



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CURVA DE DEMANDA DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Júlia Mara Mattos dos Santos

João Monlevade, MG
2026

Júlia Mara Mattos dos Santos

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA CURVA DE
DEMANDA DO SISTEMA ELÉTRICO
BRASILEIRO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ricardo Abrantes Coury Baracho

Coorientador:

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2026**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237e Santos, Julia Mara Mattos dos.
Estudo da evolução da curva de demanda do sistema elétrico brasileiro. [manuscrito] / Julia Mara Mattos dos Santos. - 2026.
39 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Energia solar. 3. Geração distribuída de energia elétrica. 4. Redes elétricas inteligentes. 5. Sistemas de energia elétrica - Brasil. 6. Sistemas de energia fotovoltaica. I. Baracho, Francisco Ricardo Abrantes Couy. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.311.1:621.383.51(81)

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlia Mara Mattos dos Santos

Estudo da Evolução da Curva de Demanda do Sistema Elétrico Brasileiro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 11 de junho de 2026

Membros da banca

Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho - Orientador(a) UFOP

Dr. Welbert Alves Cardoso - UFOP

Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich - UFOP

Dr. Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 11/06/2026



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/06/2026, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1122843** e o código CRC **3E72FE52**.

"Até aqui nos ajudou o Senhor."

- 1 Samuel 7:12

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise dos impactos da crescente inserção da geração solar fotovoltaica sobre o comportamento da curva de demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN). Com o avanço da micro e minigeração distribuída após a regulamentação promovida pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, observam-se mudanças significativas no perfil da carga líquida do sistema elétrico brasileiro. O aumento da participação da geração solar tem contribuído para o aprofundamento do vale da curva de demanda durante o período diurno e para a intensificação das rampas de carga no final da tarde, fenômenos associados à caracterização da Curva do Pato. A partir de revisão bibliográfica e análise técnico-operacional de dados e relatórios institucionais, especialmente o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo – PAR/PEL 2025 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), foram avaliados os principais impactos operacionais associados à expansão da geração solar no Brasil. Entre os impactos identificados destacam-se as rampas intradiárias, a ocorrência de eventos de *curtailment* e as alterações no fluxo de potência das redes elétricas. Além da análise dos impactos operacionais, o trabalho também discute possíveis soluções para mitigação dos efeitos associados à Curva do Pato, com destaque para o armazenamento de energia em baterias e a implementação de tarifas dinâmicas, estratégias capazes de aumentar a flexibilidade operacional do sistema elétrico e melhorar o aproveitamento da geração renovável disponível. Os resultados obtidos evidenciam que a Curva do Pato representa uma transformação significativa na operação do sistema elétrico brasileiro, exigindo evolução contínua dos mecanismos de planejamento, operação e regulação do setor elétrico diante da crescente participação da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica nacional.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Energia Fotovoltaica; Curva do Pato; curtailment; Sistema Elétrico Brasileiro.

Abstract

This work presents an analysis of the impacts of the increasing integration of photovoltaic solar generation on the demand curve behavior of the Brazilian National Interconnected System (SIN). With the expansion of distributed generation following the implementation of ANEEL Normative Resolution No. 482/2012, significant changes have been observed in the net load profile of the Brazilian power system. The growing participation of solar generation has contributed to the deepening of the demand curve valley during daytime hours and to the intensification of load ramps in the late afternoon, phenomena associated with the characterization of the Duck Curve. Based on a literature review and a technical-operational analysis of data and institutional reports, particularly the Medium-Term Electric Operation Plan (PAR/PEL 2025) published by the National Electric System Operator (ONS), the main operational impacts associated with the expansion of solar generation in Brazil were evaluated. Among the identified impacts are intraday ramps, curtailment events, and changes in power flow within electrical networks. In addition to analyzing the operational impacts, this study also discusses possible mitigation strategies for the effects associated with the Duck Curve, with emphasis on battery energy storage systems and dynamic pricing mechanisms, which are capable of increasing operational flexibility and improving the utilization of available renewable energy resources. The results indicate that the Duck Curve represents a significant transformation in the operation of the Brazilian power system, requiring continuous improvements in planning, operation, and regulatory mechanisms in response to the increasing participation of photovoltaic solar generation in the national electricity matrix.

Keywords: distributed generation; photovoltaic energy; duck curve; curtailment; Brazilian power system.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN) e principais interligações.	14
Figura 2 – Mercado de Energia Brasileiro	15
Figura 3 – Curva do Pato Real e Projetada para o Sistema da Califórnia, entre 31 de Março de 2012 e 2020	17
Figura 4 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil de 2013 a 2025	19
Figura 5 – Espiral da Morte das Distribuidoras de Energia	23
Figura 6 – Evolução da carga supervisionada do SIN e influência da MMGD	28

Lista de Siglas

GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
SIN	Sistema Interligado Nacional
MME	Ministério de Minas e Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
GD	Geração Distribuída
MMGD	Micro e Minigeração Distribuída
CAISO	<i>California Independent System Operator</i>

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese dos desafios operacionais e estratégias de mitigação	35
-----------------------------------------------------------------------------------	----

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contextualização e Motivação	10
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivos Específicos	11
1.3	Estado da Arte	11
1.4	Justificativa	12
1.5	Desenvolvimento	12
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1	O Sistema Elétrico Brasileiro	13
2.1.1	Características e Estrutura do Setor de Energia Elétrica Brasileiro	14
2.2	Curva de Demanda Elétrica	15
2.2.1	A Curva do Pato (<i>Duck Curve</i>)	16
2.3	Capacidade da Geração de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	18
2.4	MMGD e as Mudanças no Perfil da Curva de Carga	20
2.4.1	Impactos da Geração Distribuída na Curva de Carga	20
2.5	Desafios Econômicos das Distribuidoras no Novo Cenário Energético	22
2.6	Desafios e Soluções para o Planejamento e a Operação do Sistema	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	Metodologia da Pesquisa	25
3.2	Base de Dados e Fontes de Informação	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Caracterização da Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional	27
4.2	Impactos da Caracterização da Curva do Pato no SIN	28
4.2.1	Rampas Intradiárias	29
4.2.2	Curtailment	30
4.2.2.1	Tipos de Curtailment	30
4.2.3	Fluxo de Potência	31
4.3	Possíveis Soluções para os Impactos da Caracterização da Curva do Pato no SIN	32
4.3.1	Armazenamento em Baterias	32
4.3.2	Tarifas Dinâmicas	33
4.4	Síntese dos Resultados	34

5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

O setor elétrico brasileiro enfrenta, nas últimas décadas, desafios crescentes em função das transformações tecnológicas, da transição energética global e das mudanças nos padrões de consumo. Essas transformações, impulsionadas pela crescente adesão de novas tecnologias, pela evolução das políticas energéticas e pelas mudanças no comportamento dos consumidores, resultaram em uma evolução significativa na curva de demanda do sistema elétrico brasileiro. Essa evolução reflete as variações no perfil de consumo de energia elétrica ao longo do tempo e está diretamente relacionada às mudanças na matriz energética nacional.

Com o aumento da inserção de fontes renováveis, como a geração fotovoltaica e a eólica, o perfil de consumo e geração tem se modificado gradualmente. Esses avanços tecnológicos, aliados à crescente participação da geração distribuída, impactam diretamente o comportamento da curva de demanda, trazendo novos desafios para o planejamento, a operação e a estabilidade do sistema elétrico nacional.

A evolução da curva de demanda está relacionada a diversos fatores, incluindo mudanças nos hábitos de consumo da população, a inserção de tecnologias de eficiência energética, o crescimento da geração renovável e a eletrificação de setores como transporte e indústria. Esses aspectos geram implicações diretas sobre a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição, exigindo soluções inovadoras para assegurar a confiabilidade e a eficiência do sistema elétrico.

Este estudo tem como propósito o entendimento dos impactos das mudanças estruturais na curva de demanda do sistema elétrico brasileiro, promovendo conhecimentos que possam subsidiar decisões no âmbito da regulação e do planejamento energético em um cenário de transição energética e modernização do setor.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar a evolução da curva de demanda do sistema elétrico brasileiro, tendo como marco inicial a resolução normativa 482, que estabeleceu as diretrizes para a microgeração e minigeração distribuída. O estudo busca identificar os principais fatores que influenciam as mudanças no perfil de consumo, avaliando seus impactos no planejamento e operação do setor elétrico.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar os impactos das fontes renováveis de energia, especialmente da geração distribuída, na evolução da curva de demanda .
- Investigar os fatores históricos e as tendências futuras que impactam a curva de demanda no Brasil.
- Propor soluções para mitigar os desafios associados às transformações no perfil de demanda, considerando aspectos técnicos e regulatórios .

1.3 Estado da Arte

Nesta seção, são apresentados estudos que estão diretamente relacionados aos impactos causados pela inserção da geração distribuída fotovoltaica no sistema elétrico brasileiro, especialmente em relação à alteração da curva de carga e aos desafios operacionais decorrentes disso.

([PAIXÃO; ABAIDE, 2021](#)) propõem métricas para avaliar o impacto da GDFV na curva de carga de um alimentador residencial. Dentre as métricas destacam-se o fator de carga, o fator de irregularidade e a redução da energia máxima da rede, sendo possível, por meio de simulações, perceber a modificação significativa da curva ao longo do dia, principalmente nos horários de transição solar. O estudo conclui que a presença da GDFV pode provocar rampas acentuadas no final da tarde, o que exige respostas rápidas do sistema para manter o equilíbrio.

Já ([ALVES; RAMOS, 2024](#)) realizam uma análise sobre a chamada curva do pato, demonstrando que a redução da demanda durante o pico da geração solar é seguida por um aumento abrupto na carga no início da noite, fenômeno que tem se intensificado com o aumento da penetração da geração distribuída. Como proposta de mitigação, os autores sugerem a utilização de sistemas de armazenamento com baterias, que poderiam ser acionados durante o “ramp-up” e contribuiriam para suavizar a transição de carga.

([PAIXÃO; SAUSEN; ABAIDE, 2024](#)) abordam o papel da energia solar fotovoltaica no contexto da transição energética, discutindo seu potencial de expansão no Brasil, suas aplicações em diferentes tipos de sistemas (on-grid, off-grid e híbridos) e os desafios que envolvem sua adoção em larga escala. O estudo reforça a importância da previsibilidade da geração para o bom desempenho do sistema elétrico, além de destacar os avanços tecnológicos e as boas condições de irradiação solar do país como fatores determinantes para sua consolidação.

A monografia (MARQUES, 2021) contribui com uma perspectiva econômica e regulatória, ao analisar os impactos da Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) sobre as distribuidoras de energia elétrica. O autor apresenta o conceito de espiral da morte, em que a adesão crescente à geração distribuída afeta a arrecadação das distribuidoras, elevando as tarifas dos consumidores remanescentes e incentivando ainda mais a migração para a GDFV. Este cenário, segundo o autor, pode comprometer a sustentabilidade financeira do setor, exigindo mudanças na regulação.

Com base nesses estudos, observa-se que a GDFV representa um avanço importante na democratização da energia renovável, mas também exige reavaliações na operação, no planejamento e na regulação do setor elétrico brasileiro. O presente trabalho busca complementar essas abordagens ao analisar, com base em dados históricos e simulações, como a curva de demanda tem evoluído no Brasil desde a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, considerando os efeitos técnicos, operacionais e econômicos dessa transformação.

1.4 Justificativa

O estudo da evolução da curva de demanda do sistema elétrico brasileiro é fundamental para compreender as transformações que estão ocorrendo no setor elétrico, especialmente em um contexto de crescente participação de fontes renováveis e de geração distribuída. Essas transformações impactam diretamente o planejamento, a operação e a confiabilidade do sistema, além de exigirem adaptações na infraestrutura e nos modelos regulatórios.

Com a crescente inserção de tecnologias mais sustentáveis, a curva de demanda se torna um elemento crítico para assegurar o equilíbrio entre oferta e consumo.

1.5 Desenvolvimento

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em quatro capítulos, além deste capítulo introdutório. No [Capítulo 2](#), são abordados os principais tópicos relacionados à fundamentação teórica. O [Capítulo 3](#) apresenta a metodologia utilizada para a realização das análises. No [Capítulo 4](#), são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do trabalho. Por fim, no [Capítulo 5](#), são apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

2 Fundamentos Teóricos

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados à operação e planejamento do sistema elétrico brasileiro, com ênfase na análise da curva de demanda e nos impactos decorrentes da inserção crescente da geração distribuída e de fontes renováveis na confiabilidade e no desempenho do sistema.

2.1 O Sistema Elétrico Brasileiro

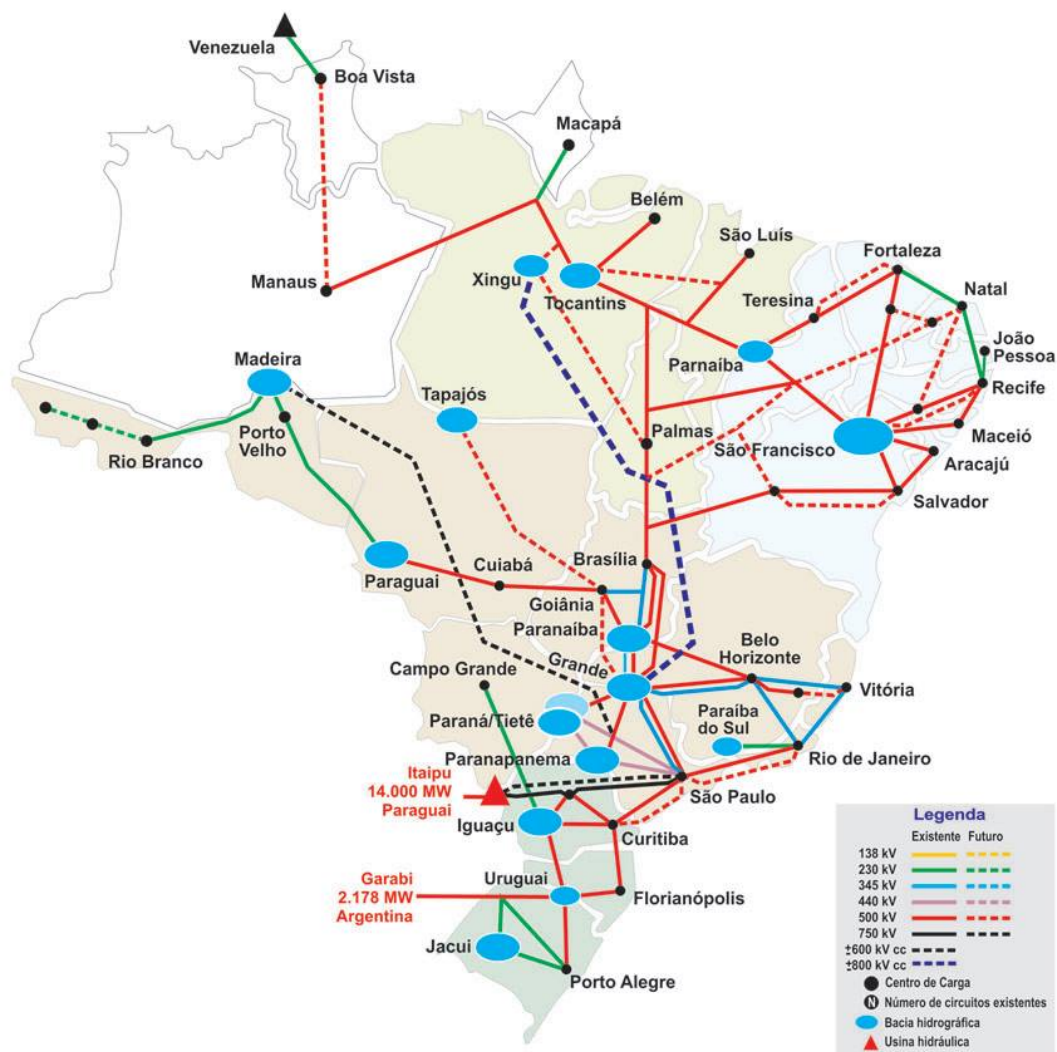
O sistema elétrico do Brasil é reconhecido como um dos mais amplos e diversificados globalmente, sendo caracterizado como complexo, extenso, bem operado e bem planejado. A matriz elétrica nacional é marcada pela predominância de fontes renováveis, com destaque para a geração hidráulica, que representa aproximadamente 56% da capacidade instalada no país (EPE, 2024).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é responsável por atender mais de 98% da carga elétrica brasileira, conectando quase todas as regiões por meio de uma malha de transmissão de longa distância. A Figura 1 ilustra a abrangência da rede de transmissão nacional, destacando os principais centros de carga, as bacias hidrográficas e as interligações existentes e futuras. Historicamente, a expansão do sistema foi impulsionada por grandes empreendimentos hidrelétricos e, mais recentemente, pelo crescimento da participação de fontes intermitentes, como a energia eólica e a solar fotovoltaica.

As crises hídricas recorrentes e a crescente necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm incentivado a diversificação da matriz elétrica, com a ampliação de fontes renováveis não despacháveis. Até o momento essa mudança no perfil de geração, aliada ao avanço da geração distribuída, especialmente a partir da energia solar, tem provocado alterações expressivas no comportamento da curva de demanda elétrica no país.

A expansão, especialmente da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), vem promovendo transformações significativas no setor, influenciando as regulamentações e o modelo de atuação das distribuidoras de energia elétrica. (ONS, 2024)

Figura 1 – Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN) e principais interligações.



Fonte: Adaptado de ONS

2.1.1 Características e Estrutura do Setor de Energia Elétrica Brasileiro

O setor de energia elétrica no Brasil é estruturado de maneira segmentada, sendo composto por quatro etapas principais: geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Essa segmentação tem como objetivo garantir a confiabilidade no fornecimento e a segurança da operação do sistema elétrico nacional, que atende uma das maiores demandas do mundo (SAUAIA, 2018).

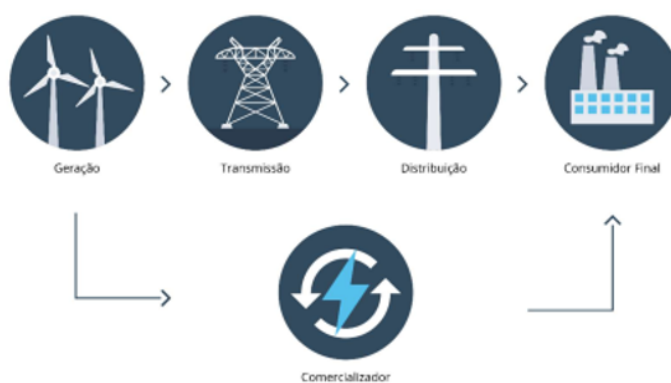
A geração é responsável pela produção de eletricidade a partir de diferentes fontes, destacando-se as hidrelétricas, que representam a maior parcela da matriz, seguidas por usinas termelétricas, eólicas, solares e também bagaço de cana. A energia gerada é então transportada até os centros de carga por meio do segmento de transmissão, que utiliza redes de alta tensão para cobrir grandes distâncias. Posteriormente, a energia é entregue aos consumidores finais pelo segmento de distribuição, realizado por concessionárias responsáveis pela rede de média e baixa tensão. Por fim, a comercialização ocorre tanto no

ambiente de contratação regulado (mercado cativo) quanto no ambiente livre, permitindo que grandes consumidores escolham seus fornecedores e negociem preços e condições de fornecimento (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024a).

A regulação do setor elétrico é conduzida por um conjunto de órgãos institucionais, cada um com funções específicas e complementares. O Ministério de Minas e Energia (MME) é o responsável pela formulação das políticas energéticas do país e pela definição de diretrizes para garantir a segurança do suprimento de eletricidade. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) atua como o principal órgão regulador, fiscalizando as atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, além de assegurar o cumprimento das normas do setor e a modicidade tarifária. Já o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) coordena e controla a operação das instalações de geração e transmissão no SIN, rede de transmissão que conecta as principais regiões do Brasil e viabiliza o intercâmbio energético entre elas, promovendo maior eficiência operacional e segurança energética (ONS, 2022).

Essa estrutura regulatória e operacional garante a estabilidade e o desenvolvimento do mercado de energia elétrica brasileiro, que atende tanto consumidores cativos quanto consumidores livres, que podem negociar diretamente com os geradores de energia elétrica. O equilíbrio entre essas etapas e a coordenação entre os órgãos reguladores são fatores determinantes para o funcionamento seguro e eficiente do sistema elétrico nacional.

Figura 2 – Mercado de Energia Brasileiro



Fonte: MARQUES, 2021

2.2 Curva de Demanda Elétrica

A curva de demanda elétrica, também conhecida como curva de carga, é a representação gráfica da variação da demanda por energia elétrica ao longo do tempo. Essa curva expressa o comportamento do consumo em diferentes períodos do dia e é uma ferramenta essencial para o planejamento e a operação do sistema elétrico, pois permite

identificar os horários de maior e menor consumo e fornece subsídios importantes para o dimensionamento da capacidade de geração, bem como da infraestrutura de transmissão e distribuição do sistema (EPE, 2024).

No contexto brasileiro, a análise da curva de demanda tem desempenhado um papel estratégico para garantir a segurança e a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, auxiliando no gerenciamento da operação do Sistema Interligado Nacional e na definição de políticas tarifárias e de investimentos (Ministério de Minas e Energia, 2023).

Historicamente, o Brasil apresentava uma curva de carga caracterizada por um único pico de consumo, que ocorria, em geral, no início da noite, entre 18h e 21h. Esse comportamento refletia o aumento da demanda residencial nesse intervalo, impulsionado pelo retorno das pessoas às suas residências e pela utilização simultânea de equipamentos elétricos, como sistemas de iluminação, chuveiros elétricos e eletrodomésticos (ONS, 2022).

No entanto, nas últimas décadas, essa configuração tem se alterado de forma progressiva. Tal mudança decorre de uma combinação de fatores, incluindo a evolução dos hábitos de consumo da população, a adoção de medidas de eficiência energética em diversos setores, a migração de cargas industriais para horários fora do período de ponta e, principalmente, o avanço da geração distribuída, notadamente da fonte solar fotovoltaica (GREENER, 2022).

Com a inserção crescente de sistemas de MMD, esse padrão tem sido alterado de maneira significativa, tornando a curva mais instável e complexa. A previsibilidade, que era uma das premissas para o despacho ótimo da geração, passa a ser comprometida, exigindo maior flexibilidade do parque gerador e adaptabilidade das distribuidoras. (PAIXÃO; ABAIDE, 2021)

O aumento da participação da energia solar em residências, comércios, empresas, e nas áreas rurais, especialmente durante o período diurno, tem contribuído para a redução da demanda líquida na rede elétrica convencional em horários de alta insolação. Essa transformação tem impacto direto na configuração da curva de carga nacional e regional, criando novos desafios para a operação do sistema elétrico, como a maior necessidade de flexibilidade da rede e a gestão da intermitência de fontes renováveis (ONS, 2022).

2.2.1 A Curva do Pato (*Duck Curve*)

O fenômeno conhecido como curva do pato (ou *duck curve*) refere-se à distorção observada na curva de demanda líquida em sistemas elétricos que apresentam elevada penetração de geração solar distribuída. Essa situação é representada graficamente pelo perfil que lembra o formato de um pato, caracterizado pela redução significativa da demanda líquida durante o dia, seguida por uma rápida e acentuada elevação no início da noite.

A Figura 3 ilustra esse comportamento, originalmente identificado no estado da Califórnia (EUA) pelo operador de sistema California Independent System Operator

(CAISO) ([California Independent System Operator \(CAISO\), 2016](#)), entre os anos de 2012 e 2020. Atualmente, esse fenômeno já é observado em diversas regiões do Brasil, especialmente em áreas com forte concentração de sistemas de geração distribuída solar.

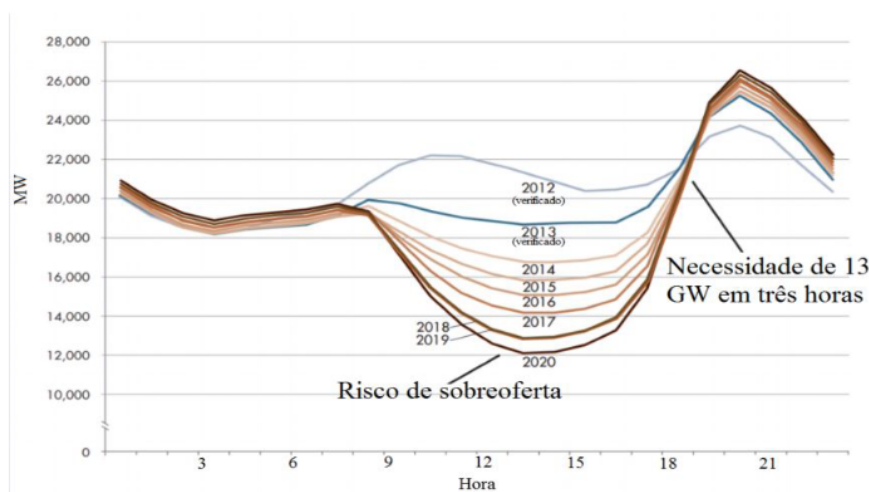
Durante o período diurno, a geração solar local atende parte significativa do consumo das unidades consumidoras, reduzindo a carga efetivamente atendida pela rede de distribuição. No entanto, ao final da tarde e início da noite, com a diminuição da irradiância solar e o consequente declínio da produção fotovoltaica, ocorre uma elevação abrupta da demanda convencional, exigindo do sistema uma rampa de subida (ramping) acentuada .

Esse comportamento cria desafios adicionais para a operação do sistema elétrico brasileiro, como a necessidade de rápida rampa de acionamento de usinas despacháveis, especialmente hidrelétricas e termelétricas, a fim de suprir a demanda crescente no início da noite .

Além disso, o novo formato da curva de carga líquida pressiona as distribuidoras e o operador do sistema a desenvolver estratégias de flexibilidade, como o uso de armazenamento em baterias, a integração de recursos energéticos distribuídos e a modernização da infraestrutura de distribuição. A questão tarifária também passa a ser central nesse contexto, uma vez que a redução do consumo no período de maior geração solar impacta a arrecadação das distribuidoras e desafia o atual modelo de remuneração dos serviços prestados pela rede elétrica ([ALVES; RAMOS, 2024](#)).

A Figura 3 mostra a evolução da curva de carga ao longo dos anos, evidenciando o acentuamento progressivo do formato conhecido como “curva do pato”. Em 2020, essa tendência atingiria níveis críticos, com uma rampa de aumento de carga de aproximadamente 13 GW em um intervalo de apenas três horas.

Figura 3 – Curva do Pato Real e Projetada para o Sistema da Califórnia, entre 31 de Março de 2012 e 2020



Fonte: Adaptado de CAISO (2016)

2.3 Capacidade da Geração de Energia Solar Fotovoltaica no Brasil

A geração de energia solar fotovoltaica tem apresentado uma das maiores taxas de crescimento entre as fontes de geração elétrica no Brasil nas últimas décadas. Esse crescimento é impulsionado principalmente pela redução dos custos da tecnologia fotovoltaica, pela elevada disponibilidade de recursos solares no território brasileiro e pela criação de políticas públicas e marcos regulatórios que incentivaram a expansão dessa fonte na matriz energética nacional.

Historicamente, a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira era pouco representativa até meados da década de 2010. Entretanto, a partir da introdução de mecanismos regulatórios e da realização de leilões de energia voltados às fontes renováveis, a capacidade instalada fotovoltaica passou a crescer de forma acelerada. Esse crescimento foi intensificado após a regulamentação da micro e minigeração distribuída pela Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que instituiu o sistema de compensação de energia elétrica o conhecido como Net Metering e permitiu que consumidores passassem a gerar sua própria energia a partir de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição ([Agência Nacional de Energia Elétrica \(ANEEL\), 2012](#)).

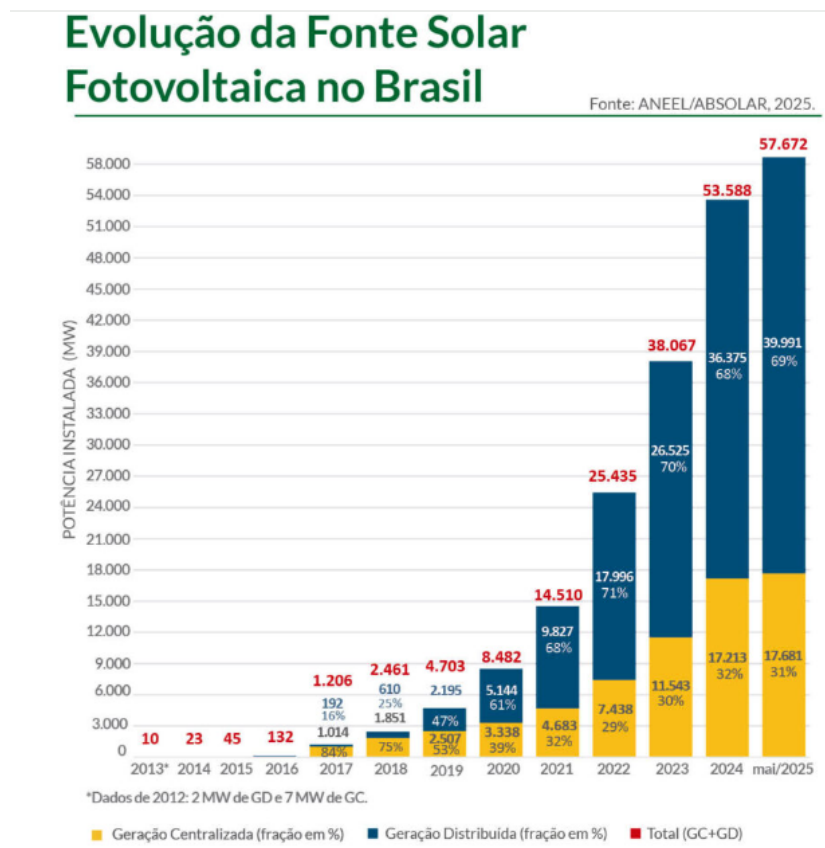
De acordo com a Figura 4, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no país é de aproximadamente 60 GW em 2025, considerando a soma da geração centralizada e da geração distribuída. Desse total, cerca de 40 GW correspondem a sistemas de [MMGD](#) instalados em telhados, fachadas e pequenos terrenos próximos aos consumidores, enquanto aproximadamente 18 GW estão associados a grandes usinas solares conectadas ao sistema de transmissão ([Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025](#); [Portal Solar, 2025](#)).

Esse crescimento posiciona o Brasil entre os principais mercados globais de energia solar. Em termos de capacidade instalada, o país já se encontra entre os maiores produtores mundiais de energia fotovoltaica, refletindo o forte potencial solar nacional e a crescente competitividade econômica dessa tecnologia. A expansão da fonte solar também tem contribuído para diversificar a matriz elétrica brasileira, historicamente dominada pela geração hidrelétrica ([EPE, 2024](#)).

A geração centralizada fotovoltaica é composta por grandes usinas solares de escala industrial, normalmente localizadas em regiões com elevados índices de irradiação solar, como a região do Nordeste do país. Essas usinas são conectadas diretamente à rede de transmissão e participam do mercado de energia elétrica por meio de contratos firmados em leilões regulados ou no mercado livre de energia.

Por outro lado, a geração distribuída fotovoltaica corresponde a sistemas de menor porte conectados diretamente às redes de distribuição. Esses sistemas são instalados geralmente em residências, estabelecimentos comerciais, propriedades rurais ou pequenas indústrias. Atualmente, existem mais de 3,5 milhões de sistemas fotovoltaicos distribuídos instalados no Brasil, evidenciando a ampla difusão dessa tecnologia entre os consumi-

Figura 4 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil de 2013 a 2025



Fonte: ANEEL/ABSOLAR(2025)

res (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024b; Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025).

Além do crescimento da capacidade instalada, a energia solar tem assumido papel cada vez mais relevante na matriz elétrica nacional. Em 2024, a fonte solar já representava cerca de 10% da geração elétrica do país e aproximadamente 23% da capacidade instalada total do sistema elétrico brasileiro, consolidando-se como uma das principais fontes renováveis em expansão no país (EPE, 2024; Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025).

Outro aspecto relevante é a forte predominância da geração distribuída no crescimento da capacidade solar nacional. Estimativas indicam que mais de 70% da capacidade fotovoltaica instalada no país está associada a sistemas de MMGD, principalmente em aplicações residenciais e comerciais (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025). Esse cenário demonstra que a expansão da energia solar no Brasil ocorre de forma descentralizada, aproximando a geração de energia dos centros de consumo e contribuindo para reduzir perdas na transmissão e distribuição.

Por fim, as projeções do setor elétrico indicam que a participação da energia solar na matriz brasileira continuará crescendo nos próximos anos. Estudos apontam que a capacidade fotovoltaica instalada poderá superar 80 GW até o final da década, impulsionada

principalmente pela expansão da [MMGD](#) e pela construção de novos parques solares de grande porte ([EPE, 2024](#); [Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2025](#)). Esse crescimento reforça o papel estratégico da energia solar na transição energética brasileira e na diversificação das fontes de geração elétrica.

2.4 MMGD e as Mudanças no Perfil da Curva de Carga

A Geração Distribuída, com ênfase na tecnologia fotovoltaica, tem desempenhado um papel fundamental na modificação do perfil da curva de demanda elétrica no Brasil. A partir da publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 ([Agência Nacional de Energia Elétrica \(ANEEL\), 2012](#)), os consumidores brasileiros passaram a ter o direito de gerar sua própria energia elétrica e injetar eventuais excedentes na rede de distribuição, por meio do sistema de compensação de energia elétrica.

Esse movimento foi amplificado com o aprimoramento da regulamentação, por meio da Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 [Agência Nacional de Energia Elétrica \(ANEEL\) \(2015\)](#) e, posteriormente, com a aprovação da Lei nº 14.300/2022, que instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída no país [Brasil \(2022\)](#). Esses marcos contribuíram para impulsionar a expansão da [MMGD](#), especialmente no segmento residencial e comercial.

Em 2025, o Brasil superou a marca de 60 GW de potência instalada em sistemas de geração distribuída, sendo a maior partedessa capacidade proveniente de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede de distribuição. O país consolidou-se como um dos líderes globais na adoção da [GDFV](#), com destaque para as regiões Sudeste e Sul, que concentram a maior parte das instalações. ([Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024a](#))

Entre os principais efeitos da expansão da geração distribuída fotovoltaica está o fenômeno conhecido como achatamento da curva de carga diurna. A geração local de energia solar tem provocado uma redução significativa na demanda observada pelas distribuidoras durante as horas de maior irradiação solar, geralmente entre o final da manhã e o início da tarde. Essa alteração no perfil de carga traz impactos relevantes para a operação e o planejamento do sistema elétrico, ao reduzir a necessidade de despacho de grandes usinas convencionais nesses períodos e ao criar novos desafios associados à gestão da intermitência e ao redesenho das tarifas de energia elétrica ([GREENER, 2022](#)).

2.4.1 Impactos da Geração Distribuída na Curva de Carga

A inserção crescente da geração fotovoltaica tem provocado mudanças significativas no comportamento da curva de carga observada pelas distribuidoras de energia elétrica. Esses impactos afetam diretamente a forma, a amplitude e a previsibilidade da curva de demanda ao longo do dia, trazendo consigo desafios técnicos, operacionais e regulatórios.

Um dos efeitos mais evidentes é o achatamento da carga durante o período diurno. Isso ocorre porque, nos horários de maior incidência solar, que ocorre aproximadamente entre 10h e 16h, os consumidores com sistemas fotovoltaicos passam a suprir sua própria demanda energética, reduzindo a necessidade de importação de energia da rede. Como resultado, a carga que chega às distribuidoras durante esse intervalo é significativamente reduzida, o que modifica substancialmente o perfil da curva (ONS, 2022).

Contudo, esse alívio na demanda não é constante. No fim do dia, com a diminuição da geração solar, os consumidores voltam a depender integralmente do fornecimento da distribuidora. Isso gera uma rampa de subida abrupta na demanda, geralmente entre 17h e 19h, exigindo uma resposta rápida do sistema elétrico. A necessidade de acionamento de fontes despacháveis em um curto intervalo de tempo impõe maiores custos operacionais, além de elevar o risco de sobrecarga e instabilidade, especialmente em regiões com alta penetração da GDFV (Empresa de Pesquisa Energética, 2023).

Esse comportamento da curva de carga está diretamente associado ao fenômeno conhecido como curva do pato (*duck curve*), que vem se acentuando ano após ano com o crescimento da geração fotovoltaica. Um estudo realizado pelo operador do sistema da Califórnia (CAISO) demonstrou que, em 2020, a rampa de carga ultrapassou 13 GW em apenas três horas, evidenciando a gravidade do problema (California Independent System Operator (CAISO), 2016). Nesse contexto, dois grandes desafios são destacados: o primeiro é a redução extrema da carga líquida ao meio-dia, o que pode levar à necessidade de desligamento de usinas inflexíveis, projetadas para operar continuamente. O segundo desafio é a retomada súbita da geração no fim do dia, que exige fontes com alta flexibilidade operacional ou sistemas de armazenamento de energia capazes de sustentar o fornecimento enquanto as usinas convencionais são acionadas (PAIXÃO; ABAIDE, 2021; California Independent System Operator (CAISO), 2016).

Outro impacto relevante está relacionado ao aumento da faixa de carga, isto é, a diferença entre os pontos de mínima e máxima demanda diária. À medida que o vale da curva se aprofunda devido à autossuficiência momentânea dos consumidores com Geração Distribuída (GD), e o pico permanece elevado, essa amplitude se torna mais acentuada. Essa condição dificulta o planejamento da operação e pode comprometer a eficiência da utilização dos ativos da rede elétrica (PAIXÃO; ABAIDE, 2021).

A redução do fator de carga é outro efeito observado. Essa métrica, que compara a demanda média com a demanda máxima, tende a diminuir quando há grande variação entre os extremos da curva. Um fator de carga mais baixo indica que a infraestrutura da rede está sendo subutilizada durante parte significativa do dia, mas precisa estar plenamente disponível para atender à carga máxima no período crítico (ONS, 2024).

Além disso, em situações de baixa demanda combinada com alta geração solar, como nos fins de semana ou feriados, pode ocorrer o fluxo reverso de potência. Nessa condição, a energia excedente gerada pelos sistemas fotovoltaicos é injetada na rede, fazendo

com que a direção natural do fluxo de energia se inverta. Esse comportamento, não previsto no projeto original das redes de distribuição convencionais, pode gerar sobretensões, desequilíbrios de fase e a atuação incorreta de dispositivos de proteção e controle ([Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024a](#)).

2.5 Desafios Econômicos das Distribuidoras no Novo Cenário Energético

A expansão da geração distribuída, especialmente a solar fotovoltaica, além de provocar desafios operacionais para o sistema elétrico, também tem gerado preocupações no campo econômico e regulatório. Um dos efeitos mais discutidos neste contexto é o fenômeno conhecido como espiral da morte das distribuidoras. Esse processo se inicia quando um número crescente de consumidores opta por gerar sua própria energia, reduzindo a quantidade de energia comprada das distribuidoras locais ([CASTRO et al., 2016](#)).

Com a queda do volume comercializado de energia, as concessionárias enfrentam uma redução na arrecadação, enquanto continuam sendo responsáveis pela manutenção da infraestrutura da rede de distribuição e pelo atendimento a todos os consumidores conectados à rede, inclusive aqueles que continuam como consumidores cativos. Diante dessa situação, as tarifas de energia tendem a ser reajustadas para compensar a perda de receita e garantir a sustentabilidade econômica das distribuidoras.

O problema se intensifica porque o aumento tarifário, ao tornar o custo da energia mais elevado, estimula ainda mais consumidores a buscar alternativas de autoprodução, como a instalação de sistemas de geração distribuída, retroalimentando o ciclo e agravando a perda de receita das concessionárias. Esse ciclo vicioso, caracterizado pela redução progressiva de consumidores cativos e o aumento contínuo das tarifas, configura o que se denomina espiral da morte, demonstrado na figura 5.

Além do impacto sobre a viabilidade financeira das distribuidoras, o fenômeno também gera distorções tarifárias e pode agravar desigualdades socioeconômicas, uma vez que consumidores de baixa renda e pequenos consumidores, que não possuem condições de investir em sistemas de geração distribuída, acabam mais expostos ao aumento das tarifas ([MARQUES, 2021](#)).

Figura 5 – Espiral da Morte das Distribuidoras de Energia



Fonte: Elaboração própria

2.6 Desafios e Soluções para o Planejamento e a Operação do Sistema

As recentes transformações no comportamento da curva de demanda elétrica no Brasil, impulsionadas principalmente pela expansão da geração distribuída solar e pela mudança nos padrões de consumo, têm exigido uma revisão das estratégias de planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional. O principal desafio está em garantir a confiabilidade do suprimento frente ao aumento da intermitência e à distorção da curva de carga, como a intensificação da curva do pato. (ONS, 2024)

Uma das soluções mais discutidas no cenário energético atual é a adoção de sistemas de armazenamento de energia em larga escala, especialmente baterias, que permitem suavizar a curva de demanda ao armazenar o excedente de geração solar durante o dia e redistribuí-lo à noite. Esta estratégia visa reduzir a necessidade de acionamento de usinas convencionais em horários críticos. (ALVES; RAMOS, 2024)

Paralelamente, iniciativas de resposta da demanda vêm sendo implementadas para incentivar consumidores a deslocarem parte de seu consumo para fora dos horários de pico. Essa prática, que vem ganhando destaque em mercados internacionais e no Brasil, é considerada essencial para melhorar a eficiência do sistema e aliviar a sobrecarga nos períodos mais críticos (FRANCO, 2013).

Outro elemento central é o avanço das redes inteligentes (smart grids), que viabilizam o monitoramento em tempo real e a operação dinâmica do sistema elétrico. As smart grids permitem integrar de forma mais eficiente a geração distribuída e facilitam o controle da qualidade e da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, especialmente em áreas com alta penetração de fontes renováveis (PAIXAO; SAUSEN; ABAIDE, 2024).

No âmbito regulatório, a modernização das regras de remuneração da infraestrutura elétrica tem sido considerada uma ferramenta essencial para mitigar distorções econômicas e reduzir o risco da chamada espiral da morte das distribuidoras. Nesse sentido, a aplicação gradual da TUSD-Fio B, prevista na Lei nº 14.300/2022, busca equilibrar a compensação de custos entre consumidores com e sem geração distribuída, assegurando a sustentabilidade econômica do setor ([Brasil, 2022](#)).

3 Metodologia

Neste capítulo, é apresentada a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento deste trabalho, com foco na análise da evolução da curva de demanda no Sistema Elétrico Brasileiro frente à crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica. A metodologia empregada nesta etapa baseia-se na análise técnico-documental de dados e estudos institucionais do setor elétrico.

3.1 Metodologia da Pesquisa

A metodologia adotada neste trabalho consiste em uma análise técnico-operacional, de caráter qualitativo e quantitativo, voltada à avaliação dos impactos da crescente inserção da geração solar fotovoltaica sobre o comportamento da curva de demanda do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Do ponto de vista qualitativo, foram analisados os principais fenômenos operacionais associados à elevada participação de fontes renováveis variáveis, incluindo a formação da Curva do Pato, a intensificação das rampas intradiárias, a ocorrência de eventos de *curtailment* e as alterações no fluxo de potência das redes elétricas ([DENHOLM; O'CONNELL; BRINKMAN, 2015](#); [International Energy Agency, 2025](#)).

Do ponto de vista quantitativo, foram avaliados dados relacionados à evolução da carga supervisionada do SIN, à capacidade instalada de micro e minigeração distribuída (MMGD) e à expansão da geração solar fotovoltaica no Brasil ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#); [Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024b](#)). A análise desses dados permitiu identificar alterações significativas no perfil da demanda líquida do sistema elétrico brasileiro ao longo dos últimos anos.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais. A primeira etapa consistiu na caracterização da Curva do Pato no contexto brasileiro, analisando a evolução histórica da curva de demanda e os efeitos da inserção da geração solar sobre a carga líquida observada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. Na segunda etapa, foram avaliados os impactos operacionais decorrentes desse fenômeno, com destaque para as rampas intradiárias, o *curtailment* e as alterações no fluxo de potência. Por fim, a terceira etapa consistiu na análise de possíveis soluções para mitigar esses impactos, incluindo armazenamento em baterias e tarifas dinâmicas.

Dessa forma, a metodologia adotada busca integrar dados operacionais, fundamentos teóricos e análise crítica, permitindo compreender a Curva do Pato não apenas como um fenômeno gráfico, mas como uma transformação estrutural na operação do sistema elétrico brasileiro.

3.2 Base de Dados e Fontes de Informação

A base de dados utilizada neste trabalho é composta por relatórios técnicos, documentos institucionais e estudos relacionados à operação e ao planejamento do sistema elétrico brasileiro. Entre as principais fontes utilizadas, destaca-se o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo – PAR/PEL 2025, elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), documento que constitui a principal referência técnica desta pesquisa ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)).

O PAR/PEL 2025 apresenta estudos detalhados sobre a operação do Sistema Interligado Nacional no horizonte de médio prazo, incluindo projeções de carga, evolução da matriz elétrica, expansão das fontes renováveis, limites de intercâmbio entre regiões e impactos operacionais associados à crescente inserção da geração distribuída e da geração solar centralizada.

A relevância do PAR/PEL 2025 para este trabalho está associada principalmente à disponibilidade de dados operacionais recentes relacionados à carga supervisionada do SIN e à influência da micro e minigeração distribuída sobre a demanda líquida observada pelo operador do sistema. Esses dados permitem identificar o aprofundamento do vale da curva de demanda no período diurno e a intensificação das rampas intradiárias no final da tarde, características diretamente associadas ao fenômeno conhecido como Curva do Pato ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)).

Além do PAR/PEL 2025, foram utilizados dados disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), especialmente aqueles relacionados à capacidade instalada de micro e minigeração distribuída no Brasil ([Agência Nacional de Energia Elétrica, 2024b](#)). Essas informações são fundamentais para compreender a evolução da geração distribuída fotovoltaica e sua influência sobre a carga líquida do sistema.

Também foram utilizados estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), voltados à expansão da matriz elétrica brasileira, à integração das fontes renováveis e aos desafios associados à operação do sistema elétrico ([EPE, 2024](#)).

Adicionalmente, foram consultados estudos internacionais relacionados à Curva do Pato, à integração de fontes renováveis variáveis e às estratégias de flexibilização do sistema elétrico, permitindo estabelecer comparações entre o contexto brasileiro e experiências internacionais ([International Energy Agency, 2025](#); [OPERATOR, 2021](#)).

Portanto, a utilização dessas fontes permite a realização de uma análise fundamentada em dados oficiais e estudos técnicos reconhecidos, garantindo maior confiabilidade aos resultados obtidos neste trabalho.

4 Resultados

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos neste trabalho, com foco na evolução da curva de demanda no Sistema Elétrico Brasileiro frente à crescente inserção da geração distribuída fotovoltaica. A análise realizada baseia-se na interpretação de dados e estudos institucionais do setor elétrico, permitindo identificar as principais mudanças no comportamento da carga e os impactos associados à inserção da geração solar no sistema.

4.1 Caracterização da Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional

A Curva do Pato (*Duck Curve*) é um fenômeno observado em sistemas elétricos com elevada participação de geração solar fotovoltaica. Esse comportamento foi inicialmente identificado no sistema elétrico da Califórnia, nos Estados Unidos, e posteriormente passou a ser observado em diversos sistemas elétricos com elevada inserção de fontes renováveis variáveis (DENHOLM; O'CONNELL; BRINKMAN, 2015).

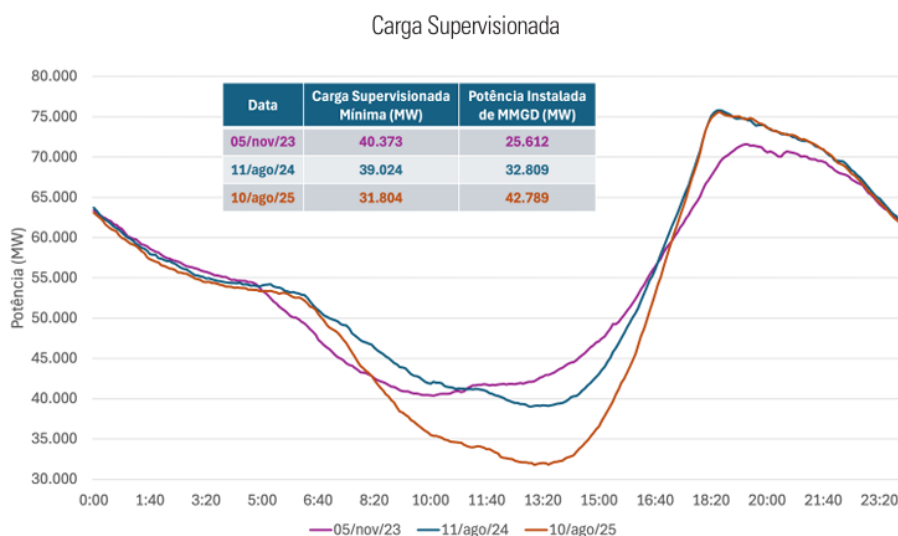
No contexto brasileiro, a expansão da geração solar, tanto em usinas centralizadas quanto na forma de micro e minigeração distribuída, tem provocado alterações significativas no perfil da demanda líquida observada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025; EPE, 2024).

Durante o intervalo aproximado entre 9h e 16h, a geração solar atinge níveis elevados de produção, reduzindo significativamente a demanda líquida observada pelo sistema elétrico. Esse comportamento resulta na formação de um vale pronunciado na curva de carga líquida. Entretanto, no final da tarde, a redução da geração solar combinada com o aumento do consumo de energia provoca uma rápida elevação da demanda líquida, caracterizando rampas intradiárias acentuadas.

Esse fenômeno impõe desafios operacionais relevantes ao Sistema Interligado Nacional, exigindo elevada flexibilidade do parque gerador para atender às variações rápidas da carga e garantir a segurança da operação do sistema elétrico.

A Figura 6 apresenta a evolução da carga supervisionada do Sistema Interligado Nacional em três momentos distintos: novembro de 2023, agosto de 2024 e agosto de 2025. Observa-se um aprofundamento progressivo do vale da demanda líquida no período diurno, especialmente entre aproximadamente 9h e 14h, comportamento diretamente associado ao aumento da participação da micro e minigeração distribuída MMGD no sistema elétrico brasileiro.

Figura 6 – Evolução da carga supervisionada do SIN e influência da MMGD



Fonte: Revista PAR/PEL 2025

Conforme indicado na figura 6, a carga supervisionada mínima registrada passou de aproximadamente 40.373 MW em novembro de 2023 para cerca de 31.804 MW em agosto de 2025. No mesmo período, a potência instalada de MGD aumentou de aproximadamente 25,6 GW para cerca de 42,8 GW. Esse crescimento da geração distribuída contribui para reduzir a carga observada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico durante o período de maior geração solar, aprofundando o vale da curva de demanda líquida.

Além disso, observa-se que a redução da geração solar no final da tarde provoca uma elevação rápida da demanda líquida entre aproximadamente 16h e 19h, caracterizando rampas intradiárias acentuadas. Esse comportamento evidencia a intensificação do fenômeno conhecido como Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional, resultado da crescente participação da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.

4.2 Impactos da Caracterização da Curva do Pato no SIN

A caracterização da Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional evidencia mudanças significativas na operação do sistema elétrico brasileiro. A elevada inserção da geração solar fotovoltaica, especialmente na forma de micro e minigeração distribuída, altera o comportamento da demanda líquida e impõe novos desafios relacionados à flexibilidade operacional, estabilidade do sistema e planejamento energético (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025; EPE, 2024).

Tradicionalmente, o sistema elétrico brasileiro operava com perfil de carga relati-

vamente previsível, caracterizado por aumento gradual do consumo ao longo do dia e pico concentrado no período noturno. Entretanto, a expansão da geração solar fotovoltaica reduziu significativamente a carga observada pelo operador durante o período diurno, aprofundando o vale da curva de demanda líquida ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)).

Além disso, a rápida redução da geração solar ao final da tarde provoca elevação acentuada da carga líquida em um curto intervalo de tempo, aumentando a complexidade da operação do SIN. Esse comportamento exige maior capacidade de resposta rápida das fontes despacháveis, maior reserva operativa e maior flexibilidade do parque gerador ([International Energy Agency, 2025](#)).

Outro impacto importante está relacionado ao aumento da ocorrência de eventos de *curtailment*, às alterações no fluxo de potência das redes elétricas e à necessidade crescente de modernização dos sistemas de transmissão e distribuição. Dessa forma, a Curva do Pato deixa de ser apenas um fenômeno gráfico e passa a representar uma transformação estrutural no funcionamento do sistema elétrico brasileiro.

4.2.1 Rampas Intradiárias

As rampas intradiárias correspondem às variações rápidas da demanda líquida observadas ao longo do dia, especialmente durante o período de transição entre a redução da geração solar e o aumento do consumo elétrico ([International Energy Agency, 2025](#)). Esse fenômeno representa um dos principais impactos operacionais associados à Curva do Pato.

No Sistema Interligado Nacional, as rampas tornam-se mais intensas principalmente entre aproximadamente 16h e 19h. Durante esse período, ocorre redução significativa da geração fotovoltaica devido à diminuição da irradiação solar, ao mesmo tempo em que o consumo residencial e comercial aumenta ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)). Como consequência, o sistema elétrico precisa elevar rapidamente a geração proveniente de outras fontes para manter o equilíbrio entre oferta e demanda.

Esse comportamento exige elevada flexibilidade operacional das fontes despacháveis. No caso brasileiro, as usinas hidrelétricas desempenham papel fundamental devido à sua capacidade de modulação relativamente rápida da potência gerada ([EPE, 2024](#)). Entretanto, a intensificação das rampas aumenta a necessidade de reserva operativa e pode elevar os custos associados ao despacho de geração.

Além dos impactos operacionais, as rampas intradiárias também evidenciam a necessidade de desenvolvimento de soluções capazes de aumentar a flexibilidade do sistema elétrico, incluindo armazenamento em baterias, resposta da demanda e tarifas dinâmicas ([OPERATOR, 2021](#)).

4.2.2 Curtailment

O *curtailment* corresponde à redução compulsória da geração de energia elétrica por determinação do operador do sistema, mesmo quando existe disponibilidade do recurso energético, como radiação solar ou vento ([International Energy Agency, 2025](#)). Esse procedimento é utilizado para preservar a segurança e a estabilidade da operação do sistema elétrico.

No contexto da Curva do Pato, o *curtailment* ocorre principalmente em situações nas quais a geração renovável disponível supera a demanda líquida do sistema ou encontra limitações de escoamento na rede elétrica ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)). Durante períodos de elevada geração solar e baixa demanda, especialmente no intervalo entre 10h e 15h, o sistema pode apresentar excedente energético, tornando necessário limitar parte da geração renovável.

Além das restrições relacionadas ao excesso de geração, o *curtailment* também pode ocorrer devido a limitações na infraestrutura de transmissão e distribuição, principalmente em regiões onde a expansão da geração renovável ocorre de forma mais acelerada do que o crescimento da rede elétrica ([EPE, 2024](#)).

Do ponto de vista operacional, o aumento da ocorrência de eventos de *curtailment* evidencia a necessidade de maior flexibilidade do sistema elétrico. Já sob a perspectiva econômica, o fenômeno representa desperdício parcial de energia renovável disponível e pode reduzir a rentabilidade dos empreendimentos de geração ([International Energy Agency, 2025](#)).

Dessa forma, o *curtailment* destaca a importância de investimentos em transmissão, armazenamento de energia e mecanismos de flexibilização da demanda para aumentar a capacidade de absorção da geração renovável pelo Sistema Interligado Nacional.

4.2.2.1 Tipos de Curtailment

O *curtailment* pode ser classificado de acordo com a principal causa que leva à necessidade de redução da geração renovável. Em sistemas elétricos com elevada participação de fontes renováveis variáveis, destacam-se principalmente o *curtailment* por restrição elétrica, o *curtailment* por excesso estrutural de geração e o *curtailment* por segurança operativa ([International Energy Agency, 2025](#)).

O *curtailment* por restrição elétrica ocorre quando existem limitações físicas na infraestrutura de transmissão ou distribuição que impedem o escoamento da energia gerada ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)). Esse tipo de limitação é comum em regiões onde a expansão da geração ocorre em ritmo mais acelerado do que o desenvolvimento da rede elétrica.

Já o *curtailment* por excesso estrutural de geração ocorre quando a geração renovável disponível supera a demanda líquida do sistema. Esse fenômeno está diretamente

relacionado à Curva do Pato, especialmente durante períodos de elevada geração solar e baixo consumo elétrico (DENHOLM; O'CONNELL; BRINKMAN, 2015).

Por sua vez, o *curtailment* por segurança operativa está associado à necessidade de manutenção da estabilidade do sistema elétrico. Em determinadas condições, o operador do sistema pode limitar a geração renovável para preservar níveis adequados de frequência, tensão e reserva operativa (International Energy Agency, 2025).

A análise desses diferentes tipos de *curtailment* demonstra que os desafios associados à integração das fontes renováveis vão além da expansão da geração, envolvendo também aspectos relacionados à infraestrutura elétrica, à flexibilidade operacional e à modernização do sistema elétrico brasileiro.

4.2.3 Fluxo de Potência

A expansão da geração distribuída fotovoltaica provoca alterações significativas no fluxo de potência das redes elétricas, especialmente nos sistemas de distribuição (TONKOSKI; TURCOTTE; EL-FOULY, 2012). Tradicionalmente, as redes elétricas foram projetadas para operar com fluxo unidirecional de potência, no qual a energia elétrica flui das grandes usinas geradoras até os consumidores finais.

Entretanto, com a inserção crescente da geração distribuída, consumidores passam também a injetar energia na rede elétrica durante períodos de elevada geração solar. Em situações nas quais a produção fotovoltaica supera o consumo local, ocorre o chamado fluxo reverso de potência, caracterizado pela circulação de energia no sentido contrário ao originalmente previsto no planejamento da rede (TONKOSKI; TURCOTTE; EL-FOULY, 2012).

Esse fenômeno pode provocar impactos técnicos importantes, como elevação de tensão, aumento das perdas elétricas e dificuldades na coordenação dos sistemas de proteção. Além disso, a variabilidade da geração solar torna o comportamento do fluxo de potência mais dinâmico e menos previsível, aumentando a complexidade operacional das redes de distribuição (International Energy Agency, 2025).

Nesse contexto, torna-se necessária a modernização das redes elétricas por meio da ampliação da automação, utilização de medidores inteligentes e desenvolvimento de sistemas avançados de monitoramento e controle. A integração de armazenamento em baterias também pode contribuir para redução dos impactos associados ao fluxo reverso, permitindo absorção local do excedente energético gerado (EPE, 2024).

Portanto, as alterações no fluxo de potência evidenciam que a expansão da geração distribuída modifica significativamente a dinâmica operacional das redes elétricas, exigindo evolução contínua dos mecanismos de planejamento, operação e controle do sistema elétrico brasileiro.

4.3 Possíveis Soluções para os Impactos da Caracterização da Curva do Pato no SIN

A crescente inserção da geração solar fotovoltaica no Sistema Interligado Nacional evidencia a necessidade de adaptação da operação e do planejamento do sistema elétrico brasileiro frente às mudanças provocadas pela Curva do Pato. Os impactos associados a esse fenômeno, como intensificação das rampas intradiárias, aumento da ocorrência de eventos de *curtailment* e alterações no fluxo de potência das redes elétricas, demonstram que a expansão das fontes renováveis deve ser acompanhada pelo desenvolvimento de mecanismos capazes de aumentar a flexibilidade operacional do sistema ([International Energy Agency, 2025](#); [EPE, 2024](#)).

Nesse contexto, soluções tecnológicas, operacionais e regulatórias tornam-se fundamentais para garantir maior equilíbrio entre geração e demanda, preservar a segurança operativa do SIN e ampliar a capacidade de absorção da geração renovável. Diferentemente do modelo tradicional de operação, baseado predominantemente em geração centralizada e fluxo unidirecional de potência, o cenário atual exige maior integração entre geração distribuída, armazenamento de energia, modernização das redes elétricas e participação ativa da demanda ([Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025](#)).

Entre as principais estratégias utilizadas internacionalmente para mitigação dos impactos da Curva do Pato destacam-se o armazenamento de energia em baterias, as tarifas dinâmicas, os programas de resposta da demanda e a ampliação da infraestrutura de transmissão ([OPERATOR, 2021](#)). Essas soluções buscam reduzir os excedentes de geração durante o período diurno, suavizar as rampas intradiárias e minimizar a necessidade de *curtailment*.

No contexto brasileiro, embora muitas dessas soluções ainda estejam em processo de desenvolvimento regulatório e tecnológico, observa-se crescente necessidade de modernização da operação do sistema elétrico diante da expansão acelerada da geração solar fotovoltaica. Dessa forma, torna-se fundamental discutir alternativas capazes de aumentar a flexibilidade operacional do SIN e garantir integração eficiente das fontes renováveis variáveis à matriz elétrica brasileira.

Assim, esta seção apresenta algumas das principais soluções para mitigação dos impactos associados à caracterização da Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional, com destaque para o armazenamento em baterias e as tarifas dinâmicas, estratégias consideradas relevantes para o futuro da operação do sistema elétrico brasileiro.

4.3.1 Armazenamento em Baterias

O armazenamento de energia em baterias destaca-se como uma das principais soluções para mitigação dos impactos associados à Curva do Pato ([International Energy](#)

Agency, 2025). Essa tecnologia permite armazenar o excedente de geração solar produzido durante o período diurno e disponibilizar essa energia em horários de maior demanda elétrica, especialmente durante as rampas intradiárias no final da tarde.

No contexto do Sistema Interligado Nacional, o armazenamento em baterias pode reduzir a ocorrência de eventos de *curtailment*, aumentando o aproveitamento da geração renovável disponível (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025). Durante períodos de elevada geração solar e baixa demanda líquida, parte da energia excedente pode ser armazenada em vez de ser descartada, contribuindo para maior eficiência operacional do sistema.

Além disso, os sistemas de armazenamento podem atuar na prestação de serviços ancilares, como controle de frequência, suporte de tensão e reserva operativa (EPE, 2024). Essas funções tornam-se cada vez mais importantes em sistemas com elevada participação de fontes renováveis conectadas por conversores eletrônicos, como solar e eólica.

Outro benefício importante está relacionado à mitigação dos impactos provocados pelo fluxo reverso de potência nas redes de distribuição. Baterias instaladas próximas às cargas podem absorver parte da energia excedente gerada localmente, reduzindo sobrecargas e problemas de sobretensão na rede elétrica (TONKOSKI; TURCOTTE; EL-FOULY, 2012).

Apesar dos benefícios operacionais, a implementação em larga escala do armazenamento em baterias ainda enfrenta desafios econômicos e regulatórios no Brasil, principalmente relacionados aos custos de investimento e à definição de mecanismos adequados de remuneração pelos serviços prestados (EPE, 2024). Entretanto, a tendência de redução dos custos tecnológicos indica que o armazenamento deverá assumir papel cada vez mais relevante na operação futura do sistema elétrico brasileiro.

4.3.2 Tarifas Dinâmicas

As tarifas dinâmicas representam uma estratégia regulatória voltada ao aumento da flexibilidade da demanda em sistemas elétricos com elevada participação de fontes renováveis variáveis (FARUQUI; SERGICI, 2010). Diferentemente das tarifas convencionais, nas quais o valor da energia permanece relativamente constante ao longo do dia, as tarifas dinâmicas variam conforme as condições de operação do sistema elétrico, refletindo diferenças entre horários de maior e menor demanda.

No contexto da Curva do Pato, as tarifas dinâmicas podem contribuir para reduzir o aprofundamento do vale da demanda líquida durante o período diurno e suavizar as rampas intradiárias no final da tarde. Durante horários de elevada geração solar, tarifas mais baixas podem incentivar consumidores a deslocarem parte do consumo para períodos de maior disponibilidade energética (International Energy Agency, 2025).

Esse mecanismo também está associado ao conceito de resposta da demanda, no qual consumidores passam a desempenhar papel mais ativo na operação do sistema elé-

trico. Equipamentos como veículos elétricos, sistemas de climatização e processos industriais flexíveis podem ser programados para operar em horários mais favoráveis ao sistema, contribuindo para maior equilíbrio entre geração e demanda (FARUQUI; SERGICI, 2010).

Experiências internacionais demonstram que programas de precificação dinâmica podem reduzir sobrecargas na rede elétrica, melhorar o aproveitamento da geração renovável e diminuir os custos operacionais do sistema (OPERATOR, 2021). Entretanto, sua implementação depende da expansão da infraestrutura de medição inteligente, modernização regulatória e desenvolvimento de tecnologias capazes de automatizar o gerenciamento do consumo energético.

Dessa forma, as tarifas dinâmicas devem ser compreendidas não apenas como um mecanismo econômico, mas como uma ferramenta estratégica para aumento da flexibilidade operacional do sistema elétrico brasileiro diante da crescente expansão da geração solar fotovoltaica.

4.4 Síntese dos Resultados

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu identificar os principais impactos operacionais associados à crescente inserção da geração solar fotovoltaica no Sistema Interligado Nacional. Os resultados obtidos evidenciam que a expansão da micro e minigeração distribuída vem provocando alterações significativas no perfil da curva de demanda líquida do sistema elétrico brasileiro, caracterizando o fenômeno conhecido como Curva do Pato (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2025).

Observou-se que a elevada geração solar durante o período diurno contribui para a redução da carga supervisionada do SIN, aprofundando o vale da curva de demanda líquida. Em contrapartida, a redução da geração fotovoltaica no final da tarde, associada ao aumento do consumo elétrico, provoca intensificação das rampas intradiárias e aumento da necessidade de flexibilidade operacional do sistema (International Energy Agency, 2025).

Além disso, verificou-se que o crescimento da participação das fontes renováveis variáveis amplia a ocorrência de eventos de *curtailment*, principalmente em cenários de elevada geração solar e limitações na infraestrutura de transmissão. Também foram identificados impactos relacionados às alterações no fluxo de potência das redes elétricas, especialmente devido ao aumento do fluxo reverso provocado pela geração distribuída fotovoltaica (TONKOSKI; TURCOTTE; EL-FOULY, 2012).

Diante desse cenário, foram discutidas possíveis soluções para mitigação dos impactos associados à Curva do Pato, com destaque para o armazenamento de energia em baterias e a implementação de tarifas dinâmicas. Essas estratégias contribuem para aumento da flexibilidade operacional do sistema elétrico, redução do *curtailment* e melhor

aproveitamento da geração renovável disponível (FARUQUI; SERGICI, 2010; International Energy Agency, 2025).

A Tabela 1 abaixo apresenta uma síntese dos principais desafios operacionais identificados e das respectivas estratégias de mitigação discutidas neste trabalho.

Tabela 1 – Síntese dos desafios operacionais e estratégias de mitigação

Problema	Impacto	Solução
Aprofundamento do vale da curva	Subutilização da geração solar	Tarifas dinâmicas
Rampas intradiárias acentuadas	Necessidade de maior flexibilidade operacional	Armazenamento em baterias
Curtaimento de geração renovável	Perda econômica e desperdício energético	Expansão da transmissão e armazenamento
Fluxo reverso de potência	Alterações operacionais nas redes de distribuição	Modernização das redes elétricas

Portanto, os resultados obtidos demonstram que a Curva do Pato no Sistema Interligado Nacional não deve ser compreendida apenas como uma alteração gráfica da demanda elétrica, mas como uma transformação estrutural na operação do sistema elétrico brasileiro, exigindo evolução contínua dos mecanismos de planejamento, operação e regulação do setor elétrico.

5 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar os impactos da crescente inserção da geração solar fotovoltaica, especialmente na forma de micro e minigeração distribuída, sobre o comportamento da curva de demanda do Sistema Interligado Nacional. A partir da análise de dados e relatórios institucionais do setor elétrico brasileiro, foi possível identificar mudanças relevantes na forma como a demanda líquida do sistema tem evoluído nos últimos anos.

A expansão da geração distribuída solar tem contribuído para a redução da carga supervisionada observada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico durante o período diurno. Esse comportamento tem provocado o aprofundamento do vale da curva de demanda líquida e evidenciado a formação do fenômeno conhecido como Curva do Pato no contexto do sistema elétrico brasileiro. Esse fenômeno caracteriza-se pela combinação entre elevada geração solar durante o dia e aumento da demanda no período noturno, resultando em rampas intradiárias acentuadas na transição entre esses períodos.

A análise realizada ao longo deste trabalho também evidenciou que o aumento dessas rampas de carga impõe desafios operacionais relevantes ao Sistema Interligado Nacional. A necessidade de atender a variações rápidas da demanda líquida exige maior flexibilidade do parque gerador, além da manutenção de níveis adequados de reserva operativa para garantir a segurança e a estabilidade do sistema elétrico. Nesse contexto, as usinas hidrelétricas desempenham papel fundamental na absorção dessas variações devido à sua capacidade de ajuste relativamente rápido da potência gerada.

Outro aspecto importante observado é a ocorrência de eventos de *curtailment* de geração renovável. Em situações em que a geração disponível supera a demanda líquida do sistema ou encontra restrições de escoamento na rede de transmissão, torna-se necessário reduzir a produção de determinadas usinas para manter o equilíbrio entre geração e carga. Esse fenômeno evidencia que a expansão das fontes renováveis deve ser acompanhada por investimentos em infraestrutura de transmissão e por estratégias de planejamento capazes de ampliar a flexibilidade do sistema elétrico.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a crescente participação da geração solar na matriz elétrica brasileira, embora represente um avanço importante no processo de transição energética e diversificação da matriz, também introduz novos desafios para a operação e o planejamento do sistema elétrico. A integração eficiente dessas fontes exige o desenvolvimento de mecanismos operacionais e regulatórios que permitam lidar com a variabilidade da geração renovável e com as mudanças no perfil da demanda líquida.

Por fim, destaca-se que a análise da Curva do Pato no contexto brasileiro contribui para a compreensão das transformações em curso no setor elétrico e para a identificação de desafios associados à crescente participação das fontes renováveis.

Referências

- Agência Nacional de Energia Elétrica. *Anuário Estatístico de Geração Distribuída 2024*. 2024. <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: mar. 2025. 15, 20, 22
- Agência Nacional de Energia Elétrica. *Dados da Micro e Minigeração Distribuída no Brasil*. 2024. <<https://www.aneel.gov.br>>. 19, 25, 26
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa nº 482/2012*. 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição. 18, 20
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa nº 687/2015*. 2015. Altera dispositivos da REN nº 482/2012. 20
- ALVES, A. B.; RAMOS, L. F. Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na curva de pato em um sistema elétrico e a utilização de armazenamento como método de mitigação. *Engenharias: desafios e soluções nas múltiplas fronteiras do conhecimento*, 2024. Capítulo 8. Disponível em: <<https://www.researchgate.net>>. 11, 17, 23
- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. *Panorama da Energia Solar no Brasil*. 2025. <<https://www.absolar.org.br/>>. 18, 19, 20
- Brasil. *Lei nº 14.300/2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída*. 2022. Diário Oficial da União, Brasília. 20, 24
- California Independent System Operator (CAISO). *Managing the Duck Curve*. [S.l.]: California Independent System Operator, 2016. Disponível em: <<https://www.caiso.com>>. 17, 21
- CASTRO, N. de et al. *Perspectivas e Desafios da Difusão da Micro e da Mini Geração Solar Fotovoltaica no Brasil*. Rio de Janeiro: Publit, 2016. (Texto de Discussão do Setor Elétrico, n. 67). ISBN 978-85-7773-956-1. 22
- DENHOLM, P.; O'CONNELL, M.; BRINKMAN, G. *Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart*. [S.l.], 2015. 25, 27, 31
- Empresa de Pesquisa Energética. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2023*. 2023. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia>>. Acesso em: mar. 2025. 21
- EPE, . *Plano Decenal de Expansão de Energia 2032*. Brasília: EPE, 2024. 13, 16, 18, 19, 20, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33
- FARUQUI, A.; SERGICI, S. Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments. *Journal of Regulatory Economics*, 2010. 33, 34, 35
- FRANCO, A. P. *Sistemas Fotovoltaicos: Contextualização e Perspectivas para sua Massificação no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Especialista em Formas Alternativas de Energia. Disponível em: <<http://infopetro>>. 23

- GREENER. *Estudo Estratégico de Geração Distribuída Fotovoltaica - 2023*. 2022. <<https://www.greener.com.br/estudos>>. Acesso em: mar. 2025. 16, 20
- International Energy Agency. *Energy Policy Review: Brazil 2025*. [S.l.], 2025. 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35
- MARQUES, L. B. *O Impacto da Geração Distribuída Fotovoltaica nas Distribuidoras de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, 2021. Monografia de Graduação em Ciências Econômicas. Disponível em: <<https://www.ufpr.br>>. 12, 22
- Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2050*. 2023. <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/planejamento/plano-nacional-de-energia-2050>>. Acesso em: mar. 2025. 16
- ONS, . *Curva de Carga do SIN - Relatório Técnico*. 2022. <<https://www.ons.org.br>>. Acesso em: mar. 2025. 15, 16, 21
- ONS, . *Relatório de Operação do SIN*. Rio de Janeiro: ONS, 2024. 13, 21, 23
- Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do Sistema Interligado Nacional – PAR/PEL 2025*. Rio de Janeiro, 2025. 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34
- OPERATOR, C. I. S. *What the Duck Curve tells us about managing a green grid*. 2021. Disponível em: <https://www.caiso.com>. 26, 29, 32, 34
- PAIXAO, J. L. da; SAUSEN, J. P.; ABAIDE, A. da R. *Energia Fotovoltaica: Avanços, Potencialidades e Desafios para uma Transição Sustentável*. Editora Científica, 2024. v. 16. ISBN 978-65-5360-749-1. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.37885/240817469>>. 11, 23
- PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Métricas para a avaliação do impacto da geração distribuída fotovoltaica na curva de carga. *Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência – CEEESP, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM*, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.53316/sepoc2021.068>>. 11, 16, 21
- Portal Solar. *Energia solar atinge mais de 60 GW de capacidade instalada no Brasil*. 2025. <<https://www.portalsolar.com.br>>. 18
- SAUAIA, R. L. *Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios*. 2018. 1º Workshop de Energia Solar Fotovoltaica, Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, Rio de Janeiro (RJ). Disponível em: <<https://www.absolar.org.br>>. 14
- TONKOSKI, R.; TURCOTTE, D.; EL-FOULY, T. Impact of high pv penetration on voltage profiles in residential neighborhoods. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012. 31, 33, 34