

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

**APLICAÇÃO DA FRONTEIRA INVERTIDA EM  
ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS PARA MEDIR  
O DESEMPENHO RELATIVO DA PRODUÇÃO DE  
ENERGIA EÓLICA NOS ESTADOS BRASILEIROS  
ENTRE OS ANOS DE 2015 A 2019**

\* Marcus Vinícius Sousa Rodrigues <sup>1</sup>  
Marisete Dantas de Aquino <sup>2</sup>  
Antônio Clécio Fontelles Thomaz <sup>3</sup>  
Rejane Felix Pereira <sup>4</sup>

**APPLICATION OF INVERTED FRONTIER IN DATA  
ENVELOPMENT ANALYSIS TO MEASURE THE RELATIVE  
PERFORMANCE OF WIND ENERGY PRODUCTION IN THE  
BRAZILIAN STATES BETWEEN THE YEARS FROM 2015 TO 2019**

Recibido el 20 de marzo de 2021. Aceptado el 8 de septiembre de 2021

## Abstract

*Wind energy is energy from the air currents that circulate through the atmosphere. It is a source considered clean, renewable and available everywhere. Currently the use of wind energy to generate electricity is already a reality in Brazil. It is known that multiple are the criteria that can be used to carry out the analysis of the efficiency of the wind power generation sector. The multicriteria tool adopted in this research will be the data envelopment analysis. The main objective is to assess the relative efficiency of wind energy production in Brazilian states between 2015 and 2019 and then apply the inverted frontier model, in order to order the analyzed set and identify the falsely efficient units. The efficiency analysis indicated that of the 58 (fifty-eight) units analyzed, 9 (nine) were classified as efficient. The application of the inverted frontier model ordered the units according to the standardized efficiency measure and identified 8 (eight) units with false efficiency. It was possible to conclude that the FCM product (average annual capacity factor) had a significant weight in the calculations of efficiency measures of the UTDs (decision making unit).*

**Keywords:** efficiency, false efficiency, DEA, wind generation.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Maranhão - UFMA, São Luís (MA), Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza (CE), Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Estadual do Ceará – UECE, Fortaleza (CE), Brasil.

<sup>4</sup> Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Redenção - CE, Brasil

\* *Autor correspondente:* Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Avenida dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga, CEP: 65080-805, São Luís - MA. Email: [rodrigues.marcus@ufma.br](mailto:rodrigues.marcus@ufma.br)

## Resumo

*A energia eólica é a energia proveniente das correntes de ar que circulam pela atmosfera. É uma fonte considerada limpa, renovável e disponível em todos os lugares. Atualmente o uso da energia eólica para a geração de energia elétrica já é uma realidade no Brasil. Sabe-se que múltiplos são os critérios que podem ser usados para a realização da análise da eficiência do setor de geração de energia eólica. A ferramenta multicritério adotada nesta pesquisa será a análise envoltória de dados. O objetivo principal consiste em avaliar a eficiência relativa da produção de energia eólica nos estados brasileiros entre 2015 e 2019 e em seguida aplicar a modelo da fronteira invertida, de modo a ordenar o conjunto analisado e identificar as unidades falsamente eficientes. A análise da eficiência indicou que das 58 (cinquenta e oito) unidades analisadas, 9 (nove) foram classificadas como eficientes. A aplicação do modelo da fronteira invertida ordenou as unidades de acordo com a medida da eficiência normatizada e identificou 8 (oito) unidades com falsa eficiência. Foi possível concluir que o produto FCM (fator de capacidade médio anual), teve um peso significativo nos cálculos das medidas de eficiências das UTDs (unidade tomadora de decisão).*

**Palavras chave:** eficiência, falsa eficiência, DEA, geração eólica.

## Introdução

A energia eólica é definida como a energia proveniente das correntes de ar, os ventos que circulam pela atmosfera, devido ao aquecimento desigual dela. Em outras palavras, é a energia cinética contida nos ventos. De acordo com Magalhães *et al.* (2019), energia eólica é uma fonte de energia considerada limpa, renovável e abundante.

A energia eólica é utilizada há muito tempo, para atividades essenciais como a caça, irrigação, grandes navegações, ou ainda a moagem de grãos e o bombeamento de água que usava mecanismo de grandes moinhos (Mendonça; Lopes; Santos, 2019). Entretanto, de acordo com Castro, Souza e Castro (2019), somente no século XIX, a energia eólica passou a ser usada na conversão em corrente elétrica.

O uso da energia eólica, tanto na geração residencial/comercial quanto nos grandes parques eólicos ou complexos eólicos, é uma realidade, o que torna necessário a adoção de políticas que visem o incentivo e ampliação da participação dessa fonte na matriz energética nacional (Rodrigues; Aquino; Thomaz, 2015; Rodrigues; Aquino; Thomaz, 2021).

A energia eólica tem uma função altamente relevante dentro dos aspectos que provocam a alteração do clima e ainda é uma alternativa para continuidade segura da geração de energia elétrica minimizando os impactos das atividades econômicas na natureza (Lima; Santos; Moizinho, 2018). Dessa forma, conforme Silva, Alves e Ramalho (2018), buscar melhorar a eficiência energética no uso de recursos renováveis vem sendo ressaltada em avaliações sobre o desenvolvimento sustentável.

A eficiência pode ser entendida como a capacidade de minimizar a quantidade de insumos mantendo-se a produção ou a capacidade de maximizar a produção mantendo-se a mesma quantidade de insumo (Fernandes; Resende Filho, 2018). Em termos energéticos, Salgado Júnior *et al.* (2017), afirma que a eficiência pressupõe a adoção de estratégias e medidas para diminuir o desperdício no processo de produção energética.

De acordo com Rodrigues, Aquino e Thomaz (2015), a técnica para conversão da energia dos ventos em energia eólica é simples, bastando que se tenha um bom potencial eólico e resistir aos caprichos da natureza. Dar-se o nome de turbina eólica (ou aerogerador) ao equipamento que converte energia eólica em energia elétrica.

O conjunto de turbinas eólicas instaladas em uma mesma área e ligadas a uma rede de transmissão de energia é chamado de parque eólico. Para Gorayeb e Brannstrom (2016), as turbinas eólicas são instaladas ordenadamente em que se consideram a velocidade do vento, as condições de operação, a rugosidade do terreno e a estabilidade térmica vertical da atmosfera.

De acordo com Rodrigues, Aquino e Thomaz (2021), múltiplos são os critérios que podem ser usados para um estudo da análise da eficiência (ou desempenho) do setor eólico, requerendo para isso, uma ferramenta de análise multicritério.

Será adotada como ferramenta de análise multicritério a Análise Envoltória de Dados (AED), também identificada como *Data Envelopment Analysis* (DEA) que pode ser empregada para avaliar um conjunto de unidades, chamadas de Unidades Tomadoras de Decisão (UTD) ou ainda *Decision Making Unit* (DMU) objetivando classificá-las conforme as suas performances.

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar a eficiência relativa da produção de energia eólica dos estados brasileiros produtores desta fonte durante o período entre os anos 2015 e 2019. Para isso, aplicou-se a análise por envoltória de dados para calcular a medida de eficiência convencional das unidades analisadas, e posteriormente, aplicou-se o modelo da fronteira invertida, de modo a ordenar o conjunto analisado e identificar as unidades com falsa eficiência.

### Material e métodos

Como dito anteriormente, para analisar a eficiência na produção de energia eólica nos estados brasileiros que apresentam parques eólicos operando em seus territórios será aplicada a ferramenta da análise envoltória de dados – AED. Assim, nesta seção será apresentada uma introdução da ferramenta multicritério que será usada nesta pesquisa, a AED, descrevendo os modelos matemáticos clássicos dessa ferramenta.

Em seguida, será descrita a metodologia desta pesquisa, descrevendo o conjunto de unidades a serem avaliadas, UTDs, e as variáveis, de insumo e de produto, usadas para medir a eficiência relativa desse conjunto. Além, será feita uma descrição do método da fronteira invertida que objetiva ordenar as unidades avaliadas identificando as falsas UTDs eficientes.

### Análise Envoltória de Dados

Segundo Rodrigues, Aquino e Thomaz (2021), a AED é uma ferramenta de programação matemática que avalia o grau de eficiência de um conjunto de unidades semelhantes, ou seja, que apresentam os mesmos insumos e produtos. Conforme Banker (1993), na AED consideram-se os recursos que se dispõe e os produtos alcançados.

A AED possibilita o cálculo da eficiência comparativa de um conjunto de UTDs, demonstrando como cada unidade opera em relação as demais do conjunto, obtendo um diagnóstico completo desse conjunto e identificando as ineficiências nos usos de recursos de cada unidade (Barbosa; Bastos, 2014; Qingxiam; Yan; Liang, 2016).

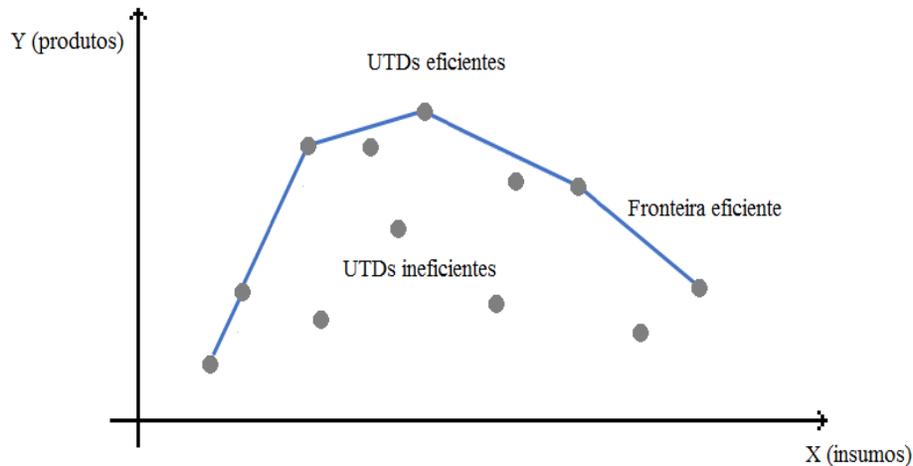
Do fato de não exigir uma relação funcional entre insumos e produtos, a AED é dita ser uma técnica não paramétrica em que o cálculo da eficiência é dado pela razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos (Cherchye; De Rock; Walheer, 2016; Lourenço; Ferreira; Sugahara, 2020).

A AED é usada para a construção de uma fronteira linear por partes, chamada de fronteira eficiente, construída pelos insumos e produtos de cada UTD avaliada, em seus vértices se encontram as unidades eficientes do conjunto analisado (Rodrigues *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2015).

Na Figura 1 tem-se ilustrada a fronteira eficiente de um conjunto de UTD em que é possível identificar as unidades eficientes, na fronteira, e as unidades não eficientes (ditas ineficientes), que se situam abaixo desta fronteira. Singh, Mittal e Upadhyay (2014) afirmam que as UTDs com alta performance, quando comparadas às UTDs analisadas, estão localizadas na fronteira eficiente.

Convém ressaltar que, a medida da eficiência é uma medida relativa que depende do modelo de AED adotado, sendo determinada por três componentes: a superfície envoltória, a orientação do modelo e o peso das variáveis avaliativas (Rodrigues; Aquino; Thomaz, 2021).

A grande vantagem de se usar um modelo AED é que ele não necessita a priori do conhecimento dos pesos (multiplicadores) dos insumos e dos produtos de cada UTD. Isto é, o próprio modelo é capaz de definir para cada UTD o conjunto de pesos para os seus fatores (insumos e produtos).



**Figura 1.** Fronteira eficiente formada pelas UTDs eficientes (Fonte: Rodrigues, Aquino e Thomaz, 2021).

Conforme Rodrigues, Aquino e Thomaz (2017), as unidades classificadas eficientes, chamadas de *benchmarks*, são usadas como modelo de referência para as unidades que apresentam algum grau de ineficiência, de modo a melhorarem suas performances e atingirem a fronteira de eficiência. Ou seja, de acordo com Ramos *et al.* (2020), a AED identifica para cada unidade ineficiente um conjunto de *benchmarks* que servirão de modelo para a obtenção da eficiência.

Assim, metas são estabelecidas de modo que cada UTD ineficiente seja projetada em direção a fronteira de eficiência. Duas são as formas básicas que uma unidade ineficiente pode se tornar eficiente. Conforme Azevedo, Leite e Andrade (2019), a primeira consiste em diminuir os insumos, mantendo constante os produtos, sendo chamada de “orientação a insumo”, enquanto a segunda consiste em elevar os produtos, mantendo-se constante os insumos, sendo chamada de “orientação a produto”.

Pode-se afirmar que o principal objetivo na orientação a insumo é o ganho de eficiência com a redução do consumo de insumos, mantendo a produção constante. Enquanto, na orientação a produto, o principal objetivo é o ganho de eficiência por meio do aumento da produção mantendo-se constante o consumo de insumos.

Existem dois modelos mais comuns de análise por envoltória de dados, que são: o modelo CCR, que também pode ser identificado como *Constant Return to Scale* (CRS), que admite retornos de escala constante; e o modelo BCC, que é comumente apresentado como *Variable Return to Scale* (VRS), que admite retornos variáveis de escala. O cálculo da eficiência desses modelos pode usar tanto com orientação a insumo como com orientação a produto.

Em seguida, será feita uma descrição de cada um dos modelos matemáticos de AED considerados clássicos, CCR e BCC, tanto com orientação a insumo como com orientação a produto.

### Modelo CCR

A AED teve início com a publicação por Charnes, Cooper e Rhodes (1978) da pesquisa que almejava realizar a análise da eficiência de programas escolares no Estado do Texas – EUA. Este modelo ficou conhecido por CCR (iniciais dos autores) e trabalha com retornos constante de escala, além de originalmente ter sido desenvolvido para orientação a insumo.

Considere que existam  $n$  unidades semelhantes entre si, empregando  $m$  insumos para resultar em  $s$  produtos. Dessa forma, em um modelo CCR, com orientação a insumo, os pesos dos produtos e dos insumos de uma unidade objeto,  $UTD_O$ , são determinados por meio da resolução da equação (1).

$$\max E_{fO} = \sum_{i=1}^s U_i Y_{iO} \quad \text{Equação (1)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m V_j X_{jO} = 1$$

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{ik} - \sum_{j=1}^m V_j X_{jk} \leq 0, \quad (k = 1, \dots, n) \quad \text{Equação (2)}$$

$$U_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, s); \quad V_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, m)$$

Onde:  $E_{fO}$  é a eficiência relativa da  $UTD_O$ ;  $Y_{ik}$  e  $X_{ij}$  são as quantidades de produto observado  $i$  da unidade  $k$  e de insumo observado  $j$  da unidade  $k$ , respectivamente;  $U_i$  e  $V_j$  são os pesos dados ao produto  $i$  e ao insumo  $j$ , respectivamente; e,  $Y_{iO}$  e  $X_{iO}$  são as quantidades do produto  $i$  e do insumo  $j$  da unidade objeto, respectivamente.

As formulações do modelo CCR orientado a produto estão apresentadas nas equações (3) e (4). Nesse tipo de orientação ocorre a maximização dos produtos, enquanto os insumos permanecem inalterados.

$$\min h_O = \sum_{j=1}^m V_j X_{jO} \quad \text{Equação (3)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{i0} = 1$$

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{ik} - \sum_{j=1}^m V_j X_{jk} \leq 0, \quad (k = 1, \dots, n) \quad \text{Equação (4)}$$

$$U_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, s); \quad V_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, m)$$

Onde:  $h_0 = 1/Ef_0$ .

Na modelagem AED dos multiplicadores, tanto com orientação a produto como com orientação a insumo, as incógnitas de decisão são os pesos  $V_j$  e  $U_i$ . Com isso, o conjunto dos pesos encontrados para cada unidade analisada deve proporcionar a eficiência máxima.

#### Modelo BCC

Este modelo foi desenvolvido por Banker, Charnes e Cooper (1984), onde os retornos de escala são considerados variáveis, sendo conhecido como modelo BCC em homenagem aos autores.

Este modelo adota tecnologias com retornos de escala variáveis, proporcionando uma fronteira formada por combinações convexas de UTDs eficientes (Rodrigues; Aquino; Thomaz, 2017). De acordo com Gomes Júnior, Soares de Mello e Ângulo Meza (2013), este modelo adota o axioma da convexidade ao invés do axioma da proporcionalidade do modelo CCR.

A adição de uma variável livre  $U_*$ , para orientação a insumo, e  $V_*$  para orientação a produto faz com que a suposição de retornos constantes do modelo CCR seja relaxada para retorno variáveis do modelo BCC. Logo, o modelo BCC, orientado a insumo pode ser dado pelo problema de PML seguinte.

$$\max E_{f0} = \sum_{i=1}^s U_i Y_{i0} + U_* \quad \text{Equação (5)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^m V_j X_{j0} = 1$$

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{ik} - \sum_{j=1}^m V_j X_{jk} + U_* \leq 0, \quad (k = 1, \dots, n) \quad \text{Equação (6)}$$

$$U_i \geq 0 \ (i = 1, \dots, s); \ V_j \geq 0 \ (j = 1, \dots, m); \ U_* \in \mathbb{R}$$

Se a variável livre  $U_*$  for positiva, então, o modelo apresenta rendimentos de escala não decrescente (RND), enquanto se a variável for negativa, o modelo se apresenta com rendimentos de escala não crescente (RNC).

A modelagem AED dos multiplicadores para o modelo BCC, orientado a produto, é representada pela equação 7.

$$\min h_0 = \sum_{j=1}^m V_j X_{j0} + V_* \quad \text{Equação (7)}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{i0} = 1$$

$$\sum_{i=1}^s U_i Y_{ik} - \sum_{j=1}^m V_j X_{jk} + V_* \leq 0, \quad (k = 1, \dots, n) \quad \text{Equação (8)}$$

$$U_i \geq 0 \ (i = 1, \dots, s); \ V_j \geq 0 \ (j = 1, \dots, m); \ V_* \in \mathbb{R}$$

Se a variável livre  $V_*$  for positiva, então, o modelo apresenta rendimentos de escala não crescente (RNC), enquanto se esta variável for negativa, o modelo se apresenta com rendimentos de escala não decrescente (RND).

### Metodologia

A aplicação da ferramenta de análise envoltória de dados nesta pesquisa, que objetiva analisar o desempenho da geração de energia eólica nos estados brasileiros produtores durante o período entre os anos de 2015 e 2019, será composta basicamente dos seguintes estágios a serem desenvolvidos:

- 1) Seleção e definição das UTDs a serem avaliadas.
- 2) Definição dos insumos e produtos (variáveis de avaliação).
- 3) Seleção do modelo AED na análise da eficiência do conjunto de UTDs.
- 4) Aplicação do modelo AED por meio da ferramenta SIAD.
- 5) Análise e interpretação dos resultados obtidos.

Nesta seção será descrita a metodologia da pesquisa por meio da descrição das unidades tomadoras de decisão e da seleção das variáveis avaliativas, tanto de insumo como de produto, que serão usadas para realizar os cálculos das medidas de eficiência.

Em seguida será definido o modelo AED a ser aplicado para o cálculo das medidas de eficiência do conjunto analisado e por fim será realizada uma descrição do método da fronteira invertida que visa ordenar o conjunto de UTDs avaliadas, identificando as unidades com falsa eficiência.

#### *Unidades tomadoras de decisão – UTDs*

Atualmente, o Brasil apresenta 12 (doze) estados produtores de energia eólica, com parques eólicos em operação gerando energia elétrica em seus territórios. Assim, os estados brasileiros que produzem energia eólica são: Paraíba, Bahia, Maranhão, Ceará, Paraná, Piauí, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte, Sergipe e Santa Catarina.

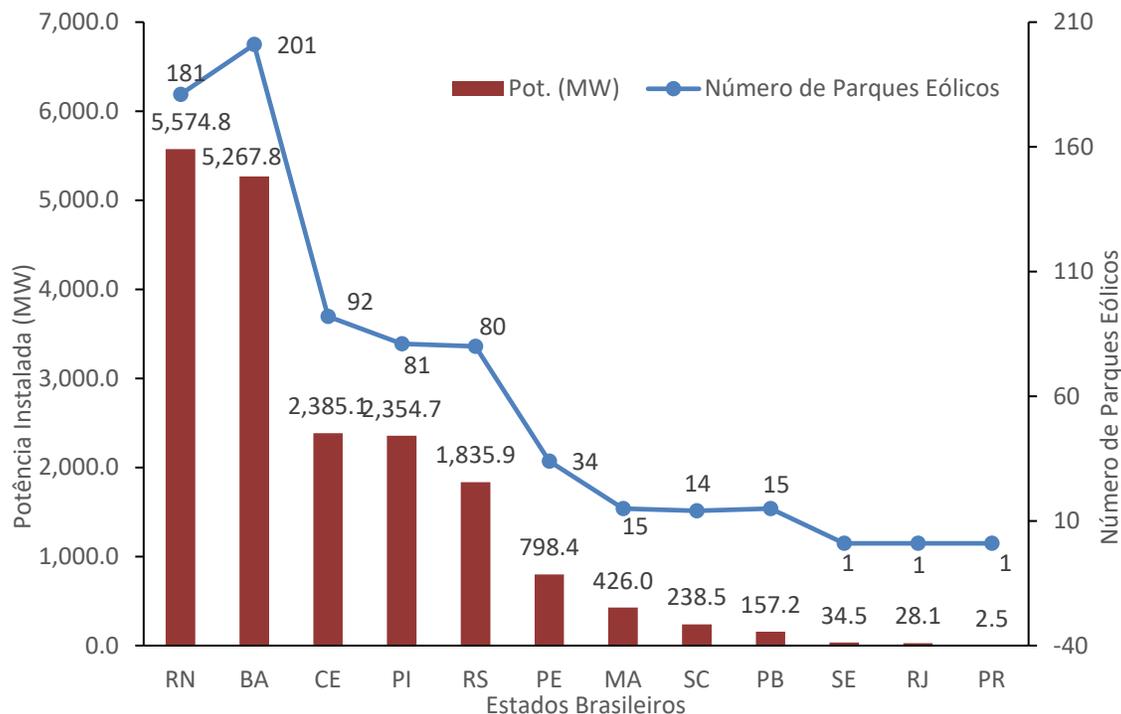
Na Figura 2 são apresentados, para cada estado brasileiro produtor de energia eólica, a potência instalada, em MW, e a quantidade de parques eólicos em operação em seu território. Segundo ABEEólica (2021), o Brasil apresenta uma potência instalada (capacidade instalada) de 18,0 GW distribuída em 695 parques eólicos em operação, sendo a maioria instalados no litoral nordestino.

Conforme os dados apresentados na Figura 2, dos cinco maiores produtores de energia eólica, que são Rio Grande do Norte (5.154,2 MW), Bahia (4.879,5 MW), Piauí (2.275,9 MW), Ceará (2.179,3 MW) e Rio Grande do Sul (1.835,9 MW), apenas o Rio Grande do Sul, ocupando a quinta posição, não se encontra na Região Nordeste.

Este fato mostra a força dos ventos nordestino, ou seja, os estados nordestinos juntos (excetuando Alagoas, que não possui parques eólicos em operação) representam cerca de 88,3% de toda a capacidade instalada no país, com 599 parques em operação, a grande maioria localizados no litoral nordestino.

Dessa forma, as UTDs desta pesquisa serão representadas pelo setor de geração de energia eólica dos 12 (dozes) estados brasileiros que possuem parques eólicos convertendo energia eólica em energia elétrica durante os anos 2015, 2016, 2017, 2018 e 2019. Então, na Tabela 1 estão listadas todas as UTDs a serem avaliadas nesta pesquisa, um total de 58 (cinquenta e oito) UTDs.

Assim, cada UTD identificada na Tabela 1 representa um ano específico (entre 2015 e 2019) da energia eólica produzida em grande porte nos parques eólico de cada um dos estados produtores dessa fonte de energia renovável. É importante destacar que o Estado do Maranhão só passa a ter parque eólico em operação comercial gerando energia elétrica a partir do ano de 2017.



**Figura 2.** Capacidade instalada por cada estado em fevereiro de 2021. Fonte: Adaptado de ABEEólica, 2021.

**Tabela 1.** Conjunto de UTDs analisadas na pesquisa

Unidade Tomado de Decisão – UTD							
1	RN (2015)	16	PI (2016)	31	PB (2017)	46	PR (2018)
2	BA (2015)	17	PE (2016)	32	SE (2017)	47	RN (2019)
3	CE (2015)	18	SC (2016)	33	RJ (2017)	48	BA (2019)
4	RS (2015)	19	PB (2016)	34	PR (2017)	49	CE (2019)
5	PI (2015)	20	SE (2016)	35	RN (2018)	50	RS (2019)
6	PE (2015)	21	RJ (2016)	36	BA (2018)	51	PI (2019)
7	SC (2015)	22	PR (2016)	37	CE (2018)	52	PE (2019)
8	PB (2015)	23	RN (2017)	38	RS (2018)	53	MA (2019)
9	SE (2015)	24	BA (2017)	39	PI (2018)	54	SC (2019)
10	RJ (2015)	25	CE (2017)	40	PE (2018)	55	PB (2019)
11	PR (2015)	26	RS (2017)	41	MA (2018)	56	SE (2019)
12	RN (2016)	27	PI (2017)	42	SC (2018)	57	RJ (2019)
13	BA (2016)	28	PE (2017)	43	PB (2018)	58	PR (2019)
14	CE (2016)	29	MA (2017)	44	SE (2018)		
15	RS (2016)	30	SC (2017)	45	RJ (2018)		

Fonte: Autoria própria, 2021.

### Variáveis de avaliação (insumos e produtos)

As variáveis (ou fatores) que serão usadas para a análise da eficiência das UTDs descritas na Tabela 1 estão relacionadas diretamente a produção de energia eólica nos estados brasileiros produtores desta fonte durante o período entre os anos 2015 e 2019. Assim, na Tabela 2 são apresentadas as variáveis, de insumo e de produtos, selecionadas para serem usadas no cálculo das medidas das eficiências relativas das UTDs desta pesquisa.

**Tabela 2.** Variáveis de avaliação usadas na pesquisa

Insumos	Produtos
PIN – Potência instalada durante o ano, em MW	GEM – Geração eólica média anual, em MW
NPE – Número de parques eólicos operando ao ano	FCM – Fator de capacidade médio anual, em %

Fonte: Autoria própria, 2021.

O insumo PIN é potência instalada, em MW, durante o ano, e se refere a capacidade instalada nos parques eólicos em operação comercial ao final do respectivo ano de cada UTD. Enquanto o insumo NPE é o número de parques eólicos em operação ao final do respectivo ano em cada UTD.

O produto GEM é a geração de energia eólica média ao longo de cada ano de uma UTD. Representa em média o quando de potência elétrica é gerada nos parques eólicos durante o ano. Já o produto FCM é o fator de capacidade médio anual de cada ano de uma UTD. “O fator de capacidade da fonte eólica representa a proporção entre a geração efetiva da usina em um intervalo de tempo e a capacidade total no mesmo íterim” (ABEEólica, 2020).

Em seguida, segue na Tabela 3 os dados das variáveis, de insumo e de produto, para cada UTD analisada na pesquisa. Vale salientar que esses dados foram obtidos junto a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEÓLICA.

**Tabela 3.** Dados de insumos e produtos para cada UTD analisada

(continua)

UTD	PIN	NPE	GEM	FCM
Rio Grande do Norte (2015)	2,699.6	97	803.8	37.9
Bahia (2015)	1,470.1	55	448.8	46.0
Ceará (2015)	1,256.3	45	517.1	42.7
Rio Grande do Sul (2015)	1,467.9	60	373.0	31.5
Piauí (2015)	503.1	18	90.9	43.8
Pernambuco (2015)	406.6	19	46.2	44.0
Santa Catarina (2015)	238.5	14	35.4	15.2
Paraíba (2015)	69.0	13	16.0	25.6
Sergipe (2015)	34.5	1	7.4	21.5
Rio de Janeiro (2015)	28.1	1	8.7	31.2

UTD	PIN	NPE	GEM	FCM
Paraná (2015)	2.5	1	0.4	16.6
Rio Grande do Norte (2016)	3,408.1	125	1.208.0	41.8
Bahia (2016)	1,897.8	73	6925	40.6
Ceará (2016)	1,759.1	67	668.0	47.6
Rio Grande do Sul (2016)	1,644.4	69	518.2	34.1
Piauí (2016)	869.9	31	330.9	43.8
Pernambuco (2016)	650.9	29	169.4	31.7
Santa Catarina (2016)	238.5	14	31.3	13.4
Paraíba (2016)	69.0	13	18.6	29.7
Sergipe (2016)	34.5	1	7.2	20.8
Rio de Janeiro (2016)	28.1	1	7.8	27.8
Paraná (2016)	2.5	1	0.4	15.3
Rio Grande do Norte (2017)	3,625.5	133	1,510.0	44.4
Bahia (2017)	2,344.3	90	889.1	48.5
Ceará (2017)	1,935.8	74	581.2	34.1
Rio Grande do Sul (2017)	1,831.9	80	635.6	37.1
Piauí (2017)	1,443.1	52	522.6	46.1
Pernambuco (2017)	782.0	34	335.3	48.3
Maranhão (2017)	220.8	8	125.5	68.0
Santa Catarina (2017)	238.5	14	28.8	12.6
Paraíba (2017)	157.2	15	28.5	31.4
Sergipe (2017)	34.5	1	8.4	24.3
Rio de Janeiro (2017)	28.1	1	8.8	31.5
Paraná (2017)	2.5	1	0.4	17.0
Rio Grande do Norte (2018)	3,980.1	147	1,553.6	42.0
Bahia (2018)	3,525.0	133	1,253.5	46.2
Ceará (2018)	2,049.9	80	628.8	33.6
Rio Grande do Sul (2018)	1,831.9	80	633.5	35.6
Piauí (2018)	1,584.1	58	636.2	44.3
Pernambuco (2018)	781.3	34	373.7	47.8
Maranhão (2018)	274.8	10	112.2	50.8
Santa Catarina (2018)	238.5	14	19.6	10.2
Paraíba (2018)	156.9	15	64.8	41.7
Sergipe (2018)	34.5	1	9.1	26.4
Rio de Janeiro (2018)	28.1	1	5.9	21.1
Paraná (2018)	2.5	1	0.3	13.7
Rio Grande do Norte (2019)	4,159.5	154	1,604.0	39.6
Bahia (2019)	4,074.4	165	1,914.2	49.1
Ceará (2019)	2,045.5	79	685.5	37.1
Rio Grande do Sul (2019)	1,831.9	80	598.4	33.7
Piauí (2019)	1,638.1	60	720.8	44.0
Pernambuco (2019)	782.0	34	368.0	47.1
Maranhão (2019)	426.0	15	176.4	49.7
Santa Catarina (2019)	238.5	14	41.6	29.7
Paraíba (2019)	157.2	15	63.0	40.6
Sergipe (2019)	34.5	1	7.8	22.4
Rio de Janeiro (2019)	28.1	1	6.9	24.7
Paraná (2019)	2.5	1	0.4	14.7

PIN (MW); GEM (MW); FCM (%). Fonte: Autoria própria, 2021.

### Seleção do modelo AED e fronteira invertida

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3 verifica-se que as UTDs apresentam diferentes tamanhos, o que faz com que elas possam ter rendimentos de escalas variáveis. Dessa forma, o método AED, escolhido para determinar as eficiências, será o modelo BCC (retornos de escala variáveis), orientado a produto, apresentados nas equações (7) e (8).

Os modelos AED resultam em um elevado número de unidades eficientes, contudo, por causa das propriedades matemáticas do modelo DEA, as UTDs que mostram valor menor de um dos insumos ou o maior de um dos produtos serão consideradas eficientes, e portanto, identificadas como falsas eficientes.

Assim, o método da fronteira invertida identifica essas unidades com falsa eficiência. A fronteira invertida consiste em considerar os insumos como produtos e os produtos como insumos para cada UTD, e depois, resolve-se o modelo BCC do AED, com uma orientação a insumo (Ângulo Meza *et al.*, 2007).

De acordo com Ângulo Meza *et al.* (2007), o método da fronteira invertida constrói um índice de eficiência composta, cuja definição é dada pela média aritmética  $Ef_{Conv}$  (fronteira AED convencional), e o complemento da eficiência em relação à  $Ef_{Inv}$  (fronteira invertida) Isto é,

$$Ef_{Comp} = \frac{Ef_{Conv} + (1 - Ef_{Inv})}{2} \quad \text{Equação (9)}$$

Em seguida é feito a normalização da eficiência composta, dividindo os valores da equação (9) obtida em cada UTD pela maior de todas as medidas de eficiência compostas, indicada por  $Máx(Ef_{Comp})$ . Assim, a eficiência composta normalizada, indicada por  $Ef_{Norm}$ , é definida pela equação

$$Ef_{Norm} = \frac{Ef_{Comp}}{Máx(Ef_{Comp})} \quad \text{Equação (10)}$$

Para a perspectiva da fronteira invertida, a unidade mais eficiente será aquela que produzirá muitos de todos os seus produtos gastando pouco de todos os seus insumos, sem que haja destaque nem nos insumos e nem nos produtos. Assim, a metodologia objetiva excluir do grupo de unidades eficientes as UTDs com falsa eficiência. (Brochado; Mariano; Rebelatto, 2008).

Por fim, pode-se afirmar que com a medida da eficiência composta normalizada, calculadas pelas equações (9) e (10), será possível então o ordenamento das UTDs avaliadas.

Todos os cálculos das eficiências relativas das UTDs determinadas neste trabalho foram realizados com auxílio do Sistema Integrado de Apoio à Decisão (SIAD), que é uma ferramenta computacional. De acordo com Ângulo Meza *et al.* (2005), o SIAD permite se trabalhe com o máximo de 150 (cento e cinquenta) UTDs e 20 (vinte) variáveis avaliativas, entre insumos e produtos.

### Resultados e discussão

É importante salientar que o cálculo das eficiências em relação à fronteira AED convencional, indicadas por  $Ef_{Conv}$ , das unidades descritas na Tabela 1, foi realizado por meio da aplicação do modelo AED-BCC, com orientação a produto. Já na metodologia da fronteira invertida, os insumos e produtos são invertidos, então foi aplicado o modelo AED-BCC com orientação a insumo.

Em seguida, na Tabela 4 são apresentadas, para UTD, os valores da eficiência em relação a fronteira convencional,  $Ef_{Conv}$ , da eficiência em relação a fronteira invertida,  $Ef_{Inv}$ , do índice de eficiência composta,  $Ef_{Comp}$ , e da eficiência composta normalizada,  $Ef_{Norm}$ .

**Tabela 4.** Medidas das eficiências das unidades avaliadas (continua)

UTD	$Ef_{Conv}$	$Ef_{Inv}$	$Ef_{Comp}$	$Ef_{Norm}$
1ª Maranhão (2017)	1.000000	0.151547	0.924226	1.000000
2ª Rio de Janeiro (2017)	1.000000	0.415589	0.792206	0.857155
3ª Rio de Janeiro (2015)	0.990476	0.419622	0.785427	0.849821
4ª Sergipe (2018)	1.000000	0.490344	0.754828	0.816713
5ª Pernambuco (2018)	0.968979	0.465042	0.751969	0.813620
6ª Maranhão (2018)	0.756170	0.254522	0.750824	0.812381
7ª Pernambuco (2019)	0.953396	0.472743	0.740326	0.801023
8ª Maranhão (2019)	0.857824	0.392502	0.732661	0.792729
9ª Rio de Janeiro (2016)	0.886356	0.470803	0.707777	0.765804
10ª Sergipe (2017)	0.923069	0.532630	0.695220	0.752218
11ª Piauí (2019)	1.000000	0.632518	0.683741	0.739798
12ª Paraíba (2018)	0.746365	0.388875	0.678745	0.734392
13ª Pernambuco (2017)	0.868679	0.513526	0.677576	0.733128
14ª Paraíba (2019)	0.725605	0.399874	0.662866	0.717211
15ª Ceará (2015)	0.941759	0.618041	0.661859	0.716122
16ª Sergipe (2019)	0.857136	0.577558	0.639789	0.692242
17ª Rio de Janeiro (2019)	0.784127	0.530003	0.627062	0.678472
18ª Piauí (2016)	0.851068	0.597084	0.626992	0.678396
19ª Piauí (2018)	0.912354	0.669806	0.621274	0.672209
20ª Sergipe (2015)	0.813358	0.602149	0.605605	0.655256
21ª Paraná (2017)	1.000000	0.805637	0.597182	0.646142
22ª Paraná (2015)	1.000000	0.824965	0.587517	0.635685
23ª Sergipe (2016)	0.791202	0.622205	0.584499	0.632419
24ª Piauí (2017)	0.832203	0.699126	0.566538	0.612986

UTD	Ef <sub>Conv</sub>	Ef <sub>Inv</sub>	Ef <sub>Comp</sub>	Ef <sub>Norm</sub>
25 <sup>a</sup> Ceará (2016)	0.836742	0.710854	0.562944	0.609098
26 <sup>a</sup> Paraná (2016)	1.000000	0.894730	0.552635	0.597943
27 <sup>a</sup> Rio Grande do Norte (2017)	0.973881	0.872209	0.550836	0.595997
28 <sup>a</sup> Paraná (2019)	1.000000	0.931070	0.534465	0.578284
29 <sup>a</sup> Rio de Janeiro (2018)	0.670449	0.620401	0.525024	0.568068
30 <sup>a</sup> Bahia (2017)	0.838950	0.808990	0.514980	0.557201
31 <sup>a</sup> Bahia (2016)	0.798227	0.787547	0.505340	0.546770
32 <sup>a</sup> Bahia (2019)	1.000000	1.000000	0.500000	0.540993
33 <sup>a</sup> Santa Catarina (2019)	0.436765	0.471154	0.482805	0.522389
34 <sup>a</sup> Rio Grande do Norte (2018)	0.908741	0.968837	0.469952	0.508481
35 <sup>a</sup> Bahia (2015)	0.731935	0.832820	0.449558	0.486415
36 <sup>a</sup> Rio Grande do Norte (2019)	0.896502	1.000000	0.448251	0.485001
37 <sup>a</sup> Paraíba (2016)	0.756745	0.860532	0.448107	0.484845
38 <sup>a</sup> Bahia (2018)	0.857468	1.000000	0.428734	0.463884
39 <sup>a</sup> Rio Grande do Norte (2016)	0.827945	0.986108	0.420918	0.455428
40 <sup>a</sup> Ceará (2019)	0.732509	0.891040	0.420734	0.455229
41 <sup>a</sup> Paraná (2018)	0.805882	1.000000	0.402941	0.435977
42 <sup>a</sup> Rio Grande do Sul (2017)	0.727803	0.941473	0.393165	0.425399
43 <sup>a</sup> Rio Grande do Sul (2018)	0.725398	0.945601	0.389898	0.421865
44 <sup>a</sup> Piauí (2015)	0.645651	0.871457	0.387097	0.418834
45 <sup>a</sup> Pernambuco (2016)	0.521012	0.784303	0.368355	0.398554
46 <sup>a</sup> Rio Grande do Sul (2016)	0.659050	0.932968	0.363041	0.392805
47 <sup>a</sup> Ceará (2017)	0.661350	0.952294	0.354528	0.383594
48 <sup>a</sup> Rio Grande do Norte (2015)	0.705059	1.000000	0.352529	0.381432
49 <sup>a</sup> Paraíba (2017)	0.561182	0.874386	0.343398	0.371552
50 <sup>a</sup> Rio Grande do Sul (2019)	0.685206	1.000000	0.342603	0.370692
51 <sup>a</sup> Ceará (2018)	0.663955	0.987461	0.338247	0.365979
52 <sup>a</sup> Paraíba (2015)	0.652279	1.000000	0.326139	0.352878
53 <sup>a</sup> Pernambuco (2015)	0.647059	1.000000	0.323529	0.350054
54 <sup>a</sup> Santa Catarina (2015)	0.264741	0.671048	0.296846	0.321184
55 <sup>a</sup> Rio Grande do Sul (2015)	0.529560	1.000000	0.264780	0.286488
56 <sup>a</sup> Santa Catarina (2016)	0.234079	0.761189	0.236445	0.255830
57 <sup>a</sup> Santa Catarina (2017)	0.215382	0.809518	0.202932	0.219570
58 <sup>a</sup> Santa Catarina (2018)	0.150118	1.000000	0.075059	0.081213

Fonte: Autoria própria, 2021.

Conforme os dados apresentados na Tabela 4, percebe-se que, de acordo com as medidas de eficiência em relação a fronteira convencional foram identificadas 9 (nove) UTDs consideradas eficientes (*benchmarks*), a saber: Bahia (2015); Maranhão (2017); Paraná (2015); Paraná (2016); Paraná (2017); Paraná (2019); Piauí (2019); Rio de Janeiro (2017) e Sergipe (2018).

Como dito anteriormente, as unidades eficientes, as *benchmarks*, servem como modelo para as unidades ineficientes. Portanto, o modelo AED aplicado na pesquisa definiu para cada uma das UTDs ineficientes um conjunto de *benchmarks*.

Assim, na Tabela 5 tem-se o número de vezes que uma *benchmark* foi citada como referência para uma unidade ineficiente. Conforme os dados apresentados, o setor eólico do Estado do Maranhão no ano de 2017 se mostrou como modelo para 33 (trinta e três) unidades ineficientes, seguido do Estado da Bahia no ano de 2019 que foi modelo para um total de 29 (vinte e nove) unidades. Enquanto isso, o setor eólico do Estado do Paraná, nos anos de 2016, 2017 e 2019, não foi modelo para nenhuma unidade ineficiente.

Ao se aplicar um modelo AED pode ocorrer de se ter muitas unidades do conjunto classificadas como eficientes. Além disso, quando se aplica o modelo AED-BCC com orientação a insumo algumas unidades, que apresentam os maiores produtos ou os menores insumos, serem classificadas como eficientes, mesmo não sendo, que são as chamadas unidades falsamente eficientes.

**Tabela 5.** Número de referências de uma *benchmark* para as UTDs ineficientes

Benchmarks	Nº
Maranhão (2017)	33
Bahia (2019)	29
Piauí (2019)	20
Paraná (2015)	6
Rio de Janeiro (2017)	4
Sergipe (2018)	5
Paraná (2016)	0
Paraná (2017)	0
Paraná (2019)	0

Fonte: Autoria própria, 2021.

Assim, a aplicação do método da fronteira invertida neste trabalho além de ordenar as UTDs conforme a medida da eficiência normalizada, indica por  $Ef_{Norm}$ , identificou as unidades falsamente eficientes.

A Tabela 4 apresentou o ordenamento das UTDs, do maior valor da medida de eficiência normalizada ao menor valor. O maior destaque se deve a unidade Maranhão (2017), representando o setor eólico do Maranhão durante o ano de 2017, que foi classificada como a mais eficiente de todo o conjunto, com a medida  $Ef_{Norm} = 1.0$ . Já as demais *benchmarks* são identificadas como unidades falsamente eficientes.

Analisando os dados do Maranhão (Tabela 3), verifica-se que ao final do ano de 2017 o estado tinha um total de 8 (oito) parques eólicos em operação, com uma potência instalada de 220.8 MW, o que resultou em uma geração eólica média anual de 125.5 MW e um fator de capacidade de 68.0 %.

É importante destacar que das 5 (cinco) unidades referentes ao Estado do Paraná, 4 (quatro) unidades foram classificadas conforme a medida da eficiência convencional como *benchmarks*, que são as UTDs: Paraná (2015), Paraná (2016), Paraná (2017) e Paraná (2019). Isto se deve pelo fato de que os insumos, PIN e NPE, respectivamente iguais a 2.5 GW e 1 são os menores valores de todo o conjunto analisado. Daí, o fato de três unidades referentes ao Paraná, conforme Tabela 5, não foram referências para nenhuma unidade ineficiente.

Já a unidade mais ineficiente do conjunto analisado foi unidade Santa Catarina (2018), representando o setor eólico de Santa Catarina durante o ano de 2018, com medida da eficiência convencional,  $Ef_{Conv} = 0.150118$ , e com medida de eficiência normalizada,  $Ef_{Norm} = 0.081213$ . Conforme a Tabela 3, verifica-se que o Estado de Santa Catarina ao final do ano de 2018 tinha um total de 14 (quatorze) parques eólicos em operação, com uma potência instalada de 238.5 MW, o que resultou em uma geração eólica média anual de apenas 19.6 MW e um fator de capacidade de apenas 10.2 %.

Pode-se observar que o Maranhão (2017), classificada como a mais eficiente, e Santa Catarina (2018), classificada como a menos eficiente, tiveram, respectivamente, o maior e o menor valor para o produto FCM (fator de capacidade médio anual). Dessa forma, pode-se concluir que este produto teve um peso significativo nos cálculos das medidas de eficiências dessas UTDs.

### Conclusões

Esta pesquisa, além da eficiência convencional, estudada em outros trabalhos, analisou os estados produtores de energia eólica no Brasil aplicando a ferramenta da fronteira invertida em AED identificando, assim, as unidades com falsa eficiência dentre as unidades classificadas como *benchmarks* de acordo com a eficiência convencional. Este fato pode ser considerado como uma melhoria da análise da eficiência relativa das unidades analisadas na pesquisa, visto que outros trabalhos

Dessa forma, pode-se afirmar que o objetivo proposto nesta pesquisa foi atendido, ou seja cada unidade, que representava o setor de energia eólica, teve seu desempenho avaliado, por meio da análise envoltória de dados, e o método da fronteira invertida conseguiu ordenar o conjunto analisado identificando as unidades com falsa eficiência.

Das 9 (nove) unidades classificadas inicialmente como *benchmarks*, de acordo com a medida da eficiência convencional, 8 (oito) foram identificadas como falsamente eficientes. O setor eólico do Estado do Maranhão, durante o ano de 2017, foi considerado como o mais eficiente de todo o conjunto, enquanto o setor eólico do Estado de Santa Catarina, durante o ano de 2018, foi considerado o oposto, ou seja, a unidade com maior ineficiência de todas as UTDs analisadas na pesquisa.

Pode-se afirmar que uma análise como a realizada neste trabalho é muito importante do ponto de vista científico uma vez que possibilita determinar melhores práticas para o setor de geração eólica de modo a favorecer o desenvolvimento sustentável. Desse modo, se propõe para trabalhos futuros uma análise de eficiência para o setor eólico em que sejam acrescentadas além de variáveis técnicas, como as usadas nesta pesquisa, variáveis de natureza ambiental, social e econômica.

Por fim, recomenda-se o uso desta ferramenta de análise envoltória de dados para a realização da análise do setor de produção de energia eólica no Brasil buscando assim uma melhoria nas práticas desse tipo de fonte de energia.

### Referências bibliográficas

- ABEEólica, Associação Brasileira de Energia Eólica. *Boletim Anual de Geração Eólica 2019*. ABEEólica, 2020.
- ABEEólica, Associação Brasileira de Energia Eólica. *Energia Eólica: Os bons ventos no Brasil. Infovento 19, de 11 de fevereiro de 2021*. ABEEólica, 2021.
- Ângulo Meza, L., Biondi Neto, L., Soares de Mello, J. C. C. B., Gomes E. G. (2005) ISYDS – Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio à Decisão): A software package for data envelopment analysis model, *Pesquisa Operacional*, v. 25, n. 3, p. 493-503.
- Ângulo Meza, L., Soares de Mello, J. C. C. B., Gomes E. G., Fernandes A. J. S. (2007) Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica, *Investigação Operacional*, **27**, 21-36.
- Azevedo, A. A. de, Leite, C. M. de O., Andrade, L. A. de. (2019) Análise da eficiência energética dos estados brasileiros com a utilização do método análise envoltória de dados, *Brazilian Journal of Production Engineering*, **5**(3), 196-213.
- Banker, R. D. (1993) Maximum likelihood, consistency and Data Envelopment Analysis: A statistical foundation, *Management Science*, **39**(10), 1265-1273.
- Banker, R. D., Charnes, A., Cooper, W. W. (1984) Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis, *Management Science*, **30**(9), 1078-1092.
- Barbosa, R. de P., Bastos, A. P. V. (2014) Utilização da análise por envoltória de dados (DEA) na mensuração da eficiência das prestadoras de serviços de água e esgotamento sanitário: Um enfoque no desempenho da companhia de saneamento do estado do Pará, *Revista Economia e Gestão*, **14**(35), 151-181.
- Brochado, M. R. de; Mariano, E. B.; Rebelatto, D. A. do N. (2008) Análise de eficiência dos aeroportos internacionais. *Revista Produção Online*, **7**(4). <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v7i4.51>
- Castro, M. T. de, Souza, M. G. de; Castro, A. de O. (2019) Renewable energy: Wind energy, its effects and environmental gains, *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*, **5**(19), 103-108.
- Charnes, A., Cooper, W. W., Rhodes, E. (1978) Measuring the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, **2**(6), 429-444.
- Cherchye, L., De Rock, B., Walheer, B. (2016) Multi-output profit efficiency and directional distance functions, *Omega*, **61**, 100-109.
- Fernandes, D. de P., Resende Filho, M. de A. (2018) Eficiência de custos operacionais das companhias de distribuição de energia elétrica (CDEES) no Brasil: Uma aplicação (DEA & TOBIT) em dois estágios. *Revista Planejamento e Políticas Públicas*, **51**, 139-164.
- Gorayeb, A., Brannstrom, C. (2016) Caminhos para uma gestão participativa dos recursos energéticos de matriz renovável (parques eólicos) no Nordeste do Brasil, *Revista Mercator*, **15**(1), 101-115.

- Gomes Júnior, J. F., Soares de Mello, J. C. C. B., Ângulo Meza, L. (2013) DEA nonradial efficiency based on vector properties, *International Transactions Inoperational Research*, **20**, 341-364.
- Lima, E. C. de, Santos, I. A., Moizinho, L. C. S. (2018) Energia eólica no Brasil: Oportunidades e limitações para o desenvolvimento sustentável, *Revista Estudo & Debate*, **25**(1), 216-236.
- Lourenço, A. P., Ferreira, D. H. L., Sugahara, C. R. (2020) Uma análise da eficiência de portos europeus por meio da ferramenta análise envoltória de dados, *Revista Produção Online*, **20**(4), 1260-1278.
- Magalhães, J. V. M., Góes, M. de F. B., Silva, M. S., Andrade, J. C. S. (2019) Análise estratégica do setor de energia eólica no Brasil, *Revista Eletrônica Estratégia & Negócios*, **12**(1), 4-25.
- Mendonça, I. M., Lopes, I. F., Santos, J. L. de C. (2019) Perspectivas de geração de energia eólica no Brasil, *Brazilian Journal of Development*, **5**(10), 18598-18611.
- Park, J., Yoo, S. K., Lee, J. S., Kim, J., Kim, J. J. (2015) Comparing the efficiency and productivity of construction firms in China, Japan and Korea using DEA and DEA based malmquist, *Journal of Asian Architectures and Building Engineering*, **14**(1), 57-64.
- Qingxian, A., Yan, H., Liang, L. (2016) Internal resource waste and centralization degree in two-stage systems: An efficiency analysis, *Omega*, **61**, 89-99.
- Ramos, J. E., Borba, M. da C., Melo, A. P. S. de, Xavier, L. F., Carvalho, D. M. de. (2020) Benchmarks em sistemas de produção de leite: Uma aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), *Revista em Agronomia e Meio Ambiente*, **13**, (2), 449-474.
- Rodrigues, M. V. S., Aquino, M. D. de, Thomaz, A. C. F. (2015) Análise da eficiência na produção de energia eólica nos principais estados brasileiros produtores, por meio da aplicação de análise por envoltória de dados, *Revista Tecnologia Fortaleza*, **36**, (1 e 2), 18-33.
- Rodrigues, M. V. S., Aquino, M. D. de, Thomaz, A. C. F. (2017) Seleção de variáveis em análise por envoltória de dados na análise da eficiência do instrumento da cobrança pela água bruta no setor do abastecimento público nas bacias cearenses por meio da ferramenta computacional SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão), *Revista DAE*, **65**(208), 5-20.
- Rodrigues, M. V. S.; Aquino, M. D. de; Thomaz, A. C. F. (2021) Aplicação da análise envoltória de dados para analisar a eficiência do setor de energia eólica dos estados produtores entre os anos de 2015 a 2019. In: Mello, R. G.; Freitas, P. G. de (org.). *Variantes do Meio Ambiente: Atuação, Interdisciplinaridade e Sustentabilidade* volume 2. 1. ed. Rio de Janeiro – RJ: e-Publicar, 62-79.
- Rodrigues, M. V. S., Aquino, M. D. de, Thomaz, A. C. F., Pereira, R. F. (2017) Multicriteria Method in Data Envelopment Analysis: an application to measure the performance of the instrument of charging for water in the State of Ceará basins, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, **22**(8).
- Salgado Júnior, A. P.; Pimentel, A. dos S.; Oliveira, M. M. B.; Novi, J. C. (2017) O impacto nas variações das matrizes energéticas e o uso da terra: Estudo sobre a eficiência ambiental do G20. *Revista Eletrônica de Administração (REAd)*, edição **86**(2), p. 306-332.
- Silva, S. S. F. da; Alves, A. C.; Ramalho, A. M. C. (2018) Energia eólica e complementaridade energética: Estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região Nordeste do Brasil. *Qualitas Revista Eletrônica*, **19**(3), 53-72.
- Singh, M., Mittal, A. K., Upadhyay, V. (2014) Efficient water utilities: Use of performance indicator system and data envelopment analysis, *Water Science: Technology*, **14**(5), 787-794.