feng e Lubkeman (2002) avaliaram a eficiência das concessionárias de distribuição elétrica com base em seus desempenhos. Estache, Rossi e Ruzzier (2004) aplicaram métodos DEA e econométricos para avaliação de desempenho e classificação de unidades de eletricidade da América do Sul e Giannakis, Jamasb e Pollitt (2005) estudaram a avaliação da qualidade do serviço das concessionárias de distribuição de eletricidade do Reino Unido. Jha e Shrestha (2006) avaliaram a eficiência de usinas hidrelétricas no Nepal usando DEA e Vaninsky (2006) utilizando a DEA, estimou a eficiência da geração de energia elétrica nos EUA para o período de 1991 a 2004. Azadeh, Ghaderi e Maghsoudi (2008) apresentaram e integraram a abordagem hierárquica DEA-Principal Component Analysis para localização de usinas solares. Sadjadi e Omrani (2008) apresentaram um modelo DEA com dados incertos para avaliação de desempenho de empresas iranianas de distribuição de eletricidade. Jayanthi, Witt e Singh (2009) mostraram uma aplicação baseada em DEA para a indústria fotovoltaica dos EUA para avaliar o potencial de inovações que ocorrem em vários estágios da cadeia de valor da indústria em termos de sua eficiência relativa em relação a uma fronteira de melhores práticas.

3. Método de pesquisa

Ao consolidar o contexto apresentado e os objetivos designados, o estudo é direcionado por meio de quatro etapas principais: (a) revisão bibliográfica; (b) coleta de dados; (c) implementação das modelagens; e (d) análise dos resultados. Os dados referem-se ao ano de 2016 e foram por meio de relatórios da *Wind Europe* (2018) e através do serviço estatístico da União Europeia, *Eurostat* (2018) e são apresentados na Tabela 1.

DMU	(x_1) Capacidade instalada onshore e offshore (MW)	(x_2) Potência das turbinas instaladas (MW)	(x_3) Taxa de penetração do vento (%)	(y_1) Geração líquida de eletricidade eólica (TOE)	(y_2) Consumo de energia (TOE)
Alemanha	5443	2,80	16	6758,20	6725,50
Reino Unido	736	2	12,40	3213	2640,80
Finlândia	570	3,10	3,80	263,80	263,80
Bélgica	177	2,50	5,80	467,40	456,80
Irlanda	384	0	27	528,70	528,70
Dinamarca	220	2,90	36,80	1099,10	1099,10
Itália	282	2,10	5,50	1521	1506,70
Suécia	493	3,30	11,40	1331	1331
Áustria	228	3	10,40	450,10	425,90
Croácia	34	2,90	0	87,2	86,80
Espanha	49	1,90	19	4205,2	4101,50
Países Baixos	887	2,90	8,40	702,50	623,60
Polónia	682	0	7,10	1082,4	1055,80
Romania	52	0	12,50	566,60	535,90
Lituânia	178	2,40	10,60	97,7	97,20
Estônia	7	2,40	7,30	51,10	50
França	1561	2,30	4,40	1740,3	1840,10
Portugal	268	2,10	24,70	1061,3	1072,60

Tabela 1: Conjunto de dados

Para atender os objetivos desta pesquisa a aplicação do modelo está orientada a entrada, atendendo aos retornos constantes de escala

O modelo clássico de DEA para avaliar a eficiência de uma DMU, denotado por DMU observada, é apresentado na Figura 2.

$$\begin{aligned} \max \quad & h_0 = \sum_{r=1}^s u_r y_{rj_0} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0} = 1 \\ & \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij_0} \leq 0 \\ & u_r, v_i \geq 0 \end{aligned}$$

Figura 2: Modelo CRS

A partir disso e baseando-se nas pesquisas analisadas no tópico anterior, este artigo sistematiza o modelo de avaliação conforme Figura 2. As variáveis indicadas como *input* são Capacidade instalada de *onshore* e *offshore* (MW), Potência das turbinas instaladas (MW) e a Taxa de penetração do vento. Os *outputs* integrados a avaliação são a Geração líquida de energia eólica (TOE) e o consumo da eletricidade eólica (TOE).

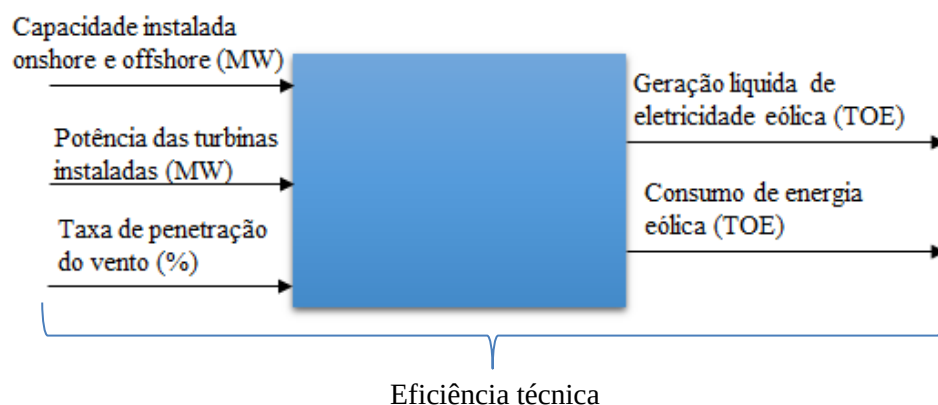


Figura 3: Estrutura de avaliação

4. Resultados

O ranking e os scores para cada DMU são exibidos na Tabela 2. É possível verificar que 36% (Alemanha, Espanha, Romania, Itália, Reino Unido, Croácia e Polônia) dos países analisados obtiveram índices satisfatórios de eficiência, 100%. Os resultados indicam que estes países possuem alto índice de desempenho técnico. Verifica-se que, ao segregar estas nações e compará-las entre si, as características de geração de energia eólica na Alemanha estão intimamente integradas a sua alta tecnologia instalada representada por 46% da capacidade eólica da União Europeia, somente em 2016. Além disto, é considerada o maior mercado de energia eólica do continente europeu. Por outro lado, a França se beneficiou de quadros regulatórios de apoio e aumentou as suas instalações anuais, alcançando em média 1.560 MW em geração de energia.

Apesar dos Países Baixos (12) ter logrado uma eficiência inferior a 30%, atualmente seu maior percentual de energia oriunda do vento é por meio de turbinas *offshore* (no mar), isto é garantido por meio da Gemini que é responsável por gerar 600 MW ao ano. Este índice de eficiência pode ser justificado pela demasiada disparidade dos dados de geração e consumo final de energia. Outro ponto que deve ser ressaltado é o *score* atribuído a Lituânia, que ocupa a última posição no ranking DEA. A principal contribuição para este desempenho é a folga entre sua capacidade instalada e sua totalidade de geração integrada ao consumo. Entretanto, a Lituânia é o país europeu com o nível mais elevado de capacidade eólica instalada em relação ao consumo de energia, cerca de 16%. Enquanto a Irlanda 13%.

Ranking	DMU	DEA
1°	1	100%
1°	11	100%
1°	14	100%
1°	7	100%
1°	2	100%
1°	10	100%
1°	13	100%
2°	17	97%
3°	16	67%
4°	6	55%
5°	8	51%
6°	4	46%
7°	5	44%
8°	9	33%
9°	12	28%
10°	19	22%
11°	3	21%
12°	15	4%

Alemanha ⁽¹⁾, Espanha ⁽¹¹⁾, Romania ⁽¹⁴⁾, Itália ⁽⁷⁾, Reino Unido ⁽²⁾, Croácia ⁽¹⁰⁾, Polônia ⁽¹³⁾, França ⁽¹⁷⁾, Estônia ⁽¹⁶⁾, Dinamarca ⁽⁶⁾, Suécia ⁽⁸⁾, Bélgica ⁽⁴⁾, Irlanda ⁽⁵⁾, Áustria ⁽⁹⁾, Países Baixos ⁽¹²⁾, Portugal ⁽¹⁹⁾, Finlândia ⁽³⁾ e Lituânia ⁽¹⁵⁾

Tabela 2: *Ranking e scores*

Para melhor visualização foi elaborada uma representação bidimensional frente ao comportamento das DMUs quanto sua eficiência global, conforme Figura 4. É possível verificar a grande disparidade das DMUs ineficientes (4, 9 e 6) quando comparada as demais. Já a grande concentração de países entre os pontos zero e quinze, aproximadamente, evidencia a relação das entradas às saídas, o que significa, que estas DMUs têm grandes potenciais em atingir o ponto ótimo de eficiência, entretanto é necessário identificar seus respectivos *benchmarks*. Pela avaliação global da eficiência relativa destes países, as grandes potências europeias que podem atuar como referencial para outros países europeus estão: Alemanha, Espanha, Romania, Itália, Reino Unido, Croácia e Polônia.

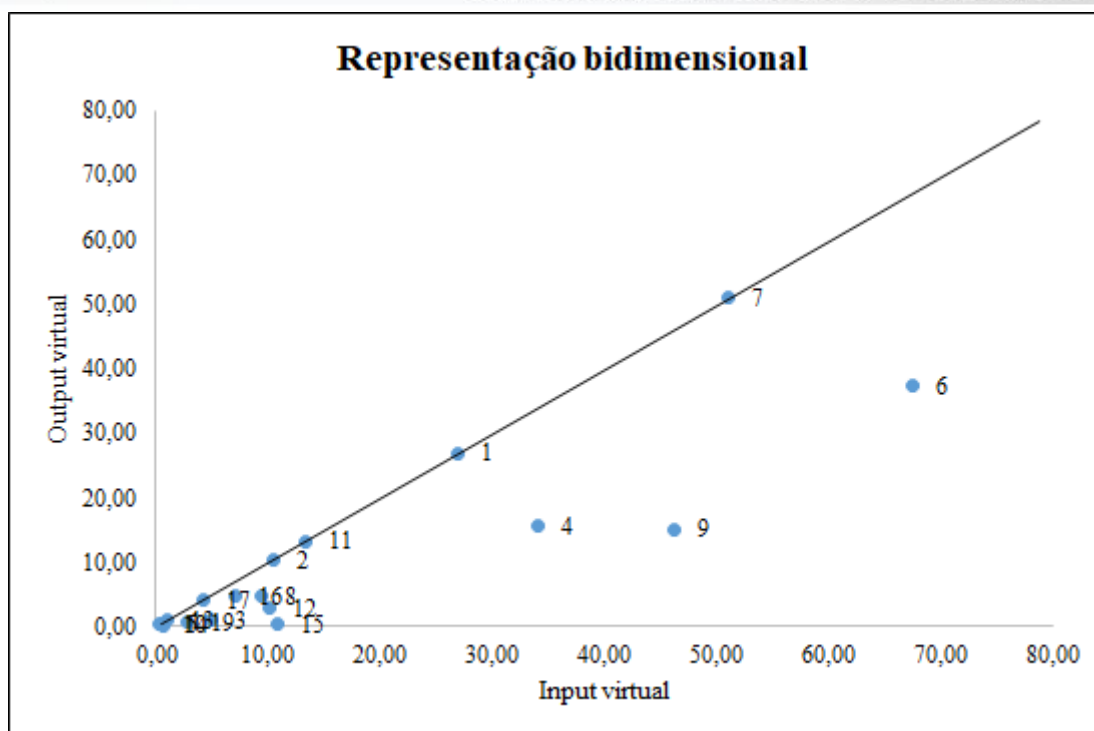


Figura 4: Representação da eficiência global

5. Conclusões

O objetivo deste artigo foi avaliar a eficiência técnica de 19 países europeus na geração e consumo de energia eólica. Os resultados exibiram que o cenário destas nações está alinhado às suas perspectivas no avanço em investimento em instalações e capacidade de gerar este tipo de energia, outra contribuição é alto índice de pesquisa que garantem o fomento de inovações no setor elétrico.

A aplicação do modelo DEA para este diagnóstico possibilitou o alcance de índices relativamente satisfatórios, visto que 36% dos países analisados atingiram o ponto ótimo de eficiência. E a aplicação da representação bidimensional facilita a visualização do comportamento das DMUs perante a fronteira. Além disto, o grande distanciamento dos demais países.

Portanto, pode-se inferir que as grandes potências europeias se agrupam a um *cluster* de *benchmarking* nos quais a variabilidade operacional é de baixo distanciamento entre as entradas e saídas. Como evidenciado neste artigo, os países europeus estão garantindo maior competitividade mundial, dessa forma, é válido a outros países, como o Brasil, adotar práticas europeias em conformidade com sua capacidade instalada e porte de geração e, mitigar o grande gargalo brasileiro que é a implementação de estações de transmissão de energia eólica. Nesse sentido, propõe-se para estudos futuros uma análise integrada dos subprocessos aplicada ao *Network DEA* na geração de energia oriunda do vento, com o objetivo de abrir a caixa preta e identificar entraves em seus estágios de produção.

Referências

- AZADEH, A.; GHADERI, S. F.; MAGHSOUDI, A. Location optimization of solar plants by an integrated hierarchical DEA PCA approach. **Energy Policy**, v. 36, n. 10, p. 3993–4004, 2008.
- BANKER, R.D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. **Management Science**, v. 30(9), p. 1078–1092, 1984.
- CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, 1978.
- CHEN, T. YIETH. An assessment of technical efficiency and cross-efficiency in Taiwan's electricity distribution sector. **European Journal of Operational Research**, v. 137, n. 2, p. 421–433, 2002.
- COTE, D.; ETUDES, H. FIRM EFFICIENCY AND OWNERSHIP STRUCTURE. **Annals of Public and Cooperative Economics**, p. 431–450, 1989.
- ESTACHE, A.; ROSSI, M. A.; RUZZIER, C. A. The case for international coordination of electricity regulation: Evidence from the measurement of efficiency in South America. **Journal of Regulatory Economics**, v. 25, n. 3, p. 271–295, 2004.
- EUROSTAT. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Acesso em: 12 de setembro de 2018.
- FORSUND, F. R.; KITTELSEN, S. A. C. Productivity development of Norwegian electricity distribution utilities. **Resource and Energy Economics**, v. 20, n. 3, p. 207–224, 1998.
- 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, n. 17, p. 2256–2271, 2005.
- GOLANY, B.; ROLL, Y.; RYBAK, D. Measuring Efficiency of Power-Plants in Israel by Data Envelopment Analysis. **Ieee Transactions on Engineering Management**, v. 41, n. 3, p. 291–301, 1994.
- GOTO, M.; TSUTSUI, M. Comparison of productive and cost efficiencies among Japanese and US electric utilities. **Omega**, v. 26, n. 2, p. 177–194, 1998.
- HJALMARSSON, L.; VEIDERPASS, A. Efficiency and ownership in Swedish electricity retail distribution. **Journal of Productivity Analysis**, v. 3, n. 1–2, p. 7–23, 1992.
- JAMASB, T.; POLLITT, M. International benchmarking and regulation: An application to European electricity distribution utilities. **Energy Policy**, v. 31, n. 15, p. 1609–1622, 2003.
- JAYANTHI, S.; WITT, E. C.; SINGH, V. Evaluation of potential of innovations: A DEA-based application to U.S. photovoltaic industry. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 56, n. 3, p. 478–493, 2009.
- JHA, D. K.; SHRESTHA, R. Measuring efficiency of hydropower plants in Nepal using data envelopment analysis. **Ieee Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, p. 1502–1511, 2006.
- KORHONEN, P. J.; SYRJANEN, M. J. Evaluation of Cost Efficiency in Finnish Electricity Distribution. **Annals of Operations Research**, v. 121, n. 1–4, p. 105–122, 2003.
- NEMOTO, J.; GOTO, M. Measurement of dynamic efficiency in production: An application of data envelopment analysis to Japanese electric utilities. **Journal of Productivity Analysis**, v. 19, n. 2–3, p. 191–210, 2003.
- PAHWA, A.; FENG, X. M.; LUBKEMAN, D. Performance evaluation of electric distribution utilities based on data envelopment analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 3, p. 400–405, 2002.
- RESENDE, M. Relative efficiency measurement and prospects for yardstick competition in Brazilian electricity

distribution. **Energy Policy**, v. 30, n. 8, p. 637–647, 2002.

SADJADI, S. J.; OMRANI, H. Data envelopment analysis with uncertain data: An application for Iranian electricity distribution companies. **Energy Policy**, v. 36, n. 11, p. 4247–4254, 2008.

SUEYOSHI, T.; GOTO, M. Slack-adjusted DEA for time series analysis: Performance measurement of Japanese electric power generation industry in 1984-1993. **European Journal of Operational Research**, v. 133, n. 2, p. 232–259, 2001.

VANINSKY, A. Efficiency of electric power generation in the United States: Analysis and forecast based on data envelopment analysis. **Energy Economics**, v. 28, n. 3, p. 326–338, 2006.

YUNOS, J. M.; HAWDON, D. The efficiency of the National Electricity Board in Malaysia: An intercountry comparison using DEA. **Energy Economics**, v. 19, n. 2, p. 255–269, 1997.

Wind Europe. Local impact, global leadership 2017. Disponível em: <https://windeurope.org/about-wind/reports/local-impact-global-leadership/>. Acesso em: 01 de setembro de 2018.