



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BIANCA ARAUJO BRAGA BRASIL

**ANÁLISE DOS IMPACTOS OPERACIONAIS DAS RESTRIÇÕES POR
CONSTRAINED-OFF EM USINAS SOLARES NO BRASIL.**

FORTALEZA

2025

BIANCA ARAUJO BRAGA BRASIL

ANÁLISE DOS IMPACTOS OPERACIONAIS DAS RESTRIÇÕES POR
CONSTRAINED-OFF EM USINAS SOLARES NO BRASIL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral
da Câmara

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B83 Brasil, Bianca Araujo Braga.

Análise dos impactos operacionais das restrições por Constrained-Off em usinas solares no Brasil. / Bianca Araujo Braga Brasil. – 2025.

51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Energia solar. 2. Constrained-off. 3. Sin. 4. Dados abertos. I. Título.

CDD 621.3

BIANCA ARAUJO BRAGA BRASIL

ANÁLISE DOS IMPACTOS OPERACIONAIS DAS RESTRIÇÕES POR
CONSTRAINED-OFF EM USINAS SOLARES NO BRASIL.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.e Juliana Carvalho de Alencar
Delfos Energy

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa jornada acadêmica, muitas pessoas foram fundamentais para que este trabalho se tornasse realidade. Expresso aqui minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Francisca Kelma e Régis José, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e por sempre acreditarem no meu potencial. Sem vocês, essa caminhada não teria sido possível.

Ao meu orientador, Professor Raphael Amaral, pela paciência, dedicação e valiosos ensinamentos que me guiaram durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi essencial para que eu pudesse amadurecer academicamente e superar desafios.

Aos amigos que construí durante a faculdade, João Victor, Juliana, Mariana e Karolina, por todo o companheirismo, apoio e por tornarem essa trajetória muito mais leve e especial. As conversas, as risadas e os desafios compartilhados ficarão para sempre na memória.

Também não poderia deixar de agradecer ao grupo Animais Universitários, ONG que tive a honra de fazer parte. Fazer parte desse projeto me ensinou muito sobre empatia, compromisso e o impacto que podemos ter no mundo quando nos unimos por uma causa maior.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio e cada momento compartilhado foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

"O passado pode doer. Mas, do jeito que eu vejo,
você pode fugir dele ou aprender com ele."

(O Rei Leão (1994))

RESUMO

O crescimento da geração solar fotovoltaica no Brasil impõe novos desafios operacionais ao Sistema Interligado Nacional (SIN), principalmente no que se refere à gestão da intermitência e ao escoamento da energia gerada. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o impacto das restrições operacionais por *constrained-off* em usinas solares no Brasil, utilizando como base os dados públicos disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Para a realização deste estudo, foram extraídos dados em formato de planilhas, que passaram por um processo de organização e tratamento em um ambiente voltado à análise de grandes volumes de informação. Os dados foram organizados em arquitetura Delta Lake, permitindo versionamento, rastreabilidade e otimização de consultas analíticas. Foram aplicadas validações estruturais e explorados indicadores como a evolução da potência instalada, a classificação das restrições — indisponibilidade externa (REL), confiabilidade elétrica (CNF) e energética (ENE) — além da análise por origem (local e sistêmica), tipo de usina e região. Gráficos exploratórios e comparativos foram utilizados para a visualização de padrões e identificação de comportamentos operacionais ao longo do tempo. Um estudo de caso com a usina Conjunto Pirapora 2 analisou dias com diferentes condições de restrição, evidenciando o impacto das indisponibilidades externas sobre o despacho da geração. Os resultados reforçam a necessidade de expansão da infraestrutura de transmissão, aliada ao aprimoramento dos mecanismos operacionais e de despacho, com destaque para a importância de estratégias específicas para fontes intermitentes. Evidencia-se também a urgência de um planejamento energético mais integrado entre geração e escoamento, de forma a garantir maior eficiência e segurança na inserção da fonte solar no SIN.

Palavras-chave: Energia solar. Constrained-off. Sin. Dados abertos

ABSTRACT

The growth of solar photovoltaic generation in Brazil presents new operational challenges to the National Interconnected System (SIN), especially with respect to the management of intermittency and the flow of generated energy. In this context, this study aims to analyze the impact of operational restrictions due to *constrained-off* events in solar power plants in Brazil, using public data provided by the National Electric System Operator (ONS). Data were extracted from spreadsheets and processed in an environment designed for analyzing large volumes of information. The information was organized to enable efficient querying and structured analysis, supporting the monitoring of installed capacity growth and the classification of restrictions, including external unavailability (REL), electrical reliability (CNF) and energy limitations (ENE). The analysis also considered the origin of the restrictions (local or systemic), the type of plant, and the geographic region. Exploratory and comparative charts were used to visualize patterns and identify operational behaviors over time. A case study of the Conjunto Pirapora 2 solar plant examined days with different restriction conditions, highlighting the impact of external unavailability on generation dispatch. The results reinforce the need to expand the transmission infrastructure, along with improvements in operational mechanisms and dispatch strategies, with special attention to the particularities of intermittent energy sources. The study also emphasizes the urgency of a more integrated energy planning approach, aligning energy generation and flow to ensure greater efficiency and reliability in the integration of solar energy into the SIN.

Keywords: Solar energy. Constrained-off. SIN. Open data. PySpark. Pandas. Data visualization

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura organizacional do setor elétrico brasileiro | 19 |
| Figura 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte | 21 |
| Figura 3 – Evolução mensal da geração de energia solar no SIN | 27 |
| Figura 4 – Geração solar diária na data 16/07/2024 – CONJ. PIRAPORA 2 | 29 |
| Figura 5 – Geração solar diária na data 06/12/2024 – CONJ. PIRAPORA 2 | 29 |
| Figura 6 – Geração solar diária na data 13/07/2024 – CONJ. PIRAPORA 2 | 30 |
| Figura 7 – Cortes (%) de Usinas Solares por Tipo de Restrição no Nordeste (2024) . . | 31 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Micro e Mini Geração Distribuída (GWh) | 21 |
|---|----|

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|--|
| G_{inst} | Potência instalada (MW) |
| G_{ger} | Geração efetiva de energia (MWmed) |
| G_{disp} | Geração disponível (MW) |
| G_{frust} | Geração frustrada (MW) |
| ΔG | Diferença entre geração disponível e realizada (MW) |
| $\%_{\text{restr}}$ | Percentual de corte por restrição |
| t | Tempo (hora ou dia) |
| REL | Razão de indisponibilidade externa |
| CNF | Razão de atendimento a requisitos de confiabilidade elétrica |
| ENE | Razão energética (excesso de geração) |
| PAR | Restrição indicada no parecer de acesso |
| LOC | Origem da restrição local |
| SIS | Origem da restrição sistêmica |
| PLD | Preço de Liquidação das Diferenças (R\$/MWh) |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| SIN | Sistema Interligado Nacional |
| ESS | Encargos de Serviços do Sistema |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Objetivos | 16 |
| 1.1.1 | <i>Objetivo Geral</i> | 16 |
| 1.1.2 | <i>Objetivo Específicos</i> | 16 |
| 1.2 | Estrutura do Trabalho | 17 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1 | Sistema Interligado Nacional (SIN) | 18 |
| 2.2 | Fonte de Energia Solar no Brasil | 20 |
| 2.3 | Geração Distribuída e Geração Centralizada: Impactos no Setor Elétrico | 21 |
| 2.4 | Restrições Operacionais em Energia Solar e Constrained-off | 23 |
| 3 | METODOLOGIA | 25 |
| 3.1 | Arquitetura Geral da Solução | 25 |
| 3.2 | Coleta e Armazenamento dos Dados | 25 |
| 3.3 | Transformação e Limpeza dos Dados | 25 |
| 3.4 | Estratégia Analítica | 26 |
| 3.5 | Experimentos | 26 |
| 3.5.1 | <i>Experimento 1 – Estudo de Caso: Usina Conjunto Pirapora 2</i> | 26 |
| 3.5.2 | <i>Experimento 2 – Análise por Tipo de Restrição e Subsistema</i> | 26 |
| 4 | RESULTADOS | 27 |
| 4.1 | Evolução da Geração Solar | 27 |
| 4.2 | Estudo de Caso: CONJ. PIRAPORA 2 | 28 |
| 4.3 | Análise por Tipo de Restrição no Subsistema Nordeste | 30 |
| 5 | CONCLUSÃO | 32 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 33 |
| | REFERÊNCIAS | 34 |
| | APÊNDICES | 36 |
| | APÊNDICE A – Notebook Python – Extração e Tratamento dos Dados de | |
| | Restrições Operacionais (<i>Constrained-off</i>) | 36 |
| | APÊNDICE B – Notebook Python – Capacidade Instalada de Geração . . | 40 |

| | |
|---|----|
| APÊNDICE C – Notebook Python – Estudo de Caso: Usina Conjunto | |
| Pirapora 2 | 43 |
| APÊNDICE D – Notebook Python – Análise dos Cortes por Tipo de Res- | |
| trição no Subsistema Nordeste | 49 |

1 INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro desempenha um papel fundamental na manutenção da segurança energética e no suporte à economia nacional. A crescente demanda por energia, aliada à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado a integração de fontes renováveis no Sistema Interligado Nacional (SIN). Dentre essas fontes, a energia solar fotovoltaica tem se destacado devido à sua disponibilidade, modularidade e custos decrescentes de instalação e operação (EPE, 2024).

A inserção massiva de geração intermitente, como a solar fotovoltaica, traz benefícios ambientais e econômicos, mas também desafios operacionais. Um dos principais entraves é a ocorrência de restrições operacionais no SIN, os eventos denominados *constrained-off*. Esse termo refere-se às situações em que uma usina geradora, mesmo disponível para produzir energia, é impedida de injetar sua geração na rede devido a limitações de segurança elétrica ou de escoamento da energia gerada (ANEEL, 2023). Essas restrições são motivadas por fatores como congestionamento de linhas de transmissão, limites técnicos de operação do sistema e dificuldades na previsibilidade da geração intermitente (ONS, 2023).

Os eventos de *constrained-off* impactam diretamente a viabilidade econômica de projetos fotovoltaicos, comprometendo a previsibilidade de receitas para investidores e aumentando o risco de desbalanceamento financeiro no setor. Além disso, essas restrições expõem fragilidades na infraestrutura do SIN, evidenciando a necessidade de investimentos em expansão e modernização da rede de transmissão para garantir maior flexibilidade operacional e aproveitamento da energia gerada (CCEE, 2024).

Até setembro de 2024, o impacto financeiro dos eventos de *constrained-off* sobre as fontes renováveis no Brasil foi significativo. As usinas eólicas registraram perdas estimadas em R\$ 711 milhões desde janeiro, enquanto as usinas solares enfrentaram prejuízos de aproximadamente R\$ 165 milhões desde abril (ENERGIA, 2024). Esses dados demonstram a urgência de soluções regulatórias e técnicas que minimizem os impactos das restrições operacionais sobre a geração renovável no país.

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos dos eventos de *constrained-off* sobre a energia solar fotovoltaica no Brasil, discutindo suas causas, consequências econômicas e possíveis medidas mitigadoras. Para isso, serão abordados aspectos regulatórios, operacionais e tecnológicos, visando contribuir para o aprimoramento da integração das fontes renováveis ao SIN e para a sustentabilidade do setor elétrico nacional.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal analisar os impactos das restrições operacionais do tipo *constrained-off* em usinas solares fotovoltaicas no Brasil. A seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearam o desenvolvimento da pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os impactos do *constrained-off* em usinas solares fotovoltaicas no Brasil, identificando padrões, quantificando perdas e avaliando as principais causas das restrições operacionais no SIN.

1.1.2 Objetivo Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir, buscando aprofundar a compreensão sobre os efeitos das restrições operacionais em usinas solares no Brasil:

1. Investigar os padrões de ocorrência do fenômeno *constrained-off* em usinas solares, com base nos dados disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), analisando sua frequência e distribuição ao longo do tempo.
2. Quantificar as perdas de geração associadas às restrições operacionais, bem como estimar os impactos econômicos decorrentes dessas limitações impostas às usinas fotovoltaicas.
3. Avaliar como a expansão da energia solar tem influenciado a ocorrência de *constrained-off*, considerando a evolução da matriz elétrica nacional.
4. Sugerir estratégias para mitigar as restrições operacionais, com recomendações de caráter técnico e regulatório que possam contribuir para a redução dos impactos do *constrained-off* no setor elétrico brasileiro.

Este trabalho utilizará três conjuntos de dados abertos fornecidos pelo ONS:

1. Dados de Restrição de Operação por *constrained-off* de Usinas Fotovoltaicas
2. Dados de Restrição de Operação por *constrained-off* de Usinas Fotovoltaicas - Detalhamento por Usinas
3. Capacidade Instalada de Geração

Esses conjuntos de dados, com informações em resolução horária e cobertura nacional, permitem a análise das causas das restrições operacionais e a quantificação das perdas

associadas ao *constrained-off* em usinas fotovoltaicas.

1.2 Estrutura do Trabalho

Além do capítulo introdutório, este trabalho está organizado em quatro capítulos adicionais. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos sobre a matriz elétrica brasileira, a inserção de fontes renováveis e as restrições operacionais por *constrained-off*. O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, detalhando o processo de extração, tratamento e análise dos dados, bem como a arquitetura adotada no ambiente de processamento. No Capítulo 4 são apresentados os resultados da análise, com destaque para a classificação das restrições, análise por região e estudo de caso com a usina Conjunto Pirapora 2. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, discutindo os principais achados e sugerindo possíveis medidas técnicas e regulatórias para mitigação dos impactos causados pelo *constrained-off*. Ao final, são apresentados os apêndices, que reúnem os principais trechos de código utilizados nas etapas de extração, transformação e análise dos dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos e referências teóricas que sustentam a análise desenvolvida neste trabalho. Para compreender os fatores que influenciam as restrições operacionais aplicadas a usinas solares fotovoltaicas, é necessário, primeiramente, entender a estrutura do Sistema Interligado Nacional (SIN) e sua relevância para a coordenação da geração e do consumo de energia no Brasil. Na sequência, são discutidas as características da fonte solar fotovoltaica, seu crescimento no país e os desafios associados à sua inserção na matriz elétrica. Também são abordadas as diferenças entre geração centralizada e geração distribuída, destacando como cada modelo impacta a operação do sistema. Por fim, o capítulo apresenta o conceito de restrições operacionais, com ênfase nos eventos de *constrained-off*, que representam o foco central desta pesquisa.

2.1 Sistema Interligado Nacional (SIN)

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é a estrutura responsável pela produção e transmissão de energia elétrica no Brasil. Trata-se de um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas, composto por múltiplos agentes proprietários e operadores. O SIN abrange praticamente todo o território nacional, sendo constituído por quatro subsistemas elétricos interligados: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte (ONS, 2025b).

A interligação desses subsistemas permite a otimização do uso dos recursos energéticos disponíveis, garantindo maior segurança no suprimento de energia. Essa configuração possibilita que a energia gerada em uma região com alta disponibilidade seja distribuída para outra com menor oferta, equilibrando a distribuição conforme as necessidades regionais (ENERGIA, 2023).

Diversas entidades são responsáveis pela operação, regulação e planejamento do SIN. Entre as principais, destacam-se:

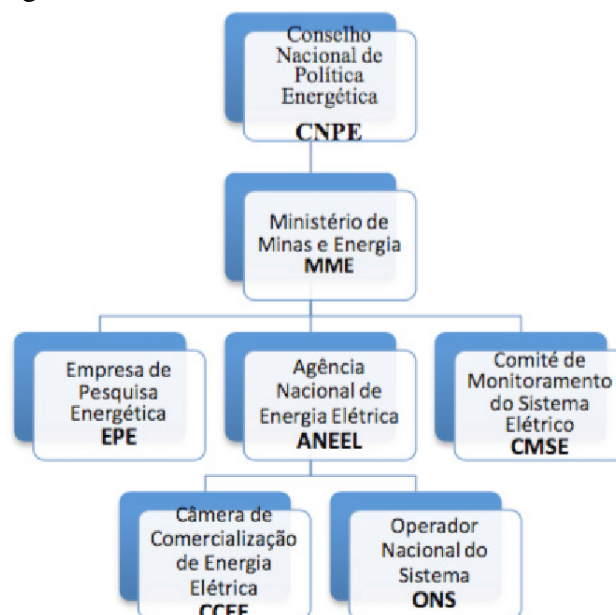
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS): Coordena e controla a operação das instalações de geração e transmissão, assegurando a confiabilidade e a segurança do sistema (ONS, 2025b).
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL): Regula e fiscaliza o setor elétrico, estabelecendo normas para a operação do SIN e garantindo uma competição justa entre os

agentes do setor (ANEEL, 2023).

- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE): Administra as transações de compra e venda de energia no mercado regulado e livre, assegurando a transparência e eficiência das operações comerciais (CCEE, 2025).
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE): Realiza estudos técnicos para o planejamento da expansão do setor elétrico, fornecendo subsídios para a formulação de políticas energéticas (EPE, 2025).
- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE): Avalia e garante a segurança do suprimento de energia elétrica no país, tomando decisões estratégicas em momentos de crise (CMSE, 2025).
- Conselho Nacional de Política Energética (CNPE): Define diretrizes e políticas para o setor energético brasileiro, estabelecendo normas e metas para a expansão e modernização da matriz energética (CNPE, 2025).
- Ministério de Minas e Energia (MME): Responsável pela formulação e implementação das políticas energéticas no Brasil, supervisionando o funcionamento do setor elétrico (MME, 2025).

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático com as principais instituições do setor elétrico brasileiro e suas respectivas relações funcionais, ilustrando como essas entidades se articulam na gestão do SIN.

Figura 1 – Estrutura organizacional do setor elétrico brasileiro



Fonte: Adaptado de CCEE (2018).

A gestão integrada dessas entidades garante o funcionamento eficiente do SIN, permitindo que a geração e distribuição de energia ocorram de forma econômica e segura. No entanto, esse sistema enfrenta desafios contínuos, como a integração de fontes intermitentes (por exemplo, solar e eólica), que exigem maior flexibilidade na operação, e a necessidade de expansão da infraestrutura de transmissão para escoar a geração renovável em regiões remotas. A capacidade de adaptação do SIN a essas novas demandas é crucial para assegurar a estabilidade e a sustentabilidade do setor elétrico brasileiro nos próximos anos.

2.2 Fonte de Energia Solar no Brasil

A energia solar tem registrado um crescimento acelerado nos últimos anos no Brasil, consolidando-se como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz elétrica nacional. Esse avanço tem sido impulsionado por fatores como a redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, os incentivos regulatórios e a busca por fontes renováveis que promovam maior sustentabilidade ao setor elétrico.

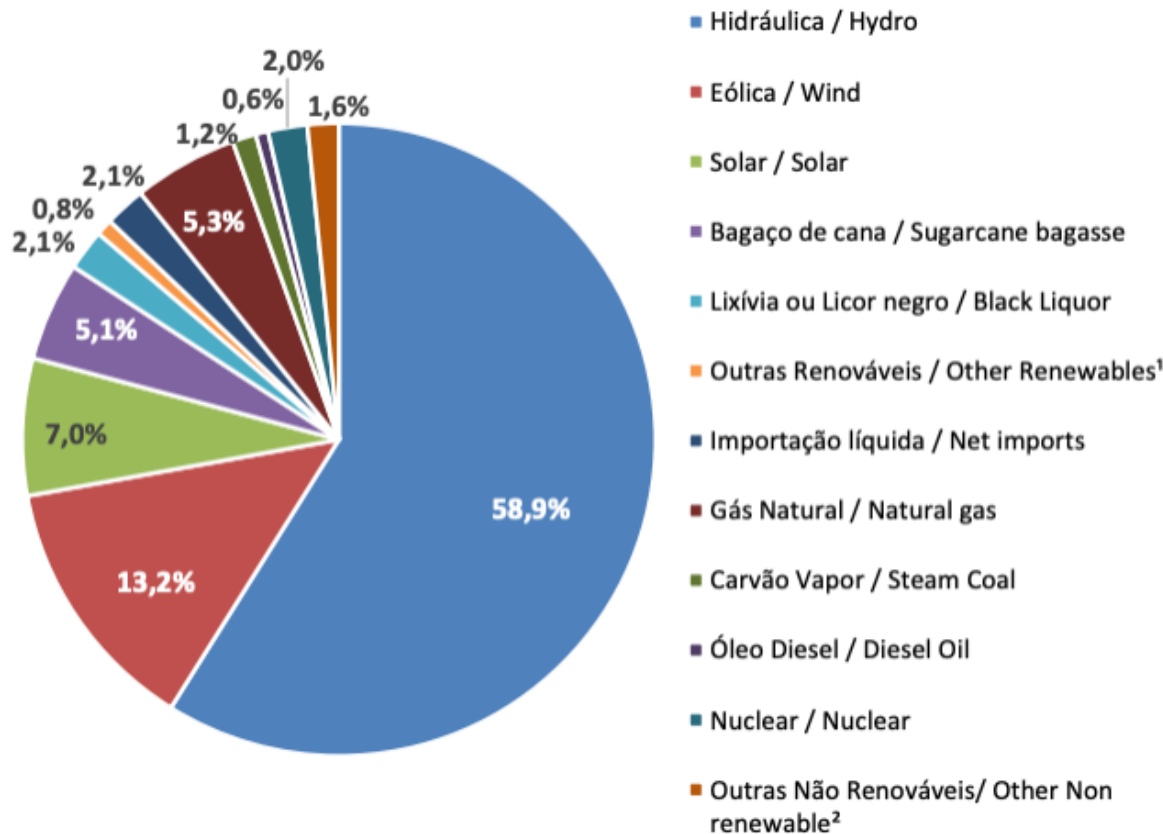
Segundo o *Balanço Energético Nacional 2024*, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a participação da energia solar na oferta interna de eletricidade atingiu 7% em 2023 (EPE, 2024). Esse percentual representa um avanço significativo em relação aos anos anteriores, evidenciando o papel crescente da fonte solar na matriz elétrica brasileira. A Figura 2 apresenta a distribuição da oferta interna de energia elétrica por fonte.

Esse crescimento é ainda mais expressivo no segmento de geração distribuída. Enquanto outras fontes renováveis, como a hidráulica e a eólica, apresentam evolução mais gradual nesse setor, a energia solar se destaca como a principal fonte. Em 2023, a geração fotovoltaica respondeu por mais de 96% do total de energia renovável gerada por micro e minigeradores distribuídos, ultrapassando expressivamente a participação de fontes como biomassa e eólica (EPE, 2024). Esse desempenho reflete a crescente adoção da tecnologia fotovoltaica, impulsionada por consumidores residenciais, comerciais e industriais, que buscam reduzir custos com energia elétrica e aumentar sua autonomia energética.

A Tabela 1 apresenta a evolução da micro e minigeração distribuída no Brasil entre 2017 e 2023, evidenciando o crescimento da energia solar em relação às demais fontes.

O avanço da energia solar reforça sua relevância para a diversificação da matriz elétrica e para a transição energética brasileira. Seu crescimento expressivo na geração distribuída reflete não apenas o aumento da competitividade da tecnologia fotovoltaica, mas também a

Figura 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: EPE (2024).

Tabela 1 – Micro e Mini Geração Distribuída (GWh)

| Identificação | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Geração de eletricidade | 359 | 828 | 2226 | 5269 | 9810 | 18423 | 30950 |
| Geração hidráulica | 84 | 158 | 310 | 67 | 207 | 284 | 219 |
| Geração eólica | 18 | 14 | 28 | 37 | 41 | 46 | 46 |
| Geração solar | 166 | 526 | 1659 | 4764 | 9019 | 17378 | 29813 |

Fonte: Elaborado com base em (EPE, 2024).

ampliação da conscientização sobre os benefícios econômicos e ambientais associados a esse modelo. A tendência é que a participação da fonte solar continue em expansão nos próximos anos, impulsionada por regulamentações favoráveis e avanços tecnológicos que favorecem sua integração ao SIN.

2.3 Geração Distribuída e Geração Centralizada: Impactos no Setor Elétrico

A Geração Distribuída (GD) e a Geração Centralizada (GC) são os dois principais modelos de produção de energia elétrica no Brasil. Cada um possui características próprias, vantagens e desafios, sendo impactados pelas transformações do setor elétrico, especialmente com o crescimento das fontes renováveis e a necessidade de adaptação da rede elétrica.

A Geração Distribuída (GD) permite que consumidores gerem sua própria eletricidade a partir de pequenas usinas conectadas à rede de distribuição. Esse modelo descentralizado proporciona benefícios como a redução de perdas na transmissão e a diversificação da matriz elétrica (INEE, s.d.). Além disso, o conceito de prossumidor vem ganhando relevância, pois consumidores que geram mais energia do que consomem podem injetar o excedente na rede e receber créditos por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) (BASSANI, 2019).

No entanto, a expansão da GD impõe desafios técnicos e regulatórios. A crescente injeção de energia na rede pode gerar sobrecargas locais e dificuldades no gerenciamento do fluxo bidirecional de eletricidade, exigindo modernizações na infraestrutura de distribuição (ANEEL, 2022). Além disso, o modelo de compensação da GD tem sido debatido no setor regulatório, uma vez que sua implementação pode impactar a tarifa de outros consumidores e gerar desequilíbrios econômicos para as concessionárias de distribuição (BRASIL, 2022).

A Geração Centralizada (GC), por outro lado, continua sendo o modelo predominante no Brasil, caracterizado por grandes usinas conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse modelo, regulamentado pela Lei nº 9.074/1995, tem sua operação coordenada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), garantindo o suprimento energético de forma segura e confiável (ONS, 2023).

A matriz elétrica brasileira se destaca por sua alta participação de fontes renováveis, e a evolução da GC tem sido marcada pela busca por um equilíbrio entre geração flexível e fontes intermitentes. O crescimento da geração variável traz novos desafios operacionais para o SIN, exigindo ajustes na gestão da oferta e demanda de eletricidade (EPE, 2024). O planejamento da expansão do setor precisa considerar a necessidade de um sistema elétrico mais resiliente e adaptável, minimizando impactos econômicos e operacionais decorrentes da variabilidade da geração (CMSE, 2023).

Em síntese, a transição energética tem transformado tanto a GD quanto a GC, exigindo inovações tecnológicas e regulatórias para garantir a confiabilidade e a eficiência do setor elétrico brasileiro. O alinhamento entre esses dois modelos será fundamental para a evolução da matriz elétrica nacional e para a integração equilibrada das novas fontes de geração, minimizando riscos operacionais como as restrições por *constrained-off*.

2.4 Restrições Operacionais em Energia Solar e Constrained-off

A crescente participação da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira trouxe desafios operacionais para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Um dos principais mecanismos utilizados para equilibrar a geração e a demanda é o *constrained-off*, que consiste na restrição da produção de energia de usinas fotovoltaicas por determinação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Para regulamentar esse processo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou, em 2023, a Resolução Normativa nº 1.073, que estabelece os procedimentos e critérios para apuração e pagamento das restrições operacionais por *constrained-off* em usinas solares. O objetivo da norma é definir a alocação de riscos e custos entre os agentes geradores e os consumidores, garantindo maior previsibilidade e transparência na operação do sistema elétrico.

“Define-se eventos de restrição de operação por *constrained-off* como a redução da produção de energia por UFVs despachadas centralizadamente ou conjunto de UFVs considerados na programação, decorrente de comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, que tenham sido originados externamente às instalações das respectivas usinas.” (ANEEL, 2023)

A Resolução Normativa nº 1.073/2023 aplica-se às usinas classificadas como Tipo I, Tipo II-B e Tipo II-C, enquanto as usinas Tipo III não são abrangidas pela medida, uma vez que sua programação e operação não são controladas pelo ONS.

Para estimar o potencial de geração das usinas solares, o ONS utiliza uma função de produtividade, elaborada com base em séries históricas de geração e variáveis meteorológicas, como irradiância solar e temperatura ambiente. Essa função é revisada anualmente para garantir maior precisão na determinação das restrições operacionais.

As razões que levam à aplicação do *constrained-off* são classificadas em três categorias pelo ONS:

- **Indisponibilidade externa (REL):** Decorrente de falhas ou limitações em instalações de transmissão externas à usina.
- **Confiabilidade elétrica (CNF):** Restrições aplicadas para manter a estabilidade do sistema, como evitar sobrecargas ou desbalanços de frequência.
- **Razões energéticas (ENE):** Excesso de geração em relação à demanda disponível no sistema.

Nos casos classificados como REL, as usinas podem ser elegíveis para compensação financeira por meio dos Encargos de Serviços do Sistema (ESS). O valor compensado é calculado

com base na frustração de geração (G_{frust}) multiplicada pelo Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) do submercado correspondente, conforme expresso na Equação 4.1:

$$\text{Valor}_{\text{compensacao}} = G_{\text{frust}} \times \text{PLD} \quad (2.1)$$

O *constrained-off* em usinas solares ocorre principalmente devido a dois fatores:

1. **Limitações na capacidade de transmissão:** Regiões como o Nordeste, que concentram grande número de usinas solares, frequentemente enfrentam restrições devido à insuficiência da infraestrutura de transmissão para escoar a energia gerada. Isso resulta na necessidade de cortes na geração para evitar sobrecargas na rede.
2. **Excesso de geração em horários de alta irradiância:** Durante períodos de baixa demanda e elevada produção fotovoltaica, pode ser necessário limitar a geração para evitar problemas de estabilidade no SIN, como variações abruptas de frequência.

A Resolução Normativa ANEEL nº 1.073/2023 e os Procedimentos de Rede do ONS estabelecem que as usinas devem fornecer, em tempo real, dados operacionais e meteorológicos para o cálculo da função de produtividade e monitoramento das restrições. Essa exigência visa aprimorar a transparência no gerenciamento do sistema elétrico e possibilitar um planejamento mais eficiente da geração solar no Brasil.

O Brasil tem enfrentado diversos apagões ao longo das últimas décadas, evidenciando vulnerabilidades no sistema elétrico nacional. Um dos eventos mais recentes ocorreu em 15 de agosto de 2023, quando uma falha no Sistema Interligado Nacional resultou em um apagão que afetou todas as unidades federativas, exceto Roraima. A interrupção teve início às 08h31min, devido à abertura da interligação Norte-Sudeste, causando uma perda de 16 mil MW de carga em todo o país. A Região Norte foi a mais impactada, enquanto o Sul sofreu menos consequências. Pelo menos 29 milhões de pessoas foram afetadas por esse evento (ONS, 2023). Eventos como esse reforçam a importância de mecanismos como o *constrained-off*, que permitem ao ONS preservar a estabilidade do sistema em situações críticas de desequilíbrio operacional.

3 METODOLOGIA

3.1 Arquitetura Geral da Solução

A solução desenvolvida neste trabalho baseia-se em um pipeline de análise de dados estruturado para processar grandes volumes de informações operacionais sobre usinas solares fotovoltaicas. O fluxo de trabalho foi inteiramente implementado na plataforma Databricks, utilizando a linguagem PySpark para o processamento distribuído e a biblioteca Pandas para visualizações complementares. Os dados foram armazenados em formato Parquet e organizados em volumes gerenciados por Delta Lake, permitindo controle transacional, versionamento e rastreabilidade.

3.2 Coleta e Armazenamento dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram extraídos do portal de dados abertos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2025a). Os conjuntos analisados incluem:

1. Capacidade Instalada de Geração
2. Restrição de Operação por *Constrained-off* de Usinas Fotovoltaicas
3. Restrição de Operação por *Constrained-off* de Usinas Fotovoltaicas – Detalhamento por Usina

A extração foi realizada no formato Parquet, com posterior armazenamento no Databricks File System (DBFS). Os arquivos foram particionados por período e categoria de restrição, o que permitiu acessos otimizados para análises analíticas.

3.3 Transformação e Limpeza dos Dados

As transformações foram realizadas utilizando PySpark, com etapas de:

- Conversão de tipos de dados
- Renomeação de colunas para padronização
- Filtragem de usinas do tipo I, II-B e II-C
- Tratamento de valores nulos e inconsistências
- Criação de colunas derivadas para corte (MW), data e identificações temporais

Em algumas etapas, foi utilizada a biblioteca Pandas para conversão dos DataFrames e geração de gráficos exploratórios.

3.4 Estratégia Analítica

A análise dos dados buscou caracterizar os eventos de *constrained-off* a partir de diferentes perspectivas:

- Evolução temporal da potência instalada e dos cortes
- Classificação dos eventos por tipo de restrição (REL, CNF, ENE)
- Segregação por origem da restrição (local ou sistêmica)
- Agrupamentos por subsistema, tipo de usina e estado

Indicadores como percentual de corte e volume de geração frustrada foram utilizados para quantificar os impactos operacionais.

3.5 Experimentos

3.5.1 Experimento 1 – Estudo de Caso: Usina Conjunto Pirapora 2

Neste experimento, foi realizada uma análise aprofundada da usina Conjunto Pirapora 2 em três dias com diferentes condições operacionais: um dia com restrição REL, um com CNF de origem local e um dia sem ocorrência de corte. Foram gerados gráficos de comparação da geração esperada e realizada, e avaliado o volume de geração frustrada.

3.5.2 Experimento 2 – Análise por Tipo de Restrição e Subsistema

O segundo experimento focou na distribuição dos cortes por tipo de restrição (REL, CNF, ENE) no subsistema Nordeste. A análise permitiu identificar o comportamento predominante das restrições e avaliar o impacto agregado por mês. Foram utilizadas visualizações temporais para apoio à interpretação dos resultados.

4 RESULTADOS

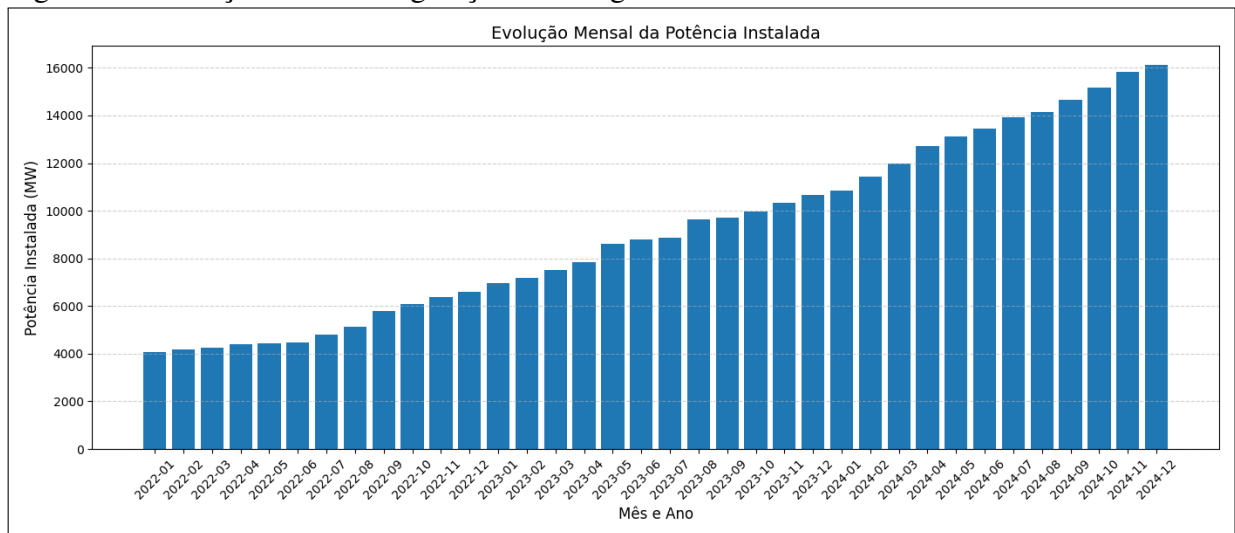
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise dos dados de geração fotovoltaica e das restrições operacionais por *constrained-off*, com base nos conjuntos de dados públicos disponibilizados pelo ONS. As análises foram segmentadas por período, região, tipo de usina e categoria de restrição, de forma a evidenciar padrões e impactos operacionais relacionados à integração da energia solar no SIN.

Ressalta-se que, em todos os gráficos apresentados, foram considerados apenas os dados de usinas solares classificadas como Tipo I, Tipo II-B e Tipo II-C, por serem despachadas centralizadamente e, portanto, sujeitas aos critérios de restrição definidos pelo ONS.

4.1 Evolução da Geração Solar

A Figura 3 apresenta a evolução mensal da geração de energia solar no SIN entre os anos de 2022 e 2024. O gráfico apresentado evidencia a evolução significativa da potência instalada em usinas solares no Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse crescimento impacta diretamente a operação do sistema, gerando uma série de implicações técnicas e operacionais.

Figura 3 – Evolução mensal da geração de energia solar no SIN



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Primeiramente, a característica intermitente da geração solar impõe maior complexidade à operação do SIN. Como essa fonte depende diretamente da radiação solar, há variações significativas ao longo do dia e em diferentes condições climáticas, o que demanda maior capacidade de previsão, controle e flexibilidade por parte do Operador Nacional do Sistema Elétrico

(ONS) para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda.

Além disso, o aumento da geração solar em regiões com infraestrutura de transmissão limitada pode resultar em eventos de *constrained-off*, nos quais a geração é restringida por impossibilidades operacionais, como limites técnicos de escoamento. Isso representa um desperdício de energia disponível e pode gerar perdas econômicas tanto para os agentes geradores quanto para o sistema como um todo.

Outro ponto relevante é a necessidade de expansão e modernização da rede de transmissão. O crescimento acelerado da fonte solar evidencia a urgência de investimentos em infraestrutura para permitir o escoamento eficiente da energia gerada, especialmente em regiões de alto potencial solar, como o Nordeste, que muitas vezes não coincidem com os centros de carga.

Por fim, a elevada penetração da geração solar modifica o perfil de carga do sistema, concentrando a injeção de energia nas horas de maior insolação e exigindo novas estratégias de operação dos reservatórios hidrelétricos. Esses fatores ressaltam a importância de uma operação integrada, com planejamento adequado e investimentos contínuos, para garantir a estabilidade e a eficiência do SIN frente à crescente inserção da fonte solar.

4.2 Estudo de Caso: CONJ. PIRAPORA 2

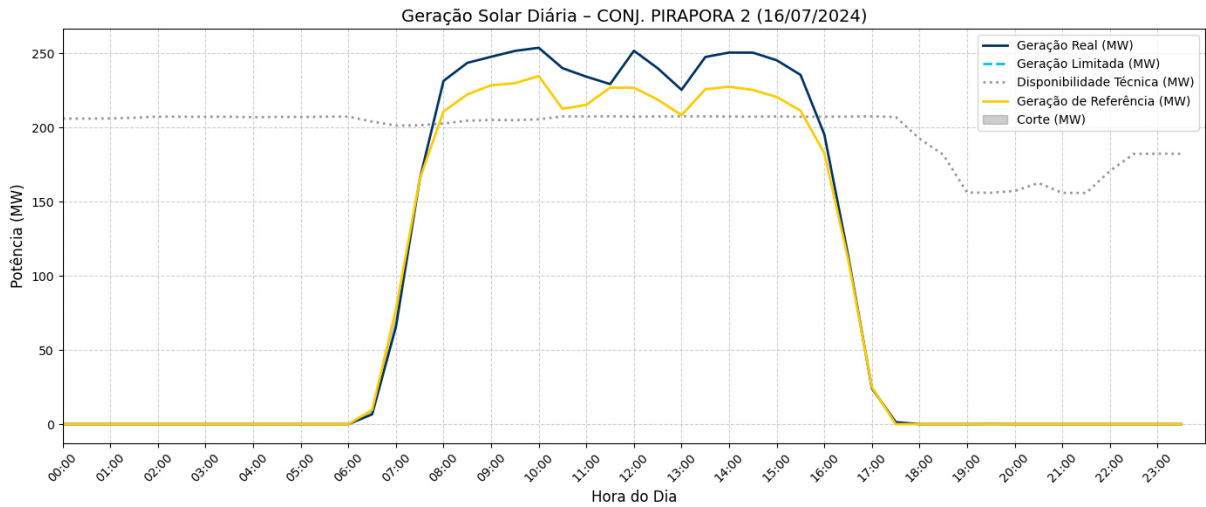
Com o objetivo de ilustrar, na prática, os efeitos das restrições operacionais por *constrained-off*, foi realizado um estudo de caso com a usina CONJ. PIRAPORA 2, localizada em Minas Gerais. Para isso, foram selecionados três dias representativos, abrangendo diferentes condições operacionais:

- 2024-07-13 – Dia com restrição por Indisponibilidade Externa (REL).
- 2024-07-16 – Dia sem qualquer ocorrência de restrição.
- 2024-12-06 – Dia com restrição por Confiabilidade Elétrica (CNF) com origem local.

A Figura 4 apresenta o desempenho da usina em um dia sem restrições, evidenciando seu pleno potencial de geração. A geração real acompanha de forma próxima a geração de referência durante o período de maior irradiância, com operação contínua e sem intervenções.

Já a Figura 5 mostra o comportamento da geração em 06/12/2024, quando a usina foi impactada por uma restrição de confiabilidade elétrica (CNF) com origem local. Observa-se que, entre aproximadamente 06h30 e 13h30, a geração foi limitada, mesmo com alta disponibilidade técnica e elevado potencial solar. Por se tratar de uma restrição local, esse tipo de corte não é

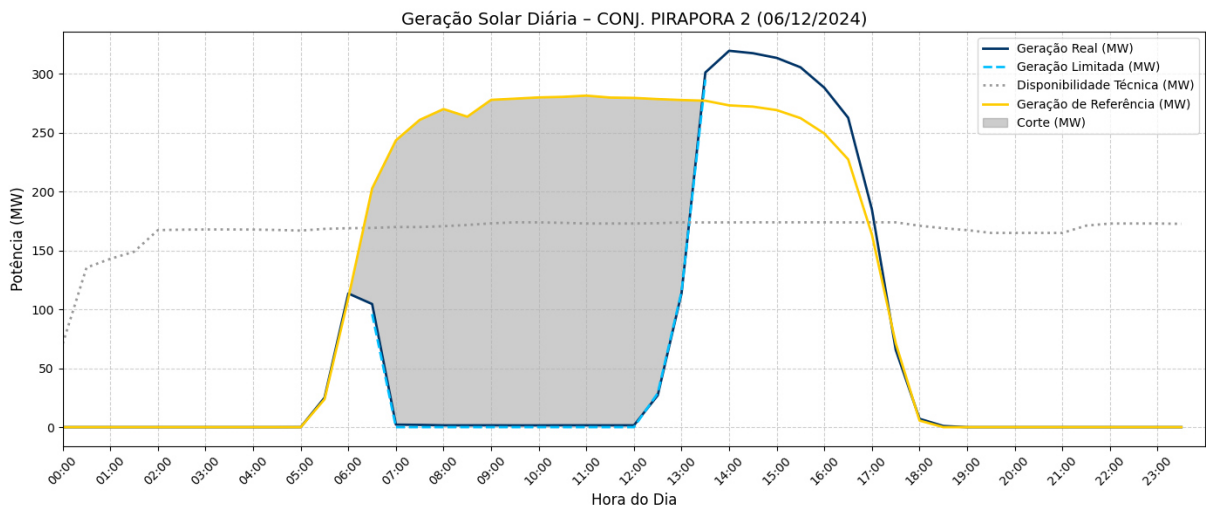
Figura 4 – Geração solar diária na data 16/07/2024 – CONJ. PIRAPORA 2



Fonte: elaborado pela autora (2025).

elegível à compensação financeira.

Figura 5 – Geração solar diária na data 06/12/2024 – CONJ. PIRAPORA 2

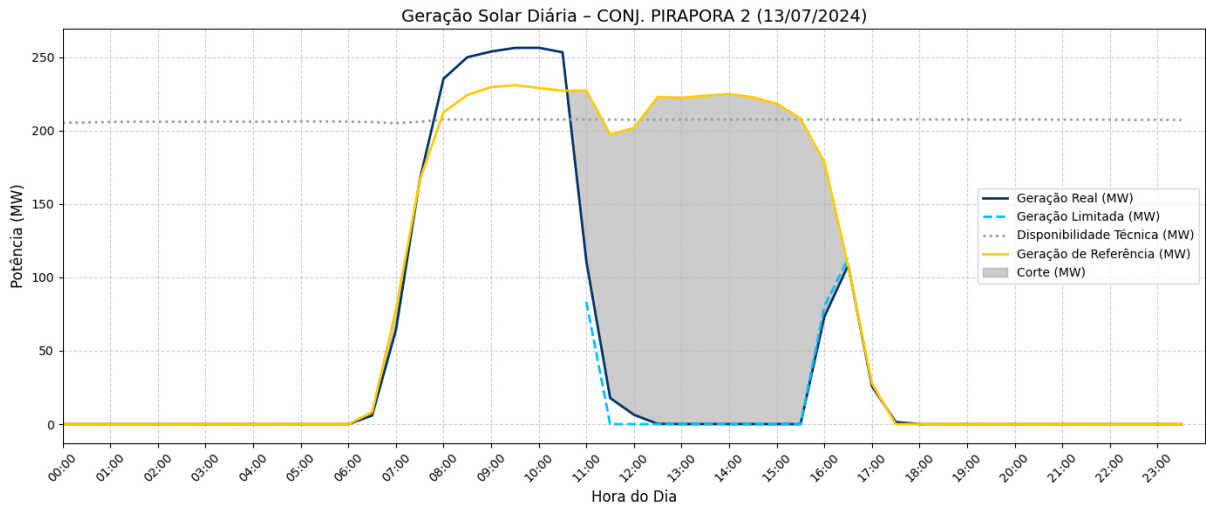


Fonte: elaborado pela autora (2025).

A Figura 6, por sua vez, apresenta o perfil do dia 13/07/2024, marcado por restrições operacionais classificadas como REL (Indisponibilidade Externa). A geração frustrada (G_{frust}) é evidente ao longo de um extenso período do dia, com a curva de referência se distanciando significativamente da geração real. Nesse cenário, a legislação vigente prevê possibilidade de compensação financeira à usina, conforme a Equação 4.1:

$$\text{Valor_compensação} = G_{frust} \times PLD \quad (4.1)$$

Figura 6 – Geração solar diária na data 13/07/2024 – CONJ. PIRAPORA 2



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A comparação entre os três dias evidencia o impacto direto das restrições operacionais sobre a geração solar. Enquanto o cenário sem corte reflete o desempenho ideal da usina, os outros dois destacam perdas expressivas de geração, sendo que apenas no caso de REL há previsão de ressarcimento via *PLD*. Esse estudo reforça a importância do aprimoramento da malha de transmissão e da gestão sistêmica para garantir maior aproveitamento da geração renovável no SIN.

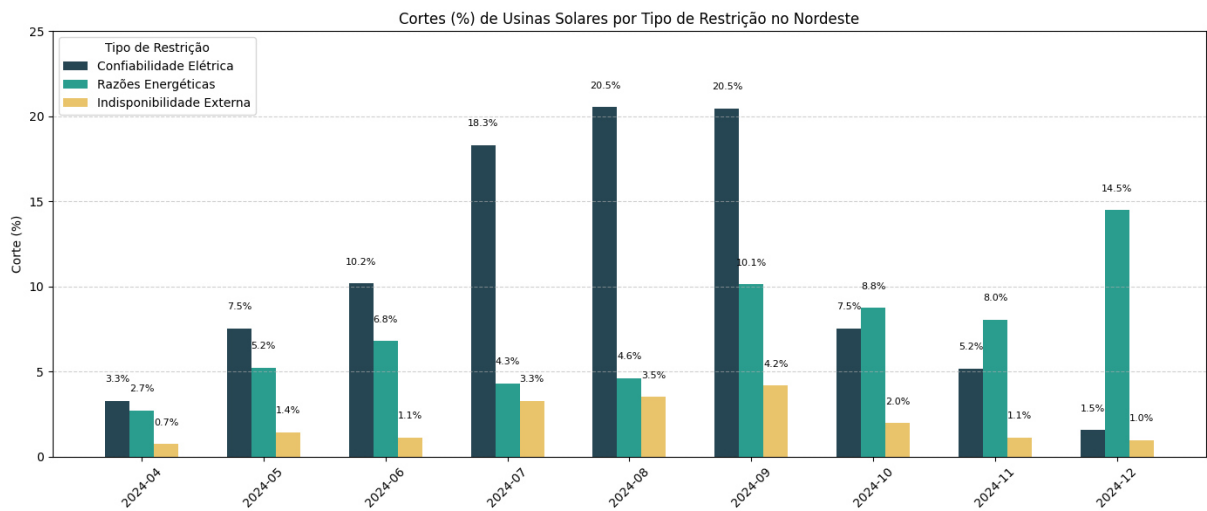
4.3 Análise por Tipo de Restrição no Subsistema Nordeste

A Figura 7 apresenta a distribuição percentual dos cortes registrados em usinas solares no subsistema Nordeste entre os meses de abril e dezembro de 2024. Os dados estão agrupados por tipo de restrição: Confiabilidade Elétrica (CNF), Razões Energéticas (ENE) e Indisponibilidade Externa (REL).

Os resultados indicam que as restrições por Confiabilidade Elétrica (CNF) foram predominantes entre julho e outubro de 2024, alcançando picos de mais de 20% de corte. Esse padrão reforça a relevância dos desafios técnicos enfrentados pelo SIN para garantir a estabilidade da rede em horários de alta injeção solar.

Em novembro e dezembro, destaca-se o crescimento das restrições por Razões Energéticas (ENE), possivelmente associadas ao excesso de geração em relação à demanda local e à limitação de flexibilidade na operação. Já as restrições por Indisponibilidade Externa (REL) apresentaram menor frequência, embora ainda sejam relevantes em alguns meses, indicando

Figura 7 – Cortes (%) de Usinas Solares por Tipo de Restrição no Nordeste (2024)



Fonte: elaborado pela autora (2025).

gargalos localizados na infraestrutura de transmissão.

Esses dados demonstram como diferentes fatores impactam a operação das usinas solares no Nordeste, e reforçam a necessidade de ações coordenadas entre planejamento da geração, reforço da rede e regulação adaptativa para mitigar os efeitos do *constrained-off* na região.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou os impactos operacionais das restrições por *constrained-off* em usinas solares fotovoltaicas no Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizando dados públicos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e tecnologias de processamento distribuído no ambiente Databricks. Por meio da implementação de pipelines em PySpark e do uso da arquitetura Delta Lake, foi possível processar e analisar grandes volumes de dados com granularidade horária, garantindo alta eficiência e rastreabilidade. Os resultados indicam que, durante o segundo semestre de 2024, as restrições de geração relacionadas à confiabilidade elétrica (CNF) foram predominantes no subsistema Nordeste, enquanto as restrições por razões energéticas (ENE) aumentaram nos últimos meses do ano. O estudo de caso da usina CONJ. PIRAPORA 2 evidenciou, de forma clara, o impacto das restrições nas curvas diárias de geração. Dias sem restrições apresentaram desempenho próximo à geração de referência, enquanto os dias com restrições, especialmente do tipo indisponibilidade externa (REL), mostraram perdas significativas de geração, com direito à compensação financeira baseada na geração frustrada e no preço de liquidação das diferenças (PLD). Este trabalho destaca que o crescimento acelerado da geração solar requer investimentos urgentes em infraestrutura de transmissão e melhorias na gestão operacional do SIN. Além disso, ressalta a necessidade de revisões regulatórias que promovam maior justiça e previsibilidade para os agentes do setor. A compreensão dos gargalos atuais e a integração de estratégias tecnológicas e políticas são fundamentais para garantir a eficiência e a sustentabilidade do sistema elétrico diante da expansão das fontes renováveis. Dessa forma, a análise aqui realizada contribui para subsidiar decisões estratégicas no planejamento energético nacional, ampliando a capacidade do Brasil em aproveitar o potencial da energia solar e enfrentar os desafios operacionais decorrentes de sua inserção crescente na matriz elétrica.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados alcançados e nas possibilidades de aprofundamento do tema, apresentam-se a seguir algumas sugestões de continuidade da pesquisa:

- Expandir o horizonte temporal da análise, incorporando dados mais recentes e de anos anteriores, de forma a identificar tendências de longo prazo no fenômeno do *constrained-off*.
- Realizar uma avaliação comparativa entre diferentes fontes renováveis, como solar e eólica, para compreender as particularidades do impacto das restrições operacionais.
- Integrar dados meteorológicos e de previsão solar para correlacionar eventos de corte com variáveis climáticas e sazonais.
- Desenvolver análises econômicas mais abrangentes, considerando variações do Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) e estimativas de perdas financeiras com maior granularidade.
- Explorar o uso de modelos preditivos e técnicas de aprendizado de máquina para antecipar eventos de restrição com base em padrões históricos e dados operacionais.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.073, de 12 de setembro de 2023**. Brasília, 2023. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231073.pdf>>.
- ANEEL, A. N. de E. E. **Relatório de Impacto Regulatório sobre a Geração Distribuída**. [S.l.], 2022. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>.
- BASSANI, A. **Energia solar fotovoltaica e os desafios da geração distribuída**. [S.l.]: Editora Técnica, 2019.
- BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 - Marco Legal da Geração Distribuída**. 2022. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2022-2023/2022/Lei/L14300.htm>.
- CCEE. **Sobre a CCEE**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br>>.
- CMSE. **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/cmse>>.
- CMSE, C. de Monitoramento do S. E. **Relatório de Segurança Energética 2023**. 2023. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/cmse>>.
- CNPE. **Portarias e resoluções do CNPE**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/cnpe>>.
- ENERGIA, H. **O que é Curtailment?** 2024. Acesso em: 10 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.headenergia.net/post/o-que-e-curtailment>>.
- ENERGIA, M. L. de. **Energia no brasil: tudo sobre o sistema interligado nacional (sin). Mercado Livre de Energia**, 2023. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.mercadolivredeenergia.com.br/noticias/energia-no-brasil-tudo-sobre-o-sistema-interligado-nacional-sin/>>.
- EPE. **Estudos e análises do setor elétrico**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.
- EPE, E. de P. E. **Balanço Energético Nacional 2024**. [s.n.], 2024. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>.
- INEE, I. N. de E. E. **Geração Distribuída no Brasil**. s.d. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.inee.org.br>>.
- MME. **Ministério de Minas e Energia - Diretrizes do setor elétrico**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/>>.
- ONS. **Relatório sobre o Apagão de 15 de Agosto de 2023**. 2023. Acesso em: 20 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br>>.
- ONS. **Dados abertos - Portal de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://dados.ons.org.br/>>.

ONS. **O que é o SIN**. [s.n.], 2025. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>.

ONS, O. N. do S. E. **Relatório Técnico sobre a Operação do SIN**. [S.l.], 2023. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ons.org.br>>.

APÊNDICE A – NOTEBOOK PYTHON – EXTRAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DE RESTRIÇÕES OPERACIONAIS (*CONSTRAINED-OFF*)

Este apêndice apresenta o notebook desenvolvido em Python com uso de PySpark para a implementação do pipeline de Extração, Transformação e Carga (ETL) dos dados públicos de restrições operacionais por *constrained-off*, disponibilizados pelo ONS.

O código foi implementado no ambiente Databricks e contempla desde a definição do schema de leitura até o tratamento dos dados em formato ‘.xlsx’. A seguir, apresenta-se o código completo:

```

1  %pip install openpyxl
2
3  from pyspark.sql import functions as F
4  from pyspark.sql.types import (
5      StringType, IntegerType, FloatType, DateType, TimestampType, StructType,
6      ↪ StructField, DoubleType
7  )
8
9  # Define the schema
10 schema = StructType([
11     StructField('id_subsistema', StringType(), True),
12     StructField('nom_subsistema', StringType(), True),
13     StructField('id_estado', StringType(), True),
14     StructField('nom_estado', StringType(), True),
15     StructField('nom_usina', StringType(), True),
16     StructField('id_ons', StringType(), True),
17     StructField('ceg', StringType(), True),
18     StructField('din_instante', TimestampType(), True),
19     StructField('val_geracao', StringType(), True),
20     StructField('val_geracaolimitada', StringType(), True),
21     StructField('val_disponibilidade', StringType(), True),
22     StructField('val_geracaoreferencia', StringType(), True),
23     StructField('val_geracaoreferenciafinal', StringType(), True),
24     StructField('cod_razaorestricao', StringType(), True),
25     StructField('cod_origemrestricao', StringType(), True)
26 ])
27

```

```

28  # List of file paths
29  file_paths = [
30      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_04.xlsx",
31      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_05.xlsx",
32      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_06.xlsx",
33      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_07.xlsx",
34      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_08.xlsx",
35      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_09.xlsx",
36      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_10.xlsx",
37      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_11.xlsx",
38      "/Volumes/dev/red/volume/CONST_OFF/RESTRICAO_COFF_FOTOVOLTAICA_2024_12.xlsx",
39  ]
40
41  # Initialize an empty Spark DataFrame with the defined schema
42  combined_df = spark.createDataFrame([], schema)
43
44  # Loop through each file path, read the Excel file, and union the DataFrames
45  for file_path in file_paths:
46      # Read the Excel file into a pandas DataFrame
47      excel_df = pd.read_excel(file_path, engine='openpyxl')
48
49      # Convert the necessary columns to string type
50      excel_df['val_geracao'] = excel_df['val_geracao'].astype(str)
51      excel_df['val_geracaolimitada'] = excel_df['val_geracaolimitada'].astype(str)
52      excel_df['val_disponibilidade'] = excel_df['val_disponibilidade'].astype(str)
53      excel_df['val_geracaoreferencia'] = excel_df['val_geracaoreferencia'].astype(str)
54      excel_df['val_geracaoreferenciafinal'] =
55          ↪ excel_df['val_geracaoreferenciafinal'].astype(str)
56
57      # Convert the pandas DataFrame to a Spark DataFrame with the defined schema
58      spark_df = spark.createDataFrame(excel_df, schema=schema)
59
60      # Union the DataFrames
61      combined_df = combined_df.union(spark_df)
62
63  df = combined_df.withColumn(
64      "VOL_GERACAO_MW",
65      when(
66          (col("val_geracao") == "") |

```

```

66         (col("val_geracao").isNull()) |
67         (col("val_geracao") == "nan") |
68         (col("val_geracao") == "NAN"),
69         None
70     ).otherwise(col("val_geracao").cast("double"))
71 )
72
73 df = df.withColumn(
74     "VOL_GERACAO_LIMITADA_MW",
75     when((col("val_geracaolimitada") == "") |
76         (col("val_geracaolimitada").isNull()) |
77         (col("val_geracaolimitada") == "nan") |
78         (col("val_geracaolimitada") == "NAN"),
79         None
80     ).otherwise(col("val_geracaolimitada"))
81     .cast("double")
82 )
83
84 df = df.withColumn(
85     "VAL_DISPONIBILIDADE_MW",
86     when((col("val_disponibilidade") == "") |
87         (col("val_disponibilidade").isNull()) |
88         (col("val_disponibilidade") == "nan") |
89         (col("val_disponibilidade") == "NAN"),
90         None)
91     .otherwise(col("val_disponibilidade"))
92     .cast("double")
93 )
94
95 df = df.withColumn(
96     "VAL_GERACAO_REFERENCIA",
97     when((col("val_geracaoreferencia") == "") |
98         (col("val_geracaoreferencia").isNull()) |
99         (col("val_geracaoreferencia") == "nan") |
100         (col("val_geracaoreferencia") == "NAN"),
101         None)
102     .otherwise(col("val_geracaoreferencia"))
103     .cast("double")
104 )

```

```

105
106 df = df.withColumn(
107     "VAL_GERACAO_REFERENCIA_FINAL",
108     when((col("val_geracaoreferenciafinal") == "") |
109          (col("val_geracaoreferenciafinal").isNull()) |
110          (col("val_geracaoreferenciafinal") == "nan") |
111          (col("val_geracaoreferenciafinal") == "NAN"),
112          None)
113     .otherwise(col("val_geracaoreferenciafinal"))
114     .cast("double")
115 )
116
117 # Renomeio de colunas
118 df = df.withColumnRenamed("nom_subsistema", "NOME_SUBSISTEMA") \
119         .withColumnRenamed("nom_estado", "NOME_ESTADO") \
120         .withColumnRenamed("nom_usina", "NOME_USINA") \
121         .withColumnRenamed("ceg", "CEG") \
122         .withColumnRenamed("din_instante", "DT_REFERENCIA") \
123         .withColumnRenamed("cod_razaorestricao", "COD_RAZAO_RESTRICAO") \
124         .withColumnRenamed("cod_origemrestricao", "COD_ORIGEM_RESTRICAO")
125
126 df = df.select(
127     "NOME_SUBSISTEMA",
128     "NOME_ESTADO",
129     "NOME_USINA",
130     "CEG",
131     "DT_REFERENCIA",
132     "COD_RAZAO_RESTRICAO",
133     "COD_ORIGEM_RESTRICAO",
134     "VOL_GERACAO_MW",
135     "VOL_GERACAO_LIMITADA_MW",
136     "VAL_DISPONIBILIDADE_MW",
137     "VAL_GERACAO_REFERENCIA",
138     "VAL_GERACAO_REFERENCIA_FINAL"
139 )
140
141 # Save the DataFrame to the specified table
142 df.write.format("delta").mode("overwrite").saveAsTable("dev.off_constrained.tb_coff_ons")

```

APÊNDICE B – NOTEBOOK PYTHON – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO

Este apêndice apresenta o notebook desenvolvido em Python com uso de PySpark para a extração, tratamento e análise da base de dados de Capacidade Instalada de Geração, disponibilizada pelo ONS.

O pipeline foi implementado no ambiente Databricks, permitindo a leitura, limpeza e agregação de dados segmentados por tipo de usina, estado e período de referência.

```

1  %pip install openpyxl
2
3  from pyspark.sql import functions as F
4  from pyspark.sql.types import (
5      StringType, IntegerType, FloatType, DateType, TimestampType, StructType,
6      ↪ StructField, DoubleType
7  )
8  import pandas as pd
9  import pandas as pd
10 import matplotlib.pyplot as plt
11
12 # Define the schema
13 schema = StructType([
14     StructField("id_subsistema", StringType(), True),
15     StructField("nom_subsistema", StringType(), True),
16     StructField("id_estado", StringType(), True),
17     StructField("nom_estado", StringType(), True),
18     StructField("nom_modalidadeoperacao", StringType(), True),
19     StructField("nom_agenteproprietario", StringType(), True),
20     StructField("nom_tipousina", StringType(), True),
21     StructField("nom_usina", StringType(), True),
22     StructField("ceg", StringType(), True),
23     StructField("nom_unidadegeradora", StringType(), True),
24     StructField("cod_equipamento", StringType(), True),
25     StructField("num_unidadegeradora", StringType(), True),
26     StructField("nom_combustivel", StringType(), True),
27     StructField("dat_entradataeste", TimestampType(), True),
28     StructField("dat_entradaoperacao", TimestampType(), True),
29     StructField("dat_desativacao", TimestampType(), True),
30     StructField("val_potenciaefetiva", DoubleType(), True)
31 ])

```

```

31
32 # Read the CSV files into a DataFrame
33 df = (spark.read
34       .format("csv")
35       .option("header", True)
36       .option("sep", ";")
37       .schema(schema)
38       .load('/Volumes/dev/red/volume/capacidade_geracao/CAPACIDADE_GERACAO.csv')
39       )
40
41 from pyspark.sql.functions import col
42
43 # Filter the DataFrame for the specified values in the nom_modalidadeoperacao column
44 ↪ and nom_tipousina
44 df = df.filter(
45     col("nom_modalidadeoperacao").isin(["TIPO I", "TIPO II-B", "TIPO II-C"])
46 ).filter(
47     col("nom_tipousina") == "FOTOVOLTAICA"
48 )
49
50 # Assuming df_capacidade is a PySpark DataFrame, convert it to a Pandas DataFrame
51 df_capacidade_pd = df_historico.toPandas()
52
53 # Converter a coluna de data para datetime
54 df_capacidade_pd["Mes e Ano"] = pd.to_datetime(df_capacidade_pd["Mes e Ano"])
55
56 # Filtrar os dados a partir de 2022
57 df_capacidade_filtrado = df_capacidade_pd[df_capacidade_pd["Mes e Ano"].dt.year >=
58     ↪ 2022]
59
60 # Plotar gráfico de barras
61 plt.figure(figsize=(14, 6))
62 plt.bar(
63     df_capacidade_filtrado["Mes e Ano"].dt.strftime("%Y-%m"),
64     df_capacidade_filtrado["Potência total"],
65     color="#1f77b4"
66 )
67 # Configurações do gráfico

```

```
68 plt.title("Evolução Mensal da Potência Instalada", fontsize=14)
69 plt.xlabel("Mês e Ano", fontsize=12)
70 plt.ylabel("Potência Instalada (MW)", fontsize=12)
71 plt.xticks(rotation=45)
72 plt.grid(True, axis='y', linestyle='--', alpha=0.6)
73 plt.tight_layout()
74 plt.show()
```

APÊNDICE C – NOTEBOOK PYTHON – ESTUDO DE CASO: USINA CONJUNTO PIRAPORA 2

Este apêndice apresenta os scripts utilizados no Experimento 1, que analisa a usina Conjunto Pirapora 2 em três situações distintas: um dia com restrição de origem externa (REL), um dia com restrição local por confiabilidade elétrica (CNF) e um dia sem ocorrência de restrição.

O objetivo foi comparar os perfis de geração da usina em diferentes condições operacionais, utilizando visualizações horárias e indicadores como volume de corte, volume limitado e volume de referência. As análises foram conduzidas no ambiente Databricks, com apoio das bibliotecas pandas, matplotlib e PySpark.

```

1  from pyspark.sql.functions import to_date
2  from pyspark.sql.functions import date_format
3  import pandas as pd
4  import datetime
5  import matplotlib.pyplot as plt
6  import matplotlib.dates as mdates
7  from pyspark.sql.functions import col, when
8
9  df_coff = spark.read.table("dev.off_constrained.tb_coff_ons")
10
11 df_pirapora = df_coff.filter(df_coff.NOME_USINA == "CONJ. PIRAPORA 2")
12
13 df_pirapora = df_pirapora.withColumn("DT_REFERENCIA_DIA", date_format("DT_REFERENCIA",
    ↳ "yyyy-MM-dd"))
14 df_pirapora = df_pirapora.withColumn("DT_REFERENCIA_HORA", date_format("DT_REFERENCIA",
    ↳ "HH:mm:ss"))
15
16 ## Dia com razao de restricao INDISPONIBILIZADE EXTERNA
17 df_pirapora_julho = df_pirapora.filter(to_date(df_pirapora.DT_REFERENCIA_DIA) ==
    ↳ "2024-07-13")
18
19 ## Dia com razao de restricao CNF (Confiabilidade Elétrica) e teve origem em
    ↳ restrição de caráter local.
20 df_pirapora_dezembro = df_pirapora.filter(to_date(df_pirapora.DT_REFERENCIA_DIA) ==
    ↳ "2024-12-06")
21
22 ## Dia sem nenhuma razao de restricao

```

```

23 df_pirapora_normal = df_pirapora.filter(to_date(df_pirapora.DT_REFERENCIA_DIA) ==
    ↪ "2024-07-16")
24
25 df_teste_pd = df_pirapora_normal.toPandas()
26
27 # Recarregar a base e preparar dados
28 df_teste_pd["DATA_HORA"] = pd.to_datetime(df_teste_pd["DT_REFERENCIA"])
29 df_teste_pd["DATA_HORA"] = df_teste_pd["DATA_HORA"].dt.tz_localize(None)
30
31 # Definir vetores
32 x = df_teste_pd["DATA_HORA"].values
33 y1 = df_teste_pd["VOL_GERACAO_MW"].astype(float).values
34 y2 = df_teste_pd["VAL_GERACAO_REFERENCIA"].astype(float).values
35 mask = y2 > y1
36
37 # Criar figura
38 plt.figure(figsize=(14, 6))
39
40 # Linhas do gráfico
41 plt.plot(x, y1, label="Geração Real (MW)", color="#003366", linewidth=2)
42 plt.plot(x, df_teste_pd["VOL_GERACAO_LIMITADA_MW"], label="Geração Limitada (MW)",
    ↪ color="#00bfff", linewidth=2, linestyle='--')
43 plt.plot(x, df_teste_pd["VAL_DISPONIBILIDADE_MW"], label="Disponibilidade Técnica
    ↪ (MW)", color="#999999", linewidth=2, linestyle=':')
44 plt.plot(x, y2, label="Geração de Referência (MW)", color="#ffcc00", linewidth=2)
45
46 # Preenchimento da área de corte
47 plt.fill_between(x, y1, y2, where=mask, interpolate=True, color="gray", alpha=0.4,
    ↪ label="Corte (MW)")
48
49 # Eixo X formatado com horas
50 plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
51 plt.gca().xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=1))
52 plt.xticks(rotation=45)
53
54 # Estética final
55 plt.title("Geração Solar Diária - CONJ. PIRAPORA 2 (16/07/2024)", fontsize=14)
56 plt.xlabel("Hora do Dia", fontsize=12)
57 plt.ylabel("Potência (MW)", fontsize=12)

```

```

58 plt.legend()
59 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
60
61
62 # Definir intervalo de x manualmente para o eixo
63 data_alvo = "2024-07-16"
64 plt.xlim(
65     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 00:00:00"),
66     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 23:59:59")
67 )
68
69 plt.tight_layout()
70 # Mostrar também no notebook
71 plt.show()
72
73
74 df_teste_pd = df_pirapora_julho.toPandas()
75
76 # Recarregar a base e preparar dados
77 df_teste_pd["DATA_HORA"] = pd.to_datetime(df_teste_pd["DT_REFERENCIA"])
78 df_teste_pd["DATA_HORA"] = df_teste_pd["DATA_HORA"].dt.tz_localize(None)
79
80 # Definir vetores
81 x = df_teste_pd["DATA_HORA"].values
82 y1 = df_teste_pd["VOL_GERACAO_MW"].astype(float).values
83 y2 = df_teste_pd["VAL_GERACAO_REFERENCIA"].astype(float).values
84 mask = y2 > y1
85
86 # Criar figura
87 plt.figure(figsize=(14, 6))
88
89 # Linhas do gráfico
90 plt.plot(x, y1, label="Geração Real (MW)", color="#003366", linewidth=2)
91 plt.plot(x, df_teste_pd["VOL_GERACAO_LIMITADA_MW"], label="Geração Limitada (MW)",
92     ↪ color="#00bfff", linewidth=2, linestyle='--')
93 plt.plot(x, df_teste_pd["VAL_DISPONIBILIDADE_MW"], label="Disponibilidade Técnica
94     ↪ (MW)", color="#999999", linewidth=2, linestyle=':')
95 plt.plot(x, y2, label="Geração de Referência (MW)", color="#ffcc00", linewidth=2)

```

```

95  # Preenchimento da área de corte
96  plt.fill_between(x, y1, y2, where=mask, interpolate=True, color="gray", alpha=0.4,
    ↪  label="Corte (MW)")
97
98  # Eixo X formatado com horas
99  plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
100 plt.gca().xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=1))
101 plt.xticks(rotation=45)
102
103 # Estética final
104 plt.title("Geração Solar Diária - CONJ. PIRAPORA 2 (13/07/2024)", fontsize=14)
105 plt.xlabel("Hora do Dia", fontsize=12)
106 plt.ylabel("Potência (MW)", fontsize=12)
107 plt.legend()
108 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
109
110
111 # Definir intervalo de x manualmente para o eixo
112 data_alvo = "2024-07-13"
113 plt.xlim(
114     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 00:00:00"),
115     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 23:59:59")
116 )
117
118 plt.tight_layout()
119 # Mostrar também no notebook
120 plt.show()
121
122
123
124 df_teste_pd = df_pirapora_dezembro.toPandas()
125
126 # Recarregar a base e preparar dados
127 df_teste_pd["DATA_HORA"] = pd.to_datetime(df_teste_pd["DT_REFERENCIA"])
128 df_teste_pd["DATA_HORA"] = df_teste_pd["DATA_HORA"].dt.tz_localize(None)
129
130 # Definir vetores
131 x = df_teste_pd["DATA_HORA"].values
132 y1 = df_teste_pd["VOL_GERACAO_MW"].astype(float).values

```

```

133 y2 = df_teste_pd["VAL_GERACAO_REFERENCIA"].astype(float).values
134 mask = y2 > y1
135
136 # Criar figura
137 plt.figure(figsize=(14, 6))
138
139 # Linhas do gráfico
140 plt.plot(x, y1, label="Geração Real (MW)", color="#003366", linewidth=2)
141 plt.plot(x, df_teste_pd["VOL_GERACAO_LIMITADA_MW"], label="Geração Limitada (MW)",
    ↪ color="#00bfff", linewidth=2, linestyle='--')
142 plt.plot(x, df_teste_pd["VAL_DISPONIBILIDADE_MW"], label="Disponibilidade Técnica
    ↪ (MW)", color="#999999", linewidth=2, linestyle=':')
143 plt.plot(x, y2, label="Geração de Referência (MW)", color="#ffcc00", linewidth=2)
144
145 # Preenchimento da área de corte
146 plt.fill_between(x, y1, y2, where=mask, interpolate=True, color="gray", alpha=0.4,
    ↪ label="Corte (MW)")
147
148 # Eixo X formatado com horas
149 plt.gca().xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%H:%M'))
150 plt.gca().xaxis.set_major_locator(mdates.HourLocator(interval=1))
151 plt.xticks(rotation=45)
152
153 # Estética final
154 plt.title("Geração Solar Diária - CONJ. PIRAPORA 2 (06/12/2024)", fontsize=14)
155 plt.xlabel("Hora do Dia", fontsize=12)
156 plt.ylabel("Potência (MW)", fontsize=12)
157 plt.legend()
158 plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.6)
159
160
161 # Definir intervalo de x manualmente para o eixo
162 data_alvo = "2024-12-06"
163 plt.xlim(
164     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 00:00:00"),
165     pd.to_datetime(f"{data_alvo} 23:59:59")
166 )
167
168 plt.tight_layout()

```

```
169  # Mostrar também no notebook  
170  plt.show()
```

APÊNDICE D – NOTEBOOK PYTHON – ANÁLISE DOS CORTES POR TIPO DE RESTRIÇÃO NO SUBSISTEMA NORDESTE

Este apêndice apresenta os scripts de análise para o Experimento 2, que examina a distribuição dos cortes de geração fotovoltaica por tipo de restrição — Indisponibilidade Externa (REL), Confiabilidade Elétrica (CNF) e Razões Energéticas (ENE) — com foco no subsistema Nordeste.

As análises incluíram tratamento de dados com pandas, visualizações com matplotlib e aplicação de filtros temporais e categóricos. Os resultados foram utilizados para avaliar padrões operacionais e sazonalidade das restrições ao longo do segundo semestre de 2024.

```

1  from pyspark.sql.functions import to_date, date_format, col, when, sum as _sum
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  import matplotlib.dates as mdates
4  import pandas as pd
5  import numpy as np
6  import datetime
7
8  df_coff = spark.read.table("dev.off_constrained.tb_coff_ons") \
9      .withColumn("MES_ANO", date_format("DT_REFERENCIA", "yyyy-MM")) \
10     .filter(col("NOME_SUBSISTEMA") == "NORDESTE")
11
12     # Agrupar por mês, tipo de restrição e subsistema
13     df_geracao_total = df_coff.groupBy("MES_ANO", "NOME_SUBSISTEMA", "NOME_USINA").agg(
14         _sum("VAL_GERACAO_REFERENCIA").alias("GERACAO_REF_MW_TOTAL")
15     )
16
17     # Filtrar onde COD_RAZAO_RESTRICAO e COD_ORIGEM_RESTRICAO não são nulos
18     df_coff_restricao = df_coff.filter(
19         col("COD_RAZAO_RESTRICAO").isNotNull() &
20         col("COD_ORIGEM_RESTRICAO").isNotNull()
21     )
22
23     # Calcular geração frustrada apenas nessas linhas
24     df_coff_restricao = df_coff_restricao.withColumn(
25         "CORTE_MW", when(
26             (df_coff_restricao["VAL_GERACAO_REFERENCIA"] -
27              ↪ df_coff_restricao["VOL_GERACAO_MW"]) < 0, 0

```

```

27     ).otherwise(
28         df_coff_restricao["VAL_GERACAO_REFERENCIA"] -
29         ↪ df_coff_restricao["VOL_GERACAO_MW"]
30     )
31
32     # Agrupar por mês, tipo de restrição e subsistema
33     df_coff_restricao = df_coff_restricao.groupby("MES_ANO", "COD_RAZAO_RESTRICAO",
34         ↪ "NOME_USINA").agg(
35         _sum("CORTE_MW").alias("CORTE_MW"),
36     )
37
38     # Realizar o join entre df_razao_mes e df_geracao_total pelo NOME_SUBSISTEMA e MES_ANO
39     df_joined = df_coff_restricao.join(
40         df_geracao_total,
41         on=["NOME_USINA", "MES_ANO"],
42         how="inner"
43     )
44
45     # Calcular percentual de corte
46     df_final = df_joined.withColumn(
47         "PERCENTUAL_CORTE",
48         when(col("GERACAO_REF_MW_TOTAL") != 0, (col("CORTE_MW") /
49         ↪ col("GERACAO_REF_MW_TOTAL")) * 100).otherwise(0)
50     )
51
52     df_plotagem = df_joined.drop("NOME_USINA") \
53         .groupBy("MES_ANO", "COD_RAZAO_RESTRICAO") \
54         .agg(
55             _sum("CORTE_MW").alias("CORTE_MW"),
56             _sum("GERACAO_REF_MW_TOTAL").alias("GERACAO_REF_MW_TOTAL")
57         )
58
59     # Calcular percentual de corte
60     df_plotagem = df_plotagem.withColumn(
61         "PERCENTUAL_CORTE",
62         when(col("GERACAO_REF_MW_TOTAL") != 0, (col("CORTE_MW") /
63         ↪ col("GERACAO_REF_MW_TOTAL")) * 100).otherwise(0)
64     )

```

```

62
63 # Converter para Pandas
64
65 df_razao_mes_pd = df_plotagem.toPandas()
66
67 # Pivotar os dados
68 df_pivot = df_razao_mes_pd.pivot(index="MES_ANO", columns="COD_RAZAO_RESTRICAO",
    ↪ values="PERCENTUAL_CORTE").fillna(0)
69
70 # Definir colunas de interesse
71 razoes = ["CNF", "ENE", "REL"]
72 df_pivot["TOTAL"] = df_pivot[razoes].sum(axis=1)
73
74 # Ordenar por mês
75 df_pivot = df_pivot.sort_index()
76
77 # Definições de plotagem
78 labels = df_pivot.index.tolist()
79 x = np.arange(len(labels))
80 bar_width = 0.2
81 cores = {
82     "CNF": "#264653", # cinza-azulado
83     "ENE": "#2a9d8f", # verde petróleo
84     "REL": "#e9c46a", # amarelo mostarda
85 }
86
87 # Legenda descritiva
88 nomes_legenda = {
89     "CNF": "Confiabilidade Elétrica",
90     "ENE": "Razões Energéticas",
91     "REL": "Indisponibilidade Externa"
92 }
93
94 # Criar figura
95 fig, ax = plt.subplots(figsize=(14, 6))
96
97 # Plotar barras e adicionar os valores
98 for i, razao in enumerate(razoes):
99     if razao in df_pivot.columns:

```

```

100     valores = df_pivot[razao].values
101     bars = ax.bar(x + i * bar_width, valores, width=bar_width,
102                  label=nomes_legenda[razao], color=cores[razao])
103
104     # Adicionar rótulos nas barras
105     for j, v in enumerate(valores):
106         ax.text(x[j] + i * bar_width, v + 1, f'{v:.1f}%', ha='center', va='bottom',
107                ↪ fontsize=8)
108
109     # Eixos e estética
110     ax.set_xticks(x + bar_width)
111     ax.set_xticklabels(labels, rotation=45)
112     ax.set_ylabel("Corte (%)")
113     ax.set_title("Cortes (%) de Usinas Solares por Tipo de Restrição no Nordeste")
114     ax.legend(title="Tipo de Restrição", loc="upper left")
115     ax.grid(axis="y", linestyle="--", alpha=0.6)
116     ax.set_ylim(0, 25)
117
118     plt.tight_layout()
119     plt.show()
120

```