

CAPÍTULO 7

A ENERGIA NUCLEAR NO CONTEXTO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Data de submissão: 02/11/2024

Data de aceite: 02/12/2024

Thiago Daboit Roberto

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2694615438248688>

Thiago Corrêa Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3266404381934797>

Maximiano Correia Martins

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/3232700055302552>

André Pereira de Almeida

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
- UERJ
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/6871464920281079>

Gustavo da Rosa Nogueira

Universidade Veiga de Almeida - UVA
Rio de Janeiro - RJ
<http://lattes.cnpq.br/0111929569258095>

impactos ambientais e aumentar a segurança no abastecimento, tem incentivado o interesse em fontes alternativas, incluindo a energia nuclear. Este estudo compara a energia nuclear com outras fontes predominantes no Brasil — hidrelétrica, eólica, solar, gás natural e carvão — para avaliar seus benefícios e limitações no contexto nacional. Foram analisados quatro critérios principais: capacidade de geração, fator de capacidade, segurança e custo médio de produção. A energia nuclear destaca-se por seu elevado fator de capacidade, próximo de 91%, superando significativamente as fontes solar e eólica, o que possibilita uma geração estável e contínua. Além disso, suas baixas emissões de CO₂ a tornam uma opção estratégica para mitigar as mudanças climáticas e atingir as metas de descarbonização do país. Em termos de segurança, a taxa de mortalidade associada à energia nuclear é consideravelmente baixa quando comparada a fontes fósseis, o que contrasta com a percepção pública sobre seus riscos. Apesar do alto investimento inicial, a energia nuclear demonstra viabilidade econômica com custos operacionais competitivos a longo prazo. Embora o manejo de resíduos nucleares exija políticas rigorosas, os

RESUMO: A necessidade de diversificar a matriz energética brasileira, visando reduzir

avanços tecnológicos têm permitido uma gestão segura e eficiente. Conclui-se que a energia nuclear possui um papel estratégico na diversificação e estabilização da matriz energética brasileira, complementando as fontes renováveis e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Recomenda-se, portanto, o investimento em tecnologia e em conscientização pública para maximizar o potencial dessa fonte no setor energético nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Nuclear; Matriz Energética Brasileira; Sustentabilidade Energética; Fontes Renováveis; Diversificação Energética.

ENERGY IN THE CONTEXT OF THE BRAZILIAN ENERGY MATRIX

ABSTRACT: The need to diversify Brazil's energy matrix to reduce environmental impacts and enhance supply security has encouraged interest in alternative sources such as nuclear energy. This study compares nuclear energy with other predominant sources in Brazil — hydroelectric, wind, solar, natural gas, and coal — to evaluate their benefits and limitations in the national context. Four main criteria were analyzed: generation capacity, efficiency (capacity factor), safety, and average production cost. Nuclear energy stands out for its high capacity factor, around 91%, which surpasses that of solar and wind sources, allowing stable and continuous generation. Additionally, its low CO₂ emissions make it a strategic option to mitigate climate change and achieve the country's decarbonization targets. In terms of safety, the mortality rate associated with nuclear energy is considerably lower compared to fossil sources, contrasting with public perception of its risks. Despite high initial investment, nuclear energy demonstrates economic feasibility with competitive operational costs over the long term. Although nuclear waste management requires strict policies, technological advances enable safe and efficient handling. It is concluded that nuclear energy has a strategic role in diversifying and stabilizing Brazil's energy matrix, complementing renewable sources and reducing dependence on fossil fuels. Investment in technology and public awareness is recommended to maximize this source's potential in the national energy sector.

KEYWORDS: Nuclear Energy; Brazilian Energy Matrix; Energy Sustainability; Renewable Sources; Energy Diversification.

1 | INTRODUÇÃO

Diante do aumento exponencial da demanda por energia e das consequências ambientais das fontes fósseis, o Brasil enfrenta a necessidade urgente de diversificar sua matriz energética. Essa diversificação é essencial para garantir a segurança do abastecimento energético, reduzir impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável. Atualmente, com uma matriz energética majoritariamente dependente de hidrelétricas, o país enfrenta desafios relacionados à sazonalidade e à disponibilidade de recursos hídricos, o que torna a expansão de outras fontes energéticas uma prioridade estratégica.

Em um contexto global em que a busca por fontes de energia mais limpas e eficientes é cada vez mais incentivada, a energia nuclear emerge como uma alternativa estratégica e promissora. Embora a tecnologia nuclear apresente a capacidade de gerar grandes

quantidades de energia com baixa pegada de carbono, ela é frequentemente associada a riscos e preocupações ambientais na percepção pública (Rossi, 2019). No Brasil, a energia nuclear ocupa uma posição modesta na matriz elétrica, representada principalmente pelas usinas de Angra 1 e Angra 2. No entanto, essa tecnologia oferece vantagens substanciais para diversificar e estabilizar a oferta de energia, destacando-se pela alta eficiência, menor ocupação de área e capacidade de produção contínua, independentemente das variações sazonais.

A diversificação da matriz energética alinha-se com os compromissos brasileiros em fóruns internacionais para a redução de emissões de poluentes e combate às mudanças climáticas. Dessa forma, o Brasil precisa expandir a participação de fontes alternativas, como a energia solar e eólica, e revisar o papel estratégico da energia nuclear no cenário nacional.

Este trabalho objetiva explorar o papel da energia nuclear na matriz energética brasileira, comparando-a com outras fontes, como a energia solar, eólica, hidrelétrica, gás natural e carvão. Para tanto, são abordados aspectos técnicos e econômicos de cada fonte, com ênfase em quatro critérios principais: capacidade de geração, eficiência, segurança e custo médio de produção. Espera-se que a análise ofereça subsídios técnicos para a compreensão e avaliação da energia nuclear como alternativa viável para o setor energético brasileiro.

2 | CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

A matriz energética brasileira caracteriza-se por uma elevada dependência de fontes renováveis, com 50,16% provenientes de hidrelétricas, 13,19% de eólica e 5,19% de solar, totalizando 68,54%, conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2024a). Esse perfil energético reflete a abundância de recursos hídricos no país, consolidando as hidrelétricas como principal fonte de geração de eletricidade. No entanto, essa predominância torna o país vulnerável a oscilações sazonais e eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, que comprometem a regularidade do abastecimento (ONS, 2024b). Em períodos de estiagem, a redução no nível dos reservatórios obriga o país a recorrer às usinas termoelétricas, que geralmente utilizam combustíveis fósseis, elevando os custos e as emissões de gases de efeito estufa.

Para mitigar essa vulnerabilidade e atender à crescente demanda por energia, o Brasil vem ampliando a participação de outras fontes. Nos últimos anos, houve um aumento significativo na capacidade instalada de energia eólica e solar conforme o Ministério de Minas e Energia (MME, 2024), as quais são estratégicas para reduzir a dependência hídrica e as emissões de carbono. Contudo, essas fontes enfrentam o desafio da intermitência, ou seja, a variabilidade na produção de energia em função das condições climáticas.

A energia nuclear, embora representando cerca de 1% da capacidade instalada de geração de energia elétrica (ONS, 2024a), possui características que complementam a matriz elétrica. Utilizando fissão nuclear, o Brasil gera eletricidade de forma contínua e previsível, independentemente das condições climáticas, o que fornece uma base de eletricidade estável que complementa as fontes renováveis intermitentes. Adicionalmente, a geração nuclear é caracterizada por baixa emissão de carbono e requer uma área significativamente menor em comparação com outras fontes de alta capacidade, como as hidrelétricas.

Apesar das vantagens, a expansão da energia nuclear no Brasil enfrenta desafios consideráveis. A percepção pública sobre a segurança das usinas nucleares permanece negativa, influenciada por acidentes históricos como Chernobyl e Fukushima (Harvard Kennedy School, 2014). Além disso, o elevado custo inicial e a complexidade associada ao gerenciamento de resíduos nucleares fazem da expansão dessa tecnologia um tema de debate no setor energético e ambiental. Ainda assim, a energia nuclear é considerada uma opção estratégica em um cenário de transição para uma matriz mais diversificada e resiliente.

Em resumo, o cenário energético brasileiro demanda uma abordagem equilibrada que combine diferentes fontes de energia. As fontes de base, como a hidrelétrica e a nuclear, fornecem eletricidade de forma contínua para atender à demanda mínima, enquanto as fontes de ponta, como a solar e a eólica, operam de forma intermitente para suprir picos de consumo, aumentando a flexibilidade do sistema. Neste contexto, a energia nuclear desempenha um papel essencial ao oferecer uma fonte confiável e estável para a matriz energética do país.

3 | DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA

Para entender a composição atual da matriz elétrica do Brasil, é essencial analisar o balanço de carga e geração disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que apresenta uma visão consolidada das fontes de energia e suas respectivas capacidades em megawatts (MW). Esse panorama permite identificar como cada fonte contribui para o fornecimento de eletricidade no país, refletindo as prioridades e os desafios específicos da matriz energética brasileira.

Na Figura 1, observa-se o balanço de carga e geração do Sistema Integrado Nacional (SIN), o qual destaca a predominância de fontes renováveis na matriz energética brasileira, sendo composto por 51,3% de hidrelétricas, 20,1% de eólicas, 12,7% de solares, 13,4% de termelétricas e 2,4% de nucleares.



Valores acumulados no dia em MWmed até: 23:44

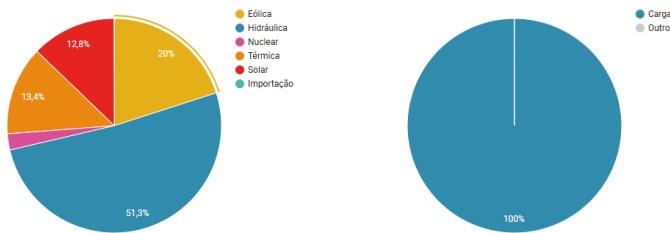


Figura 1: Balanço carga e geração do Brasil (ONS, 2024c)

3.1 Energia Hidrelétrica

As hidrelétricas constituem a base da matriz elétrica brasileira, respondendo pela maior parcela de geração, conforme evidenciado na Figura 1. Essa dependência é sustentada pela abundância de recursos hídricos no país, mas também apresenta vulnerabilidades, conforme ilustra a Figura 2. Embora a geração hidrelétrica mantenha uma média confiável, ela apresenta variações significativas ao longo dos últimos 10 anos, com picos e quedas relacionados a fatores sazonais e climáticos.

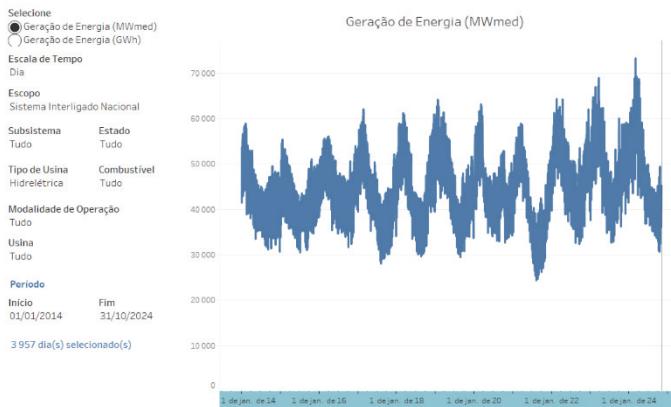


Figura 2: Geração de energia hidrelétrica Brasil (ONS, 2024d).

3.2 Energia Solar

A energia solar fotovoltaica, apesar de representar uma pequena porcentagem do total gerado atualmente, mostra um rápido crescimento, conforme observado na Figura 3. Esse crescimento tem sido impulsionado pela redução dos custos de instalação e pelo incentivo governamental. A energia solar, sendo intermitente e dependente das condições climáticas, possui o potencial de aliviar a demanda durante os períodos de maior incidência solar, funcionando como uma fonte complementar à geração de base.

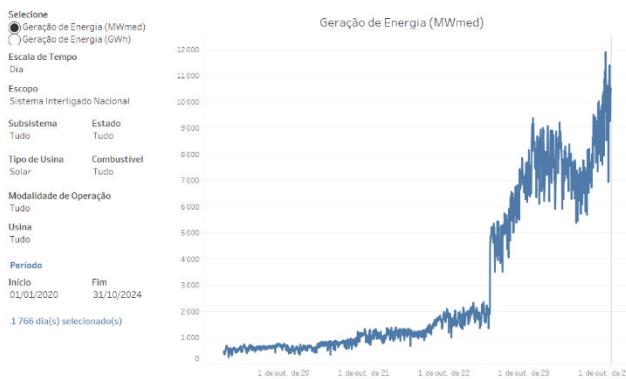


Figura 3: Geração de energia solar Brasil (ONS, 2024d).

3.3 Energia Eólica

A energia eólica tem se expandido significativamente, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, onde a constância e a intensidade dos ventos garantem altos fatores de capacidade, conforme evidenciado na Figura 4. Entretanto, essa fonte ainda apresenta variações consideráveis de geração, devido à dependência de condições atmosféricas favoráveis, como ventos constantes.

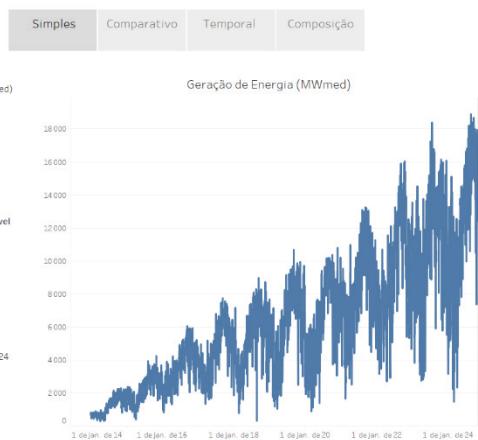


Figura 4: Geração de energia eólica Brasil (ONS, 2024d).

3.4 Energia Termelétrica a Gás e Carvão

As usinas termelétricas a gás natural e carvão desempenham um papel importante como fontes de reserva, sendo acionadas em períodos críticos, especialmente durante estiagens severas. A Figura 5 ilustra a capacidade dessas usinas em atender à demanda necessária para equilibrar a matriz energética. Embora sua contribuição seja fundamental para garantir a segurança do fornecimento, essas fontes emitem quantidades significativas de CO₂ e têm um custo operacional elevado. No Brasil, o gás natural é mais utilizado do que o carvão, refletindo uma escolha tanto ambiental quanto econômica para a geração de energia de reserva (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024a).



Figura 5: Geração de energia térmica (ONS, 2024d).

3.5 Energia Nuclear

A energia nuclear ocupa uma posição modesta na matriz elétrica brasileira, porém destaca-se como uma fonte de base altamente eficiente e de baixa emissão de carbono. A Figura 6 ilustra a estabilidade da geração nuclear, que fornece eletricidade continuamente, independentemente das condições climáticas. As quedas periódicas, que podem reduzir a geração a quase zero, são devidas a manutenções programadas, um procedimento comum para assegurar a segurança e a operação contínua das usinas nucleares. Após essas paradas, a geração retorna à normalidade, evidenciando a confiabilidade e a importância da energia nuclear como uma fonte estável no SIN.

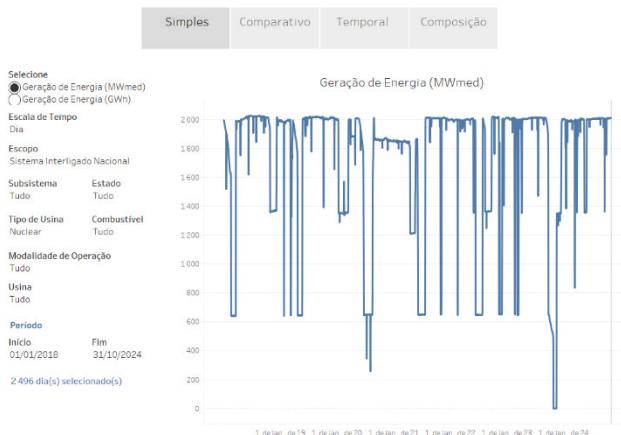


Figura 6: Geração de energia nuclear (ONS, 2024d).

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das principais fontes de energia será conduzida com base nos critérios estabelecidos: capacidade de geração, eficiência (fator de capacidade), segurança e custo médio de produção. A Tabela 1, a seguir, sintetiza as principais características de cada fonte de energia, incluindo sua participação na matriz, fator de capacidade, custo médio e emissões de CO₂, complementando as discussões que seguem.

Fonte de Energia	Participação na Matriz (%)	Fator de Capacidade (%)	Custo Médio (centavos de R\$/kWh)	Emissão de CO ₂ (g/kWh)	Características e Desafios Principais
Hidrelétrica	51,3%	~45	2 - 5	Baixa	Alta eficiência; vulnerável a secas e sazonalidade
Eólica	20,1%	~41	7 - 15	0	Expansão rápida; intermitência dependente do vento
Solar	12,7%	~26	8 - 13	0	Crescimento acelerado; dependente de condições climáticas
Termelétrica (Gás e Carvão)	13,4%	~43 (gás), ~56 (carvão)	38 - 60	Alta	Fonte de reserva; alta emissão de CO ₂
Nuclear	2,4%	~91	3 - 4	Muito baixa	Geração contínua; alto custo inicial; baixa emissão

Tabela 1: Comparação das Principais Fontes de Energia na Matriz Elétrica Brasileira (DIE/MME, 2016; EPE, 2024b, 2024c, 2008b, 2006).

4.1 Capacidade de Geração

A capacidade de geração é essencial para atender à demanda nacional de eletricidade, especialmente em períodos de alta demanda e baixa pluviosidade. A energia hidrelétrica, que responde por 51,3% da matriz energética, constitui a principal fonte de energia no Brasil devido à disponibilidade de recursos hídricos. Fontes renováveis intermitentes, como eólica (20,1%) e solar (12,7%), têm se expandido e são importantes para complementar a matriz. A energia nuclear, embora corresponda a apenas 2,4% da matriz, oferece uma vantagem estratégica, pois sua capacidade de geração constante e independência de fatores climáticos contribuem para a estabilidade do sistema e fornecem suporte durante períodos de baixa produção de outras fontes, como hidrelétricas e eólicas.

4.2 Eficiência

O fator de capacidade mede a eficiência operacional, indicando o quanto cada fonte opera próxima ao seu potencial máximo anual. A energia nuclear apresenta o maior fator

de capacidade, com aproximadamente 91%, evidenciando a confiabilidade e a operação contínua das usinas nucleares, que geram eletricidade de maneira estável. As hidrelétricas possuem um fator de capacidade em torno de 45%, sendo altamente eficientes em condições normais de pluviosidade, mas vulneráveis à estiagem. As fontes eólicas e solar apresentam fatores de capacidade de 41% e 26%, respectivamente, devido à dependência de condições climáticas, como vento e radiação solar, limitando sua confiabilidade como geração de base. As termelétricas a gás e carvão, com fatores de capacidade de 43% e 56%, respectivamente, são essenciais para complementar a geração, mas o custo e o impacto ambiental restringem seu uso contínuo.

4.3 Segurança

A segurança é um critério fundamental na escolha das fontes de energia, considerando tanto o impacto sobre a saúde pública quanto o risco de acidentes. A energia nuclear, apesar da complexa percepção pública decorrente de eventos históricos como Chernobyl e Fukushima, apresenta uma das menores taxas de mortalidade por TWh gerado. De acordo com Conca (2012), a taxa de mortalidade da energia nuclear é de aproximadamente 0,1 mortes por TWh nos Estados Unidos e 90 mortes por TWh globalmente, significativamente inferior à das fontes fósseis. As termoelétricas a carvão e óleo têm as maiores taxas de mortalidade por TWh, com o carvão contribuindo para cerca de 100.000 mortes por TWh globalmente, atingindo até 170.000 mortes por TWh na China, principalmente devido às emissões de poluentes atmosféricos que causam doenças respiratórias e cardiovasculares. Em comparação, a energia eólica e solar apresentam taxas de mortalidade relativamente baixas, com 150 mortes por TWh para a eólica e 440 mortes por TWh para a solar, associadas a acidentes durante a instalação e manutenção dos equipamentos. A hidrelétrica apresenta baixa mortalidade na operação, mas eventos de rompimento de barragens podem resultar em alto impacto, com uma taxa média global de mortalidade de 1.400 mortes por TWh, variando conforme as condições de segurança e regulamentação de cada país.

4.4 Custo Médio de Produção

O custo de produção é um fator crucial para avaliar a viabilidade econômica e competitividade das fontes de energia. A energia hidrelétrica é a fonte mais econômica no Brasil, com custos entre 2 e 5 centavos de dólar por kWh, devido à baixa manutenção e longa vida útil. A energia nuclear, com custo médio de 3 a 4 centavos por kWh, é competitiva a longo prazo, pois, embora o custo inicial de construção e o gerenciamento de resíduos sejam elevados, a eficiência operacional e baixa emissão de CO₂ justificam o investimento. As eólica e solar possuem custos mais altos, entre 7 e 15 centavos por kWh para eólica e

entre 8 e 13 centavos para solar, refletindo o custo da infraestrutura e a intermitência. As termelétricas (gás e carvão) têm custos médios de 38 a 60 centavos por kWh, sendo que o impacto ambiental das emissões de CO₂ e a dependência do preço dos combustíveis elevam o custo real para a sociedade.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa dos critérios revela que a energia nuclear, apesar de sua participação modesta na matriz energética brasileira, possui características que a tornam uma solução estratégica para a diversificação e estabilização do sistema. Com alta capacidade de geração, eficiência operacional, baixo custo a longo prazo e baixa emissão de CO₂, a energia nuclear se destaca como uma alternativa viável para reduzir a dependência de fontes fósseis e de renováveis intermitentes.

Ao combinar fontes de base, como hidrelétrica e nuclear, com fontes intermitentes, como eólica e solar, o Brasil pode alcançar uma matriz energética mais equilibrada e resiliente. Em um contexto de transição para uma matriz de baixo carbono, a expansão da energia nuclear, associada a um planejamento rigoroso e à conscientização pública sobre sua segurança, pode contribuir para que o Brasil atinja suas metas de sustentabilidade, assegurando ao mesmo tempo uma fonte de energia estável e confiável.

REFERÊNCIAS

CONCA, J. **How Deadly Is Your Kilowatt? We Rank The Killer Energy Sources.** Forbes, 2012. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2012/06/10/energys-deathprint-a-price-always-paid/#52abb560709b>. Acesso em: 20 jul. 2019.

DIE/MME. **Energia Solar no Brasil e Mundo.** In: DIE/MME. Brasília: [s.n.], 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 1 nov. 2024.

EPE. **Plano Nacional de Energia – PNE 2030 - Geração Termonuclear.** In: EPE. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE 2030 - Geração Termonuclear.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE%2030%20-%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Termonuclear.pdf)>.

EPE. **Plano Nacional de Energia – PNE 2030 - Gás Natural.** In: EPE. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE 2030 - Gás Natural.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-175/PNE%2030%20-%20G%C3%A1s%20Natural.pdf)>.

HARVARD KENNEDY SCHOOL. **The Cost of Renewable Energy: An Evidence-Based Review.** Cambridge: Harvard Kennedy School, 2014. Disponível em: <https://www.hks.harvard.edu/publications/cost-renewable-energy-evidence-based-review>. Acesso em: 1 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Brasil bate recorde de expansão da energia solar em 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-bate-recorde-de-expansao-da-energia-solar-em-2023>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Balanço de Energia**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Carga e Geração**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao>. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Dados hidrológicos e níveis dos reservatórios**. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados_hidrologicos_niveis.aspx. Acesso em: 1 nov. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **O Sistema em Números**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 1 nov. 2024.

ROSSI, A. **Tudo o que você precisa saber sobre as usinas nucleares de Angra 1 e 2, e por que são diferentes de Chernobyl**. BBC News Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-48683942>. Acesso em: 20 jul. 2019.