

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
MBA EM GESTÃO ESTRATÉGICA EM ENERGIAS NATURAIS RENOVÁVEIS

DANILO BATISTA MELO FONTES

CURTAILMENT EM USINAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: DESAFIOS E
PERSPECTIVAS

CURITIBA

2024

DANILO BATISTA MELO FONTES

CURTAILMENT EM USINAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: DESAFIOS E
PERSPECTIVAS

Artigo apresentado ao curso de MBA em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. José Osório do Nascimento Neto

CURITIBA

2024

CURTAILMENT EM USINAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: DESAFIOS E PERSPECTIVAS

DANILO BATISTA MELO FONTES

RESUMO

O *curtailment*, que se refere à redução da geração de energia em usinas, tornou-se um desafio significativo no Brasil, especialmente nas fontes solar e eólica. Este trabalho analisa as causas e impactos do *curtailment* no contexto brasileiro, destacando os desafios técnicos, econômicos e regulatórios que dificultam a plena utilização do potencial renovável do país. Perspectivas e soluções são discutidas para mitigar essa questão, incluindo inovações tecnológicas e reformas regulatórias. A compreensão do *curtailment* é essencial para aprimorar a eficiência do sistema elétrico brasileiro e promover uma transição energética sustentável.

Palavras-chave: *Curtailment*, Energias Renováveis, Brasil, Impactos, Soluções.

ABSTRACT

Curtailment, which refers to the reduction of energy generation in power plants, has become a significant challenge in Brazil, particularly in solar and wind sources. This article analyzes the causes and impacts of curtailment within the Brazilian context, highlighting the technical, economic, and regulatory challenges that hinder the full utilization of the country's renewable potential. Furthermore, perspectives and solutions to mitigate this issue will be discussed, including technological innovations and regulatory reforms. Understanding curtailment is essential for improving the efficiency of the Brazilian electrical system and promoting a sustainable energy transition.

Keywords: Curtailment, Renewable Energy, Brazil, Impacts, Solutions.

1. INTRODUÇÃO

A diversificação da matriz elétrica de um país desempenha um papel fundamental na sua segurança elétrica, desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental. Nos últimos anos, o Brasil tem se consolidado como um dos maiores protagonistas globais na geração de energia renovável, com destaque para as fontes solar e eólica. A abundância de recursos naturais, como a incidência solar e os ventos constantes, especialmente na região Nordeste, possibilitou um crescimento expressivo dessas fontes na matriz energética nacional.

A energia solar fotovoltaica e a eólica, em particular, passaram a desempenhar um papel estratégico na diversificação da matriz elétrica, contribuindo para a redução da dependência de fontes fósseis e para o alcance das metas climáticas estabelecidas pelo país. No entanto, com o avanço dessas tecnologias, surgem novos desafios, entre os quais o *curtailment*, definido como a redução da geração de energia por usinas despachadas centralizadamente ou considerados na programação, através de comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que tenham sido originados externamente às instalações das respectivas usinas.

No Brasil, o fenômeno afeta principalmente as usinas solares e eólicas, que são fontes intermitentes de energia. Apesar de possuírem grande potencial de geração, essas usinas frequentemente sofrem cortes em sua produção, especialmente em momentos de baixa demanda ou de saturação das linhas de transmissão.

A relevância desse tema está relacionada aos seus impactos diretos na eficiência energética, na sustentabilidade do setor elétrico e nas políticas públicas voltadas para a transição energética. O *curtailment* compromete o aproveitamento pleno das fontes renováveis, afetando a viabilidade financeira dos projetos e dificultando o cumprimento das metas de descarbonização. Além disso, ele coloca em evidência a necessidade de reformulações no planejamento e na regulação do setor elétrico, para que o Brasil possa não apenas expandir sua capacidade instalada de energia renovável, mas também utilizá-la de forma eficiente.

Assim, entender as causas e os impactos do *curtailment* no Brasil é crucial para fomentar soluções que garantam uma transição energética sustentável e competitiva, alavancando o potencial renovável do país.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fatores para o crescimento do Curtailment

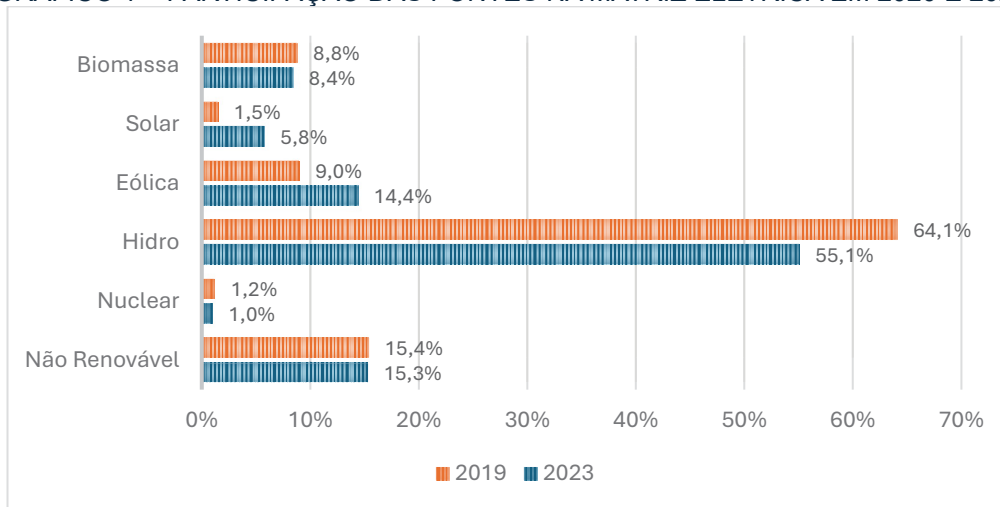
2.1.1. Expansão acelerada da Matriz Elétrica Brasileira

A transição energética global representa um desafio no sentido de propiciar desenvolvimento econômico e social a partir de menores emissões de carbono e com maior participação das fontes limpas e renováveis. Em 2023, ao atingir a marca de

200 gigawatts (GW) de potência centralizada, o Brasil prova seu protagonismo e está sintonizado com a transição energética (ANEEL, 2024).

De acordo com os dados publicados pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE no Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, as fontes eólica e solar representaram 9% e 1% da capacidade de geração de energia na matriz elétrica brasileira, respectivamente. Já no BEN 2024, a representação da fonte eólica subiu para 14,4%, enquanto a solar para 5,8%, conforme apresentado no gráfico 1.

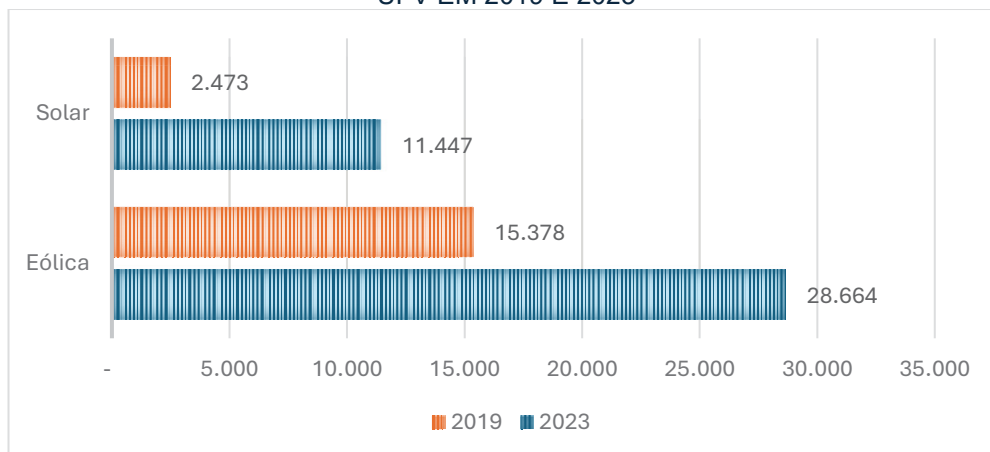
GRÁFICO 1 – PARTICIPAÇÃO DAS FONTES NA MATRIZ ELÉTRICA EM 2020 E 2024



FONTE: O autor (2024)

Considerando a evolução da capacidade de geração em MW de cada fonte, os números tornam-se ainda mais expressivos. O gráfico 2 apresenta o comparativo entre as fontes solar e eólica nos anos de 2019 e 2023.

GRÁFICO 2 – COMPARATIVO SOBRE A EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA (MW) EOL E UFV EM 2019 E 2023



FONTE: O autor (2024)

A capacidade instalada de usinas eólicas apresentou um crescimento robusto de aproximadamente 86%, refletindo o aumento da importância dessa fonte na matriz energética brasileira. Já a capacidade instalada de usinas solares teve um crescimento exponencial de cerca de 363%, destacando-se como a fonte renovável que mais avançou no país. Esse salto reflete tanto a expansão tecnológica quanto o crescente investimento em energia limpa e sustentável.

Além da expansão da matriz elétrica brasileira centralizada, o Brasil conta com outro crescimento na oferta: a micro e minigeração distribuída (MMGD), que ocorre quando o consumidor brasileiro gera sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada.

A MMGD teve seu crescimento incentivado por ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte. Em 2023, a micro e minigeração distribuída atingiu 30.950 GWh com uma potência instalada de 26.627 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 29.813 GWh e 26.366 MW de geração e potência instalada, respectivamente (EPE, 2024).

O aumento da participação de fontes intermitentes e não despacháveis, como a solar e a eólica, exigiu adaptações no sistema de planejamento e operação do setor elétrico brasileiro. Embora o país tenha um histórico consolidado de geração hidrelétrica, o crescimento de fontes renováveis intermitentes, que dependem de condições climáticas, demandou uma reavaliação das políticas de expansão e operação do sistema. Essa mudança estrutural impactou a dinâmica de geração e consumo, contribuindo para o surgimento de situações em que o excesso de oferta em determinados momentos leva à necessidade de restrições na geração para evitar sobrecarga no sistema.

De acordo com o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (PAR/PEL) 2023, a previsão é que, até 2028, 45 GW de novos projetos entrem em operação, sendo que 26 GW já possuem Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) assinado, o que garante a conexão das usinas à Rede Básica, e 19 GW aguardam parecer de acesso (ONS, 2023).

Cabe destacar que, considerando apenas as usinas com CUST assinado, estados como Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte, juntos, terão um aumento na capacidade instalada de até 20 GW de energia eólica e solar. Adicionalmente, na região Norte e Nordeste, cerca de 9 GW de usinas aguardam a implementação de

obras de transmissão para viabilizar seu escoamento, enquanto 10 GW ainda estão em fase de análise pelo ONS, condicionados à entrada de novas obras de transmissão (ONS, 2023).

Além disso, o relatório também aponta que, para os próximos anos, o SIN enfrentará uma "significativa sobra de geração" no período diurno devido ao crescimento das energias solar e eólica. Em momentos de maior incidência solar, a geração pode ultrapassar 30 GW em 2024 e atingir cerca de 50 GW em 2026, resultando em desperdício energético por falta de capacidade de escoamento (ONS, 2023).

2.1.2. Limitações da Infraestrutura: Problemas na transmissão de energia

Outro fator relevante para o *curtailment* em usinas renováveis no Brasil é a limitação da infraestrutura de transmissão de energia, principalmente na exportação de energia entre submercados, visto que o crescimento de geração foi intenso na região Nordeste e o centro de carga está no Sudeste do país. As linhas de transmissão no país não cresceram na mesma velocidade que a capacidade de geração de fontes renováveis.

Para abordar os problemas de escoamento existentes no Sistema Interligado Nacional (SIN), o PAR/PEL 2023 destaca que a expansão da capacidade de transmissão não tem acompanhado o crescimento acelerado da geração renovável, principalmente eólica e solar.

O relatório aponta que, apesar de a capacidade instalada totalizar 214,4 GW em 2023, com previsão de crescimento para 246,8 GW até 2027, o sistema de transmissão enfrenta sérias limitações de escoamento de energia. Entre os problemas citados, destaca-se que aproximadamente 191 empreendimentos foram classificados como limitados em termos de escoamento da geração ou intercâmbio de energia, evidenciando gargalos na infraestrutura (ONS, 2023).

A publicação ainda ressalta que entre 2023 e 2028, está prevista a adição de 10.000 km de novas linhas de transmissão e 30.600 MVA em subestações, representando um aumento de 5,8% na extensão das linhas de transmissão e 7,5% na capacidade de transformação, enquanto a geração renovável, principalmente eólica e solar, teve um crescimento muito mais acelerado, levando a um descompasso entre a capacidade de escoamento e a geração de energia (ONS, 2023).

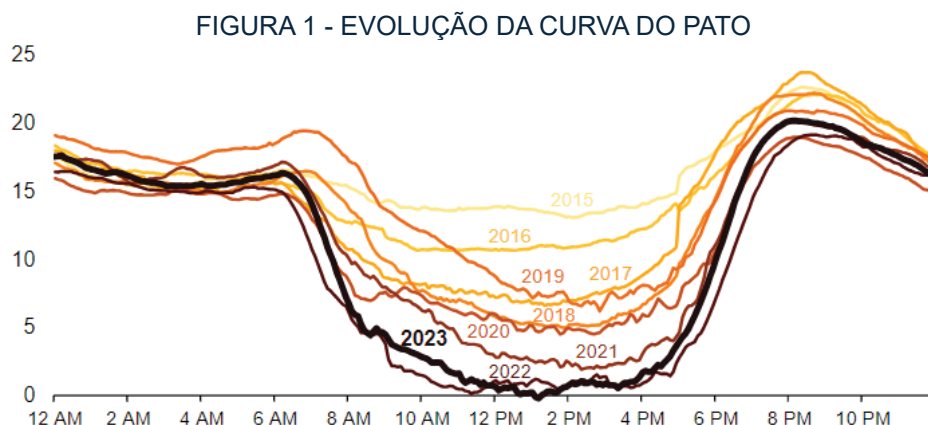
Esse descompasso entre a expansão da infraestrutura de transmissão e a capacidade de geração já vinha sendo apontado como um dos principais fatores que limitam o escoamento pleno da energia gerada. De acordo com o PAR/PEL 2023, embora a EPE tenha recentemente publicado soluções estruturais para a expansão da capacidade de transmissão da região Norte de Minas Gerais e para o escoamento da geração na região Nordeste, o ONS avalia que a implantação dessas obras não será suficiente para viabilizar o escoamento da geração sinalizada pela atual conjuntura (ONS, 2023).

2.1.3. Intermitência das Fontes Renováveis: Desafios relacionados à variabilidade da geração solar e eólica

A intermitência das fontes renováveis, especialmente da energia solar e eólica, é outro fator determinante para o *curtailment*. A geração dessas fontes depende diretamente de condições climáticas, como a intensidade do vento e a radiação solar, que variam ao longo do dia e das estações do ano.

Outro aspecto importante é o impacto dos recursos energéticos distribuídos e da crescente penetração das fontes renováveis variáveis, como eólica e solar. A complexidade da operação do sistema também aumenta devido à variabilidade dessas fontes e à incapacidade de controle rápido.

O comportamento característico da produção massiva de energia solar ao meio-dia, quando a demanda é relativamente baixa, seguido por uma queda acentuada na geração no final do dia, justamente quando a demanda aumenta, ilustra o descompasso entre a geração solar e a demanda por eletricidade. Esse fenômeno é conhecido como curva do pato, conforme apresentado na Figura 1. A curva do pato está diretamente relacionada ao *curtailment*, que ocorre quando a infraestrutura de transmissão não tem capacidade suficiente para escoar o excesso de geração solar, resultando na necessidade de interromper parte da produção de energia renovável.



FONTE: Operador Independente do Sistema da Califórnia (CAISO)

A intermitência das fontes solar e eólica também impacta a previsibilidade da geração. Em dias nublados e com baixa radiação solar ou com pouca incidência de ventos, a produção de energia cai drasticamente, exigindo que o sistema elétrico compense com outras fontes. Essa variabilidade dificulta o gerenciamento da oferta de energia, forçando o operador do sistema a tomar decisões rápidas para garantir o equilíbrio entre geração e consumo.

2.1.4. Fatores Regulatórios e Mercadológicos: Análise do marco regulatório e dos incentivos econômicos

Os fatores regulatórios e mercadológicos desempenharam um papel central no desenvolvimento das energias renováveis no Brasil, moldando a estrutura de incentivos econômicos. A Lei nº 9.427/1996, que criou a ANEEL, estabeleceu as bases regulatórias do setor elétrico, definindo os mecanismos de concessão e regulação das atividades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no país. Esse marco regulatório foi essencial para garantir a segurança jurídica e estimular investimentos em energias renováveis.

Além disso, introduziu um importante incentivo ao setor, criando descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para fontes incentivadas, como eólica, solar, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs). Esse incentivo foi decisivo para viabilizar economicamente a inserção de novas fontes de geração renovável no sistema elétrico brasileiro, promovendo o aumento expressivo dessas tecnologias na matriz energética nacional.

No entanto, a Lei nº 14.120/2021 trouxe uma mudança significativa nesse cenário, ao estabelecer o fim gradual dos descontos nas tarifas para usinas incentivadas. Com a perspectiva do término dos incentivos, houve um aumento acentuado nas solicitações de outorgas para novas usinas, numa tentativa de garantir o benefício antes da mudança regulatória.

Esse crescimento acelerado das usinas incentivadas gerou uma pressão sobre a infraestrutura de transmissão, contribuindo para a intensificação de eventos de *curtailment*, nos quais a geração de energia precisa ser reduzida devido à incapacidade de escoamento do excedente energético.

2.2.Regulamentação e tratamento do *Curtailment*

2.2.1. Regulamentação do *Curtailment* para usinas eólicas e fotovoltaicas

A regulamentação do *curtailment* em usinas renováveis no Brasil é estabelecida pelas Resoluções Normativas ANEEL nº 1.030/2022 e nº 1.073/2023, que fornecem as bases legais para a compensação financeira das usinas afetadas. Essas resoluções estabelecem critérios detalhados para a apuração das perdas e para o ressarcimento dos geradores.

As resoluções classificam as restrições de operação em três categorias principais:

- a) **Indisponibilidade externa:** refere-se a restrições causadas por problemas externos à usina, como falhas na infraestrutura de transmissão. Nesse caso, as usinas são elegíveis para compensação financeira, pois os problemas estão fora do controle dos operadores;
- b) **Requisitos de confiabilidade elétrica:** ocorrem quando o Operador Nacional do Sistema (ONS) precisa reduzir a produção de energia para garantir a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico. Embora necessárias, essas restrições afetam diretamente as usinas, limitando sua produção;
- c) **Razão energética:** ocorre quando a energia gerada pela usina não pode ser alocada na carga do sistema, geralmente em momentos de baixa demanda ou quando há congestionamento na rede de transmissão, forçando a usina a reduzir sua produção.

A Resolução ANEEL nº 1.030/2022 introduz diretrizes específicas para a compensação de usinas eólicas que enfrentam *curtailment*, determinando que o

ressarcimento deve ocorrer em situações de *constrained-off*, quando a produção de energia é reduzida por fatores externos à usina, como falhas na rede de transmissão. O objetivo é garantir que os geradores sejam compensados pelas perdas de geração que não decorrem de problemas internos à operação das usinas (ANEEL, 2022).

Para calcular a compensação, o ONS deve utilizar uma curva de produtividade, que relaciona a velocidade do vento à potência de saída da usina. Nos casos em que a usina não possui um histórico de operação de pelo menos um ano, essa curva é ajustada mensalmente até que o período necessário seja completado, permitindo o cálculo preciso da energia frustrada. O ressarcimento só é efetuado se o tempo acumulado de restrição exceder 78 horas em um ano civil, aplicável às restrições classificadas como decorrentes de indisponibilidade externa.

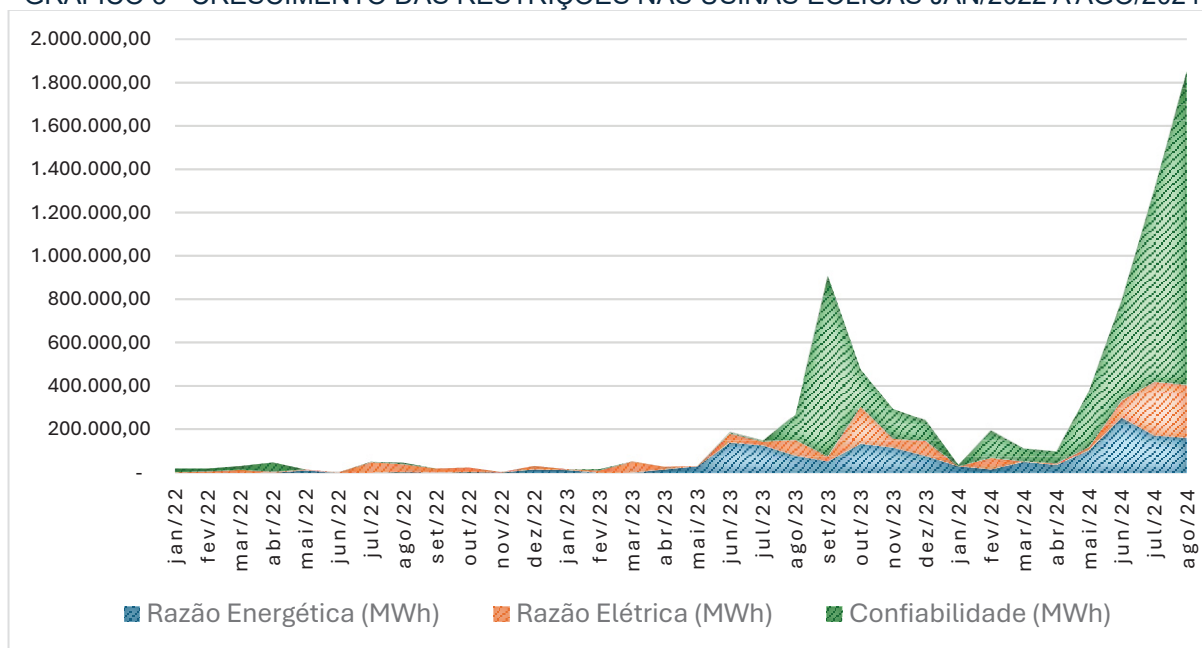
A Resolução ANEEL nº 1.073/2023 expandiu esse tratamento para incluir as usinas fotovoltaicas, aplicando o mecanismo de *constrained-off* a essas instalações. Da mesma forma que nas usinas eólicas, o cálculo da geração de energia frustrada nas usinas fotovoltaicas é baseado em variáveis meteorológicas, como a radiação solar. Para que haja compensação financeira, o tempo acumulado de restrição deve superar 30 horas e 30 minutos em um ano, considerando apenas as restrições de operação causadas por indisponibilidade externa (ANEEL, 2023).

A compensação financeira é realizada por meio do Encargo de Serviço do Sistema (ESS), que é proporcional à energia frustrada. O valor da compensação é calculado com base no Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) do submercado ao qual a usina pertence durante o período de restrição (ANEEL, 2022).

2.2.2. Crescimento do *Curtailment* nas fontes Eólica e Fotovoltaica

A expressiva inserção de fontes renováveis na matriz elétrica, combinada com o descompasso na expansão da Rede Básica, tem resultado em um aumento significativo das restrições de geração impostas pelo ONS. De acordo com dados divulgados pelo próprio ONS nos Relatórios de Restrições de Geração de dezembro 2023 e de agosto 2024, os números consolidados demonstram esse crescimento, como ilustrado no gráfico 3, que destaca as restrições nas usinas eólicas.

GRÁFICO 3 - CRESCIMENTO DAS RESTRIÇÕES NAS USINAS EÓLICAS JAN/2022 A AGO/2024

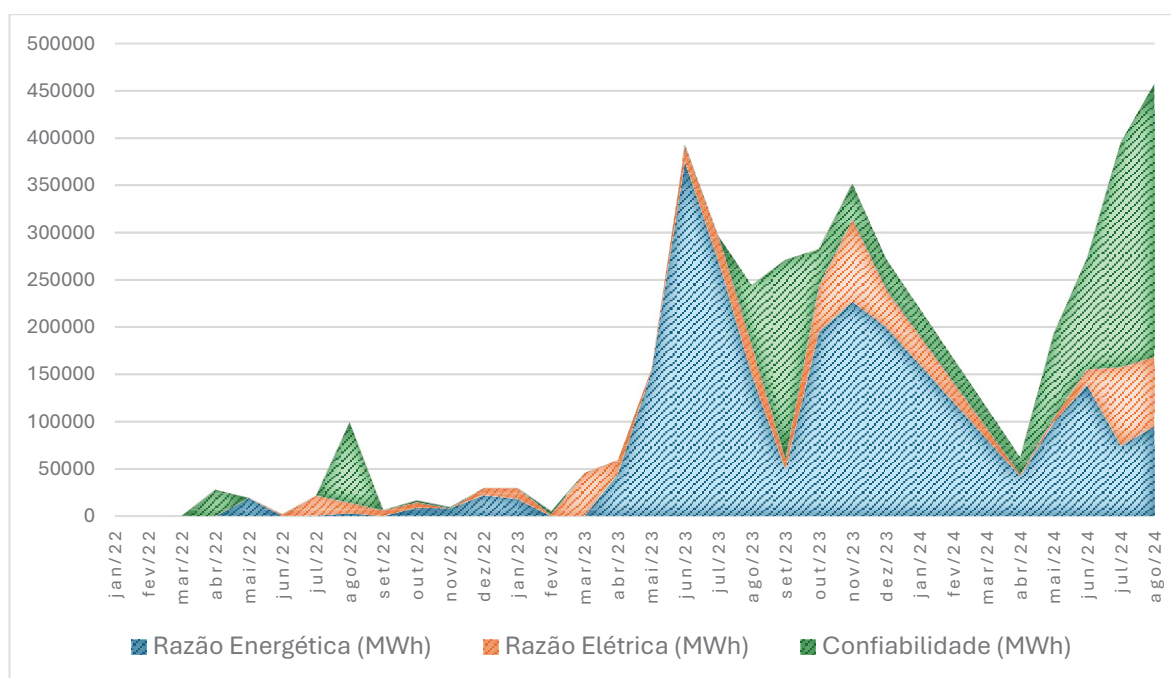


FONTE: O autor (2024).

Ao comparar a quantidade de energia restringida nos meses de agosto de 2023 e agosto de 2024, observamos um aumento de aproximadamente 595%. No mesmo período, ao analisarmos os cortes de energia motivados por questões de confiabilidade — decorrentes da falta de capacidade estrutural do Sistema Interligado Nacional (SIN) e que, segundo a regulamentação vigente, não oferecem compensação financeira aos agentes de geração —, constatamos um crescimento exponencial de cerca de 1150%.

Os relatórios apresentam uma lacuna nos dados sobre as restrições em usinas fotovoltaicas, fornecendo informações apenas para os períodos de abril de 2022 a dezembro de 2023 e de abril de 2024 a agosto de 2024. No entanto, apesar dessa limitação, é possível observar um crescimento expressivo nas restrições, conforme ilustrado no gráfico 4.

GRÁFICO 4 – CRESCIMENTO DAS RESTRIÇÕES NAS USINAS FOTOVOLTAICAS



FONTE: O autor (2024).

Assim como nas usinas eólicas, ao comparar os meses de agosto de 2023 e agosto de 2024, observa-se um aumento nas restrições de geração de aproximadamente 85%. Quando analisadas exclusivamente as restrições motivadas por questões de confiabilidade, o crescimento é ainda mais acentuado, atingindo cerca de 358%.

2.3. Impactos do *Curtailment*

2.3.1. Econômicos: Perdas financeiras para os agentes de geração e impacto no custo da energia

O *curtailment* tem um impacto econômico direto sobre as usinas renováveis, pois reduz a quantidade de energia gerada e, consequentemente, a receita esperada. Além disso, as usinas renováveis que dependem de contratos de longo prazo enfrentam desafios para cumprir suas obrigações contratuais, o que pode gerar multas e penalidades adicionais.

Essas perdas financeiras também afetam o custo da energia. Com a geração renovável limitada, o sistema elétrico precisa recorrer a fontes mais caras, como as

termelétricas, para atender à demanda. Isso resulta em um aumento no preço da energia para o consumidor final.

As restrições na geração de energia, resultaram em prejuízos expressivos para as empresas do setor. Conforme destacado por Rodrigues (2024), segundo levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSolar e a Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEólica, esses prejuízos chegaram a quase R\$ 1 bilhão, com as empresas de energia solar acumulando perdas de R\$ 237 milhões, enquanto as perdas no setor de energia eólica ultrapassaram R\$ 700 milhões.

2.3.2. Técnicos: Efeitos na Garantia Física

A garantia física é um parâmetro crucial para os agentes de geração, determinando a quantidade de energia que uma usina pode assegurar ao sistema e comercializar de forma contínua e segura. Esse valor é calculado com base no desempenho histórico e em simulações operacionais da usina, considerando fatores como a disponibilidade de recursos naturais e a capacidade instalada (ANEEL, 2004).

Em 2015, a Portaria MME nº 416 estabeleceu os critérios para o cálculo da garantia física das usinas eólicas, levando em conta a geração histórica e a previsão de desempenho futuro das usinas. Essa regulamentação criou uma base sólida para a comercialização da energia gerada no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e no Ambiente de Contratação Livre (ACL), garantindo que o montante comercializado refletisse a capacidade real das usinas (MME, 2015).

Assim como as eólicas, com a rápida expansão das fontes solar, a Portaria MME nº 60/2020 foi publicada para definir a metodologia de cálculo da garantia física das usinas solares. Ela introduziu mecanismos de revisão periódica, baseados na energia gerada efetivamente, para assegurar que as usinas solares também tivessem sua garantia física ajustada à realidade operacional (MME, 2020).

Em 2022, a Portaria MME nº 1.851 revisou os montantes de garantia física das usinas eólicas, considerando os dados de geração verificados entre 2018 e 2021 (MME, 2023). No entanto, à medida que o *curtailment* começou a impactar diretamente a quantidade de energia gerada, afetou as revisões da garantia física. A ABEEólica questionou essa revisão, afirmando que os eventos de *curtailment* não

estavam sendo devidamente considerados, o que resultava na subavaliação da capacidade de geração das usinas.

Em resposta a esses questionamentos, o Ministério de Minas e Energia publicou a Nota Técnica nº 594/2023, que revisou a metodologia de cálculo da garantia física, incorporando os períodos de *curtailment*. A nota reconheceu que as usinas não deveriam ser penalizadas por eventos de restrição de geração que não eram de sua responsabilidade, como falta de capacidade de transmissão, e que esses fatores deveriam ser refletidos nas revisões da garantia física (MME, 2023).

Ainda em 2023, o Despacho Decisório nº 12/2023/SNTEP deferiu parcialmente o pedido da ABEEólica, solicitando a reavaliação dos montantes de garantia física das usinas eólicas, com base na nova metodologia que considerava os impactos do *curtailment*. Esse despacho foi um reconhecimento oficial de que os cortes de geração impostos por fatores externos devem ser incorporados aos cálculos, para refletir com precisão a capacidade de geração das usinas eólicas (MME, 2023).

2.4. Perspectivas e Soluções

2.4.1. Uso de armazenamento de energia por baterias

Uma das principais soluções para mitigar os efeitos do *curtailment* é a adoção de tecnologias de armazenamento de energia. Sistemas de baterias de grande escala, como utilizados em países como Austrália e Estados Unidos, podem armazenar o excedente de energia gerada em momentos de baixa demanda, permitindo que essa energia seja utilizada quando necessário.

O uso de baterias para armazenamento de energia é uma solução eficaz para mitigar os impactos da intermitência das fontes renováveis, especialmente solar e eólica. De acordo com Brondani et al. (2023), a implementação de sistemas de armazenamento oferece maior flexibilidade operacional, reduzindo assim a necessidade de desligamento de usinas e o desperdício de energia renovável.

Rocha (2022) ressalta que, apesar dos benefícios claros das baterias para o armazenamento de energia, a adoção em larga escala no Brasil ainda enfrenta desafios significativos, principalmente em termos de viabilidade financeira e falta de regulamentação específica. No entanto, discussões recentes sobre a regulamentação têm gerado expectativas para uma inserção eficaz do armazenamento por baterias.

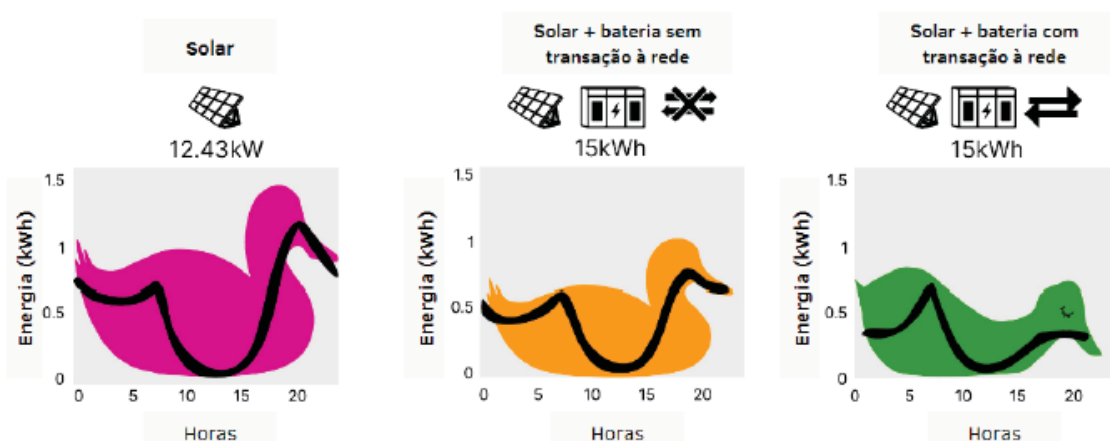
2.4.2. Sistema de gerenciamento de demanda

Os sistemas de gerenciamento de demanda associados às Fontes Renováveis Intermitentes (FRIs) podem colaborar para reduzir a necessidade de desligamentos forçados, promovendo uma melhor adequação da oferta à demanda. A combinação entre tecnologias de armazenamento e a gestão ativa da demanda permite uma operação mais flexível da rede elétrica, evitando *curtailment* e melhorando a eficiência do sistema (PEREIRA; PRADO JUNIOR, 2020)

Uma modelagem realizada na Austrália pelo Instituto de Economia Energética e Análise Financeira (IEEFA, 2023) indicou que o uso de baterias em conjunto com sistemas solares pode alterar significativamente a curva de oferta e demanda de energia solar. O estudo utilizou baterias de 15 kWh combinadas com um sistema solar de 12,43 kW, demonstrando que o armazenamento do excedente de produção solar durante o dia pode mudar a curva tradicional de "pato barrigudo" para uma de "pato adormecido" (BRONDANI et al., 2023).

Essa alteração na curva resulta na redução do pico noturno, à medida que as baterias carregadas assumem o fornecimento de energia aos consumidores. A extensão dessa mudança dependerá da quantidade de baterias disponíveis e da sua utilização em larga escala (BRONDANI et al., 2023).

FIGURA 2 - CURVA DO PATO ADORMECIDO.



FONTE: Adaptado por BRONDANI et al, de IEEFA (2023).

No Brasil, a Aneel aprimorou, em outubro de 2022, o programa de resposta da demanda, tornando-o uma ferramenta estrutural para a gestão do Sistema Interligado Nacional (SIN). Em setembro de 2024, a Aneel aprovou uma nova

modalidade, que permite a contratação de grandes consumidores para reduzir a demanda em momentos críticos, com ofertas entre 5 MW e 100 MW por submercado (SOUTO, 2024).

Em outubro de 2024, o programa de resposta da demanda atingiu um recorde de 260 MW de redução no consumo de energia elétrica, superando a marca anterior de 170 MW. O programa se mostrou uma ferramenta eficaz para garantir a estabilidade do sistema elétrico, ao oferecer alternativas ao ONS para evitar o acionamento de fontes mais caras. Diversos agentes participaram dessa redução, incluindo a Petrobras e a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), contribuindo em subsistemas como o Sul, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste (SOUTO, 2024).

2.4.3. Sugestões para melhorias no marco regulatório e incentivos para redução do *curtailment*

O avanço da regulação no setor de armazenamento de energia é essencial para garantir uma integração eficiente das FRIs e minimizar o impacto do *curtailment*. No Brasil, ainda há um vazio regulatório no que diz respeito à remuneração adequada dos serviços de armazenamento, como apontam Soliano Pereira e Prado Junior (2020).

Ainda destacam que, sem uma regulação específica que valorize os benefícios operacionais e os serviços ancilares prestados pelas baterias, as oportunidades de investimento no setor permanecem limitadas (PEREIRA; PRADO JUNIOR, 2020)

Além disso, o MME tem promovido discussões sobre a necessidade de revisar as regras operacionais e regulatórias para a integração das renováveis na matriz elétrica, considerando a expansão acelerada dessas fontes e o aumento dos eventos de *curtailment*. Propostas para a criação de leilões específicos de maior flexibilização do planejamento do sistema estão em pauta, com o objetivo de reduzir o impacto do *curtailment* sobre as usinas renováveis.

Assim, o MME publicou, em 27 de setembro de 2024, a Portaria GM MME nº 812/2024, que divulga a proposta para consulta pública, com o objetivo de aprimorar as diretrizes de contratação de sistemas de armazenamento que complementem a capacidade elétrica do SIN (MME, 2024).

A proposta apresentada pelo MME para o Leilão de Reserva de Capacidade na forma de Potência (LRCAP) por meio de sistemas de armazenamento de 2025 pretende aumentar a segurança no fornecimento de energia elétrica e melhorar a integração de fontes renováveis ao sistema, por meio da contratação de sistemas de armazenamento que reduzam a intermitência e o *curtailment*.

2.4.4. Alinhamento com o Desenvolvimento Industrial do Brasil

O alinhamento das políticas energéticas com o desenvolvimento industrial do Brasil é fundamental para garantir que o país continue a crescer de forma sustentável. O desenvolvimento de novas tecnologias energéticas, como sistemas de armazenamento e redes inteligentes, pode impulsionar o setor industrial brasileiro, criando oportunidades de inovação e exportação de tecnologias verdes.

A construção e operação de Data Centers demanda grandes quantidades de energia, com consumo global estimado entre 240 e 340 TWh em 2022, representando de 1% a 1,3% da demanda elétrica mundial (IEA, 2022).

Projeções indicam que o consumo de energia por data centers pode crescer em 160% até 2030, impulsionado pelo uso crescente de tecnologias como inteligência artificial. Para mitigar esse impacto, grandes empresas estão investindo em fontes de energia renovável e tecnologias mais eficientes, como pequenos reatores nucleares modulares (GOLDMAN SACHS, 2024).

Por outro lado, a produção de hidrogênio verde, que depende de fontes renováveis, também é altamente intensiva em energia. Em 2022, a demanda global de hidrogênio foi de 95 milhões de toneladas, sendo usada principalmente nos setores de refino e indústria química (REUTERS, 2024).

O Brasil possui um grande potencial para se tornar o maior produtor mundial de hidrogênio verde (H2V), em função de sua matriz energética predominantemente renovável. Atualmente, o país possui projetos-piloto em andamento, com a maior parte concentrada no Nordeste, devido à abundância de energia eólica e solar. Um estudo da consultoria alemã Roland Berger estima que o Brasil poderá faturar R\$ 150 bilhões por ano com o mercado de H2V até 2050, sendo R\$ 100 bilhões provenientes das exportações (SANTIAGO, 2023).

No entanto, o custo de produção ainda é um grande desafio. O pesquisador Diogo Lisbona, da FGV, aponta que o preço de produção do hidrogênio verde é

significativamente mais alto que o do hidrogênio cinza, destacando a necessidade de investimentos em fontes renováveis e certificação de processos para assegurar a competitividade no mercado (SANTIAGO, 2023)

3. CONCLUSÃO

O *curtailment* em usinas renováveis no Brasil apresenta-se como um desafio de grande relevância, especialmente nas fontes eólica e solar, que, embora tenham registrado um crescimento expressivo nos últimos anos, enfrentam barreiras técnicas, econômicas e regulatórias que comprometem seu pleno aproveitamento. Entre os principais desafios identificados, destacam-se a expansão acelerada da matriz elétrica sem o correspondente avanço na infraestrutura de transmissão, a intermitência das fontes renováveis e as limitações impostas pela regulação atual. As soluções propostas incluem o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia e a melhoria das políticas regulatórias, visando a mitigação dos impactos do *curtailment*.

A ação conjunta entre governo, setor privado e sociedade é fundamental para enfrentar esses desafios. O governo deve liderar com políticas públicas eficazes e incentivos que fomentem o desenvolvimento da infraestrutura de transmissão e a adoção de novas tecnologias, enquanto o setor privado precisa investir em soluções tecnológicas e inovações que garantam a viabilidade econômica dos projetos de energia renovável. A colaboração entre esses atores é essencial para manter os níveis de investimento e assegurar que o Brasil continue a expandir sua matriz energética de forma sustentável.

Futuras direções de pesquisa devem se concentrar em aprofundar o conhecimento sobre os impactos econômicos do *curtailment* e desenvolver modelos de previsão mais eficientes para a geração intermitente. Além disso, é crucial monitorar continuamente as políticas implementadas e sua efetividade em reduzir as restrições de geração. O avanço das discussões sobre a regulamentação de armazenamento de energia por baterias e a resposta da demanda são passos importantes que merecem maior atenção acadêmica e prática.

Por fim, o Brasil tem a oportunidade de se consolidar como líder global na produção de energias renováveis, maximizando a eficiência e adotando tecnologias inovadoras. A transição energética bem-sucedida permitirá ao país fortalecer sua

competitividade global, ao mesmo tempo em que cumpre suas metas de descarbonização e reduz o desperdício energético.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW.** Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Acesso em: 11 outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.030, de 26 de julho de 2022. Consolida os atos regulatórios relativos ao programa da Resposta da Demanda e ao procedimento de pagamento de restrição de operação por Constrained-off de usinas eólicas.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 jul. 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221030.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa nº 1.073, de 12 de setembro de 2023. Altera a Resolução Normativa ANEEL nº 1.030, de 26 de julho de 2022, que estabelece, dentre outros, os procedimentos e critérios para apuração e pagamento de restrição de operação por constrained-off.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 set. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231073.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, cria a Conta de Desenvolvimento Energético - CDE, institui a Programação de Universalização do Serviço Público de Energia Elétrica e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 29 abr. 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/10438.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Lei nº 14.120, de 1º de março de 2021. Altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, para dispor sobre o regime de exploração de usinas termelétricas; e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 1 mar. 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14120.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Despacho Decisório nº 12/2023/SNTEP. Revisão dos montantes de garantia física para usinas eólicas à luz de eventos de curtailment.** Diário Oficial da União, Brasília, 2023. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/pdt20221851spde.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

BRASIL. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, sobre a expansão da oferta de energia e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10848.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

BRONDANI, Giovana Bortoluzzi; CANHA, Luciane Neves; LUCCA, Vinícios. **Opções de oferta de flexibilidade ao planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro.** In: VIII CBGD – Congresso Brasileiro de Geração Distribuída, 16 e 17 de novembro de 2023, Belo Horizonte. Disponível em: <https://doi.org/10.53316/cbgd2023.023>. Acesso em: 13 out. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional. 2024.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 11 outubro de 2024.

GOLDMAN SACHS. **AI is poised to drive 160% increase in data center power demand. 2024.** Disponível em: <https://www.goldmansachs.com/insights/articles/AI-poised-to-drive-160-increase-in-power-demand>. Acesso em: 13 out. 2024.

International Energy Agency - IEA. **Data Centres and Data Transmission Networks. 2022.** Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>. Acesso em: 13 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria nº 416, de 1º de setembro de 2015. Estabelece os procedimentos e critérios para o cálculo da garantia física de energia para empreendimentos eólicos.** Diário Oficial da União, Brasília, 2015. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Portaria/MME_416.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria nº 60, de 21 de fevereiro de 2020. Estabelece procedimentos e metodologias para revisão dos montantes de garantia física de energia para usinas solares fotovoltaicas.** Diário Oficial da União, Brasília, 2020. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Portaria/MME_60.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria SPE/MME nº 1.851, de 13 de dezembro de 2022. Revisão dos montantes de garantia física de energia das usinas eólicas. Diário Oficial da União, Brasília, 2022.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2021-2022/Portaria/MME_1851.htm. Acesso em: 13 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Nota Técnica nº 594/2023-DPOG/SNTEP. Revisão de garantia física e inclusão de eventos de constrained-off.** Brasília: MME, 2023. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sei/documento/nota-tecnica/594-2023>. Acesso em: 13 out. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Portaria GM MME nº 812, de 26 de setembro de 2024.** Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/mme-n-812-de-26-de-setembro-de-2024-586969487>. Acesso em: 13 out. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Relatório de Restrições de Geração – Dezembro 2023.** ONS, 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/topo/aceso-restrito>. Acesso em: 13 out. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Relatório de Restrições de Geração - Agosto 2024.** ONS, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/topo/aceso-restrito>. Acesso em: 13 out. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo – PAR/PEL 2023.** Revista PARPEL. Ciclo 2024-2028. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Revista%20PARPEL%202023-3-Fev24%20VF.pdf#search=par%20pel>. Acesso em: 12 outubro de 2024.

PEREIRA, Osvaldo Soliano; PRADO JUNIOR, Fernando Amaral de Almeida. **Sistemas de armazenamento: uma revisão crítica de seu papel na gestão das Fontes Renováveis Intermitentes.** Espaço Energia, n. 33, p. 11-13, out. 2020. Disponível em: <http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/33/EE033-06-03.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

REUTERS. **Latin America gears up for clean hydrogen boom but the road is not smooth. 2024.** Disponível em: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/latin-america-gears-up-clean-hydrogen-boom-road-is-not-smooth-2024-10-04/>. Acesso em: 13 out. 2024.

ROCHA, Luiz Célio Souza. **Otimização multiobjetivo da configuração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas com sistemas de armazenamento de energia: situação atual e possíveis alterações regulatórias.** Brasília: Enap, 2022. 145 p. (Cadernos Enap, 121). Acesso em: 13 out. 2024.

RODRIGUES, Robson. **Cortes de geração de energia renovável causam prejuízos de quase R\$ 1 bi a empresas do setor, diz associação.** Valor Econômico, São Paulo, 27 ago. 2024. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2024/08/27/cortes-de-gerao-de-energia-renovvel-causam-prejuzos-de-quase-r-1-bi-a-empresas-do-setor-diz-associao.ghtml>. Acesso em: 13 out. 2024.

SANTIAGO, Tatiana. **Hidrogênio verde: Brasil será maior produtor mundial de combustível do futuro.** InvestNews, 8 maio 2023. Disponível em: <https://investnews.com.br/infograficos/hidrogenio-verde-brasil-pode-se-tornar-lider-de-producao-mundial/>. Acesso em: 13 out. 2024.

SOUTO, Poliana. **Resposta da demanda bate recorde com redução de 260 MW.** MegaWhat, 9 out. 2024. Disponível em: <https://megawhat.energy/noticias/resposta-da-demanda-bate-recorde-com-reducao-de-260-mw>. Acesso em: 13 out. 2024.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **California's curtailments of solar generation are rising as demand for electricity falls during the day.** Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=56880>. Acesso em: 12 out. 2024.