

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, SUSTENTABILIDADE E BEM-ESTAR

Roni Nunes de Almeida, Adriano de Amarante

INTRODUÇÃO

A relação entre qualidade de energia e bem-estar socioeconômico busca compreender a importância da eficiência energética em promover o desenvolvimento econômico dos países (Kaufmann, 1992, 2004; Sorrell, 2007). No Brasil o setor de energia elétrica constitui uma matriz energética que, gradualmente, a partir dos anos 2000, vem tornando-se mais diversificada, explorando, os potenciais das fontes renováveis como a solar fotovoltaica e a eólica (Ferreira; Santana; Rapini, 2021). Nesse sentido, o presente estudo procura avaliar o papel do desempenho energético nas medidas de bem-estar (*PIB per capita* e *IDH*), a partir da eficiência socio-energética das 27 Unidades Federativas (UFs) do Brasil no período entre 2015 e 2021. Considerando o desempenho energético (Consumo de Energia Elétrica Residencial *per capita* e Infraestrutura de Distribuição) e de qualidade da energia elétrica (DEC e FEC).

DESENVOLVIMENTO

Para a determinação das variáveis de *inputs* e *outputs* propostas na análise do desempenho energético das 27 UFs brasileiras, utilizou-se, primeiramente, os métodos de seleção de variáveis em DEA apresentados nos estudos de Jackson (1981) e Golany e Roll (1989). O primeiro consiste no método de Análise dos Componentes Principais (PCA) com uso da matriz de correlação ou de covariância, o segundo refere-se a análise de regressão entre os possíveis *inputs* e *outputs*. A verificação dos possíveis fatores determinantes dos indicadores de bem-estar, pressupõe que o Consumo de Energia Elétrica Residencial *per capita* (CEERES) relaciona-se positivamente com PIB *per capita* e o IDH (Meza *et al*, 2007), já a Infraestrutura de Distribuição de Energia Elétrica (INFDEE) relaciona-se negativamente, ressaltando que o índice é construído a partir da razão entre o imobilizado (R\$ Mil) das empresas de distribuição elétrica atuantes nos estados e a densidade demográfica (hab./km²), tal relação indica que a maioria dos estados brasileiros encontram-se com uma infraestrutura de distribuição de energia elétrica que não está acompanhando seu ritmo de desenvolvimento, ou seja, indicando uma concentração dos recursos imobilizados em regiões menos desenvolvidas (ou menor densidade populacional). Os indicadores de qualidade da energia elétrica¹ DEC (Duração de Interrupções por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) relacionam-se negativamente com os índices de bem-estar dos estados, demonstrando que quanto maior seus valores (pior a qualidade de energia) e, assim, menor bem-estar. Finalmente aplicam-se os modelos DEA-CCR de Charnes, Cooper e Rhodes (1978) e DEA-BCC de Banker, Cooper e Charnes (1984) orientados ao *input* para medir a eficiência produtiva e técnica dos estados brasileiros sobre a perspectiva de bem-estar energético abrangendo os anos de 2015, 2017, 2019 e 2021. O nível de eficiência de cada DMU, está num intervalo entre 0,00 e 1,00, sendo 1,00 o requisito para ser eficiente e menor que 1,00 ineficiente.

RESULTADOS

¹ De acordo com Pessanha, Souza e Laurencel (2007) é sugerido transformar os indicadores DEC e FEC em *inputs/outputs* desejáveis, para tanto realizou-se um procedimento semelhante a inversão dada pelas razões: DEC_INV = Max (DEC)/DEC e FEC_INV = Max (FEC)/FEC.

Os dados foram coletados em diversas fontes como ANEEL, EPE, IBGE, IPEA Data e Demonstrações Financeira, sendo utilizado o *software* STATA na realização dos procedimentos metodológicos. O método PCA mostrou que num conjunto de 6 componentes principais (PCs), os 3 primeiros componentes acumulam 81,5% de combinações possíveis entre os *inputs* e *outputs* selecionados para determinar a eficiência socio-energética das UFs. O PC1 apresenta uma variância de 45,2% representando o total de variação observada a partir dos pesos atribuídos aos *inputs* e *outputs* utilizados, destacando o IDH (0,47) com maior peso explicativo, o PC2 e o PC3 apresentaram variâncias de 22,6% e 13,6%, respectivamente. A análise de regressão considerou 2 modelos e níveis de significância de 5% e 10%, o modelo 1 mostrou a relação positiva das variáveis CEERES, FEC e INFDEE ante o PIB *per capita*, entretanto, apenas a primeira variável é significativa. O modelo 2, indicou que as variáveis CEERES e FEC apresentam uma relação positiva, enquanto, DEC e INFDEE uma relação negativa, sendo ambas ante o IDH, onde todas foram significativas. A avaliação da eficiência socio-energética das 27 UFs brasileiras por meio do DEA, separou os indicadores de qualidade de energia por cada estado e por *clusters* (regiões), a fim de considerar as diferenças regionais inerentes às DMUs. Os resultados mostraram a dominância dos estados das regiões Sudeste e Sul com os melhores níveis de eficiência média entre 2015 e 2021, ou seja, próximas a fronteira eficiente (1,00). Os estados apresentaram uma trajetória de menor variação na eficiência energética perante o bem-estar, destacando que o RJ obteve redução na eficiência energética no período, atrelado a dificuldades no cumprimento de metas dos indicadores DEC e FEC e na infraestrutura de distribuição de energia, acarretando reduções no bem-estar. Por outro lado, os estados de MG e ES posicionaram-se na fronteira eficiente, indicando, bom desempenho energético acompanhado de melhorias no bem-estar. Os estados das regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste apresentaram uma trajetória de maior variação na eficiência média, em razão da baixa eficiência produtiva iniciada em 2019, decorrente das diferenças em termos de infraestrutura energética e de desafios de estados como RO, AM, AP, GO e RN em melhorar os indicadores DEC e FEC. Considerando, o desempenho dos estados via organização por *clusters*, observaram-se que houve significativa melhora na eficiência média das regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste. Em geral, apenas 11,1% dos estados foram eficientes (MG, ES e DF), 37% se comportaram próximo da fronteira eficiente (RS, MT, SC, PR, SP, RJ, SE, BA, CE e MA) e 51,8% foram ineficientes (RR, AM, RO, AC, PA, AP, TO, PI, RN, PB, PE, AL, MS e GO).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo consistiu na análise das variáveis de *inputs* do bem-estar condicionadas ao setor elétrico brasileiro, estimando a eficiência socio-energética das 27 UFs entre 2015 e 2021. Os métodos de seleção de variáveis em DEA sugeriram que o CEERES é um importante determinante dos indicadores de bem-estar estaduais, entretanto, as demais variáveis como DEC, FEC e o INFDEE podem contribuir de forma significativa para o nível de IDH estaduais, mas não são significativas para o PIB *per capita* (exceto o DEC). Ademais via o método PCA, pode-se capturar uma medida de eficiência socio-energética alternativa e comparativa aos resultados dos modelos DEA. Ao final a aplicação do DEA mostrou a eficiência socio-energética centralizadas nas regiões mais desenvolvidas do Brasil (Sudeste e Sul), apesar das outras regiões apresentarem dificuldades em manter níveis adequados de desempenho energético, têm abundância de fontes de energia renováveis, contribuindo para diversificação da matriz energética brasileira e no desenvolvimento da chamada “Transição Energética”.

Palavras-chave: Eficiência Socio-Energética; Bem-Estar; Sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- 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.
- FERREIRA, L. F.; SANTANA, J. R.; RAPINI, M. S. O setor energético no Brasil: um debate sobre a potencialidade das fontes renováveis no contexto ambiental e tecnológico. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 49, 2021.
- GOLANY, B.; ROLL, Y. An application procedure for DEA. **Omega**, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.
- JACKSON, J. E. Principal components and factor analysis: part II additional topics related to principal components. **Journal of Quality Technology**, v. 13, n. 1, p. 46-58, 1981.
- KAUFMANN, R. K. A biophysical analysis of the energy/real GDP ratio: implications for substitution and technical change. **Ecological Economics**, v. 6, n. 1, p. 35-56, 1992.
- KAUFMANN, R. K. The mechanisms of autonomous energy efficiency increases: a cointegration analysis of the US energy/GDP ratio. **The Energy Journal**, v. 25, n. 1, p. 63-86, 2004.
- MEZA, L. A. *et al.* Seleção de variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia eléctrica. **Investigação Operacional**, v. 27, n. 1, p. 21-36, 2007.
- PESSANHA, J. F. M.; SOUZA, R. C.; LAURENCEL, L. da C. Um modelo de análise envoltória de dados para o estabelecimento de metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica. **Pesquisa Operacional**, v. 27, p. 51-83, 2007.
- SORRELL, S. **The Rebound Effect**: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency. London: UKERC, 2007.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Roni Nunes de Almeida

MODALIDADE DE BOLSA: PIBIC/Af

VIGÊNCIA: 09/2024 a 08/2025 – Total: 12 meses

ORIENTADOR: Adriano de Amarante

CENTRO DE ENSINO: ESAG

DEPARTAMENTO: Departamento de Ciências Econômicas

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Ciências Sociais Aplicadas

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Economia da Energia no Brasil: aplicações econométricas ao setor elétrico

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP1-2018