

Avaliação dos Impactos Futuros da Demanda Flexível no Setor Elétrico Brasileiro

Evaluating the Future Impacts of Flexible Demand in the Brazilian Power Sector

Gabriel Fonseca Oliveira Roma¹, Douglas Marques Murja², Géremi Gilson Dranka³

RESUMO

Este estudo investiga o potencial da demanda flexível no sistema elétrico brasileiro, considerando a meta de 100% de fontes renováveis estabelecida pelo Plano Nacional de Energia 2050. Por meio da utilização do software EnergyPLAN, realizaram-se simulações operacionais do sistema elétrico, evidenciando que a incorporação da demanda flexível é capaz de substancialmente mitigar tanto a necessidade de importação/exportação de energia quanto o excesso crítico de produção. No entanto, a relação entre a implementação da demanda flexível e a redução desses parâmetros não segue uma tendência linear. Adicionalmente, ao realocar a curva de demanda para coincidir com os momentos de maior geração, pode ser necessária a alocação de investimentos suplementares na infraestrutura de transmissão de energia. Os resultados deste estudo representam uma contribuição substancial para o aprofundamento da compreensão dos desafios e das oportunidades inerentes à transição em direção a uma matriz energética mais sustentável, oferecendo contribuições importantes para futuras estratégias de planejamento energético.

PALAVRAS-CHAVE: Demanda Flexível; Matriz Energética 100% renovável; Planejamento Energético.

ABSTRACT

This study investigates the potential of flexible demand within the Brazilian electrical system, taking into consideration the ambitious goal of achieving 100% reliance on renewable energy sources outlined in the National Energy Plan for 2050. Utilizing the EnergyPLAN software, operational simulations of the electrical system were conducted, revealing that the integration of flexible demand has the substantial capacity to mitigate both the necessity for energy import/export and the critical surplus in production. However, it is noteworthy that the relationship between implementing flexible demand and reducing these parameters does not adhere to a linear trend. Additionally, supplementary investments in energy transmission infrastructure may be required when reallocating the demand curve to align with peak generation moments. The outcomes of this study constitute a significant contribution towards a deeper understanding of the challenges and opportunities inherent in the transition towards a more sustainable energy matrix, thereby providing valuable insights for future energy planning strategies.

KEYWORDS: Flexible Demand; 100% RES; Energy Planning.

Introdução

Com a crescente preocupação global e os intensificados esforços para mitigar os impactos das mudanças climáticas, a transição para uma matriz elétrica mais sustentável emerge como uma prioridade crítica para a maioria das nações em sua visão de longo prazo. O planejamento energético adequado requer a consideração de diferentes fatores, como políticos, econômicos, culturais, ecológicos e técnicos (DRANKA; FERREIRA, 2018).

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, País. E-mail: gabrielroma@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 9713423588009836.

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, País. E-mail: douglasmurja@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3526944228602650.

³ Docente no Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, País. E-mail: geremidranka@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3004093329141780.

Nesse esforço, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) junto com o Ministério de Minas e Energia (MME) publicou o Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) no ano de 2020. O objetivo do PNE 2050 é apresentar cenários de expansão energética para o Brasil, levando em consideração diretrizes e estratégias que visam alcançar quatro principais objetivos: segurança energética, retorno financeiro aos investimentos, disponibilidade de acesso à população e minimização dos impactos socioambientais (MME; EPE, 2020).

A transição para uma matriz energética sustentável exige a análise da disponibilidade de recursos naturais ao longo do ano e a compreensão das flutuações na geração e demanda de energia elétrica durante as estações, devido à influência das condições climáticas e sazonais nas fontes renováveis. Além disso, é fundamental modernizar e adaptar as infraestruturas do setor elétrico, incluindo o avanço em tecnologias como armazenamento de energia, redes inteligentes e sistemas de gerenciamento de demanda (RINALDI et al., 2022). Nesse sentido, as estratégias de gerenciamento pelo lado da demanda (no inglês, *Demand-Side Management* – DSM) emergem como uma estratégia promissora. A utilização da demanda flexível, por exemplo, possibilita a adaptação do consumo de eletricidade em resposta às flutuações na oferta e demanda. Essa abordagem desempenha um papel crucial na operação da rede elétrica, otimizando o uso das fontes de energia renováveis e na redução dos custos operacionais do sistema (ALVES; CARVALHO; PEÇAS LOPES, 2023).

O rápido crescimento das fontes intermitentes de energia elétrica, como a eólica e a solar, tem contribuído para a expansão das fontes renováveis no setor energético. No entanto, também traz desafios complexos para a operação da rede elétrica. Um desses desafios é que, em determinados períodos, a produção de energia pode exceder consideravelmente à demanda, resultando no fenômeno conhecido como Excesso Crítico de Produção de Energia (ECPE). O ECPE pode causar danos aos equipamentos devido à sobrecarga da rede e instabilidade causada por flutuações na frequência.

Nesse contexto, a pesquisa proposta nesse artigo tem como principal objetivo analisar o potencial da demanda flexível no sistema elétrico brasileiro considerando um cenário 100% renovável (100% RES) estabelecido pela EPE no PNE 2050. Dessa forma, busca-se identificar os principais desafios associados a cenários com alta penetração de energias renováveis, ao mesmo tempo em que se avalia o potencial da demanda flexível.

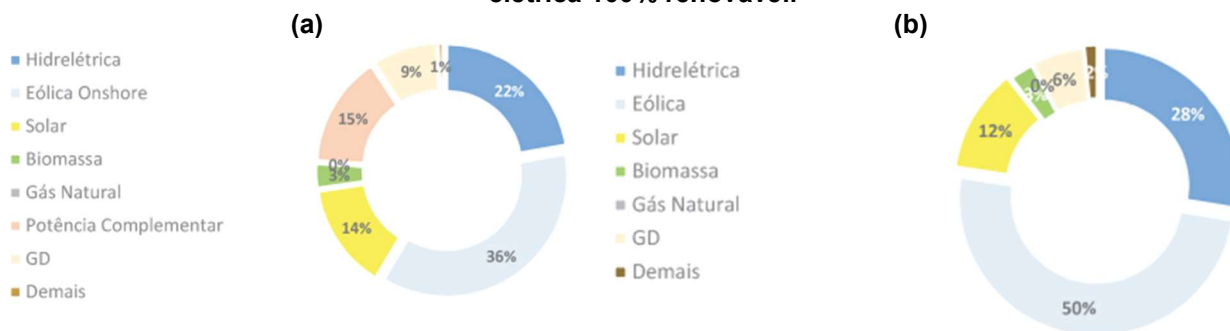
Materiais e Métodos

O software EnergyPLAN foi selecionado para a pesquisa devido às suas funcionalidades, adequadas para o problema em questão, incluindo a interface amigável e uso generalizado em vários países, incluindo o Brasil. Uma característica fundamental do EnergyPLAN é a capacidade de simular a operação de um sistema elétrico em base horária. Além disso, o EnergyPLAN permite a simulação da demanda flexível; sistemas de armazenamento de energia; capacidade de linhas de transmissão para exportação; entre outros.

O EnergyPLAN pode ser compreendido através de três principais parâmetros de entrada: (i) capacidade instalada de cada fonte de energia (MW); (ii) curvas horárias de distribuição (para fontes de energia renovável intermitente) ou a disponibilidade de combustível (no caso de usinas termelétricas, nucleares e hidrelétricas com reservatório) e (iii) fator de capacidade associado a cada fonte.

O cenário Matriz elétrica 100% renovável do PNE 2050 foi escolhido, em virtude de sua notória complexidade e dos inerentes desafios ligados à gestão de um sistema energético altamente dependente de fontes estocásticas. Os dados relativos à capacidade instalada (em MW) e à geração média (em MW médio) para este cenário são apresentados de forma detalhada nas figuras 1.a e 1.b.

Figura 1 – Capacidade Instalada (a) e Geração de energia (b) por fonte de Energia do cenário Matriz elétrica 100% renovável.



Fonte: Plano Nacional de Energia 2050 – Anexo (MME; EPE, 2020).

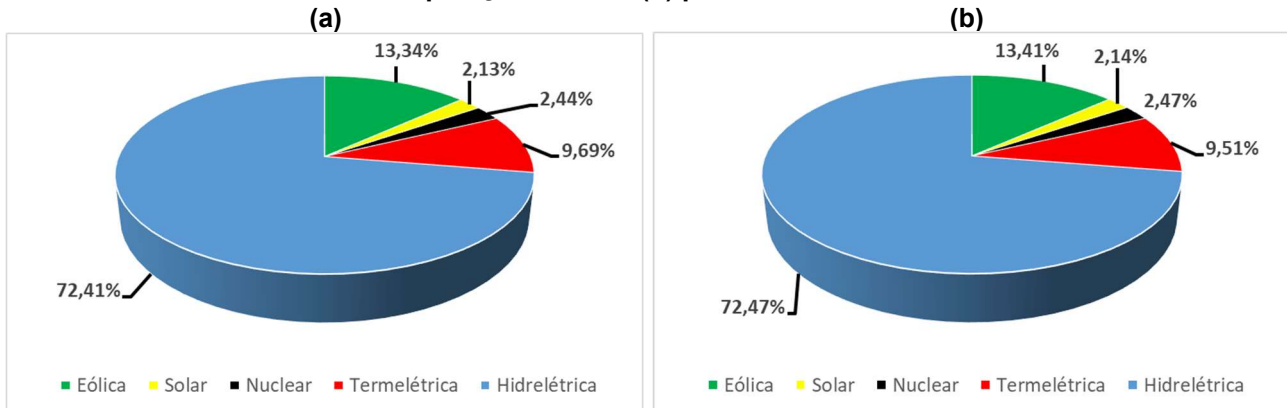
A principal hipótese do cenário 100% RES considera que grande parte do potencial hidrelétrico do país terá sido explorado, com exceção das unidades de conservação ambiental (UC) e as Terras Indígenas (TI). Além disso, é crucial observar que, neste cenário, não ocorre a expansão das usinas termelétricas movidas a carvão e gás natural, sendo utilizada apenas a biomassa como fonte de combustível. Para suprir toda demanda de energia elétrica do país, o cenário 100% RES indica ainda a necessidade da instalação de uma potência complementar, considerando quatro possíveis tecnologias que podem ser empregadas: UTE flexíveis, repotenciação das UHE, UHE reversíveis e armazenamento químico (bateria por exemplo) (MME; EPE, 2020, p. 145).

Validação do Modelo

Com o objetivo de validar a ferramenta utilizada, foram realizados testes comparativos entre as saídas de dados da geração de energia ao longo de um ano pelo EnergyPLAN, comparando-as ao histórico de operação do Operador Nacional do Sistema (ONS). Os dados horários foram extraídos de várias fontes. Os dados de incidência solar, relevantes para a geração fotovoltaica, e do perfil de ventos, usados na geração eólica, foram extraídos do site RenewablesNinja (2023), que obtém a coleta informações do satélite MEERA-2, com base nas coordenadas geográficas fornecidas. No caso dos dados de distribuição de vazão, fundamentais para a análise de usinas hidrelétricas a fio d'água, obteve-se através de registros históricos das principais bacias hidrográficas do país. Em seguida, uma média ponderada foi utilizada para estimar a vazão média nacional. Outros dados relevantes, como a disponibilidade de combustíveis para usinas termelétricas, a energia natural afluyente para usinas hidrelétricas a reservatório, a distribuição da geração de usinas nucleares e a curva de demanda ao longo do ano, foram obtidos nos registros históricos de operação do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Com o objetivo de validar o modelo, foi conduzida uma análise específica para o ano de 2022. Os resultados detalhados dos testes de validação desse ano podem ser visualizados nas Figuras 2.a e 2.b.

Figura 2 – Comparação entre os dados de geração entre a simulação no EnergyPLAN (a) e o histórico de Operação do ONS (b) para o ano de 2022.



Fonte: Autoria Própria.

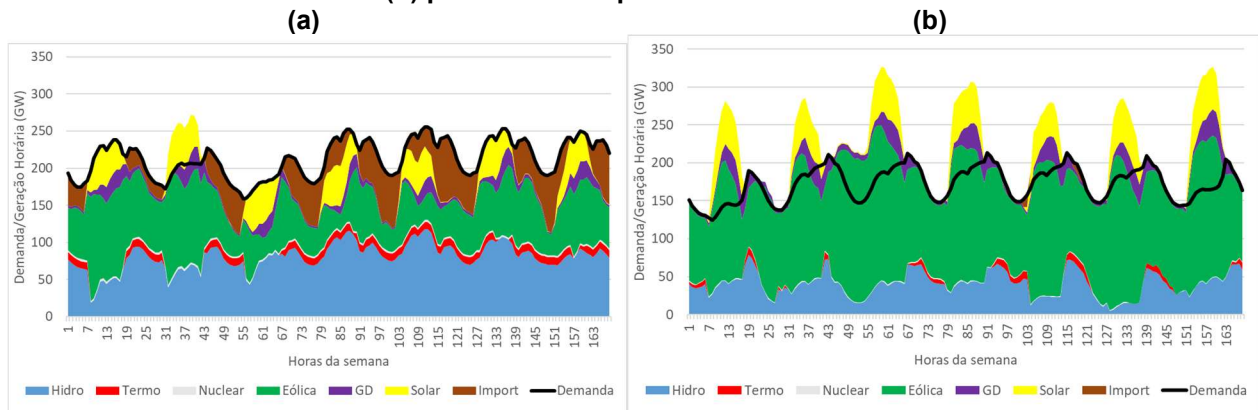
Com base nos dados apresentados na Figura 3, é possível verificar que o erro percentual das fontes de energia não ultrapassou 1,82% no pior dos casos (geração termelétrica). Já as médias ponderadas dos erros ficaram abaixo de 0,5%, indicando que o erro relativo do modelo é relativamente baixo.

Simulações, Resultados e Discussões

Com o objetivo de analisar o impacto da introdução da demanda flexível no comportamento das curvas de geração e demanda ao longo do ano, conduziram-se simulações utilizando o cenário 100% RES (2050) previamente apresentado e considerado como o cenário de referência. As simulações foram realizadas sem a implementação de quaisquer estratégias de controle de geração, como o *curtailment* ou o armazenamento de energia. É essencial notar que a simulação incluiu linhas de transmissão internacionais com uma capacidade total de 17 GW para importação e exportação de energia.

Na sequência, realizou-se um aumento progressivo na parcela de demanda flexível, com valores de 5%, 10% e 20%. Durante as simulações, pode-se constatar que os meses de verão e inverno apresentaram os maiores desafios operacionais, conforme ilustra as Figuras 3.a e 3.b, que apresenta uma semana típica para cada estação mencionada.

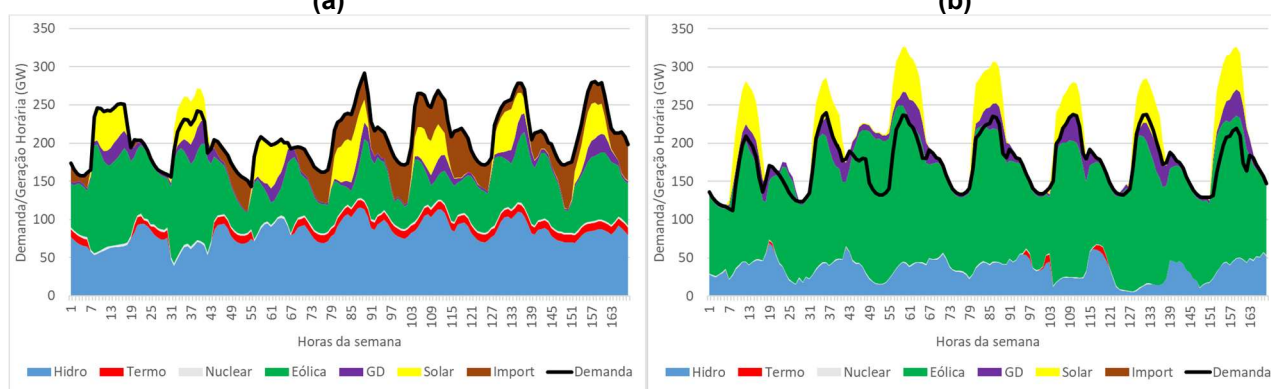
Figura 3 – Comparação entre a distribuição geração de energia em uma semana típica do verão (a) e do inverno (b) para o cenário padrão sem demanda flexível.



Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar o comportamento do sistema durante uma semana típica em cada uma das estações, torna-se evidente que desafios opostos são enfrentados. Durante o verão, identifica-se uma possível insuficiência na geração de energia elétrica, o que requer a importação para atender à demanda. Por outro lado, durante o inverno, ocorre um excedente na produção de energia elétrica, principalmente proveniente das fontes eólica e solar, o que demanda exportação, frequentemente ultrapassando a capacidade das linhas de transmissão e resultando em um excesso crítico de produção. Nesse sentido, a introdução de demanda flexível pode atenuar tanto a necessidade de importação quanto de exportação, como ilustrado nas Figuras 4.a e 4.b.

Figura 4 – Comparação entre a distribuição geração de energia em uma semana típica do verão (a) e do inverno (b) para o cenário padrão com 10% de demanda flexível.



Fonte: Autoria Própria.

A introdução da demanda flexível tem a capacidade de alterar a curva de demanda, ajustando-a para coincidir com os períodos de pico na geração de energia elétrica. Isso resulta em uma utilização mais eficiente da energia que, de outra forma, seria desperdiçada ou exportada. No entanto, vale ressaltar que, mesmo com essa estratégia, não é possível eliminar completamente os desafios relacionados à necessidade de importação, exportação e ao excesso crítico de produção de energia. A Tabela 1 ilustra uma comparação do impacto de diferentes percentuais de demanda flexível.

Tabela 1 – Comparação entre parâmetros de exportação, importação e excesso crítico de produção para diferentes valores de participação da demanda flexível.

| Cenários | Demanda Máxima (GW) | Importação Média (GW) | Exportação Média (GW) | Importação Máxima (GW) | Exportação Máxima (GW) | Importação Anual (TWh/ano) | Exportação Anual (TWh/ano) | Excesso Crítico de Produção anual (TWh/ano) |
|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|----------------------------|---|
| Sem Demanda Flexível | 255,87 | 16,00 | 14,80 | 111,91 | 163,40 | 140,52 | 130,03 | 91,55 |
| Demanda Flexível 5% | 286,85 | 13,10 | 11,49 | 100,76 | 135,96 | 115,10 | 100,94 | 66,25 |
| Demanda Flexível 10% | 291,49 | 11,08 | 8,95 | 89,88 | 121,39 | 97,35 | 78,63 | 48,45 |
| Demanda Flexível 20% | 289,50 | 9,03 | 5,79 | 73,94 | 95,37 | 79,29 | 50,87 | 25,05 |

Fonte: Autoria Própria.

Conclusão

Os resultados indicam que a introdução da demanda flexível resultou em reduções notáveis nas necessidades anuais de importação, atingindo até 43,57% no cenário com 20% de demanda flexível. Da mesma forma, as exportações e o excesso crítico de produção também apresentaram uma redução substancial, com uma queda de até 60,87% e 41,63%, respectivamente no cenário citado. Essas reduções têm um impacto positivo na redução *do curtailment* e no potencial de otimização dos recursos energéticos.

No entanto, é importante notar que a relação entre a demanda flexível e a redução desses parâmetros não é linear. Por exemplo, ao comparar a importação anual com níveis de demanda flexível de 10% e 20%, a redução na necessidade de importação é de apenas 18,55%. Não obstante o aumento de 100% no percentual de demanda flexível, a redução correspondente não exibe uma relação de proporcionalidade direta, indicando um limite de eficiência da demanda flexível, que deve ser melhor abordado em trabalhos futuros.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da UTFPR-PB e do aluno Douglas Murja.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

Referências

ALVES, I. M.; CARVALHO, L. M.; PEÇAS LOPES, J. A. Modeling demand flexibility impact on the long-term adequacy of generation systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 151, p. 109169, 1 set. 2023.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Planning for a renewable future in the Brazilian power system. *Energy*, v. 164, p. 496–511, 1 dez. 2018.

GRANDERSON, J. et al. Accuracy of hourly energy predictions for demand flexibility applications. *Energy and Buildings*, v. 295, p. 113297, 15 set. 2023.

MME; EPE. Plano Nacional de Energia - PNE 2050. Plano Nacional de Energia - PNE 2050, v. 53, n. 9, 2020.

MORCILLA, R. V.; ENANO, N. H. Sizing of community centralized battery energy storage system and aggregated residential solar PV system as a virtual power plant to support electrical distribution network reliability improvement. *Renewable Energy Focus*, v. 46, p. 27–38, 1 set. 2023.

RENEABLESNINJA. Disponível em: <https://www.renewables.ninja>. Acesso em: 15/09/23.

RINALDI, A. et al. What adds more flexibility? An energy system analysis of storage, demand-side response, heating electrification, and distribution reinforcement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, p. 112696, 1 out. 2022.