

Morais, Rafael Cancellaria; da Cunha, Bruno Scola Lopes; Pereira Júnior, Amaro Olimpio; Gutierrez, Maria Bernadete Gomes Pereira Sarmiento; Mendonça, Mário Jorge

Working Paper

Mercados de energia e eficiência alocativa em um contexto de transição energética

Texto para Discussão, No. 2874

Provided in Cooperation with:

Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília

Suggested Citation: Moraes, Rafael Cancellaria; da Cunha, Bruno Scola Lopes; Pereira Júnior, Amaro Olimpio; Gutierrez, Maria Bernadete Gomes Pereira Sarmiento; Mendonça, Mário Jorge (2023) : Mercados de energia e eficiência alocativa em um contexto de transição energética, Texto para Discussão, No. 2874, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, <https://doi.org/10.38116/td2874-port>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/284996>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/br/>

TEXTO PARA DISCUSSÃO

2874

**MERCADOS DE ENERGIA
E EFICIÊNCIA ALOCATIVA
EM UM CONTEXTO DE
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

**RAFAEL CANCELLA MORAIS
BRUNO SCOLA LOPES DA CUNHA
AMARO OLÍMPIO PEREIRA JUNIOR
MARIA BERNADETE GOMES PEREIRA
SARMIENTO GUTIERREZ
MARIO JORGE CARDOSO DE MENDONÇA**

ipea

Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

**MERCADOS DE ENERGIA E EFICIÊNCIA
ALOCATIVA EM UM CONTEXTO DE
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**

RAFAEL CANCELLA MORAIS¹

BRUNO SCOLA LOPES DA CUNHA²

AMARO OLIMPIO PEREIRA JUNIOR³

MARIA BERNADETE GOMES PEREIRA

SARMIENTO GUTIERREZ⁴

MARIO JORGE CARDOSO DE MENDONÇA⁵

1. Programa de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPE/UFRJ). *E-mail:* <rafaelmorais@ppe.ufrj.br>.

2. PPE/UFRJ. *E-mail:* <slcunha.bruno@ppe.ufrj.br>.

3. PPE/UFRJ. *E-mail:* <amaro@ppe.ufrj.br>.

4. Técnica de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *E-mail:* <maria-bernadete.gutierrez@ipea.gov.br>.

5. Técnico de planejamento e pesquisa na Dirur/Ipea. *E-mail:* <mario.mendonca@ipea.gov.br>.

Governo Federal

Ministério do Planejamento e Orçamento

Ministra Simone Nassar Tebet

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério do Planejamento e Orçamento, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidenta

LUCIANA MENDES SANTOS SERVO

Diretor de Desenvolvimento Institucional

FERNANDO GAIGER SILVEIRA

**Diretora de Estudos e Políticas do Estado,
das Instituições e da Democracia**

LUSENI MARIA CORDEIRO DE AQUINO

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas

CLÁUDIO ROBERTO AMITRANO

**Diretor de Estudos e Políticas Regionais,
Urbanas e Ambientais**

ARISTIDES MONTEIRO NETO

**Diretora de Estudos e Políticas Setoriais,
de Inovação, Regulação e Infraestrutura**

FERNANDA DE NEGRI

Diretor de Estudos e Políticas Sociais

CARLOS HENRIQUE LEITE CORSEUIL

Diretor de Estudos Internacionais

FÁBIO VÉRAS SOARES

Chefe de Gabinete

ALEXANDRE DOS SANTOS CUNHA

Coordenador-Geral de Imprensa e Comunicação Social

ANTONIO LASSANCE

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

Texto para Discussão

Publicação seriada que divulga resultados de estudos e pesquisas em desenvolvimento pelo Ipea com o objetivo de fomentar o debate e oferecer subsídios à formulação e avaliação de políticas públicas.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2023

Texto para discussão / Instituto de Pesquisa
Econômica

Aplicada.- Brasília : Rio de Janeiro : Ipea , 1990-

ISSN 1415-4765

1.Brasil. 2.Aspectos Econômicos. 3.Aspectos Sociais.
I. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CDD 330.908

JEL: 012; 019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/td2874-port>

As publicações do Ipea estão disponíveis para download gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos).

Acesse: <http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério do Planejamento e Orçamento.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	6
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	8
2.1 Revisão da literatura.....	8
2.2 Metodologia	8
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1 Mercado de energia elétrica.....	17
3.2 Mercado de gás natural.....	19
3.3 Discussão.....	21
4 CONCLUSÕES.....	22
REFERÊNCIAS	23
APÊNDICE A	26
REFERÊNCIAS	31
APÊNDICE B.....	32

SINOPSE

Este trabalho tem como objetivo verificar se a liberalização de mercados de energia, em especial gás natural e eletricidade, contribui para a transição energética, acelerando o combate às mudanças climáticas. Especificamente, este trabalho busca classificar o grau de eficiência relacionado à transição energética dos países, considerando o seu estado de desenvolvimento setorial.

Para se atingir o objetivo, faz-se uso da metodologia de análise envoltória de dados (*data envelopment analysis* – DEA) com especificação *slack based measure* (SBM) – Tone (2001). A ideia deste modelo é minimizar as folgas na produção que surgem com excesso de utilização de insumos em relação aos produtos gerados e/ou falta de geração de produtos em relação aos insumos utilizados. No nosso caso, as unidades tomadoras de decisão são os países; os indicadores de regulação (PMR) e os preços residenciais foram considerados insumos; enquanto confiabilidade e participação de renováveis na matriz elétrica foram definidos como produtos. Os principais resultados mostram que os mercados mais avançados em seus processos de abertura tendem a apresentar melhores resultados de transição energética, como maiores participações de fontes renováveis no setor elétrico, maiores participações de gás natural na matriz energética, menores preços de eletricidade e menores níveis de dependência externa, entre outros indicadores de transição. Os resultados permitem apontar que possíveis mudanças nos marcos regulatórios e de propriedade pública podem levar a um melhor desempenho no setor de energia dos países classificados como de menor eficiência relativa.

Palavras-chave: concorrência; transição energética; regulação; DEA *slack based measure*; eficiência.

ABSTRACT

This study has as main objective to investigate if the energy markets liberalisation, in particular natural gas and electricity, contribute to the energetic transition, led by climate change mitigation policies. More specifically, this study attempts to classify the efficiency degree associated with the energetic transition of countries, taking into account the development state of the natural gas and electricity sectors.

A data envelopment analysis is undertaken, more specifically using a Slack Based Measure model (Tone, 2001). This optimisation model compares decision makers units selected by pre-determined variables, which in our case are indicators of market liberalisation and energetic transition in the natural gas and electricity markets. The optimisation process will define an efficiency frontier, capable of classifying countries according to their relative efficiency. These results are presented and analysed with the objective of suggesting improvements in the regulatory framework and in the public ownership so that to improve the energy sector performance of the countries classified as lower efficiency performers relatively.

Keywords: competition; energetic transition; regulation; DEA *slack based measure*; efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A teoria econômica indica que o livre mercado contribui para a eficiência alocativa. Aspectos como ausência de barreiras à entrada, número elevado de agentes em relação ao tamanho do mercado e empresas tomadoras de preços são desejáveis para alcançar a eficiência. Esperam-se mercados eficientes porque, teoricamente, garantem uma melhor sinalização de preços e maiores níveis de bem-estar de acordo com a teoria econômica convencional. No entanto, certos mercados, como o da eletricidade e do gás natural, possuem características de indústria de rede (ou monopólio natural) – Viscusi, Harrington Junior e Sappington (2018) – que os afastam da concorrência perfeita. Portanto estes mercados necessitam de uma regulação efetiva, capaz de incorporar estas características de rede para que não ocorram a criação de monopólios privados e os abusos de poder decorrentes.

As reformas liberalizantes ocorridas nos países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e nos países emergentes a partir da década de 1990, no setor de energia, reduziram a participação do Estado como proprietário, mas não nas funções de regulação, coordenação e planejamento. Destaca-se também que a transição para uma economia de baixo carbono impondo-se de forma inequívoca no século XXI ampliou a agenda do Estado neste setor, em particular no alcance do ODS 7 (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: energia acessível e limpa). Sendo assim, o Estado ainda permanece como um ator fundamental no setor de energia, na busca da segurança energética, da eficiência e da sustentabilidade. A questão da transição energética passa a ser um objetivo central nos processos de liberalização do setor de energia, abrindo novas possibilidades tecnológicas e visando à geração de energia com menores emissões de carbono.

A transição energética refere-se a mudanças nos sistemas energéticos buscando sustentabilidade, acessibilidade, criação de valor, segurança e menores impactos ambientais. Diversas transições energéticas têm sido observadas na história da humanidade, tanto em termos de oferta quanto de consumo, todas sob alguma influência de fatores técnicos, econômicos e/ou políticos (Fouquet, 2009; Geels, 2005). A comunidade científica tem destacado a importância da recente transição energética, pautada pelas energias renováveis, como impulsionadora do combate às mudanças climáticas (IEA, 2021; Masson-Delmotte *et al.*, 2018; 2021; Irena, 2015; 2017). Além disso, o Fórum Econômico Mundial (World Economic Forum – WEF) publicou o índice de transição energética (*energy transition index* – ETI) e seu banco de dados (World Economic Forum, 2021b), um indicador que estima o nível de desempenho e prontidão dos sistemas energéticos para a transição.

Os mercados de gás natural e de eletricidade têm um papel relevante na recente transição energética. Os investimentos em fontes renováveis e fontes estáveis são fundamentais para a sustentabilidade energética e para a garantia da confiabilidade no fornecimento. A importância das fontes renováveis reside no fato de serem não finitas e limpas. Embora o gás natural seja um recurso fóssil, ele tem uma queima mais limpa do que outros combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Essa característica destaca o gás natural como um importante combustível no processo de transição energética. Verifica-se, no mundo, que o gás natural representa 24,2 % da energia primária total e 21% das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Já no Brasil, ele se situa em 12,2 % da matriz energética do país (BP, 2020). Mais recentemente, a eletrificação tem sido apontada como um caminho para sistemas de energia mais sustentáveis, condicionado a que a geração de energia elétrica seja feita principalmente a partir de fontes renováveis.

Tais mercados vêm passando por um processo de abertura em alguns países. O Reino Unido é um exemplo europeu, expoente da liberalização de mercados de energia na década de 1980. Na América Latina, o Chile experimentou abertura em seu mercado de gás natural. Recentemente, o governo brasileiro aprovou um novo marco regulatório para o mercado de gás natural (Brasil, 2021). Em geral, a abertura significa maior número de empresas e menor atuação estatal em nível de propriedade de empresas, o que implica um mercado apontando para a concorrência. Nesse sentido, existem os indicadores *product market regulation* (PMR), estimados pela OCDE (OECD, 2020b), que avaliam o nível de barreiras à entrada de uma determinada indústria, no que diz respeito à regulação e propriedade estatal. A regulação abrange aspectos das regras de acesso ao sistema de transporte de uma indústria de rede e a existência de um mercado atacadista concorrencial de gás natural e energia. A propriedade estatal, por sua vez, engloba o nível de influência do Estado na propriedade das empresas desses mercados. Entende-se que a propriedade estatal se justificaria apenas nos casos em que as empresas privadas não estariam capacitadas a operar de forma competitiva.

Este artigo tem como objetivo verificar se a liberalização de mercados de energia, em especial gás natural e eletricidade, contribui para a transição energética, impulsionada pelo combate às mudanças climáticas. Especificamente, o artigo busca classificar o grau de eficiência relacionado à transição energética dos países, considerando o estado de desenvolvimento dos setores de gás natural e elétrico. Em relação aos países não eficientes, este trabalho identifica possíveis caminhos que essas nações poderiam trilhar em direção à eficiência.

Para se atingir o objetivo, o presente trabalho faz uso da metodologia de análise envoltória de dados (*data envelopment analysis* – DEA), em seu modelo baseado em folgas,

slack based measure (SBM) – Tone (2001). Trata-se de um modelo de otimização que compara unidades tomadoras de decisão a partir de variáveis pré-definidas. Neste caso, as unidades tomadoras de decisão serão os países, e as variáveis pré-definidas, indicadores de liberalização e transição energética dos mercados de eletricidade e gás natural.

Além desta introdução, o trabalho traz a seção *Materiais e métodos*, apresentando a revisão bibliográfica, a base de dados dos indicadores PMR e ETI, o modelo DEA SBM e as premissas do estudo de caso. A seção *Resultados e discussão* traz os principais resultados a respeito da eficiência dos países e possíveis mudanças nos marcos regulatórios e de propriedade pública, que podem levar a um melhor desempenho. Adicionalmente, nesta seção explicam-se os resultados e justificam-se as eficiências obtidas. A seção *Conclusões* destaca recomendações e trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Revisão da literatura

Diversos estudos utilizaram a metodologia SBM-DEA para comparar países. Zhang e Chen (2022) compararam a eficiência energética dos países do grupo Regional Comprehensive Economic Partnership (RCEP), que engloba China, Austrália, Coreia do Sul, Japão, Nova Zelândia, Malásia, Filipinas, Tailândia, Vietnã, entre outros. Zhou e Xu (2022) também fizeram esta análise, com a diferença de que eles levaram em consideração produtos indesejáveis, como as emissões de gás carbônico dos países. Sarpong *et al.* (2022) utilizaram o modelo SBM-DEA para avaliar os *drivers* da eficiência energética de países africanos. Já Neves, Marques e Moutinho (2020) usaram DEA para comparar a eficiência técnica nas baterias dos veículos elétricos de vinte países europeus.

Verifica-se que os estudos anteriores utilizaram DEA para avaliar, majoritariamente, a eficiência energética de países. A inovação do presente trabalho está no fato de se avaliar o nível de alteração na matriz energética (transição energética) dos países a partir de uma análise quantitativa comparativa, não apenas a eficácia no consumo dos recursos existentes. O desenvolvimento sustentável não será atingido apenas com eficiência no uso de combustíveis fósseis, mas também a partir de uma troca de fósseis por renováveis.

2.2 Metodologia

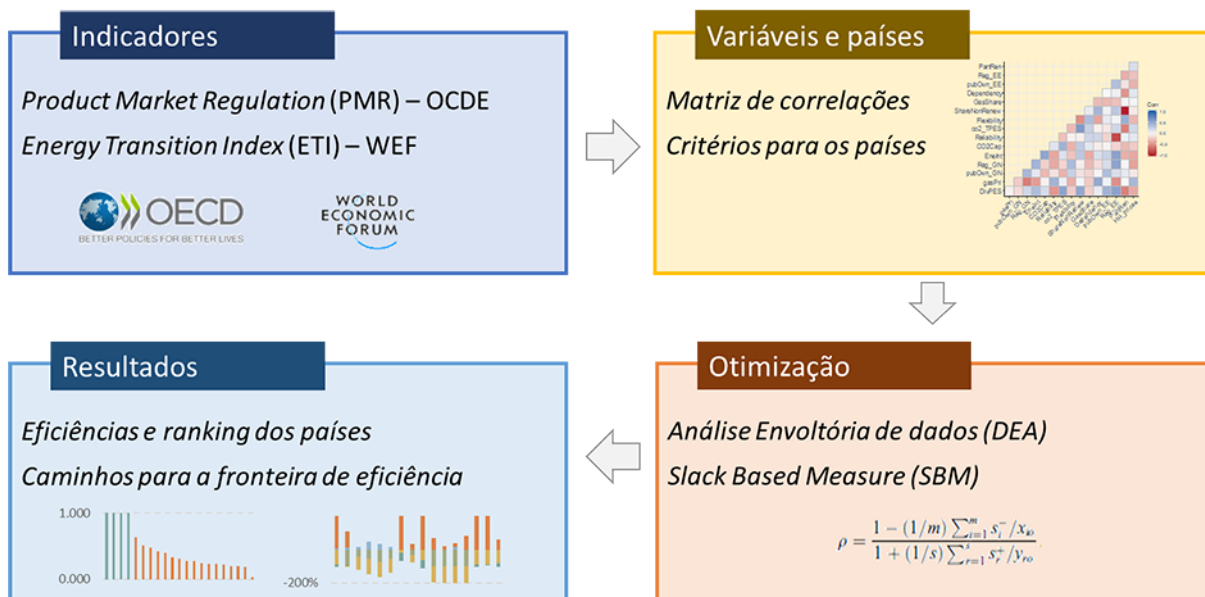
O arcabouço metodológico construído neste trabalho se fundamenta em bases de dados diversas e em um modelo de otimização, o SBM-DEA, para verificar se a liberalização

TEXTO para DISCUSSÃO

de mercados de energia pode induzir à transição energética. Esta seção descreve as bases de dados utilizadas, o modelo SBM-DEA e a relação entre eles.

A figura 1 descreve a abordagem metodológica. Primeiramente, os dados coletados das bases de dados dos indicadores PMR e ETI por país são processados. As variáveis foram selecionadas para 2018, último ano de publicação dos indicadores PMR.

FIGURA 1
Metodologia



Elaboração dos autores.

Embora tais indicadores tenham sido publicados para anos anteriores, a metodologia de cálculo utilizado pela OCDE mudou em 2018, fazendo com que os resultados daquele ano não sejam comparáveis aos indicadores dos demais períodos.

O segundo passo foi a escolha das variáveis dos mercados de energia (eletricidade e gás natural) e dos países. Após a identificação de diversas variáveis que possam representar os mercados estudados e a transição energética nestes mercados, uma matriz de correlação mostrou a coerência entre as variáveis levantadas. Por exemplo, o indicador PMR de barreiras regulatórias à entrada e o indicador confiabilidade da base de dados do ETI mostram coerência entre si: quanto menores são as barreiras regulatórias, maior é a confiabilidade dos sistemas elétricos dos países. Além dos indicadores PMR, analisaram-se doze variáveis primárias utilizadas na construção da base de dados do ETI do Fórum Econômico Mundial, que se referem aos sistemas energéticos dos países. A tabela A.1 (apêndice A) descreve as variáveis analisadas. A matriz de correlação entre as variáveis encontra-se no apêndice A.

A escolha dos países, por sua vez, se baseou nos critérios a seguir.

- 1) Países BRICS: Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul.
- 2) Países da OCDE.
- 3) Países com diferenças socioeconômicas.
- 4) Disponibilidade de informações nas duas bases de dados analisadas.

A aplicação desses critérios resultou em 21 países para o mercado de energia elétrica e 19 para o de gás natural, mostrados no quadro 1.

A terceira etapa da metodologia foi a otimização, realizada por meio do modelo SBM-DEA. Este modelo compara unidades tomadoras de decisão sob o ponto de vista de produção, considerando a utilização de insumos com o intuito de gerar produtos. Dessa forma, calcula-se uma medida de eficiência.

QUADRO 1
Países analisados

#	Eletricidade	Gás natural
1	Argentina	Austrália
2	Austrália	Áustria
3	Áustria	Brasil
4	Brasil	Canadá
5	Canadá	Chile
6	Chile	Colômbia
7	Colômbia	Dinamarca
8	Dinamarca	Estônia
9	Estônia	Finlândia
10	Finlândia	França
11	França	Alemanha
12	Alemanha	Irlanda
13	Irlanda	Itália
14	Itália	Japão
15	Japão	México
16	México	Noruega
17	Noruega	África do Sul
18	Rússia	Suécia
19	África do Sul	Reino Unido
20	Suécia	
21	Reino Unido	

Elaboração dos autores.

2.2.1 Indicadores *product market regulation*

Os indicadores PMR são índices que refletem barreiras regulatórias à entrada e à competição em mercados caracterizados como indústrias de rede (OECD, 2020a). Eles analisam as dimensões de regulação e propriedade estatal. Recebem valores entre zero e seis, de modo que zero indica total ausência de barreiras à entrada, e seis indica significativas barreiras à entrada. Por exemplo, destaca-se o Reino Unido como tendo a melhor *performance* neste indicador, com valor zero para o setor de energia, tanto gás natural quanto eletricidade, denotando a ausência de barreiras à entrada, com grau máximo de competição e transparência.

Os indicadores são construídos pela OCDE a partir de questionários com autoridades nacionais do setor de energia dos países analisados. Os questionários passam por um processo de verificação das respostas para garantir que os respondentes interpretaram corretamente as questões. A OCDE também faz uma checagem com as informações que ela tem sobre os países (OECD, 2020a).

As respostas são codificadas, recebendo valores em função da sua natureza. Respostas qualitativas recebem uma codificação diferente da de respostas quantitativas. De qualquer modo, respostas mais favoráveis à abertura recebem valores menores. Os indicadores são calculados a partir da média dos valores das respostas, ponderada pelo peso referente ao segmento da indústria analisada. Os pesos, definidor por OECD (2020a), são mostrados na tabela 1.

TABELA 1
Pesos para o cálculo dos indicadores PMR

Segmento/indústria	Eletricidade	Gás natural
Geração	0,25	0,17
Importação	0,13	0,08
Exportação	0,13	0,08
Comercialização	0,50	0,33
Armazenamento	0,00	0,33
Total	1,00	1,00

Fonte: OECD (2020a).

2.2.2 Índice de transição energética

A estrutura do ETI foi desenvolvida pelo Fórum Econômico Mundial com o objetivo de monitorar de forma abrangente a transição energética em nível global. Dadas a diversidade de fontes energéticas, regras de mercado e estruturas de governança, além da interconectividade das cadeias de suprimentos e comércio internacional, o indicador considera um enquadramento amplo no que se refere à definição de transição energética. A estrutura analítica consiste de duas partes: o desempenho atual do sistema energético e o ambiente propício para a transição energética. O progresso da transição energética será determinado pela medida em que um ambiente econômico favorável e robusto pode ser criado, o que inclui compromissos políticos, estrutura regulatória flexível, ambiente de negócios estável, incentivos para investimentos e inovação, conscientização do consumidor e adoção de novas tecnologias. Assim, o ETI mede a transição como uma mudança nas estruturas tecnológicas, de mercado, regulatórias, de padrões de consumo e de normas sociais, que garantem o acesso universal ao fornecimento seguro, sustentável, acessível e confiável de energia (Singh *et al.*, 2019).

Atualmente, o ETI fornece uma avaliação do progresso da transição energética em 115 países, os quais são selecionados pelo critério de disponibilidade mínima de dados e manutenção de consistência nos últimos dez anos. A pontuação para cada país é agregada a partir de 38 indicadores que informam desde a qualidade da educação e da infraestrutura até grau de investimento em energias renováveis, preços e comprometimento com metas climáticas (apêndice A). Vale ressaltar que a base de dados desses indicadores tem diversas fontes, em sua maioria do Banco Mundial e Fórum Econômico Mundial, mas também do Fundo Monetário Internacional (International Monetary Fund – IMF), Agência Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA), Agência Internacional para as Energias Renováveis (International Renewable Energy Agency – Irena), Enerdata etc. A seleção de indicadores é determinada pela relevância conceitual para cada dimensão da estrutura analítica, além da disponibilidade, frequência de atualizações e consistência da metodologia na coleta e divulgação dos dados. Para permitir a agregação de indicadores com escalas e magnitudes diferentes, o ETI adota o método *min-max* para transformar a pontuação de um indicador em uma escala comum de 0-100, sendo 100 a pontuação ideal.

Dada a natureza sistêmica e endógena da transição energética, as pontuações dos países são o resultado de uma combinação de fatores, incluindo dotação de recursos, geografia, clima, demografia e estrutura econômica. Além disso, algumas pontuações são baseadas em fatores além do escopo da tomada de decisão nacional, como volatilidade do mercado de *commodities*, geopolítica, ações climáticas e sentimento do mercado financeiro internacional. As pontuações dos países devem, portanto, ser consideradas no contexto do conjunto único de circunstâncias de um país.

2.2.3 Modelo *data envelopment analysis* – *slack based measure*

A DEA é uma metodologia de análise multicritério, em que os pesos de cada variável são definidos com base em problemas de programação matemática. Tal método se baseia na teoria da produção, em que insumos são utilizados para gerar produtos e a razão entre a quantidade de produtos e a utilização de insumos gera a eficiência produtiva (Charnes *et al.*, 1978). O objetivo é maximizar a eficiência, o qual pode ser atingido tanto pela minimização do uso de insumos quanto pela maximização dos produtos gerados. Essa ferramenta é amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento, como estatística, ciências econômicas e planejamento energético (Kassai, 2002; Rezende *et al.*, 2014; Nunes, 2012; Souza *et al.*, 2016). Entre as vantagens da análise envoltória de dados está o fato de ela estabelecer os pesos de maneira objetiva, ser amplamente utilizada e ter simples interpretação dos resultados. Além disso, esta metodologia também pouco demanda uma teoria prévia com direções de causalidade entre as variáveis para avaliar ajuste dos dados. Sobre as desvantagens, destacam-se a tendência a soluções de canto e formulação matemática complexa, em certos casos.

O modelo DEA utilizado no presente trabalho é o SBM, desenvolvido por Tone (2001). A lógica deste modelo é minimizar as folgas na produção, que surgem com excesso de utilização de insumos em relação aos produtos gerados e/ou falta de geração de produtos em relação aos insumos utilizados. A formulação matemática é mostrada a seguir (Tone, 2001).

$$\text{Min } \rho = \frac{1 - (1/m) \sum_{j=1}^m s_j^- / x_{jo}}{1 + (1/n) \sum_{r=1}^n s_r^+ / y_{ro}} \quad (1)$$

s.a.

$$x_o = X\lambda + s^- \quad (\text{Eq. 2})$$

$$y_o = Y\lambda - s^+ \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\lambda \geq 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$s^- \geq 0 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$s^+ \geq 0 \quad (\text{Eq. 6})$$

em que:

ρ : razão entre as folgas da unidade tomadora de decisão (*decision making unit*) DMU "o";

m : número de insumos utilizados;

n : número de produtos gerados;

s_i^- : folga na utilização do insumo “i”, excesso de insumo utilizado;

s_r^+ : folga na geração do produto “r”, falta de produto gerado;

x_{io} : quantidade utilizada do insumo “i” pela DMU “o”;

y_{ro} : quantidade produzida do produto “r” pela DMU “o”;

x_o : quantidade observada do insumo “x” na DMU “o”;

y_o : quantidade observada do produto “y” na DMU “o”;

X : matriz de insumos de todas as DMUs;

Y : matriz de produtos de todas as DMUs;

λ : variável de decisão que representa o peso que a DMU avaliada fornece para a variável (insumo ou produto) das outras DMUs.

Os resultados decorrem da comparação entre DMUs e contemplam a fronteira eficiente, formada pelas DMUs que não apresentam folgas em sua produção, recebendo a eficiência máxima. Além disso, os resultados trazem um caminho possível para se atingir a fronteira para as DMUs não eficientes. No caso do presente trabalho, as DMUs são os países analisados e as variáveis utilizadas variam em função da indústria de rede em questão. Tais variáveis serão mostradas na seção 3.

2.2.4 Dados

A base de dados¹ da presente análise utilizou indicadores PMR de regulação e propriedade estatal (OECD, 2020a) e informações que serviram de *input* para a construção do índice de transição energética do Fórum Econômico Mundial (World Economic Forum, 2021b). A matriz de correlações entre as variáveis, mostrada na figura A.1 do apêndice, serviu para a escolha das variáveis a serem utilizadas em cada setor analisado.

As variáveis que apresentaram sinais coerentes foram escolhidas. Por exemplo, no setor de eletricidade, os indicadores de regulação e confiabilidade apresentaram correlação negativa, indicando que quanto menor as barreiras regulatórias à entrada, maior é a confiabilidade do sistema elétrico analisado. Já no setor de gás natural, a participação

1. Os dados utilizados nesta análise estão disponíveis em: <<http://bit.ly/41rJtb8>>.

TEXTO para DISCUSSÃO

do gás e a dependência externa têm correlação negativa, mostrando que quanto mais dependente, menor é a participação do gás natural no consumo total de energia.

A partir da análise das correlações, foram selecionadas cinco variáveis para o mercado de eletricidade e quatro para o mercado de gás natural, de acordo com o quadro 2, a seguir. No mercado de eletricidade, os indicadores PMR e os preços residenciais foram considerados insumos, enquanto confiabilidade e participação de renováveis na matriz elétrica foram definidos como produtos. Já a análise do mercado de gás natural contou com os indicadores PMR referentes a este mercado e o índice de dependência externa como insumos, e com a participação do gás natural no consumo total de energia como produto.

QUADRO 2

Descrição qualitativa das variáveis

Mercado	Variável	Abreviação	Parametrização	Descrição
Eletricidade	Regulação	Reg	Insumo	Mede como a regulação contribui para a abertura do mercado de eletricidade.
	Propriedade estatal	PubOwn	Insumo	Mede como a propriedade do governo contribui para a abertura do mercado de eletricidade.
	Preços residenciais	HH_prices	Insumo	Preços de eletricidade para a classe residencial.
	Participação renováveis	PartRen	Produto	Porcentagem de geração por fontes renováveis em relação à geração de eletricidade do ano de 2018.
	Confiabilidade	Reliability	Produto	Confiabilidade na oferta e transparência nas tarifas.
Gás natural	Regulação	Reg	Insumo	Mede como a regulação contribui para a abertura do mercado de gás natural.
	Propriedade estatal	PubOwn	Insumo	Mede como a propriedade do governo contribui para a abertura do mercado de gás natural.
	Dependência externa	Dependency	Insumo	Importação de gás natural em relação ao seu consumo total.
	Participação do gás natural	GasShare	Produto	Participação do gás natural no consumo total de energia.

Fonte: OECD (2020a); e World Economic Forum (2021b).
Elaboração dos autores.

O quadro 2 mostra também a parametrização do modelo DEA-SBM. As variáveis consideradas como insumos são aquelas que se espera minimizar, enquanto as variáveis definidas como produtos são aquelas que se busca maximizar. Nesse sentido, os países eficientes são os que apresentam os menores valores de insumos relativamente aos maiores valores de produto. A tabela 2 mostra a estatística descritiva dos dados utilizados.

TABELA 2
Estatística descritiva das variáveis analisadas

Mercado	Variável	Unidade	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
Eletricidade	Confiabilidade	[0-8(melhor)]	1,0	8,0	6,8	1,6
	Participação de renováveis	[% total]	4,8	98,4	44,4	0,2
	PMR – propriedade estatal	[0-6(pior)]	0,0	1,2	0,8	0,3
	PMR – regulação	[0-6(pior)]	0,0	3,5	0,7	0,8
	Preços residenciais	[USDc/kWh]	7,6	39,1	22,2	8,7
Gás natural	Participação gás natural	[% total]	2,0	40,0	20,9	0,1
	PMR – propriedade estatal	[0-6(pior)]	0,0	0,9	0,4	0,3
	PMR – regulação	[0-6(pior)]	0,0	2,5	0,9	0,8
	Dependência externa	[% total]	0,1	100,0	61,9	0,4

Fonte: OECD (2020a); World Economic Forum (2021b).
Elaboração dos autores.

A análise das estatísticas descritivas evidencia a variabilidade da base de dados a ser utilizada nas simulações da análise envoltória de dados. Como as informações apresentam escalas diferentes, os dados são normalizados considerando-se seus valores máximos e mínimos, de modo a uniformizá-los entre zero e um, removendo o efeito de escala das variáveis.

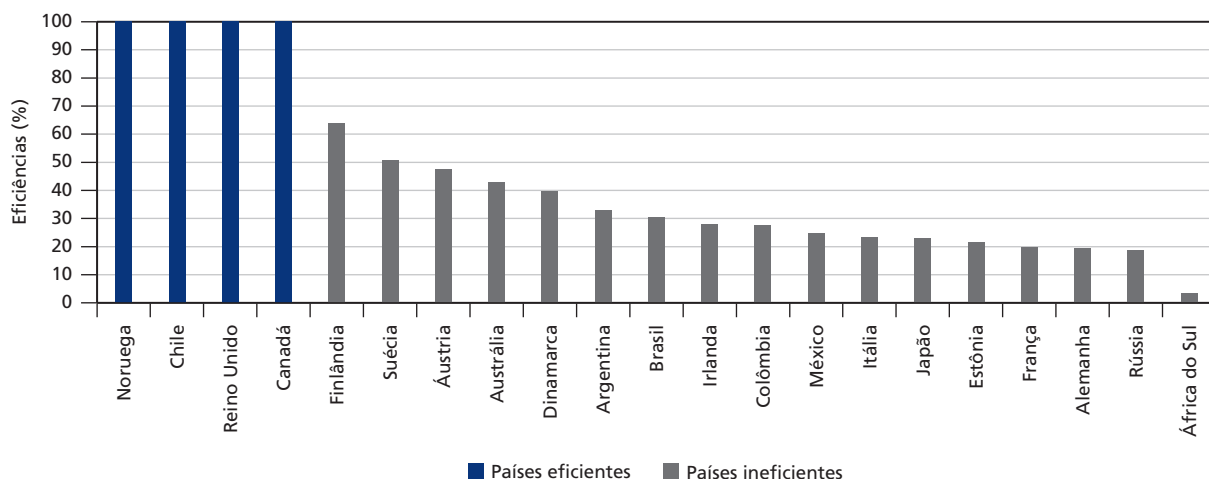
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Mercado de energia elétrica

A fronteira de eficiência do mercado de energia elétrica foi formada por Noruega, Chile, Reino Unido e Canadá, sendo dois países europeus, um da América do Norte e um da América do Sul, como mostrado no gráfico 1. Tais nações apresentam eficiência unitária por conta de terem indicadores satisfatórios na maioria das dimensões analisadas do mercado de eletricidade. Por exemplo, Noruega e Canadá se destacam na participação de fontes renováveis, com 98% e 67% respectivamente. Ambos os países apresentam, ainda, preços relativamente baixos de eletricidade, abaixo dos 25% menores valores.

GRÁFICO 1

Classificação de eficiências: mercado de eletricidade



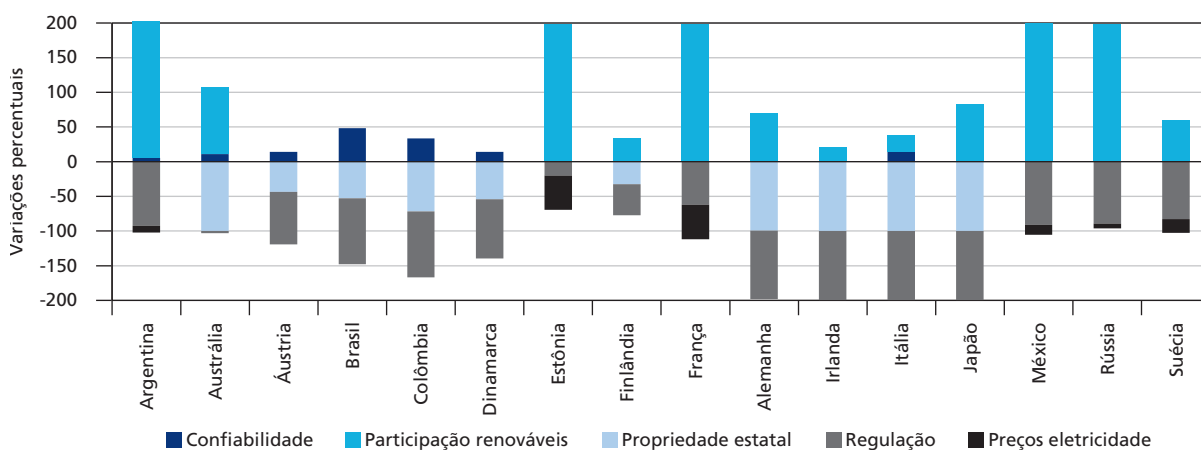
Elaboração dos autores.

Já Reino Unido e Chile são bons comparativamente nos indicadores de abertura do mercado, tanto para o aspecto regulatório quanto para a propriedade estatal. Este resultado confirma a hipótese de que países mais desenvolvidos no processo de abertura de mercado tendem a fazer parte da fronteira dos países mais eficientes. Este resultado poderia ter sido diferente, porque a análise envoltória de dados considera todas as dimensões em conjunto para determinar a eficiência de cada país. Sendo assim, o país que tem indicadores de abertura adequados não está garantido na fronteira. Um exemplo deste fato é a Austrália, que mesmo apresentando o melhor índice de abertura de mercado possível para regulação (0,001) não atingiu a fronteira de eficiência, dado que sua participação de fontes renováveis ainda é relativamente baixa, apenas 17,9%.

Adicionalmente, a metodologia DEA fornece modificações que os países podem buscar para atingir a fronteira de eficiência, como mostrado no gráfico 2. O gráfico indica a alteração no valor de cada dimensão que os países deveriam obter para atingir a fronteira de eficiência. Por exemplo, se a Alemanha aumentar em 69% a sua participação de renováveis em relação ao nível atual (40%), então ela seria eficiente nesta dimensão.

GRÁFICO 2

Modificações para o atingimento da fronteira: mercado de eletricidade



Elaboração dos autores.

Além da Alemanha, o aumento da participação de fontes renováveis na matriz elétrica se mostrou uma recomendação para outros países europeus, como França, Suécia e Itália. O compromisso europeu de investimento em energias renováveis tem sido expressivo, notadamente após a divulgação de um relatório manifestando interesse na importação de 20 Mt de hidrogênio verde (produzido a partir de fontes renováveis) em cenários mais ambiciosos de consumo energético (European Commission, 2022).

A redução de barreiras regulatórias é recomendada em 93% dos países não eficientes. O aumento da participação de renováveis aparece como recomendação para 75% deles. Já a redução da propriedade estatal é recomendada em 62% dos países, e o aumento da confiabilidade, em 25% da amostra de países não eficientes.

O Brasil vem atuando no sentido de reduzir suas barreiras regulatórias no mercado de eletricidade, como sugerido pelo modelo proposto neste trabalho, com o processo de modernização pelo qual seu sistema elétrico vem passando. Novas regulamentações têm sido desenvolvidas, como o Código Brasileiro de Energia Elétrica (Brasil, 2019) e o novo marco da geração distribuída (Brasil, 2022). O Código Brasileiro de Energia Elétrica está sendo discutido no Parlamento e busca unificar as normativas, leis e portarias em um único documento, o que pode trazer mais clareza sobre o entendimento da regulação

TEXTO para DISCUSSÃO

brasileira, reduzindo barreiras regulatórias. Já o novo marco da geração distribuída, instituído pela Lei nº 14.300/2022, foi aprovado em 2022. A singularidade desta lei é a determinação de que os prossumidores devem começar a pagar por componentes tarifárias referentes à remuneração, depreciação, manutenção e operação de ativos da rede de distribuição. Ao ajustar esta cobrança, a regulação delimita incentivos sem onerar a distribuidora. Os casos de Europa e Brasil supracitados mostram iniciativas que estão sendo tomadas no sentido apontado pelos resultados do modelo do presente trabalho, indicando que o modelo desenvolvido está respondendo adequadamente às dinâmicas observadas nos mercados de eletricidade dos países analisados.

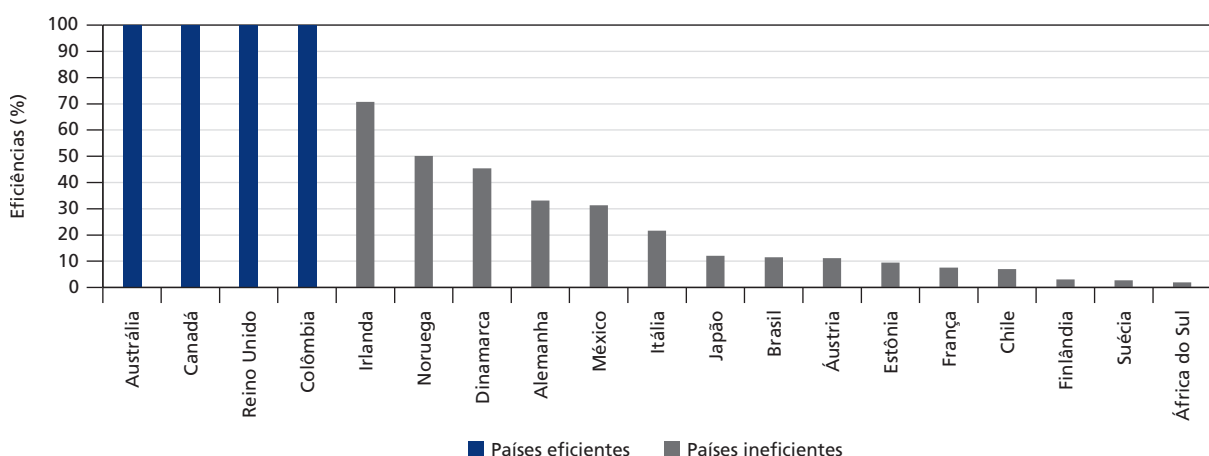
3.2 Mercado de gás natural

A fronteira de eficiência para o mercado de gás natural conta com Austrália, Canadá, Reino Unido e Colômbia, conforme mostra o gráfico 3. Trata-se de uma fronteira formada por um país da Oceania, um da América do Norte, um da Europa e um da América do Sul, de modo que diversos continentes estão representados na fronteira.

Os países da fronteira apresentam um padrão com participações relativamente elevadas de gás natural em suas respectivas matrizes elétricas, variando entre 25% (Austrália)² e 38% (Reino Unido e Canadá). As vultuosas reservas de gás natural domésticas desses países fazem com que eles tenham dependência externa relativamente baixa, exceção feita ao Reino Unido, que importou 1,1 EJ em 2020.

GRÁFICO 3

Ranking de eficiências: mercado de gás natural



Elaboração dos autores.

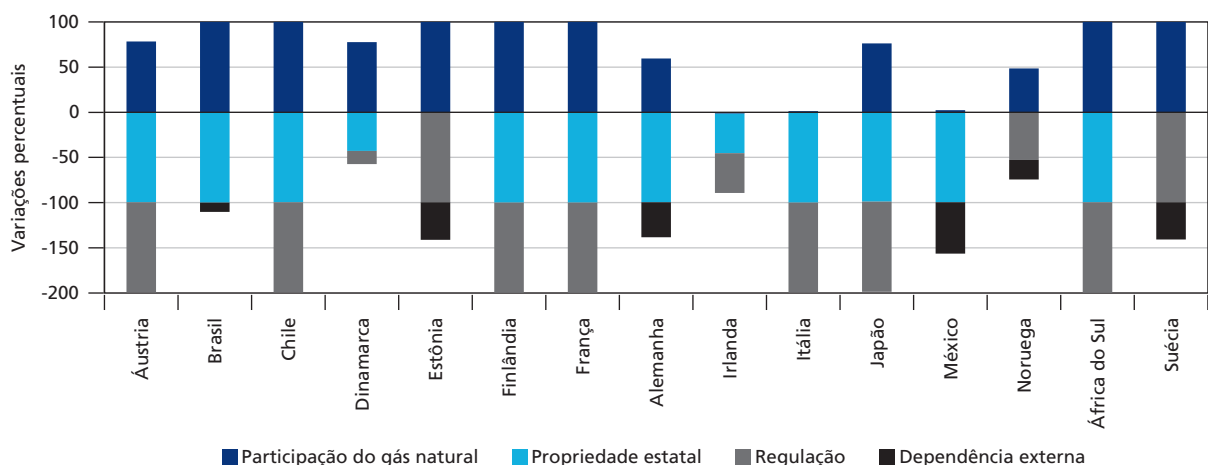
2. Disponível em: <<https://bit.ly/40fmzCN>>. Acesso em:

Mesmo sendo importador de gás natural, o Reino Unido pertence à fronteira de eficiência. Tal fato se justifica pelos indicadores satisfatórios de abertura de mercado. Este país apresenta os menores valores possíveis para as barreiras regulatórias à entrada e para a propriedade estatal dos indicadores PMR. Isso ocorre porque suas políticas nacionais sempre focaram na liberalização dos mercados, incentivando a entrada de novos agentes e a concorrência advinda de um maior número de firmas no mercado. Em concomitância, o Reino Unido sempre incentivou uma menor participação estatal na operação de empresas de infraestrutura.

As modificações a serem perseguidas para os países que desejam atingir a fronteira de eficiência são mostradas no gráfico 4. O modelo sugere que 87% dos países não eficientes aumentem a participação do gás natural em suas matrizes energéticas. Oitenta por cento dos países deveriam atuar para reduzir a participação estatal e as barreiras regulatórias à entrada. A dependência externa deve ser reduzida em 40% dos países. Vale ressaltar que a redução da dependência externa pode ser bem difícil em determinados casos, nos quais não existam alternativas técnica ou economicamente viáveis que respeitem as restrições ambientais impostas pelo atual contexto de transição energética.

GRÁFICO 4

Modificações para o atingimento da fronteira: mercado de gás natural



Elaboração dos autores.

Segundo os resultados do modelo DEA, o Brasil pode atingir a nota de eficiência máxima ao aumentar a participação do gás natural em sua matriz energética e reduzir a participação estatal em seu mercado de gás natural. Nesse sentido, o país lançou uma lei que busca o atingimento desses objetivos (Brasil, 2021). Entre as novas determinações estão a permissão de um número maior de agentes transportadores de gás natural,

anteriormente um monopólio estatal. Mais empresas privadas terão a possibilidade de investir na expansão da malha de gasodutos do país, que hoje é de apenas 9,4 mil quilômetros. Para efeitos comparativos, este número representa 31% da extensão da malha da Argentina e 0,2% da extensão da malha de gasodutos dos Estados Unidos.

3.3 Discussão

O presente trabalho apresenta algumas limitações. Inicialmente, destaca-se que a análise é estática, isto é, os países foram comparados com dados de 2018. Embora permita um diagnóstico dos seus mercados de energia, a utilização de apenas um ano impede a identificação de trajetórias de desenvolvimento dos países. Uma continuidade da pesquisa seria a utilização da metodologia SBM-DEA em uma série de tempo, avaliando os mercados de eletricidade e gás natural dinamicamente. A análise dinâmica define se o país vem apresentando variações nos indicadores de mercado ou se continua estagnado em uma estrutura que não abarca a atual transição energética.

As variáveis lineares do modelo SBM-DEA podem induzir a soluções de canto. Além disso, os resultados são dependentes das especificidades da amostra utilizada. Sendo assim, a fronteira de eficiência se altera quando o grupo de países avaliados se modifica e/ou quando se utiliza um indicador descritivo do mercado diferente. Por exemplo, se a análise do mercado de energia elétrica considerasse a flexibilidade dos sistemas elétricos ao invés da confiabilidade, o resultado seria diferente.

A comparação entre a presente análise e trabalhos anteriores que usaram os modelos DEA para confrontar países no campo do planejamento energético mostra que o foco dos estudos passados era a eficiência energética, ou seja, o consumo eficiente dos recursos energéticos (Zhang e Chen, 2022; Zhou e Xu, 2022; e Sarpong *et al.*, 2022). Este trabalho considera o aspecto adicional de avaliar a transição energética, que engloba não apenas o aumento na eficiência do consumo dos recursos, mas também as alterações nas matrizes energéticas dos países avaliados.

Adicionalmente, os estudos identificados comparavam países semelhantes em aspectos regionais e socioeconômicos. Zhang e Chen (2022) e Zhou e Xu (2022) avaliaram os países do grupo Regional Comprehensive Economic Partnership – RCEP. Sarpong *et al.* (2022) analisaram países africanos, enquanto Neves, Marques e Moutinho (2020), países europeus. O presente trabalho avaliou uma amostra que contém países de todos os continentes do mundo, com diferenças socioeconômicas significativas. Esta amostra mais abrangente permite gerar uma análise mais representativa.

As diferenças de direcionamento de políticas energéticas entre os países são verificadas pelo modelo SBM-DEA, na medida em que tais políticas se refletem na transição energética. Por exemplo, países que adotam políticas específicas para a promoção de fontes renováveis tendem a apresentar maiores participações destes combustíveis em suas matrizes elétricas, o que será captado pela variável *participação de renováveis*. O interesse do método SBM-DEA não é controlar a adoção de políticas pelos países, mas sim avaliar sua eficiência.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho endereça as relações entre a liberalização de mercados de energia e a transição energética motivada pelo combate às mudanças climáticas. O objetivo foi verificar se a liberalização dos mercados de gás natural e eletricidade contribui para a transição energética. Para isso, o trabalho utilizou um modelo de SBM-DEA para comparar o *status* atual dos mercados de energia de diversos países. A cada nação, o modelo atribui uma nota que representa a eficiência do país no sentido da transição energética. Por se tratar de uma metodologia quantitativa de comparação de mercados, a abordagem deste trabalho permite um diagnóstico dos melhores mercados e possibilidades de alterações nos mercados ineficientes.

Em termos de mercados eficientes, os resultados mostraram que os mercados mais avançados em seus processos de abertura tendem a apresentar melhores resultados de transição energética, como maiores participações de fontes renováveis no setor elétrico, maiores participações de gás natural na matriz energética, menores preços de eletricidade e menores níveis de dependência externa, entre outros indicadores de transição.

Já para os países ineficientes, o trabalho sugere modificações quantitativas a serem perseguidas em seus indicadores dos mercados de energia avaliados de modo a melhorarem suas *performances* rumo à transição energética. Em termos dos mercados de eletricidade e gás natural do Brasil, as reduções nas barreiras regulatórias à entrada e a redução da participação estatal são relevantes para o atingimento de melhorias em busca da transição energética.

O trabalho concluiu, ainda, que tais esforços já vêm sendo aplicados pelas novas legislações que estão surgindo no Brasil, como a nova lei do gás natural, o Código Brasileiro de Energia Elétrica e o novo marco regulatório da geração distribuída. Adicionalmente, vem se observando uma redução relativa na participação das empresas estatais nestes mercados.

Por fim, mesmo tendo em vista as limitações da análise, a metodologia sugerida se mostrou reprodutível, de modo que os países considerados ineficientes podem utilizar estes resultados para balizar suas políticas direcionadas à transição energética. Por outro lado, os países também podem utilizar o modelo SBM-DEA para avaliar outros indicadores de mercados energéticos, como emissões de gases de efeito estufa, flexibilidade do sistema elétrico, intensidade energética, diversidade de fontes na oferta primária de energia, entre outros. A partir de avaliações com diferentes indicadores de mercado, novas políticas energéticas podem ser estabelecidas.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Anteprojeto de Lei nº 2**: institui o Código Brasileiro de Energia Elétrica, e dá outras providências. Brasília: Câmara dos Deputados, 2019.

_____. Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera as leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999; e revoga a Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, e dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 abr. 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/40bunWq>>.

_____. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 5, p. 4, 7 jan. 2022. Seção 1.

EUROPEAN COMMISSION. **Implementing the repower EU action plan**: investment needs, hydrogen accelerator and achieving the bio-methane targets. Brussels: European Commission, 2022. (Commission Staff Working Document, n. 230). Disponível em: <<https://bit.ly/3KEUBL0>>.

FOUQUET, R. A brief history of energy. *In*: EVANS, J.; HUNT, L. C. (Ed.). **International handbook on the economics of energy**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2009. p. 1-19. Disponível em: <<https://bit.ly/410VeFP>>.

GEELS, F. W. The dynamics of transitions in socio-technical systems: a multi-level analysis of the transition pathway from horse-drawn carriages to automobiles (1860-1930). **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 17, n. 4, p. 445-476, Dec. 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/3GLz02m>>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050**: a roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Rethinking energy**: renewable energy and climate change. [s.l.]: Irena Publication, 2015.

_____. **Rethinking energy 2017**. [s.l.]: Irena Publication, 2017.

MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* Summary for policymakers. *In*: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (Ed.). **Global warming of 1.5°C**: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2018.

NEVES, S. A.; MARQUES, A. C.; MOUTINHO, V. Two-stage DEA model to evaluate technical efficiency on deployment of battery electric vehicles in the EU countries. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 86, Sept. 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/41cno0m>>.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Product market regulation**: a detailed explanation of the methodology used to build the OECD PMR indicators. Paris: OECD Publishing, 2020a.

_____. **The 2018 edition of the OECD PMR indicators and database**: methodological improvements and policy insights. Paris: OECD Publishing, 2020b. Disponível em: <<https://bit.ly/41aw5bU>>.

SARPONG, F. A. *et al.* The drivers of energy efficiency improvement among nine selected West African countries: a two-stage DEA methodology. **Energy Strategy Reviews**, v. 43, Sept. 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/3UEqMyR>>.

SINGH, H. V. *et al.* The energy transitions index: an analytic framework for understanding the evolving global energy system. **Energy Strategy Reviews**, v. 26, Nov. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3UCuYza>>.

TONE, K. Slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 130, n. 3, p. 498-509, May 2001.

VISCUSI, W. P.; HARRINGTON JUNIOR, J. E.; SAPPINGTON, D. E. M. (Ed.). **Economics of regulation and antitrust**. 5th. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2018.

ZHANG, C.; CHEN, P. Applying the three-stage SBM-DEA model to evaluate energy efficiency and impact factors in RCEP countries. **Energy**, v. 241, Feb. 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/40iaT2w>>.

ZHOU, S.; XU, Z. Energy efficiency assessment of RCEP member states: a three-stage slack based measurement DEA with undesirable outputs. **Energy**, v. 253, Aug. 2022. Disponível em: <<https://bit.ly/43w9XKC>>.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

IPCC – INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the International Panel on Climate Change** – Technical Summary. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2021.

APÊNDICE A

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

Descreve-se a seguir a lista de todas as variáveis analisadas pelo índice de transição energética (*energy transition index* – ETI). Encontram-se em negrito as escolhidas para fazer parte da análise de correlações do modelo baseado em folgas (*slack based measure* – SBM) – World Economic Forum (2021a).

1) *Performance* do sistema energético:

a) desenvolvimento econômico e crescimento:

- custo das externalidades;
- subsídios para energia;
- exportação de combustíveis;
- importação de combustíveis;
- **preços de eletricidade para o setor residencial;**
- preços de eletricidade para o setor industrial; e
- preços do gás natural (atacado).

b) sustentabilidade ambiental:

- **emissões de CO₂ per capita;**
- intensidade de CO₂;
- intensidade energética; e
- emissões de PM_{2,5}.

c) acesso à energia e segurança energética:

- **dependência de importação;**
- diversidade das importações;
- diversidade de recursos energéticos;

TEXTO para **DISCUSSÃO**

- qualidade da oferta de energia;
 - **taxa de eletrificação;** e
 - **acesso a combustíveis limpos.**
- 2) Prontidão para a transição:
- a) investimento e capital:
- capacidade de investimento em energias renováveis;
 - acesso a crédito;
 - índice de liberdade de investimento; e
 - investimentos em eficiência energética.
- b) regulação e comprometimento político:
- **regulação favorável a renováveis;**
 - **regulação favorável à eficiência energética;**
 - **regulação favorável ao acesso à energia;**
 - **estabilidade do sistema político;** e
 - comprometimento e aderência aos compromissos climáticos internacionais.
- c) instituições e governança:
- *rating* de crédito do país;
 - **leis bem definidas;** e
 - **transparência.**
- d) infraestrutura e ambiente para inovação:
- ambiente propício a inovação;
 - *performance* logística; e
 - **qualidade da infraestrutura de transporte.**

e) capital humano:

- postos de trabalho em indústrias de baixo carbono; e
- qualidade da educação.

f) estrutura do sistema energético:

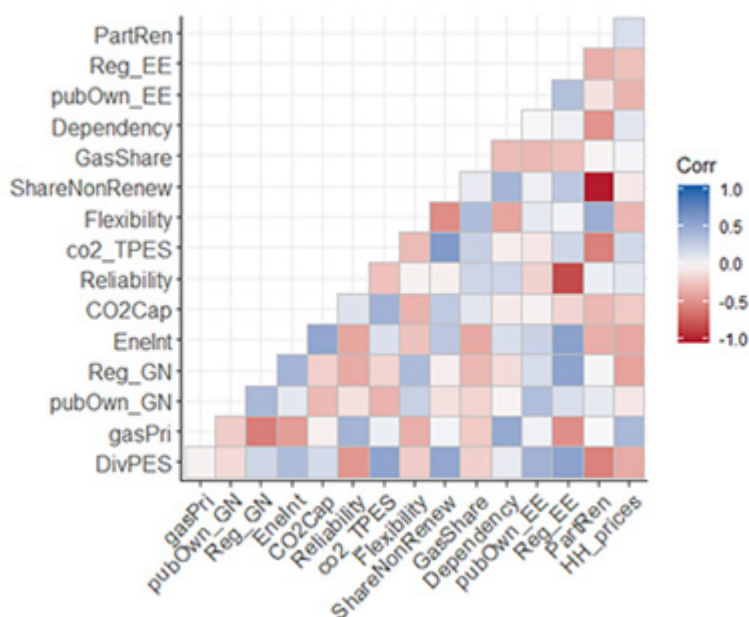
- participação nas reservas globais de combustíveis fósseis;
- **participação de renováveis na geração de eletricidade;**
- **participação de carvão na geração de eletricidade;**
- **flexibilidade do sistema energético; e**
- **energia per capita.**

Após a análise inicial das variáveis, aquelas que não apresentam redundância com os indicadores *product market regulation* (PMR) e que melhor representam os mercados de gás e de eletricidade foram eleitas para participar da análise de correlações.

A figura A.1 traz a matriz de correlações entre as variáveis analisadas.

FIGURA A.1

Matriz de correlações entre os dados de entrada



Fonte: OECD (2020); World Economic Forum (2021b).
Elaboração dos autores.

TEXTO para **DISCUSSÃO**

A seguir, apresenta-se a descrição das variáveis (em negrito, aquelas utilizadas pelo modelo DEA-SBM).

- 1) **PartRen**: participação de renováveis na geração total de eletricidade do ano de 2018.
- 2) **Reg_EE**: indicador PMR referente à regulação do mercado de eletricidade.
- 3) **pubOwn_EE**: indicador PMR referente à propriedade estatal do mercado de eletricidade
- 4) **Dependency**: parcela da importação de gás natural no seu consumo total.
- 5) **GasShare**: participação do gás no consumo total de energia.
- 6) **ShareNonRenew**: participação de não renováveis na geração total de eletricidade do ano de 2018.
- 7) **Flexibility**: parcela da eletricidade total gerada por óleo, gás natural ou hidrelétricas.
- 8) **co2_TPES**: emissões de CO₂ por unidade de energia primária produzida.
- 9) **Reliability**: confiabilidade na oferta e transparência das tarifas de eletricidade.
- 10) **CO2Cap**: emissões de CO₂ *per capita*.
- 11) **EneInt**: intensidade energética.
- 12) **Reg_GN**: indicador PMR referente à regulação do mercado de gás natural.
- 13) **pubOwn_GN**: indicador PMR referente à propriedade estatal do mercado de gás natural.
- 14) **gasPri**: preços do gás natural (atacado).
- 15) **DivPES**: diversidade na oferta de energia primária.
- 16) **HH_prices**: preços residenciais de eletricidade.

QUADRO A.1
Variáveis analisadas

Base	Variável	Abreviação	Unidade	Descrição
Agência Internacional de Energia (IEA)	Emissões de CO ₂ em relação à oferta interna de energia primária	co2_TPES	kg/GJ	Emissões de CO ₂ por combustão
	Emissões de CO ₂ per capita	CO2Cap	ton per capita	Razão entre emissões de CO ₂ por combustão e o número de habitantes do país
	Dependência de gás natural	Dependency	%	Complementar da razão entre importação e consumo de gás natural
	Diversidade na oferta de energia primária	DivPES	[0(melhor),1]	Oferta interna de energia primária
	Intensidade energética	EnEInt	US\$/kg-oe	PIB por unidade de energia consumida (PIB PPP)
	Flexibilidade do sistema elétrico	Flexibility	%	Porcentagem do total de eletricidade gerada a partir de óleo, gás natural ou hidrelétrica
	Participação do gás natural na oferta de energia	GasShare	%	Porcentagem da oferta de gás natural em relação à oferta total de energia
	Participação de fontes renováveis	PartRen	%	Porcentagem do total de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis
	Participação de fontes não renováveis	ShareNonRenew	%	Porcentagem do total de eletricidade gerada a partir de fontes não renováveis
	Preços do gás natural	gasPri	US\$/MBTU	Preço de gás natural no atacado
União Internacional do Gás (IGU)	Preços residenciais de energia elétrica	HH_prices	PPP US\$/kWh	Preços residenciais de energia elétrica ajustados por paridade de poder de compra
	Propriedade estatal – energia elétrica	pubOwn_EE	[0(melhor),6]	Indicador PMR: propriedade estatal – eletricidade
PMR/OECD	Propriedade estatal – gás natural	pubOwn_GN	[0(melhor),6]	Indicador PMR: propriedade estatal – gás natural
	Regulação – energia elétrica	Reg_EE	[0(melhor),6]	Indicador PMR: regulação – eletricidade
Banco Mundial	Regulação – gás natural	Reg_GN	[0(melhor),6]	Indicador PMR: regulação – gás natural
	Confiabilidade	Reliability	[0,8(melhor)]	Confiabilidade na oferta de eletricidade e transparência das tarifas

Elaboração dos autores.

Obs.: *Product market regulation*/Organisation for Economic Co-operation and Development – PMR/OECD.

REFERÊNCIAS

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **The 2018 edition of the OECD PMR indicators and database**: methodological improvements and policy insights. Paris: OECD Publishing, 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/41aw5bU>>.

WORLD ECONOMIC FORUM. Appendix: methodology. *In*: WORLD ECONOMIC FORUM. **Fostering effective energy transition**: 2021 edition. Cologny: World Economic Forum, 2021a. Disponível em: <<https://bit.ly/3UDGASn>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

_____. **Fostering effective energy transition**: 2021 edition. Cologny: World Economic Forum, 2021b. Disponível em: <<https://bit.ly/3UDGASn>>.

APÊNDICE B

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados utilizados nesta análise podem ser obtidos em: <<https://bit.ly/3KGz5FE>>.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação

Aeromilson Trajano de Mesquita

Assistentes da Coordenação

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

Samuel Elias de Souza

Supervisão

Ana Clara Escórcio Xavier

Everson da Silva Moura

Revisão

Alice Souza Lopes

Amanda Ramos Marques Honorio

Barbara de Castro

Brena Rolim Peixoto da Silva

Cayo César Freire Feliciano

Cláudio Passos de Oliveira

Clícia Silveira Rodrigues

Olavo Mesquita de Carvalho

Regina Marta de Aguiar

Reginaldo da Silva Domingos

Nayane Santos Rodrigues (estagiária)

Editoração

Anderson Silva Reis

Cristiano Ferreira de Araújo

Danielle de Oliveira Ayres

Leonardo Hideki Higa

Natália de Oliveira Ayres

Capa

Aline Cristine Torres da Silva Martins

Projeto Gráfico

Aline Cristine Torres da Silva Martins

The manuscripts in languages other than Portuguese published herein have not been proofread.

Ipea – Brasília

Setor de Edifícios Públicos Sul 702/902, Bloco C

Centro Empresarial Brasília 50, Torre B

CEP: 70390-025, Asa Sul, Brasília-DF

Missão do Ipea
Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro
por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria
ao Estado nas suas decisões estratégicas.



ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DO
PLANEJAMENTO
E ORÇAMENTO

