DESENVOLVIMENTO ELÉTRICO VERDE: Análise dos Indicadores de Eficiência de Energias Renováveis Alternativas no Brasil

Palavras-Chave: Energias Renováveis, Desenvolvimento Sustentável, Data Envelopment Analysis (DEA).

Autores:
Cleiton José Carneiro Junior, IE/Unicamp
Profª. Drª. Aline Veronese da Silva (orientadora), IE/Unicamp

INTRODUÇÃO

A crescente emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) por ação antrópica torna iminente o agravamento do aquecimento global. De acordo com o *Emissions Gap Report*, emitido pelas Nações Unidas (UNEP, 2023), sem maiores enrijecimentos nas políticas atuais, a temperatura global subirá 3°C até o final do século XXI. É imprescindível que medidas eficientes sejam implementadas com urgência. Nesse contexto, fontes energéticas renováveis surgem como as principais alternativas para a contenção do aquecimento. Segundo o *Net Zero Roadmap* (IEA, 2023), a geração elétrica é a maior emissora de dióxido de carbono no setor energético, correspondendo a 36% do total de emissões desse setor em 2023.

No Brasil, a matriz elétrica é predominantemente renovável, com destaque para as hidrelétricas. De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a oferta interna de energia elétrica proveniente de fontes renováveis corresponde a 88% do total, onde as hidrelétricas representam 64%. Contudo, em razão das mudanças climáticas, crises hídricas têm afetado os reservatórios das hidrelétricas, exigindo o acionamento frequente de fontes não renováveis para suprir a demanda e manter a estabilidade do sistema elétrico nacional que resulta em tarifas mais elevadas para os consumidores (IPEA, 2019). Portanto, a diversificação da matriz com fontes renováveis alternativas pode trazer maior estabilidade ao sistema elétrico, reduzir custos aos consumidores e garantir sustentabilidade energética nacional.

A diversificação elétrica, com investimentos em fontes alternativas à hidroeletricidade, pode impulsionar o desenvolvimento econômico. Hirschman (1958) defende o desenvolvimento desequilibrado, baseado em *linkages*, entendidos como mecanismos de indução dada as interdependências setoriais. Assim, investimentos em projetos complexos e capital-intensivos, como usinas elétricas, podem gerar transbordamentos com impactos socioeconômicos, especialmente nas regiões próximas à sua implantação.

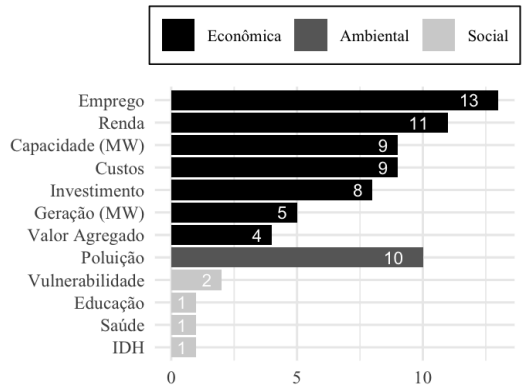
A desigualdade regional reorienta as estratégias de desenvolvimento. Macedo (2023) destaca que, em 2020, metade da população brasileira vivia em municípios responsáveis por apenas um terço do PIB. Para reduzir esses desequilíbrios, o autor enfatiza políticas de desenvolvimento centradas em infraestrutura. Nesse contexto, este estudo adota o conceito de desenvolvimento regional sustentável, consolidado na ECO-92, baseado em três pilares fundamentais: economia, sociedade e meio ambiente (Shi et al., 2019).

Diante das complexidades identificadas no sistema elétrico nacional, nas dinâmicas socioeconômicas regionais e as oportunidades de investimento em energias renováveis, insta investigar a viabilidade de um desenvolvimento regional sustentável. O presente estudo examina os impactos multidimensionais (sociais, econômicos e ambientais) decorrentes da implantação de fontes renováveis alternativas nas mesorregiões brasileiras no período 2010-2021. Para tal, emprega-se uma abordagem metodológica que avalia a eficiência relativa das unidades regionais, considerando a energia produzida por diferentes fontes, através de um modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) orientado a outputs com retornos não decrescentes de escala (NDRS). Esta pesquisa visa ampliar a contribuição de Da Silva et al. (2023), não apenas pela extensão temporal da análise, mas principalmente pela incorporação de dimensões adicionais que permitem uma avaliação mais abrangente e sofisticada da eficiência regional no contexto da transição energética brasileira.

REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura examinou as principais variáveis e bases de dados utilizadas na literatura sobre impactos de energias renováveis, com enfoque inicial em estudos empregando Análise Envoltória de Dados (DEA). Face à limitação de aplicações desse método, ampliou-se o escopo para incorporar modelagens input-output (IO), assegurando maior abrangência analítica. Do corpus de 17 artigos mapeados, destaca-se Da Silva et al. (2023) como principal referência. Constata-se que a maioria das pesquisas avalia os impactos de forma segmentada, exclusivamente econômica ou ambiental. Estudos que integraram variáveis sociais mostraram-se fundamentais para a construção do modelo adotado nesta pesquisa, o qual articula sistematicamente dimensões sociais, econômicas e ambientais. A *Figura 1* apresenta as variáveis identificadas.

Fig. 1 - Principais Variáveis Identificadas



Fonte: Elaboração própria.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma abordagem não paramétrica que adota programação linear para estimar fronteiras de eficiência (Charnes et al., 1978; Banker et al., 1984). O modelo implementado é orientado por *outputs* – busca maximizar os *outputs* mantendo constantes os *inputs* – com pressuposto de retornos não decrescentes de escala (NDRS), conforme formulado na Equação 1. A operacionalização foi realizada com o pacote Benchmarking no ambiente R (Bogetoft e Otto, 2022).

$$min \sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0} + \varphi \qquad (1)$$

Sujeito a $\sum_{i=1}^{m} v_i x_{ij} - \sum_{r=1}^{s} u_r y_{rj} + \varphi \leq 0; \; para\, j = 1,..., n$

Onde, $\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0} = 1; \;\; u_r, v_i \geq 0 \,; \;\; \varphi \leq 0$

As variáveis adotadas no modelo foram definidas a partir da revisão de literatura. As bases de dados e *proxies* foram coletadas a nível municipal e agregadas por mesorregião. A *Tabela 1* sintetiza as variáveis selecionadas e suas respectivas bases de dados. Os dados foram tabulados em painel, entre 2011 e 2021.

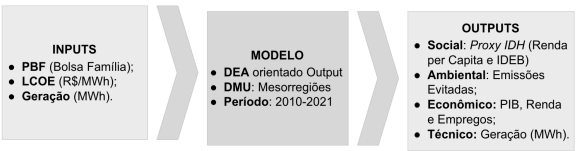
Tabela 1 - Dados Coletados

Dimensão	Variável	Fonte
Inputs		
Social	Bolsa Família (PBF)	Ministério da Cidadania
Econômica	LCOE (R$/MWh)	EPE
Técnica	Geração Elétrica (MWh)	ONS
Outputs		
Social	IDEB	INEP
Ambiental	Emissão Gases Geração Elétrica	SEEG
Econômica	PIB per Capita	IBGE
Econômica	Remuneração Média	RAIS
Econômica	Remuneração Média por CNAE	RAIS
Econômica	Empregos Total	RAIS
Econômica	Emprego Total por CNAE	RAIS
Técnica	Geração Elétrica (MWh)	ONS

Fonte: Elaboração própria.

A *Figura 2* sintetiza o *framework* do modelo para avaliar a eficiência multidimensional das mesorregiões brasileiras com usinas elétricas entre 2010 e 2021. As variáveis de *input* selecionadas foram os beneficiários do Programa Bolsa Família (PBF), interpretado como "custo social"; e o Custo Nivelado de Energia (LCOE) por Geração Elétrica anual por usina. As variáveis de *output* selecionadas representam as dimensões: social (*Proxy IDH*), ambiental (Emissões de GEE evitadas), econômicas (PIB, Remuneração Média e Empregos) e técnica (Geração de Eletricidade).

Fig. 2 - Framework do Modelo DEA



Fonte: Elaboração própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

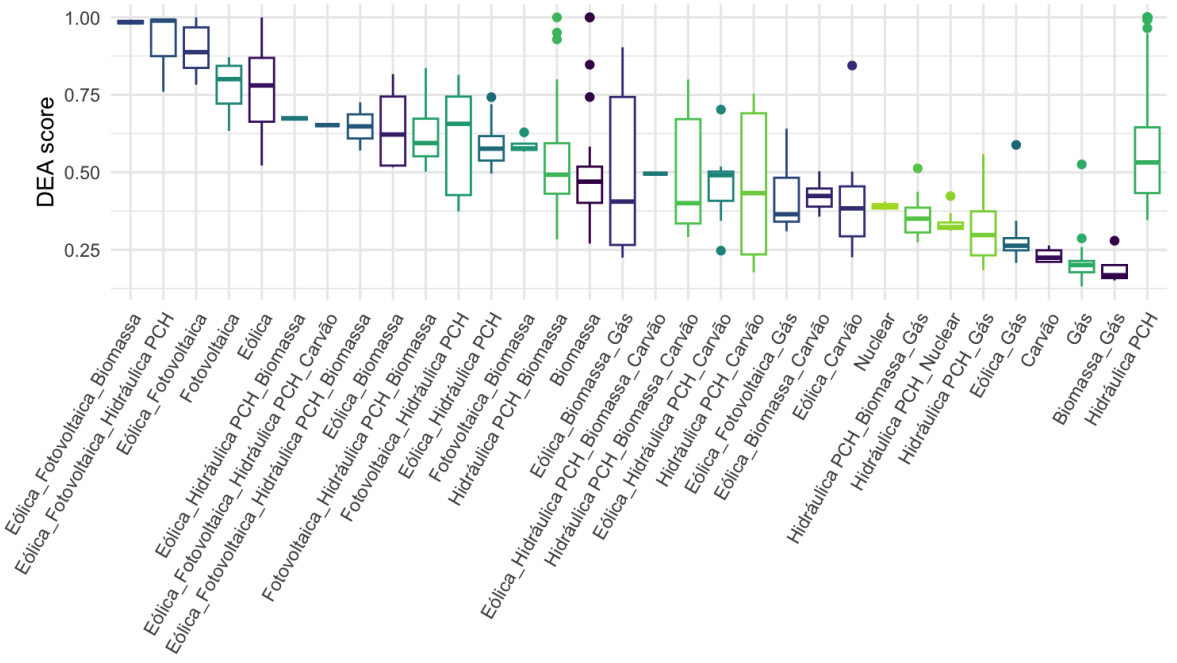
O modelo DEA adotado neste estudo é orientado por *outputs* e pressupõe retornos NDRS. Nessa abordagem, os *outputs* são considerados variáveis gerenciáveis, enquanto os inputs permanecem constantes. A aplicação do modelo permitiu analisar os impactos multidimensionais (sociais, econômicos e ambientais) associados à presença de usinas elétricas nas mesorregiões brasileiras no período de 2010-2021. Considerando que a maioria das mesorregiões analisadas possui mais de um tipo de tecnologia instalada, foi necessário agrupá-las conforme as combinações de fontes de geração elétrica presentes. A *Figura 3* apresenta os *scores* de eficiência para essas diferentes combinações tecnológicas. De forma geral, mesorregiões com predominância de tecnologias renováveis apresentaram eficiências relativas superiores, enquanto aquelas com maior participação de fontes não-renováveis demonstraram desempenhos significativamente inferiores.

Entre as 99 mesorregiões avaliadas, os scores de eficiência variaram entre 0,13 e 1,000, com média de 0,546. Dentre elas, 17 mesorregiões atingiram a eficiência máxima, compondo a fronteira eficiente com as seguintes tecnologias: eólica, biomassa, fotovoltaica e hidráulica de pequeno porte (PCH).

Adicionalmente, a análise das mesorregiões que possuem apenas uma fonte tecnológica instalada permitiu comparações mais precisas entre as diferentes matrizes energéticas. As eficiências médias, em ordem decrescente, foram: 0,7798 para fotovoltaica, 0,7714 para eólica, 0,5659 para hidráulica PCH e 0,5057 para biomassa. Em contrapartida, as mesorregiões com tecnologias não-renováveis apresentaram eficiências médias consideravelmente menores: 0,3912 para nuclear, 0,2319 para carvão e 0,2059 para gás natural.

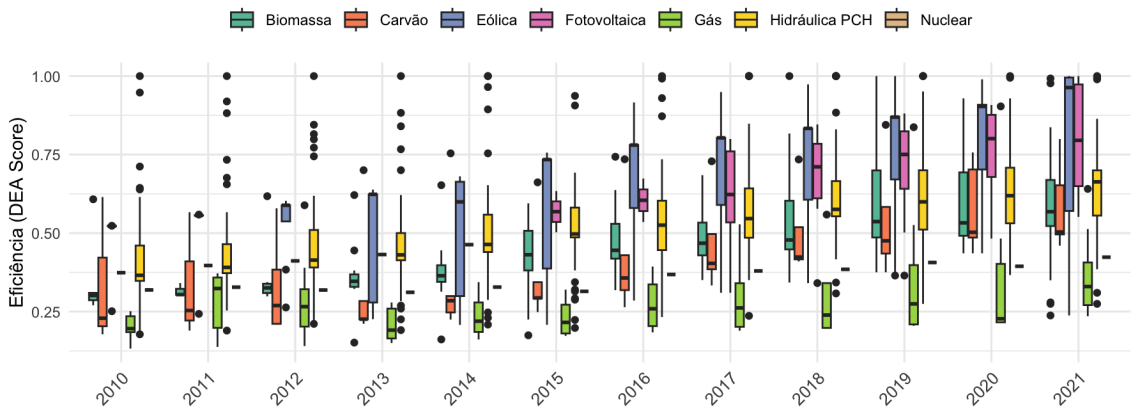
A *Figura 4* ilustra a evolução temporal das faixas de eficiência das mesorregiões, de acordo com os tipos de tecnologia presentes entre 2010 e 2021. Observa-se um aumento consistente da participação de energias renováveis alternativas na matriz elétrica nacional, com destaque para o crescimento de usinas eólicas e fotovoltaicas a partir de 2015, acompanhado pela elevação de seus *scores* de eficiência ao longo dos anos. Apesar das usinas termelétricas a carvão emitirem mais gases de efeito estufa (GEE) do que as movidas a gás, os resultados sugerem que, sob as demais dimensões consideradas, as mesorregiões com usinas a carvão apresentaram desempenho relativo superior às com usinas a gás.

Fig. 3 - *Score* de Eficiência por Tecnologia Combinada



Fonte: Elaboração própria.

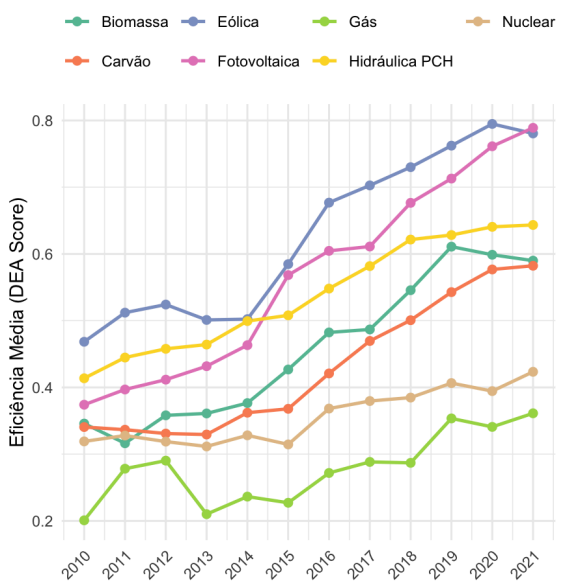
Fig. 4 - Evolução Faixa de Eficiência por Tipo de Tecnologia



Fonte: Elaboração própria.

A *Figura 5* sintetiza a evolução da eficiência média das mesorregiões com pelo menos uma tecnologia instalada no período analisado. As mesorregiões com com tecnologias renováveis continuam se destacando, com as usinas eólicas apresentando os maiores *scores* médios, seguidas por fotovoltaicas, hidráulicas PCH e biomassa.

Fig. 5 - Evolução Eficiência Média por Tecnologia



Fonte: Elaboração própria.

Em suma, os resultados corroboram a hipótese central da pesquisa ao demonstrar que usinas de fontes renováveis alternativas tendem a gerar impactos socioeconômicos e ambientais mais amplos e positivos nas regiões onde estão instaladas, em comparação às tecnologias não-renováveis. Destacam-se, em particular, as usinas eólicas e fotovoltaicas, que apresentaram os maiores scores de eficiência multidimensional, evidenciando seu elevado potencial para impulsionar o desenvolvimento regional sustentável no Brasil.

CONCLUSÕES

A geração de energia elétrica é um dos principais fatores que impulsionam o aquecimento global. No Brasil, apesar da matriz elétrica ser predominantemente renovável, sua forte dependência de hidrelétricas a torna vulnerável às recorrentes instabilidades hídricas. Nesse cenário, investimentos em fontes renováveis alternativas emergem como estratégias cruciais para garantir maior estabilidade do sistema elétrico e, simultaneamente, fomentar o desenvolvimento regional sustentável, reduzindo desigualdades socioeconômicas. A presente pesquisa analisa os impactos multidimensionais (sociais, econômicos e ambientais) da implantação dessas fontes nas mesorregiões brasileiras entre 2010 e 2021, utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA), uma abordagem não paramétrica que avalia eficiência por meio da geração de *scores* agrupados conforme as tecnologias predominantes.

Os resultados indicam que regiões com usinas eólicas e fotovoltaicas alcançaram maiores níveis de eficiência relativa na promoção de impactos multidimensionais. De forma geral, as fontes renováveis alternativas apresentaram desempenho superior, corroborando seu papel na indução de trajetórias sustentáveis de desenvolvimento e na necessidade de políticas públicas que estimulem sua expansão no Brasil. Os resultados complementam estudos da Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), ao evidenciar que tais tecnologias não apenas reduzem emissões e custos, mas também promovem efeitos sociais positivos nas regiões beneficiadas. Por fim, destacam-se limitações metodológicas, como a dificuldade de isolar os efeitos individuais de cada usina em matrizes energéticas mistas, além da indeterminação dos pesos atribuídos às dimensões no cálculo dos *scores*, dada a possibilidade de múltiplas soluções ótimas pelo modelo DEA.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA).** Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel. Acesso em: abril. 2024.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Some models for estimation of technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis.** Management Science, v. 30, n. 9, p. 1078–1092, 1984. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/2631725. Acesso em: mar. 2023.

Base dos Dados (BD). **Índice de Desenvolvimento da Educação Básica (IDEB)** - Municípios. 2021a. Disponível em: https://basedosdados.org/dataset/br-inep-ideb. Acesso em: jan. 2024.

_____. **Relação Anual de Informações Sociais (RAIS) - Microdados de Vínculos.** 2021b. Disponível em: https://basedosdados.org/dataset/br-me-rais. Acesso em: jan. 2024.

_____. **Produto Interno Bruto dos Municípios - IBGE.** 2021d**.** Disponível em: https://basedosdados.org/dataset/br-ibge-pib. Acesso em: jan. 2024.

BOGETOFT, P.; OTTO, L. **Benchmarking with DEA and SFA.** R package version 0.31. 2022. Disponível em: https://cran.r-project.org/web/packages/Benchmarking/index.html.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; RHODES, E. **Measuring the efficiency of decision making units.** European Journal of Operational Research, v. 2, p. 429–444, 1978. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221778901388. Acesso em: mar. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional.** 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf. Acesso em: set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Caderno de preços da Geração 2021.** 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao. Acesso em: mar. 2023

HIRSCHMAN, A. O. **The Strategy of Economic Development.** Yale University Press, 1958. ISBN 139780300001174. Disponível em: <https://archive.org/details/strategyofeconom00hirs/mode/2up>.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach.** 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach. Acesso em: mar. 2025.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6).** 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf. Acesso em: mar. 2024.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Cadernos ODS:** Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. 2019. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes. Acesso em: mar. 2023.

MACEDO, F. C. **Desenvolvimento Regional no Brasil no século XXI.** EDUEPB, 2023. Disponível em: https://eduepb.uepb.edu.br/download/desenvolvimento-regional-no-brasil-no-seculo-xxi/?wpdmdl=2368&masterkey=HlWMe9MBQGa0sTKgkYzD1nf8DdULSjLSZ6wy3HdGTQ68VEokOkr5JeLN15bcEnUrcWYRBpOSaBzqTiQar0MNGugFP2_-YNFPZ258HUQm8B4. Acesso em: mar. 2023.

Ministério da Cidadania. **Visualização de dados - Programa Bolsa Família.** 2022. Disponível em: https://bit.ly/3WOVxUI. Acesso em: jan. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA (OC). Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). **Dados de Emissões por Municípios Brasileiros.** Versão 11.1, 2023. Disponível em: https://seeg.eco.br/dados/. Acesso em: jan. 2024.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Geração Usina.** 2021. Disponível em: https://dados.ons.org.br/dataset/geracao-usina-2.

SHI, L.; HAN, L.; YANG, F.; GAO, L. **The evolution of sustainable development theory:** Types, goals, and research prospects. Sustainability, v. 11, n. 24, p. 7158, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/su11247158.

UN ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Emission Gap Report 2023.** United Nations, 2023. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43922/EGR2023.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: mar. 2023.