

Avaliação da eficiência relativa do setor eólico dos estados brasileiros no período de 2016 a 2020: uma aplicação da fronteira invertida em análise envoltória de dados

RESUMO

Marcus Vinícius Sousa Rodrigues
rodrigues.marcus@ufma.br
Professor do Magistério Superior,
Adjunto, Curso de Engenharia
Ambiental e Sanitária – CEAS,
Centro de Ciências Exatas e
Tecnologia – CCET, Universidade
Federal do Maranhão – UFMA.

Rejane Félix Pereira
rejanefp@gmail.com
Professora do Magistério
Superior, Adjunta, Instituto de
Engenharias e Desenvolvimento
Sustentável – IEDS, Universidade
da Integração Internacional da
Lusofonia Afro Brasileira –
UNILAB.

Marisete Dantas de Aquino
marisete@ufc.br
Professora do Magistério
Superior, Titular, Departamento
de Engenharia Hidráulica e
Ambiental – DEHA, Universidade
Federal do Ceará – UFC.

Antônio Clécio Fontelles Thomaz
clecio@larces.uece.br
Professor do Magistério Superior,
Adjunto, Centro de Ciências e
Tecnologia, Universidade
Estadual do Ceará – UECE.

A energia eólica é a energia cinética contida nas correntes de ar que circulam o planeta. O uso de energia eólica é uma alternativa ao uso de fontes fósseis na matriz energética, além de contribuir com o uso racional dos recursos hídricos. A análise da eficiência energética é essencial para buscar as melhores práticas no uso da fonte eólica para a geração de energia elétrica. O objetivo principal deste trabalho consiste em realizar uma análise da eficiência relativa do setor eólico dos estados brasileiros produtores de energia eólica, quanto a capacidade de geração elétrica por meio desta fonte renovável, no interstício de 2016 a 2020, utilizando o modelo da fronteira invertida em análise envoltória de dados. Das 58 (cinquenta e oito) unidades avaliadas, 12 (doze) foram classificadas como eficientes e as demais apresentaram algum grau de ineficiência. O método da fronteira invertida identificou as unidades eficientes que apresentam falsa eficiência, além disso ordenou todo o conjunto. Dessa forma, o setor eólico do Maranhão, no ano de 2018, se mostrou como a unidade mais eficiente, enquanto o setor eólico de Santa Catarina, também de 2018, se mostrou como a unidade com maior ineficiência. A análise dos dados apresentados nos resultados mostra que, em geral os produtos, que representam a geração eólica média mensal ao ano e o fator de capacidade médio mensal ao ano, foram significativos para a medida da eficiência do setor eólico dos estados.

PALAVRAS-CHAVE: Geração eólica. Desempenho energético. Energia eólica. Fronteira de eficiência inversa.

INTRODUÇÃO

A energia é essencial para o desenvolvimento de qualquer país, sendo um importante setor de investimentos tanto público como privado (CASTRO; SOUZA; CASTRO, 2019). Conforme Nematollahi et al. (2016), a segurança energética e os suprimentos de energia são os principais componentes para países em desenvolvimento.

Para Bastos et al. (2020), a energia elétrica é indispensável à vida moderna, sendo um setor-chave para impulsionar o crescimento econômico. De acordo com Luz et al. (2020), o cenário atual aponta uma demanda crescente do consumo de energia elétrica devido um aumento populacional e da produção de insumos cada vez mais acelerado.

Em geral, as fontes de geração energética podem ser divididas em dois grupos: as fontes renováveis, tais como a eólica, a solar, a hidrelétrica e a biomassa, e as fontes não renováveis, como a nuclear e os combustíveis fósseis.

Apesar de várias fontes, o mundo é muito dependente dos combustíveis fósseis, tais como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo, para geração de energia, e segundo Petry, Ramos e Costa (2020), a participação dessa fonte na matriz energética mundial representa cerca de 79,5%, e 49,8% na matriz energética brasileira, de acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2021). Convém destacar que o uso de combustíveis fósseis é um dos grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa e a liberação de gases poluentes para a atmosfera.

O uso de energias renováveis pode servir como alternativa ambiental ao uso de combustíveis fósseis, reduzindo a dependência de fontes fósseis e favorecendo a mitigação dos problemas causados por essas fontes não renováveis, tais como a emissão de gases de efeito estufa (BELLINI et al., 2017; LIU et al., 2018; YANG et al., 2020). Das fontes renováveis, a fonte eólica é a que mais cresce atualmente como alternativa ao uso de fontes fósseis para geração de energia.

A energia eólica é a energia contida nas massas de ar que circulam a atmosfera, sendo uma fonte de energia renovável e limpa, além de estar disponível em todo o planeta Terra (MAGALHÃES et al., 2019; RODRIGUES et al., 2021). É uma fonte abundante no Brasil, principalmente nas regiões Nordeste e Sul.

Inicialmente, a energia eólica foi utilizada para a realização de trabalho mecânico por meio dos antigos moinhos de vento, como o bombeamento de água ou a moagem de grãos, entretanto, segundo Cunha et al. (2019), o principal uso dela, na atualidade, consiste na geração de energia elétrica por meio das turbinas eólicas.

O primeiro empreendimento eólico no Brasil para geração de energia elétrica foi instalado no arquipélago de Fernando de Noronha – PE no ano de 1992. Entretanto, o setor eólico brasileiro só foi impulsionado após o ano de 2002 com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA, por meio da promulgação da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002.

A expansão do setor eólico no Brasil se apresenta como uma alternativa de modo a diversificar a matriz energética no país e gerar uma fonte de energia mais limpa, contribuindo para o desenvolvimento sustentável (LIMA; SANTOS; MOIZINHO, 2018).

O Brasil conta com uma matriz eólica que representa quase 11% da matriz energética nacional, com uma potência instalada de 19,1 GW em 726 parques eólicos e 8.585 turbinas eólicas em operação distribuídos nos 12 estados produtores brasileiros de energia eólica (ABEEÓLICA, 2021).

Pode-se afirmar que a potência instalada é a quantidade máxima de energia que pode ser produzida por uma fonte de energia durante determinado tempo (um dia, um mês, um ano etc.) e do ponto de vista da eficiência, a produção de energia elétrica deve ser a máxima possível (SAMPAIO et al., 2020).

A análise da eficiência energética é essencial para buscar as melhores práticas no uso da fonte eólica para a geração de energia elétrica. De acordo com Xu et al. (2020), a eficiência energética é uma questão global, desempenhando um papel vital para alcançar o desenvolvimento sustentável. Segundo Naushad, Faridi e Faisal (2020), medir a eficiência é altamente significativo para a tomada de decisão por parte dos gestores.

Mesmo sendo um tipo de geração de energia considerada limpa, a construção de novos parques eólicos provoca impactos ambientais adversos, além de exigir alto investimento financeiro tanto para sua implantação quanto para ampliação. Assim, Silva, Alves e Ramalho (2018) afirmam que a melhoria da eficiência energética reduz a necessidade de ampliação da capacidade geradora e de novos investimentos, liberando, assim, recursos para investimentos em medidas de proteção ao meio ambiente e melhoria nas geradoras já existentes.

Com isso, surge o seguinte questionamento: o setor de energia eólica está usando os seus recursos de forma eficiente para a geração de energia elétrica nos grandes parques eólicos? Assim, o objetivo principal deste trabalho consiste em realizar uma análise da eficiência relativa do setor eólico dos estados brasileiros produtores de energia eólica, quanto a capacidade de geração elétrica por meio desta fonte renovável, no interstício de 2016 a 2020, utilizando o modelo da fronteira invertida em análise envoltória de dados.

Para obter esse objetivo proposto, inicialmente, calculam-se as medidas das eficiências convencionais das unidades avaliadas, por meio da análise envoltória de dados – AED, classificando-as em eficientes e não eficientes. Em seguida, será aplicado a metodologia da fronteira invertida de modo ordenar todas as unidades avaliadas e identificar, dentre as unidades eficientes, as unidades com falsa eficiência.

A justificativa desta pesquisa se dá pelo fato de que a avaliação da mensuração da eficiência do setor de energia eólica pode acarretar resultados que podem auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores do setor, além de contribuir com o desenvolvimento sustentável. Segundo Haider e Mishra (2019), a AED é um método amplamente aplicado e bem estabelecido em avaliações energéticas e ambientais.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção será feita uma caracterização da metodologia de análise multicritério que será usada para avaliar a eficiência do setor eólico dos estados brasileiros produtores desta fonte, a análise envoltória de dados – AED. Em

seguida, será feita uma breve descrição da ferramenta da fronteira invertida que almeja identificar as unidades eficientes que apresentam uma falsa eficiência.

Por fim, será apresentada a metodologia desta pesquisa em que serão caracterizadas as unidades a serem avaliadas e as variáveis avaliativas, os insumos e os produtos, que são de natureza técnica e são relacionadas diretamente a produção de energia eólica.

Análise envoltória de dados

A metodologia da AED, ou DEA (sigla em inglês de *Data Envelopment Analysis*), teve início no trabalho de Charnes, Cooper e Rhodes (1978) que objetivava segundo Silva et al. (2017), avaliar o desempenho das escolas públicas nos Estados Unidos que participaram ou não de programas do governo federal.

A AED é uma técnica não-paramétrica que, utilizando a programação linear, calcula a eficiência relativa de um conjunto de unidades produtivas, que produzem os mesmos produtos por meio da utilização dos mesmos insumos, por meio da construção de uma fronteira de eficiência (BARBOSA; FUCHIGAMI, 2018, p. 4).

De acordo com Rodrigues et al. (2017), a construção da fronteira de eficiência usa para isso insumos e produtos de cada unidade avaliada, e em seguida apresenta uma medida de eficiência relativa para cada unidade.

O cálculo da eficiência de uma unidade se dá pela razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos, em que o próprio modelo de AED atribui os pesos tanto dos insumos como dos produtos (LOURENÇO; FERREIRA; SUGAHARA, 2020). Convém ressaltar que uma unidade avaliada em AED é comumente chamada de unidade tomadora de decisão – UTD, ou DMU (sigla em inglês de *Decision Making Unit*).

Assim, matematicamente, se escreve a eficiência, indicada por Ef , da seguinte forma:

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^s U_i Y_i}{\sum_{j=1}^m V_j X_j} \quad (1)$$

em que U_i é o peso do i -ésimo produto Y_i ($i = 1, 2, \dots, s$) e V_j é o peso do j -ésimo insumo X_j ($j = 1, 2, \dots, m$).

Dessa forma, a AED atribui uma medida de eficiência, variando de 0 (zero) a 1 (um), para cada UTD analisada. Logo, as UTDs são classificadas em dois grupos: as eficientes (também chamadas de *benchmarks*), com medidas de eficiência igual a unidade e que se situam na fronteira eficiente, e as não eficientes (ou ineficientes), que situam abaixo dessa fronteira e tem medida de eficiência menor do que 1 (um).

Conforme Rodrigues, Aquino e Thomaz (2017), as *benchmarks* servem de modelo para as UTDs não eficientes, de maneira que essas unidades com algum grau de ineficiência possam melhorar suas performances e sejam projetadas para a fronteira eficiente.

Os modelos de AED fornecem além das medidas da eficiência relativa, os pesos das variáveis de insumo e de produto e metas a serem alcançadas para cada unidade ineficiente atingir a eficiência (ÂNGULO MEZA et al., 2005). Assim, pode-

se considerar como uma grande vantagem da AED o fato de que o próprio modelo determina os pesos dos insumos e dos produtos de cada unidade.

Duas são as formas que uma unidade não eficiente seja projetada em direção à fronteira de eficiência, de modo a torná-la eficiente. Conforme Azevedo, Leite e Andrade (2019), a primeira consiste na redução dos insumos, mantendo-se constantes os seus produtos, chamada de orientação a insumo, enquanto a segunda forma consiste em aumentar os produtos, mantendo-se constantes os insumos, chamada de orientação a produto.

Existem dois modelos clássicos de AED, o modelo CCR, proposto por Charnes, Cooper e Rhodes (1978), e o modelo BCC, proposto por Banker, Charnes e Cooper (1984). De acordo com Silveira, Ângulo Meza e Soares de Mello (2012), no modelo CCR qualquer variação nos insumos acarreta variação proporcional nos produtos, considerando-se retornos de escala constante, enquanto no modelo BCC não se admite proporcionalidade entre insumos e produtos, permitindo retornos de escala variáveis.

Ambos os modelos clássicos, CCR e BCC, podem ser orientados tanto a insumo como a produto, entretanto o modelo CCR, devido ao fato de ser linear, deixa implícito que tornar-se invariante em relação a sua orientação (BARBOSA; FUCHIGAMI, 2018, p. 12).

Em geral, os modelos CCR e BCC, podem resultar em grande número de unidades eficientes e devido as suas características matemáticas, as unidades que apresentam o menor valor de um dos insumos ou o maior valor de um dos produtos serão classificadas como eficientes (*benchmarks*) mesmo sem ser, são as chamadas falsa eficientes. O método em AED usado para identificar as unidades com falsa eficiência é o método da fronteira invertida ou inversa.

Fronteira de eficiência invertida

É possível que uma UTD, classificada como *benchmarks* em AED, apresentar uma falsa eficiência, sendo chamada de baixa discriminação, e essa baixa discriminação pode ser identificada a partir do conceito de fronteira de eficiência invertida ou inversa (ARAÚJO; PAIXÃO; PAIXÃO, 2020).

De acordo com Silveira, Ângulo Meza e Soares de Mello (2012), o método da fronteira de eficiência invertida pode ser entendido como uma avaliação pessimista das *benchmarks*, tendo o seu conceito introduzido nos trabalhos de Yamada, Matui e Sugiyama (1994) e Entani, Maeda e Tanaka (2002).

Este método indica, dentre as *benchmarks*, as unidades que pior trabalham seus recursos, sendo chamadas de falsa eficientes, e que foram classificadas como eficientes devido ao desempenho superior de apenas um único insumo ou em apenas um único produto (FERREIRA, 2019; SANTANA; REBELATTO; PÉRICO, 2015).

Para o cálculo da fronteira invertida, indicada por Ef_{Inv} , são considerados os produtos como insumos e os insumos como produtos, e seguidamente resolve-se o modelo normalmente com orientação invertida do modelo AED original.

Conforme Ângulo Meza et al. (2007), o método da fronteira invertida constrói um índice de eficiência composta, indicada por Ef_{Comp} , definido como a média

aritmética entre a eficiência em relação à fronteira AED convencional, Ef_{Conv} , e o complemento da eficiência em relação à fronteira invertida, Ef_{Inv} . Isto é,

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

Em seguida, é feita a normalização da eficiência composta, dividindo os valores da equação (2) 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

$$Ef_{Norm} = \frac{Ef_{Comp}}{Máx(Ef_{Comp})} \quad (3)$$

Pode-se afirmar que a UTD mais eficiente na fronteira de eficiência invertida é aquela que consegue produzir muito de todos os seus produtos gastando pouco de todos os seus insumos não existindo destaque em nenhum especificamente.

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 2016 e 2020, será composta basicamente dos seguintes estágios a serem desenvolvidos:

- a) Seleção e definição das UTDs a serem avaliadas.
- b) Definição dos insumos e produtos (variáveis de avaliação).
- c) Seleção do modelo AED.
- d) Aplicação do modelo AED para o cálculo das eficiências das UTDs
- e) Análise e interpretação dos resultados obtidos.

Destaca-se que, todos os cálculos das eficiências relativas das UTDs foram realizados com o auxílio da ferramenta computacional SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão), descrito em Ângulo Meza et al. (2005).

O Brasil apresenta 12 (doze) estados com parques eólicos operando comercialmente; a saber: Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Sergipe. Conforme ABEEólica (2021), a capacidade instalada nos parques eólicos brasileiros em junho de 2021 é de 19.103,5 MW em um total de 726 parques eólicos em operação. O Gráfico 1 mostra a distribuição da capacidade instalada de cada estado produtor de energia eólica em junho de 2021.

Gráfico 1 – Capacidade instalada, em MW, em cada estado produtor de fonte eólica em junho de 2021



Fonte: ABEEÓLICA (2021).

Conforme as informações do Gráfico 1 tem-se que as cinco primeiras posições, em capacidade instalada, são ocupadas pelos estados do Rio Grande do Norte, com 5.574,8 MW, da Bahia, com 5.267,8 MW, do Ceará, com 2.385,1 MW, do Piauí, com 2.354,7 MW, e do Rio Grande do Sul, com 1.835,9 MW.

Dessa forma, cada UTD desta pesquisa representará o setor eólico de um estado brasileiro produtor desta fonte em um ano específico do período entre 2016 e 2020, conforme descrição no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição das UTDs avaliadas nesta pesquisa

Unidades Tomadoras de Decisão – UTD					
RN (2016)	PR (2016)	RJ (2017)	PB (2018)	MA (2019)	PI (2020)
BA (2016)	RN (2017)	PR (2017)	SE (2018)	SC (2019)	PE (2020)
CE (2016)	BA (2017)	RN (2018)	RJ (2018)	PB (2019)	MA (2020)
RS (2016)	CE (2017)	BA (2018)	PR (2018)	SE (2019)	SC (2020)
PI (2016)	RS (2017)	CE (2018)	RN (2019)	RJ (2019)	PB (2020)
PE (2016)	PI (2017)	RS (2018)	BA (2019)	PR (2019)	SE (2020)
SC (2016)	PE (2017)	PI (2018)	CE (2019)	RN (2020)	RJ (2020)
PB (2016)	SC (2017)	PE (2018)	RS (2019)	BA (2020)	PR (2020)
SE (2016)	PB (2017)	MA (2018)	PI (2019)	CE (2020)	---
RJ (2016)	SE (2017)	SC (2018)	PE (2019)	RS (2020)	---

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme o Quadro 1, tem-se um total de 58 (cinquenta e oito) unidades a serem avaliadas. Entretanto, vale ressaltar que o Estado do Maranhão só passa a ter parques eólicos operando comercialmente a partir de julho de 2017. Assim, optou-se por usar apenas os anos em que o setor eólico maranhense tem informações dos 12 meses completos.

Segundo Jiang et al. (2020), uma seleção razoável das variáveis de insumo e de produto pode favorecer uma melhor precisão da aplicação de AED. Sabe-se que várias são as variáveis que podem ser usadas para medir a eficiência do setor de

energia eólica. Além disso, essas variáveis podem ter naturezas bem distintas, tais como técnica, natural, econômica, social e/ou ambiental.

Dessa forma, optou-se por utilizar variáveis, de insumo e de produto, que são descritas no Quadro 2, de natureza exclusivamente técnicas que estão relacionadas diretamente com a produção eólica durante o período compreendido entre os anos 2016 e 2020.

Quadro 2 – Variáveis de insumo e de produto

Variáveis avaliativas	
Insumos	Produtos
PIN – Potência instalada ao final do ano, em MW	GEM – Geração de energia eólica média mensal durante o ano, em MW/mês
NPE – Número de parques eólicos operando comercialmente ao final do ano	FCM – Fator de capacidade médio mensal durante o ano, %/mês

Fonte: Elaboração própria (2022).

O insumo PIN é potência instalada ao final do ano, em MW, e se refere a capacidade instalada nos parques eólicos em operação comercial 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 o valor médio da geração de energia eólica média mensal ao longo de cada ano de uma UTD, representando em média o quanto de potência elétrica é gerada mensalmente nos parques eólicos durante o ano.

O produto FCM que é o valor médio do fator de capacidade médio mensal para cada ano de uma UTD. Esta variável representa a proporção entre a geração de energia efetiva do setor eólico de um estado em um intervalo de um ano e a capacidade total no mesmo período.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os insumos e os produtos apresentam tamanhos variados, assim, selecionou-se o modelo AED-BCC (retornos variáveis de escala), com uma orientação a produto.

Assim, esta seção se divide em duas partes. Inicialmente, após o cálculo das medidas das eficiências relativas das UTDs, descritas no Quadro 1, fez-se uma breve análise desses resultados, indicando as unidades *benchmarks* e as ineficientes. Em seguida, aplicou-se o método da fronteira invertida de modo a ordenar as UTDs analisadas e identificar, dentre as *benchmarks*, as unidades que apresentam falsa eficiência.

Medidas das eficiências convencionais

Aplicando o modelo AED-BCC, com orientação a produto, tem-se a medida da eficiência convencional, indicada por Ef_{Conv} , para cada UTD, que são apresentadas na Tabela 1. Além da medida da eficiência, esta tabela apresenta os valores dos

insumos e produtos, e a posição no ranqueamento conforme o valor da Ef_{Conv} para cada UTD, que representa o setor eólico de um estado em um ano específico.

Tabela 1 – Medida da eficiência convencional e valores das variáveis avaliativas

Rank	UTD	PIN (MW)	NPE	GEM (MW/mês)	FCM (%/mês)	Ef_{Conv}
1ª	PR (2016)	2,5	1	0,4	15,3	1,0000000
-	RJ (2017)	28,1	1	8,8	31,5	1,0000000
-	PR (2017)	2,5	1	0,4	17,0	1,0000000
-	PE (2018)	781,3	34	373,7	47,8	1,0000000
-	MA (2018)	274,8	10	112,2	50,8	1,0000000
-	PB (2018)	156,9	15	64,8	41,7	1,0000000
-	SE (2018)	34,5	1	9,1	26,4	1,0000000
-	BA (2019)	4.074,4	165	1.914,2	49,1	1,0000000
-	PI (2019)	1.638,1	60	720,8	44,0	1,0000000
-	MA (2019)	426,0	15	176,4	49,7	1,0000000
-	PR (2019)	2,5	1	0,4	14,7	1,0000000
-	PR (2020)	2,5	1	0,4	14,6	1,0000000
13ª	PE (2019)	782,0	34	368,0	47,1	0,984610
14ª	RN (2017)	3.625,5	133	1.510,0	44,4	0,973881
15ª	PB (2019)	157,2	15	63,0	40,6	0,973081
16ª	BA (2017)	2.344,3	90	889,1	48,5	0,969216
17ª	MA (2020)	436,0	15	171,3	40,2	0,967139
18ª	BA (2020)	4.879,6	189	1.844,7	43,6	0,963692
19ª	PE (2017)	782,0	34	335,3	48,3	0,955024
20ª	CE (2016)	1.759,1	67	668,0	47,6	0,947439
21ª	PI (2018)	1.584,1	58	636,2	44,3	0,931695
22ª	BA (2018)	3.525,0	133	1.253,5	46,2	0,930788
23ª	RN (2020)	5.554,2	182	1.772,6	39,4	0,926027
24ª	SE (2017)	34,5	1	8,4	24,3	0,923077
25ª	PB (2020)	157,2	15	59,6	38,4	0,920352
26ª	PI (2017)	1.443,1	52	522,6	46,1	0,915278
27ª	RN (2018)	3.980,1	147	1.553,6	42,0	0,908741
28ª	PI (2016)	869,9	31	330,9	43,8	0,902929
29ª	RN (2019)	4.159,5	154	1.604,0	39,6	0,896502
30ª	RJ (2016)	28,1	1	7,8	27,8	0,886364
31ª	SC (2020)	238,5	14	30,4	42,3	0,881283
32ª	SE (2019)	34,5	1	7,8	22,4	0,857143
33ª	PB (2016)	69,0	13	18,6	29,7	0,854948
34ª	PE (2020)	798,4	34	321,6	40,3	0,851373
35ª	RN (2016)	3.408,1	125	1.208,0	41,8	0,843511
36ª	BA (2016)	1.897,8	73	692,5	40,6	0,817415
37ª	PR (2018)	2,5	1	0,3	13,7	0,805882
38ª	PI (2020)	2.275,9	79	672,2	40,1	0,800186
39ª	SE (2016)	34,5	1	7,2	20,8	0,791209
40ª	RJ (2019)	28,1	1	6,9	24,7	0,784127
41ª	RS (2020)	1.835,9	80	661,6	37,1	0,764970
42ª	PB (2017)	157,2	15	28,5	31,4	0,752580
43ª	CE (2019)	2.045,5	79	685,5	37,1	0,747679
44ª	RS (2017)	1.831,9	80	635,6	37,1	0,745087
45ª	RS (2018)	1.831,9	80	633,5	35,6	0,734067
46ª	CE (2020)	2.179,3	84	676,4	36,4	0,727581

Rank	UTD	PIN (MW)	NPE	GEM (MW/mês)	FCM (%/mês)	Ef _{Conv}
47 ^a	RJ (2020)	28,1	1	6,2	21,9	0,704545
48 ^a	SE (2020)	34,5	1	6,4	18,5	0,703297
49 ^a	RS (2019)	1.831,9	80	598,4	33,7	0,693845
50 ^a	CE (2017)	1.935,8	74	581,2	34,1	0,680635
51 ^a	RS (2016)	1.644,4	69	518,2	34,1	0,680002
52 ^a	CE (2018)	2.049,9	80	628,8	33,6	0,677259
53 ^a	RJ (2018)	28,1	1	5,9	21,1	0,670455
54 ^a	PE (2016)	650,9	29	169,4	31,7	0,625858
55 ^a	SC (2019)	238,5	14	41,6	29,7	0,618773
56 ^a	SC (2016)	238,5	14	31,3	13,4	0,304754
57 ^a	SC (2017)	238,5	14	28,8	12,6	0,282410
58 ^a	SC (2018)	238,5	14	19,6	10,2	0,212508

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme os dados da Tabela 1, 12 (doze) unidades foram classificadas como eficientes, as chamadas *benchmarks*, e que se apresentam na fronteira eficiente, com medida $Ef_{Conv} = 1$. Convém destacar que não existe hierarquia entre as *benchmarks*, sendo todas eficientes conforme seus insumos e produtos. As demais 46 (quarenta e seis) UTDs apresentam algum nível de ineficiência, $Ef_{Conv} < 1$, em que são ordenadas da menos ineficiente a mais ineficiente.

Portanto, apenas as 12 (doze) *benchmarks* servirão como modelo de referência para que as demais unidades não eficientes de modo que estas possam atingir a fronteira de eficiência. Cabe ressaltar que o conjunto todo analisado apresenta uma eficiência convencional com uma média global de 0,836021.

Com os dados da Tabela 1, é possível observar que os estados que ocupam as 5 (cinco) primeiras posições em capacidade instalada (ver Gráfico 1) apresentaram só 2 (duas) *benchmarks*. Ou seja, apenas os setores eólicos da Bahia e do Piauí, ambos do ano de 2019, se mostraram eficientes. Pode-se afirmar que dos 12 (doze) estados produtores de energia eólica, 8 (oito) estados apresentaram o seu setor eólico com pelo menos 1 (uma) unidade classificada como eficiente.

Destacam-se os estados do Paraná, cujo setor eólico nos anos de 2016, 2017, 2019 e 2020, e do Maranhão, em que o seu setor eólico nos anos de 2018 e 2019, se apresentaram como eficientes. Os demais estados que apresentaram unidades eficientes, são: Rio de Janeiro, em 2017, Pernambuco, em 2018, Paraíba, em 2018, Piauí, em 2019, Bahia, em 2019, e Sergipe, em 2018.

Conforme os dados apresentados na Tabela 1 pode-se construir a Tabela 2, em que se pode comparar a eficiência dos setores eólicos dos estados durante o período analisado. Assim, na Tabela 2 são apresentadas as medidas de eficiência convencional média para cada estado que apresenta parque eólico em operação comercial.

Tabela 2 – Medida da eficiência convencional média de cada estado

Rank	Estado	Ef _{Med}	Rank	Estado	Ef _{Med}
1ª	Maranhão	0,989046	7ª	Pernambuco	0,883373
2ª	Paraná	0,961176	8ª	Sergipe	0,854945
3ª	Bahia	0,936222	9ª	Rio de Janeiro	0,809098
4ª	Piauí	0,910018	10ª	Ceará	0,756119
5ª	Rio Grande do Norte	0,909732	11ª	Rio Grande do Sul	0,723594
6ª	Paraíba	0,900192	12ª	Santa Catarina	0,459946

Fonte: Elaboração própria (2022).

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, tem-se que o Estado do Maranhão ocupa a 1ª posição entre os estados produtores de fonte eólica, seguido pelo Estado do Paraná ocupando a 2ª posição, enquanto o Estado de Santa Catarina se apresenta como o setor eólico mais ineficiente de todo o conjunto, ocupando a última posição. É importante destacar que as quatro últimas posições do ranking mostrado na Tabela 1 são ocupadas por UTDs de Santa Catarina.

Convém ressaltar que o Maranhão é o estado mais novo a ter parques eólicos operando comercialmente. Ou seja, apenas em julho de 2017 o estado passa a ter geração de energia eólica ligada a rede elétrica. Das três unidades do setor eólico do Maranhão, duas se mostraram eficientes, as unidades dos anos de 2018 e 2019. Já o setor referente ao ano de 2020 ocupou a 17ª posição, com uma eficiência igual a 0,967139.

O que se percebe em relação ao setor eólico do Maranhão do ano 2020 é que mesmo a capacidade instalada tendo sido ampliada houve uma leve diminuição geração eólica em relação ao ano anterior, e isso pode ter ocorrido devido a variação na velocidade dos ventos naquele ano ou por inoperância de alguma turbina. Além disso, houve uma significativa redução do fator de capacidade em relação aos anos 2018 (50,8%) e 2019 (49,7%). Ou seja, o produto FCM para a unidade MA (2020) foi de 40,2%.

Apesar do Estado do Paraná ser o menor setor eólico do país, em termos de capacidade instalada, com apenas um único parque eólico em operação com 2,5 MW de potência instalada, apresentou 4 (quatro) unidades eficientes. Além disso, ressalta-se que os menores fatores de capacidade médio ao ano foram das UTDs do Paraná.

Uma explicação para que as unidades do Paraná sejam classificadas como eficientes talvez seja o fato de que elas apresentam os menores insumos, PIN e FCM, de todo o conjunto, e como dito anteriormente, uma unidade que apresentar o menor dos insumos ou maior dos produtos pode ser classificada como eficiente mesmo não sendo. Assim, pode-se afirmar que essas unidades eficientes do Paraná talvez apresentem falsas eficiências.

Somente a unidade PR (2018) não se apresentou eficiente. Enquanto, que as unidades eficientes geraram ao ano uma média 400 W de energia, o setor eólico do Paraná em 2018 gerou 300 W e apresentou o menor fator de capacidade do estado no período, igual a 13,7%.

Em relação ao grupo de UTDs ineficientes, o setor eólico de Santa Catarina, conforme dados das Tabelas 1 e 2, é o estado mais ineficiente de todo o conjunto. Além de ter as 4 (quatro) últimas posições ocupadas pelo setor eólico catarinense,

nos anos 2019, 2016, 2017 e 2018, respectivamente, ainda teve a menor eficiência média entre os estados.

Das 4 (quatro) UTDs ineficientes de Santa Catarina, 3 (três) se apresentam com desempenhos bem críticos. Ou seja, os setores eólicos nos anos 2016, 2017 e 2018, obtiveram medidas da eficiência convencional iguais a 0,304754, 0,282410 e 0,212508, respectivamente, enquanto o setor do ano de 2019 teve a medida da eficiência igual a 0,618773. A única unidade que se apresentou com medida de eficiência acima da média global foi a UTD SC (2020), setor eólico do ano de 2020, que teve medida igual 0,881283 e ocupou a 31ª do ranking.

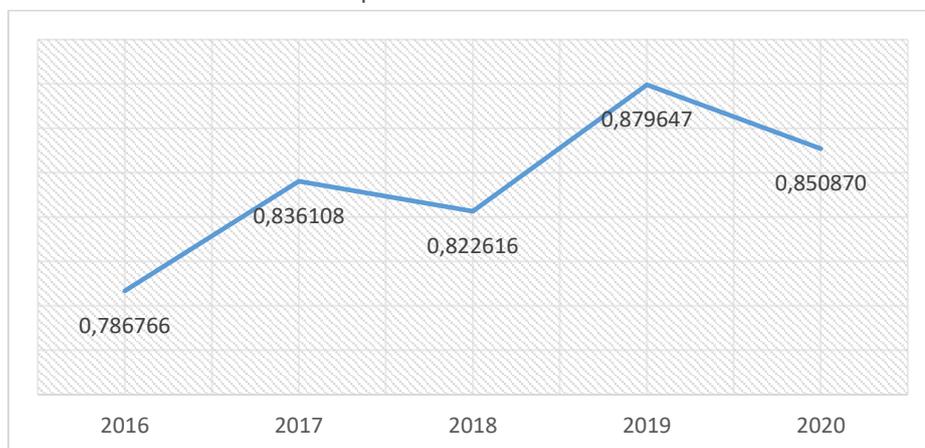
Ao analisar as 5 (cinco) unidades desse estado percebe-se que o fator de capacidade média ao ano, FCM, foi a variável de maior relevância no cálculo da medida da eficiência convencional. É possível observar que o setor eólico de Santa Catarina dos dois últimos anos tiveram os maiores fatores de capacidade médios registrados no período, 29,7%, em 2019, e 42,3%, em 2020, enquanto os demais anos esse fator foi inferior a 14%. Vale salientar que os insumos são iguais para todas as unidades, uma vez que o setor eólico catarinense apresenta 14 parques eólicos em operação com 238,5 MW de potência instalada.

É importante destacar ainda os setores eólicos dos estados do Ceará e do Rio Grande do Sul, que ocuparam 10ª e 11ª posições, respectivamente, em relação a eficiência convencional (ver Tabela 2), fato que pode demonstrar que suas unidades foram muito mal avaliadas (ver Tabela 1).

O que pode ser observado nesses dois estados é que apesar da capacidade instalada, representada pelo insumo PIN, ter aumentado ao longo dos anos a geração de energia eólica, representada pelo produto GEM, não acompanhou esse crescimento e até ocorrendo a diminuição da geração de um ano para outro. Além disso se observou no Ceará que o fator de capacidade do setor eólico cearense, representado pelo produto FCM, apresentou uma diminuição significativa ao longo dos anos estudados na pesquisa.

Em seguida, pode-se afirmar que com os dados da Tabela 1, é possível também fazer um comparativo ano a ano, para o setor eólico brasileiro. Assim, o Gráfico 2 mostra a evolução da média anual da eficiência convencional do setor eólico do país ao longo dos cinco anos analisados nesta pesquisa.

Gráfico 2 – Medida da média anual da eficiência convencional do setor eólico brasileiro no período de 2016 a 2020



Fonte: Elaboração própria (2022).

Assim, conforme o Gráfico 2 percebe-se que houve um aumento da eficiência média de 2016 até 2019, em que se atingiu o maior valor de 0,879547. Entretanto, houve uma pequena queda da eficiência em 2020. É importante destacar que no ano de 2020 o país e o mundo enfrentaram uma Pandemia devido a disseminação da Covid-19 que afetou vários setores da economia, inclusive o setor de geração energética.

Por fim, pode afirmar que um total de 35 (trinta e cinco) unidades das UTDs analisadas tiveram uma medida da eficiência convencional acima da média global, que foi de 0,846021. Este fato, juntamente com as informações do Gráfico 2 confirmam que o setor de energia eólica apresentou um excelente desempenho em relação a Ef_{Conv} no período considerado.

Aplicação da fronteira invertida

Ao aplicar o modelo AED-BCC para o cálculo da eficiência convencional um grande número de UTDs foram classificadas como *benchmarks*. Além disso, do fato do modelo ter sido com orientação a produto, muitas unidades *benchmarks* que apresentam os maiores produtos ou menores insumos apresentam falsa eficiência. Dessa forma, aplicou-se o método da fronteira inversa, que é uma metodologia em AED usada para identificar, dentre as *benchmarks*, as unidades com falsa eficiência, além de ser usada para ordenar todas as unidades do conjunto analisado.

Assim, na Tabela 3 são apresentados 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 da fronteira normalizada Ef_{Norm} , de modo que se torna possível o ordenamento de todas as UTDs.

Tabela 3 – Medidas das eficiências e ordenamento das unidades avaliadas

Rank	UTD	Ef_{Conv}	Ef_{Inv}	Ef_{Comp}	Ef_{Norm}
1ª	MA (2018)	1,000000	0,278318	0,860841	1,000000
2ª	RJ (2017)	1,000000	0,415593	0,792204	0,920267
3ª	PB (2018)	1,000000	0,437804	0,781098	0,907366
4ª	MA (2019)	1,000000	0,451577	0,774212	0,899366
5ª	PB (2019)	0,973081	0,450313	0,761384	0,884465
6ª	SE (2018)	1,000000	0,490349	0,754826	0,876847
7ª	MA (2020)	0,967139	0,483720	0,741709	0,861610
8ª	PE (2018)	1,000000	0,544164	0,727918	0,845589
9ª	PB (2020)	0,920352	0,476002	0,722175	0,838918
10ª	PE (2019)	0,984610	0,552858	0,715876	0,831601
11ª	RJ (2016)	0,886364	0,470807	0,707778	0,822194
12ª	SE (2017)	0,923077	0,532635	0,695221	0,807607
13ª	PE (2017)	0,955024	0,606775	0,674124	0,783100
14ª	PI (2019)	1,000000	0,657353	0,671323	0,779846
15ª	SE (2019)	0,857143	0,577564	0,639789	0,743214
16ª	RJ (2019)	0,784127	0,530008	0,627059	0,728426
17ª	SC (2020)	0,881283	0,644737	0,618273	0,718220
18ª	PI (2016)	0,902929	0,670426	0,616251	0,715871

Rank	UTD	Ef _{Conv}	Ef _{Inv}	Ef _{Comp}	Ef _{Norm}
19 ^a	PI (2018)	0,931695	0,713443	0,609126	0,707594
20 ^a	PE (2020)	0,851373	0,640228	0,605573	0,703466
21 ^a	PR (2017)	1,000000	0,805645	0,597178	0,693714
22 ^a	BA (2019)	1,000000	0,821592	0,589204	0,684452
23 ^a	SE (2016)	0,791209	0,622211	0,584499	0,678986
24 ^a	CE (2016)	0,947439	0,779077	0,584181	0,678617
25 ^a	RN (2017)	0,973881	0,805718	0,584082	0,678501
26 ^a	SC (2019)	0,618773	0,471154	0,573810	0,666569
27 ^a	BA (2017)	0,969216	0,825646	0,571785	0,664217
28 ^a	PI (2017)	0,915278	0,775824	0,569727	0,661826
29 ^a	RJ (2020)	0,704545	0,597385	0,553580	0,643069
30 ^a	PR (2016)	1,000000	0,894739	0,552631	0,641966
31 ^a	PR (2019)	1,000000	0,931079	0,534460	0,620858
32 ^a	PR (2020)	1,000000	0,937425	0,531288	0,617173
33 ^a	RJ (2018)	0,670455	0,620408	0,525023	0,609896
34 ^a	RN (2018)	0,908741	0,883584	0,512579	0,595440
35 ^a	SE (2020)	0,703297	0,699592	0,501853	0,582979
36 ^a	BA (2016)	0,817415	0,823604	0,496906	0,577233
37 ^a	RN (2019)	0,896502	0,913595	0,491453	0,570899
38 ^a	BA (2018)	0,930788	0,962366	0,484211	0,562486
39 ^a	BA (2020)	0,963692	1,000000	0,481846	0,559739
40 ^a	RN (2020)	0,926027	1,000000	0,463013	0,537861
41 ^a	RN (2016)	0,843511	0,923698	0,459906	0,534252
42 ^a	PB (2016)	0,854948	0,973945	0,440501	0,511710
43 ^a	RS (2020)	0,764970	0,905803	0,429583	0,499027
44 ^a	CE (2019)	0,747679	0,910361	0,418659	0,486337
45 ^a	PR (2018)	0,805882	1,000000	0,402941	0,468078
46 ^a	RS (2017)	0,745087	0,941473	0,401807	0,466761
47 ^a	PI (2020)	0,800186	1,000000	0,400093	0,464770
48 ^a	RS (2018)	0,734067	0,945284	0,394391	0,458146
49 ^a	PB (2017)	0,752580	0,995428	0,378576	0,439774
50 ^a	CE (2020)	0,727581	0,994287	0,366647	0,425917
51 ^a	RS (2019)	0,693845	1,000000	0,346922	0,403004
52 ^a	PE (2016)	0,625858	0,933678	0,346090	0,402037
53 ^a	RS (2016)	0,680002	0,989617	0,345192	0,400994
54 ^a	CE (2017)	0,680635	1,000000	0,340317	0,395331
55 ^a	CE (2018)	0,677259	1,000000	0,338629	0,393370
56 ^a	SC (2016)	0,304754	0,761194	0,271780	0,315714
57 ^a	SC (2017)	0,282410	0,809524	0,236443	0,274665
58 ^a	SC (2018)	0,212508	1,000000	0,106254	0,123430

Fonte: Elaboração própria (2022).

É importante destacar que no cálculo da eficiência invertida Ef_{Inv} inverte-se os insumos e os produtos (ou seja, os insumos passam a ser produtos e os produtos passam a ser insumos) e calcula-se a medida da eficiência alterando a orientação. Neste caso, os insumos PIN e NPE passam a ser produtos e os produtos GEM e FCM passam a ser insumos e calculam-se as medidas da eficiência das UTDs pelo método AED-BCC com uma orientação a insumo.

Conforme o ordenamento, por meio da fronteira de eficiência inversa, mostrado na Tabela 3, tem-se que o setor eólico do Estado do Maranhão, em 2018, como a unidade mais eficiente e o setor eólico do Estado de Santa Catarina, também em 2018, como a unidade menos eficiente. Convém salientar a unidade MA (2018) apresentou o maior FCM, igual a 50,8%, enquanto a unidade SC (2018) teve o menor FCM, igual a 10,2%, de todo o conjunto analisado.

Observa-se que das 12 (doze) *benchmarks* classificadas pela medida da eficiência convencional, 6 (seis) se mantiveram entre as primeiras 10 (dez) posições do ranking; são elas: MA (2018), 1ª, RJ (2017), 2ª, PB (2018), 3ª, MA (2019), 4ª, SE (2018), 6ª, e PE (2018), 8ª. Já as demais *benchmarks* ficaram todas abaixo da 13ª posição.

Dos dados apresentados na Tabela 3 é possível fazer um comparativo das medidas das eficiências normalizadas médias por estado, semelhante ao que foi feito com a medida da eficiência convencional.

Assim, tem-se a Tabela 4 que apresenta o valor médio das medidas da Ef_{Norm} de cada estado. Pode-se afirmar que as Tabelas 2 e 4 apresentam informações muito válidas que podem ser usadas para analisar a eficiência dos estados que possuem parques eólicos operando comercialmente.

Tabela 4 – Medida da eficiência normalizada média de cada estado

Rank	Estado	Ef_{Med}	Rank	Estado	Ef_{Med}
1ª	Maranhão	0,920325	7ª	Bahia	0,609625
2ª	Rio de Janeiro	0,744770	8ª	Paraná	0,608358
3ª	Sergipe	0,737927	9ª	Rio Grande do Norte	0,583391
4ª	Paraíba	0,716447	10ª	Ceará	0,475914
5ª	Pernambuco	0,713159	11ª	Rio Grande do Sul	0,445586
6ª	Piauí	0,665981	12ª	Santa Catarina	0,419720

Fonte: Elaboração própria (2022).

Mesmo sendo o sétimo estado em capacidade instalada, o setor eólico maranhense se mostrou de excelência para o período analisado (2016-2020), ocupando além da 1ª posição do ranking, com a unidade MA (2018), as 4ª e 7ª posições, respectivamente com as unidades MA (2019) e MA (2020). Ou seja, o setor eólico maranhense confirmou na medida da eficiência normalizada a 1ª posição entre os estados, posição que ocupou com a medida da eficiência convencional.

Em relação aos valores das medidas da eficiência normalizada média (Tabela 4), os estados que ocupam as 5 (cinco) primeiras posições em capacidade instalada ocuparam posições modestas, ou seja, abaixo da 5ª posição, com valores de eficiência abaixo de 0,70. Os setores eólicos do Ceará e do Rio Grande do Sul repetiram as posições 10ª e 11ª, respectivamente, conforme visto na Tabela 2.

O setor eólico de Santa Catarina manteve a última posição na Tabela 4, posição ocupada também em relação a eficiência convencional média (Tabela 2). Ou seja, esse fato confirma que esse setor eólico foi o mais ineficiente de todos os estados produtores de energia eólica.

Analisando os dados apresentados, pode-se constatar que as variáveis de produto, GEM e FCM, foram as mais relevantes para o cálculo das medidas de eficiência uma vez que a orientação foi a produto. Além do mais, as unidades mais eficientes de cada estado tiveram, em geral, os maiores fatores de capacidade quando comparadas entre si.

O fator de capacidade é um indicador importante para o setor eólico de um estado pois ele representa o quanto de energia pode ser gerada em relação ao máximo que o estado pode gerar de energia eólica. Ou seja, é a razão entre a energia gerada e a capacidade instalada. Cabe ressaltar que a capacidade instalada nesse caso se refere somente aos parques eólicos que estão ligados a rede de transmissão.

Pode-se afirmar que uma diminuição da energia gerada acarreta uma diminuição do fator de capacidade. Dois fatores que podem acarretar uma diminuição na geração de energia eólica, mesmo com aumento da potência instalada, se devem a problemas técnicos nas turbinas eólicas ou então uma mudança do regime de ventos o que acarreta uma diminuição da energia captada pelas turbinas eólicas.

Convém ressaltar que a análise de eficiência do setor eólico realizada se limitou a considerar apenas variáveis técnicas relacionadas a operacionalidade dos parques eólicos. Entretanto, uma análise mais geral pode ser realizada considerando além de variáveis técnicas, variáveis ambientais, como a redução de emissão de CO₂, naturais, com velocidade média do vento e/ou socioeconômicas, como o PIB e/ou IDH.

CONCLUSÕES

Devido a importância do setor eólico na matriz energética nacional, é de vital relevância saber se o setor está usando os seus recursos da melhor forma possível, e conseqüentemente surge o seguinte questionamento: o setor de energia eólica está usando os seus recursos de forma eficiente para a geração de energia elétrica nos grandes parques eólicos?

A resposta a esta problemática pode ser dada por meio da aplicação da análise por envoltória de dados. Assim, a ferramenta matemática da AED foi usada nesta pesquisa para analisar a eficiência relativa do setor de geração eólica nos estados brasileiros produtores de energia eólica durante o período de 2016 a 2020.

É possível afirmar que o objetivo principal deste trabalho foi atingido uma vez que foi realizada a análise da eficiência dos setores eólicos dos estados brasileiros produtores de fonte eólica, e em seguida, a aplicação do método da fronteira inversa ordenou as UTDs analisadas e identificou as unidades eficientes que apresentavam falsa eficiência.

Conforme a fundamentação teórica, a aplicação da AED dividiu as unidades analisadas em dois grupos: as eficientes, ou *benchmarks*, que apresentaram medidas de eficiência igual a unidade, e as não eficientes, que apresentaram algum

grau de ineficiência, apresentando medidas de eficiência inferior a unidade. Como dito, as *benchmarks* servem de modelos para as unidades ineficientes de modo que essas possam atingir a fronteira eficiente.

Assim, das 58 (cinquenta e oito) unidades, 12 (doze) foram identificadas como *benchmarks* e serviram de modelo para as demais unidades com algum grau de ineficiência. Além disso, é possível afirmar que o setor eólico, como um todo, durante o período pesquisado, se mostrou bem eficiente, com uma medida de eficiência global acima de 80%.

Convém ressaltar que os modelos AED determinam metas a serem atingidas pelos insumos e produtos para que cada unidade ineficiente melhore sua performance. Também, conforme a fundamentação teórica, a aplicação da ferramenta da fronteira invertida em AED ordena o conjunto analisado, identificando, dentre as *benchmarks*, as unidades que apresentam falsa eficiência.

O método da fronteira invertida identificou que o setor eólico do Maranhão, no ano de 2018, foi a unidade mais eficiente de todo o conjunto, enquanto o setor eólico de Santa Catarina, também no ano de 2018, foi a unidade com o maior grau de ineficiência.

A análise dos dados apresentados nos resultados mostra que, em geral, os produtos que representam a geração eólica média mensal ao ano e o fator de capacidade médio mensal ao ano, foram significativos para a medida da eficiência do setor eólico dos estados.

Convém destacar que a adequada seleção das variáveis a serem usadas em uma análise comparativa da produção de energia eólica é essencial para identificar as ineficiências do setor e as formas de mitigá-las ou eliminá-las.

Do ponto de vista científico, os resultados desta pesquisa podem contribuir na busca de melhores práticas para o setor de geração de energia eólica de modo a favorecer o desenvolvimento para o setor. Além disso, esta pesquisa pode contribuir, do ponto de vista prático, na definição de indicadores de eficiência para o setor de energia eólica.

Por fim, sugere-se em trabalhos futuros uma análise de eficiência para o setor em que sejam consideradas além de variáveis técnicas, como as usadas nesta pesquisa, variáveis de natureza ambiental, econômica e social de modo a ter um resultado mais amplo.

Evaluation of the relative efficiency of the wind sector in brazilian states in the period 2016-2020: an application of the inverted frontier in data envelopment analysis

ABSTRACT

Wind energy is the kinetic energy contained in the air currents that circulate the planet. The use of wind energy is an alternative to the use of fossil sources in the energy matrix, in addition to contributing to the rational use of water resources. The analysis of energy efficiency is essential to search for the best practices in the use of wind sources for the generation of electricity. The main objective of this work is to carry out an analysis of the relative efficiency of the wind sector in the Brazilian states that produce wind energy, regarding the capacity of electricity generation through this renewable source, in the period from 2016 to 2020, using the inverted frontier model in data envelopment analysis. Of the 58 (fifty-eight) units evaluated, 12 (twelve) were classified as efficient and the others showed some degree of inefficiency. The inverted frontier method identified the efficient units that present false efficiency, in addition to ordering the whole set. Thus, the wind sector in Maranhão, in 2018, proved to be the most efficient unit, while the wind sector in Santa Catarina, also in 2018, proved to be the unit with the greatest inefficiency. The analysis of the data presented in the results shows that, in general, the products, which represent the average monthly wind generation per year and the average monthly capacity factor per year, were significant for measuring the efficiency of the wind sector in the states.

KEYWORDS: Wind generation. Energy performance. Wind energy. Inverse efficiency frontier.

REFERÊNCIAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica. Energia Eólica: Os bons ventos no Brasil. **Infovento** 21, de 15 de junho de 2021. Disponível em: http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2021/06/2021_06_InfoVento21.pdf
Acesso em: 04 de julho de 2021.

ÂNGULO MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G. 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, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382005000300011>

ÂNGULO MEZA, L.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G.; FERNANDES, A. J. S. Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica. **Investigação Operacional**, v. 27, p. 21-36, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/256373181 Selecao de variaveis e m DEA aplicada a uma analise do mercado de energia eletrica>

ARAÚJO, L. P. de S.; PAIXÃO, A. N. da; PAIXÃO, M. C. S. Análise da eficiência técnica da prestação dos serviços de coleta de resíduos sólidos urbanos nos municípios paraibanos. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 16, n. 45, p. 260-271, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v16n45.11799>

AZEVEDO, A. A. de; LEITE, C. M. de O.; ANDRADE, L. A. de. Análise da eficiência energética dos estados brasileiros com a utilização do método análise envoltória de dados. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 5, n. 3, 196-213, 2019. DOI: https://doi.org/10.0001/V05N03_10

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>

BARBOSA, F. C.; FUCHIGAMI, M. Y. **Análise Envoltória de Dados: Teoria e Aplicações**. 1ª Edição. Editora Ulbra, Itumbiara – GO, 2018. Disponível em: <http://conhecimentolivres.org/wp-content/uploads/2019/03/Livro-DEA1.pdf>

BASTOS, C. M. dos S.; CORREA, D. M. M. C.; ALVES, A. L. V.; RODRIGUES, A. C. P.; CAVALCANTE, S. M. de A. A eficiência relativa das empresas brasileiras de energia elétrica. **Revista Ambiental Contábil**, v. 12, n. 1, p. 66-87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21680/2176-9036.2020v12n1ID16337>

BELLINI, D.; OLIVEIRA, E. C. de; LAGIOIA, U. C. T.; SILVA, A. C. B. da; MELO, J. L. Energia eólica: Desenvolvimento de geração de energia sustentável. **Revista Ibero-**

Americana de Ciências Ambientais, v. 8, n. 2, p. 205-223, 2017. DOI: <https://doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2017.002.0017>

CASTRO, M. T. de, SOUZA, M. G. de; CASTRO, A. de O. Renewable energy: Wind energy, its effects and environmental gains. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, v. 5, n. 19, p. 103-108, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20190056>

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

CUNHA, E. A. A.; SIQUEIRA, S. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; DINIZ, A. M. Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 87, n. 4, p. 689-697, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v8i4.65759>

ENTANI, T.; MAEDA, Y.; TANAKA, H. Dual models of interval DEA and its extensions to interval data. **European Journal of Operational Research**, v. 136, p. 32-45, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00055-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00055-8)

Empresa de Pesquisa Energética - EPE (Brasil). Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020. **Empresa de Pesquisa Energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>

FERREIRA, D. H. L. Análise da sustentabilidade de empresas: Uma aplicação da análise envoltória de dados. **Revista Produção Online**, v. 19, n. 1, p. 3-20, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v19i1.3439>

JIANG, H.; HUA, M.; ZHANG, J.; CHENG, P.; YE, Z.; HUANG, M.; JIN, Q. Sustainability efficiency assessment of wastewater treatment plants in China: A data envelopment analysis based on cluster benchmarking. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118729>

HAIDER, S.; MISHRA, P. P. Benchmarking energy use of iron and steel industry: A data envelopment analysis. **Benchmarking: An International Journal**, v. 26, n. 4, p. 1314-1335, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2018-0027>

LIMA, E. C. de; SANTOS, I. A.; MOIZINHO, L. C. S. Energia eólica no Brasil: Oportunidades e limitações para o desenvolvimento sustentável. **Revista Estudo**

& Debate, v. 25, n. 1, p. 216-236, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v25i1a2018.1641>

LIU, G.; LI, M.; ZHOU, B.; CHEN, Y.; LIAO, S. General indicator for techno-economic assessment of renewable energy resources. **Energy Conversion and Management**, 156, 416-426, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.054>

LOURENÇO, A. P.; FERREIRA, D. H. L.; SUGAHARA, C. R. Uma análise da eficiência de portos europeus por meio da ferramenta análise envoltória de dados. **Revista Produção Online**, v. 20, n. 4, p. 1260-1278, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v20i4.4085>

LUZ, C. D. L. da; VASCONCELOS, E. C. de; BILOTTA, P.; CARVALHO FILHO, M. A. da. Avaliação dos impactos ambientais em parques eólicos offshore e onshore utilizando a matriz de Leopold. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 55, n. 2, p. 206-225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200644>

MAGALHÃES, J. V. M.; GÓES, M. de F. B.; SILVA, M. S.; ANDRADE, J. C. S. Análise estratégica do setor de energia eólica no Brasil. **Revista Eletrônica Estratégia & Negócios**, v. 12, n. 1, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/reen.v12e120193-25>

NAUSHAD, M.; FARIDI, M. R.; FAISAL, S. Measuring the managerial efficiency of insurance companies in Saudi Arabia: A data envelopment analysis approach. **Journal of Asian Finance, Economics and Business**, v. 7, n. 6, p. 297-304, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13106/jafeb.2020.vol7.no6.297>

NEMATOLLAHI, O.; HOGHOOGHI, H.; RASTI, M.; SEDAGHAT, A. Energy demands and renewable energy resources in the Middle East. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 54, 1172-1181, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.058>

PETRY, P. M.; RAMOS, K. N.; COSTA, H. K. de M. A expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento local: Uma proposição de abordagem. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. especial, p. 22-43, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202022-43>

RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D. de; THOMAZ, A. C. F. 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**, Edição Especial, v. 65, n. 8, p. 5-20, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2017.002>

RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D. de; THOMAZ, A. C. F.; PEREIRA, R. F. 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)**, v. 22, e8, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716070>

RODRIGUES, M. V. S.; SILVA, L. M. X.; LIMA, S. H. D. de; PEREIRA, R. F. Panorama do setor eólico no Ceará/Brasil – Situação atual e perspectivas futuras. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 5, p. 47006-47010, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.21932.05.2021>

SAMPAIO, G. A.; FERREIRA, W. R.; BAHIA, E. T.; HENKES, J. A. Fontes renováveis: Análise dinâmica de sistemas aplicada à matriz energética do Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 438-459, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e32020438-459>

SANTANA, N. B.; REBELATTO, D. A. do N.; PÉRICO, A. E. Eficiência na conversão de recursos produtivos em desenvolvimento sustentável: O caso do Brasil entre os BRICS. **Revista Produção Online**, v. 15, n. 2, p. 601-621, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v15i2.1931>

SILVA, S. S. F. da; ALVES, A. C.; RAMALHO, A. M. C. Energia eólica e complementaridade energética: Estratégia e desafio para o desenvolvimento sustentável na região Nordeste do Brasil. **Qualitas Revista Eletrônica**, v. 19, n. 3, p. 53-72, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18391/req.v19i3.5640>

SILVA, V. de S. da; KAKIHARA, A. A. S. B. de S.; POKER JÚNIOR, J. H.; MILANI FILHO, M. A.; BELLI, M. M. Análise de eficiência dos serviços de hospitais públicos nas capitais brasileiras. **Revista Produção Online**, v. 17, n. 3, p. 1090-1108, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v17i3.2769>

SILVEIRA, J. Q. da; ÂNGULO MEZA, L.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B. Identificação de benchmarks e anti-benchmarks para companhias aéreas usando modelos DEA e fronteira invertida. **Produção**, v. 22, n. 4, p. 788-795, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132011005000004>

XU, T.; YOU, J.; LI, H.; SHAO, L. Energy efficiency evaluation based on Data Envelopment Analysis: A literature reviews. **Energies**, 13, 3548, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13143548>

YAMADA, Y.; MATUI, T.; SUGIYAMA, M. New analysis of efficiency based on DEA. **Journal of the Operations Research Society of Japan**, v. 37, p. 158-67, 1994.

YANG, R. L.; CANHA, L. N.; TIEPOLO, G. M.; URBANETZ JÚNIOR, J. Gerenciamento eficiente da produção de energia elétrica: Desafios para redução do corte de geração de energia das fontes renováveis. **Revista Brasileira de Energia**, v. 26, n. 1, p. 45-55, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v26i1.562>

Recebido: 30/07/2021

Aprovado: 14/10/2021

DOI: 10.3895/rts.v18n51.14578

Como citar: SOUSA RODRIGUES, M. V. et al. Avaliação da eficiência relativa do setor eólico dos estados brasileiros no período de 2016 a 2020: uma aplicação da fronteira invertida em análise envoltória de dados. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 51, p. 166-188, abr./jun., 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/14578>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

