

Contribuições da Engenharia Elétrica no Contexto da Transição Energética

Electrical Engineering Contributions to the Energy Transition

Kauê Henrique de Sousa¹, Stefani Caroline Leal de Freitas¹, Adélcio Maximiano Sobrinho¹ e Viviane Fernandes Moreira¹

¹ Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 24/11/2025

Data de aceitação do manuscrito: 25/03/2026

Data de publicação: 02/04/2026

Resumo— A transição energética global exige soluções inovadoras para integrar fontes renováveis, aumentar a eficiência energética e modernizar a infraestrutura. No Brasil, a engenharia elétrica desempenha um papel fundamental no avanço dessa transição, aproveitando os abundantes recursos renováveis do país e as tecnologias emergentes. Este artigo explora as principais contribuições da engenharia elétrica no contexto brasileiro, com foco na geração sustentável de energia (solar, eólica, biomassa), sistemas de armazenamento de energia, implantação de redes inteligentes (*smart grids*), eletrificação do transporte e áreas das telecomunicações como a utilização de redes ópticas e estrutura 5G para pontos de conexão dessas estruturas interconectadas. Estudos de caso, como usinas solares de grande escala no contexto óptica e projetos de redes inteligentes em centros urbanos, ilustram aplicações práticas. Desafios como a intermitência da rede, altos custos de armazenamento e disparidades regionais são analisados, juntamente com oportunidades para inovação em políticas públicas, privadas e desenvolvimento de mão de obra. Ao abordar dimensões técnicas, econômicas e regulatórias, este trabalho destaca o potencial do Brasil para liderar a inovação em energias renováveis, promovendo um futuro energético resiliente e promissor.

Palavras-chave— Engenharia Elétrica, Transição energética, Telecomunicações

Abstract— *The global energy transition demands innovative solutions to integrate renewable sources, enhance energy efficiency, and modernize infrastructure. In Brazil, electrical engineering plays a key role in driving this transition by leveraging the country's abundant renewable resources and emerging technologies. This article explores the main contributions of electrical engineering in the Brazilian context, focusing on sustainable energy generation (solar, wind, biomass), energy storage systems, the deployment of smart grids, transportation electrification, and telecommunications applications, such as optical networks and 5G infrastructure for interconnection points. Case studies, including large-scale solar power plants and smart grid projects in urban centers, illustrate practical applications. Challenges such as grid intermittency, high storage costs, and regional disparities are analyzed, along with opportunities for innovation in public and private policy and workforce development. By addressing technical, economic, and regulatory dimensions, this study highlights Brazil's potential to lead innovation in renewable energy, fostering a resilient and promising energy future.*

Keywords— *Electrical Engineering, Energy Transition, Telecommunications*

I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, intensificadas nas últimas décadas pelo acúmulo de gases de efeito estufa derivados da queima de combustíveis fósseis, representam uma ameaça crítica à estabilidade ambiental e socioeconômica global [1]. Diante desse cenário, a transição energética surge como um imperativo estratégico, caracterizado pela substituição progressiva de fontes poluentes por energias renováveis e pela promoção da

eficiência energética [2, 3]. Essa transformação transcende a mera diversificação da matriz energética, abrangendo a eletrificação de setores como transporte e indústria, além da modernização de infraestruturas [4, 5]. Nesse contexto, a Engenharia Elétrica assume papel central, viabilizando soluções tecnológicas para integração de fontes intermitentes, otimização de redes e armazenamento de energia.

Internacionalmente, o Acordo de Paris reforça a urgência da descarbonização, incentivando países a adotarem políticas alinhadas à sustentabilidade [1]. O Brasil destaca-se como protagonista nesse movimento, com uma matriz elétrica composta por 84% de fontes renováveis, como hidrelétricas, eólica, solar e biomassa [6]. A liderança

histórica em energia hidroelétrica é complementada pelo crescimento acelerado de parques eólicos no Nordeste e usinas solares no Centro-Oeste, regiões beneficiadas por recursos naturais abundantes [7]. A biomassa, especialmente a derivada da cana-de-açúcar, consolida-se como fonte complementar, garantindo flexibilidade e resiliência ao sistema elétrico nacional [8].

A integração de tecnologias de telecomunicações desempenha um papel estratégico na consolidação da transição energética, ao viabilizar a modernização e automação dos sistemas elétricos. Ferramentas como a Internet das Coisas (IoT), redes de fibra óptica e comunicações dedicadas tornam possível a criação de redes elétricas inteligentes, capazes de monitorar e controlar, em tempo real, diferentes componentes do sistema energético. Esse nível de conectividade permite a gestão precisa de micro redes, a resposta rápida a variações na geração e demanda, e a integração eficiente de fontes intermitentes, como solar e eólica [9, 10]. Além disso, a utilização de infraestrutura de telecomunicações avançada garante a transmissão segura e contínua de dados essenciais à operação do sistema, contribuindo para a redução de perdas técnicas, o aumento da confiabilidade da rede e a otimização do consumo energético [11]. Dessa forma, a convergência entre Engenharia Elétrica e tecnologias de comunicação constitui um alicerce fundamental para alcançar maior eficiência, sustentabilidade e resiliência no setor energético [12].

A escolha do tema “Contribuições da Engenharia Elétrica no Contexto da Transição Energética” justifica-se pela relevância estratégica do Brasil, que possui potencial para se consolidar como modelo global de energia limpa. Contudo, desafios técnicos persistem, como a integração de fontes intermitentes (solar e eólica) à rede, a necessidade de modernização de sistemas de distribuição e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento. A Engenharia Elétrica responde a essas demandas por meio de redes inteligentes, sistemas de baterias e programas de eficiência energética, como o coordenado pela ANEEL, que reduz perdas e incentiva o consumo consciente [4, 5]. Além disso, a eletrificação de veículos, a integração de micro redes e a aplicação de sistemas de automação com tecnologias de IoT e inteligência artificial reforçam a sinergia entre inovação técnica e sustentabilidade [8].

Este trabalho analisa as contribuições da Engenharia Elétrica para a transição energética no Brasil, explorando o papel das tecnologias de geração renovável, redes inteligentes, armazenamento, eletrificação do transporte e integração com telecomunicações. Aborda o panorama atual da matriz, os desafios técnicos e regulatórios, casos de sucesso nacionais e recomendações para políticas e investimentos que acelerem uma matriz energética sustentável e resiliente [6, 7].

Este trabalho adota uma abordagem de revisão bibliográfica exploratória e explicativa, orientada pela pergunta de pesquisa central: Como a Engenharia Elétrica contribui para viabilizar a transição energética no Brasil, considerando tecnologias de geração renovável, redes inteligentes, armazenamento de energia, eletrificação do transporte e integração com telecomunicações?

A busca foi realizada em bases acadêmicas (SciELO,

Google Scholar) e repositórios oficiais (EPE, ONS, ANEEL), utilizando combinações de termos relacionados à transição energética, engenharia elétrica, matriz renovável brasileira, *smart grids*, armazenamento de energia, eletrificação do transporte e telecomunicações aplicadas ao setor elétrico. Foram priorizadas publicações de 2018 a 2025, com ênfase em fontes oficiais brasileiras e estudos que apresentassem casos nacionais. A seleção privilegiou trabalhos de relevância direta ao tema e caráter técnico ou regulatório, excluindo publicações puramente internacionais sem conexão com o contexto brasileiro ou anteriores a 2018 (exceto referências clássicas). A literatura selecionada foi analisada para identificar convergências, lacunas e oportunidades, permitindo uma síntese crítica das contribuições da Engenharia Elétrica no avanço da transição energética no país.

Assim, este artigo será organizado da seguinte forma: a Seção II aborda o panorama da transição energética no Brasil, destacando a evolução da matriz renovável e políticas públicas. A Seção III explora as contribuições da Engenharia Elétrica, com ênfase em redes inteligentes, armazenamento de energia e eletrificação dos transportes. A Seção IV discute desafios técnicos e oportunidades socioeconômicas, enquanto a Seção V analisa estudos de caso nacionais. Por fim, a Seção VI apresenta conclusões e recomendações para acelerar a transição energética, alinhando desenvolvimento tecnológico e sustentabilidade.

II. PANORAMA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

A transição energética global, impulsionada pela necessidade premente de mitigar as mudanças climáticas e garantir a segurança do suprimento energético, encontra no Brasil um cenário particular e complexo. O país se destaca internacionalmente pela elevada participação de fontes renováveis em suas matrizes, mas enfrenta desafios significativos para consolidar um modelo energético de baixo carbono que seja, ao mesmo tempo, seguro, acessível e sustentável. Esta seção se dedica a analisar o panorama da transição energética no contexto brasileiro, abordando a composição de sua matriz energética e elétrica no contexto brasileiro e mundial, o papel das políticas públicas e regulamentações como indutoras desse processo e os desafios técnicos e regionais que emergem com a crescente integração de novas fontes e tecnologias.

a. Matriz Energética e Elétrica: Panorama Brasileiro

A transição energética no Brasil se destaca no cenário global pela alta participação de fontes renováveis. Em 2023, as fontes renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) brasileira, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [13]. Esse percentual é significativamente superior à média global de 14,7% registrada em 2022 [14, 13, 15], refletindo o papel central das renováveis em setores como transportes, indústria, uso residencial e geração elétrica.

Dentre as fontes renováveis que compõem a matriz energética nacional, destacam-se os derivados da cana-de-açúcar (16,9%), a energia hidráulica (12,1%), a

Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023

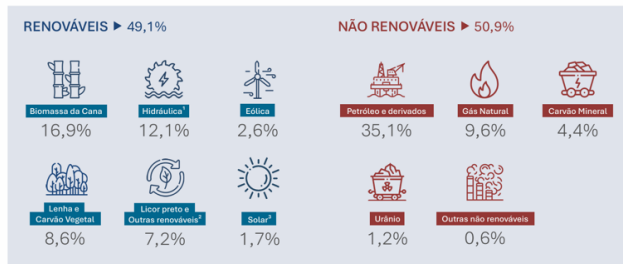
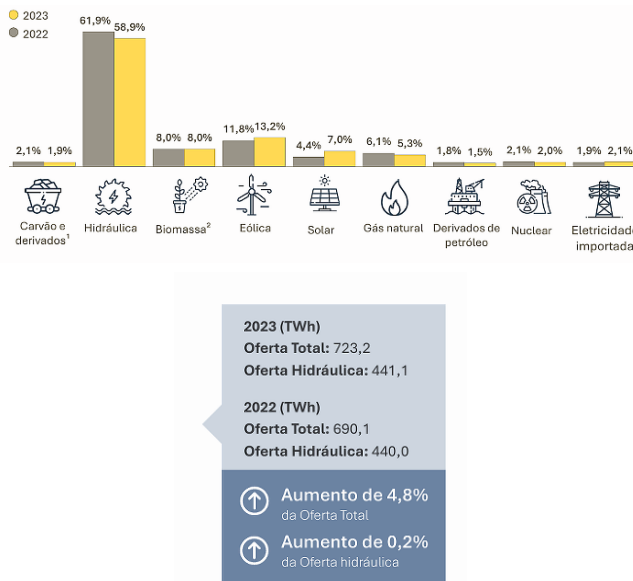


Figura 1: Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) em 2023 [17, 18].



A matriz elétrica brasileira em 2023 apresentou mudanças em função da estabilidade do regime hídrico associada ao aumento da geração eólica e solar.

Figura 2: Matriz Elétrica Brasileira em 2023 [17, 18].

lenha e o carvão vegetal (8,6%), além de outras fontes como o licor preto (7,2%), a energia eólica (2,6%) e a solar (1,7%) [13]. Apesar da robusta presença de renováveis, os combustíveis fósseis ainda representam 50,9% da matriz energética, com destaque para o petróleo e seus derivados (35,1%) e o gás natural (9,6%) [13]. O setor de transportes é o principal responsável por essa permanência dos fósseis na matriz. A Figura 1 ilustra a Repartição da Oferta Interna de Energia em 2023.

A matriz elétrica brasileira apresenta um perfil fortemente renovável. Em 2023, 89,2% da eletricidade gerada no país veio de fontes renováveis, bem acima da média global de 30% registrada em 2022 [14, 13, 16]. A energia hidráulica, tradicionalmente a base do sistema, respondeu por 58,4% da geração elétrica, enquanto as fontes eólicas (13,8%), biomassa (8,4%) e solar (8,2%) continuaram a ganhar espaço [13]. A energia nuclear representou 1,2% e as fontes não renováveis (como gás natural e carvão mineral) somaram 11% [13]. De modo que a Figura 2 detalha a Matriz Elétrica Brasileira em 2023.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2024 da EPE, a matriz elétrica brasileira em 2023 contou com as seguintes participações: hidráulica com 58,9%, eólica com 13,2%, biomassa com 8,0%, solar com 7,0%, gás natural com 5,3%, eletricidade importada com 2,1%, nuclear com

2,0%, carvão e derivados com 1,9% e derivados de petróleo com 1,5% [13]. A oferta total de eletricidade atingiu 723,2 TWh, com a hidráulica representando 441,1 TWh, o que significou um aumento de 4,8% na oferta total e 0,2% na oferta hidráulica em relação a 2022 [13].

Esse avanço foi impulsionado por uma expansão recorde em 2024, quando o Brasil adicionou 10,9 GW à sua capacidade instalada, dos quais mais de 91% vieram de novas usinas eólicas e solares [19]. Com isso, a capacidade instalada total do país alcançou 230,5 GW, sendo 84,5% de fontes renováveis, distribuídas principalmente entre hidrelétricas (46,9%), eólicas (14%), solares (9%) e biomassa (7,2%) [14, 20, 19].

Destaca-se também o crescimento da micro e mini-geração distribuída (MMGD), predominantemente solar fotovoltaica. Ao final de 2024, essa modalidade ultrapassou os 33 GW de potência instalada, representando cerca de 22% da capacidade total do país, com projeções para alcançar 49 GW até 2029, tornando-se a segunda maior fonte do Sistema Interligado Nacional (SIN) [20].

As projeções do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apontam que, até 2029, a capacidade instalada combinada de biomassa, eólica e solar centralizada deverá superar a da fonte hidráulica, representando mais de 51% da capacidade total do Sistema Interligado Nacional (SIN) [8, 9]. Até 2028, as fontes eólicas e solar centralizadas devem alcançar 79,8 GW de capacidade [15]. Esse cenário reflete as características singulares da transição energética brasileira, marcada pela expressiva participação de renováveis tanto na matriz energética quanto na matriz elétrica.

A elevada participação de renováveis confere ao setor elétrico brasileiro uma das menores intensidades de emissões de carbono do mundo, com 55,1 kg de CO₂ equivalente por MWh gerado em 2023, nível inferior ao de muitos países desenvolvidos [7]. Essa vantagem coloca o Brasil em posição estratégica na agenda global de mitigação das mudanças climáticas.

No entanto, desafios persistem. A histórica dependência da hidroeletricidade torna o sistema vulnerável a crises hídricas, exigindo diversificação contínua. Além disso, a descarbonização integral da matriz energética depende de avanços na eletrificação do transporte, maior uso de biocombustíveis e fortalecimento de políticas públicas para expandir o uso de fontes limpas em setores ainda intensivos em combustíveis fósseis [14, 21, 22].

b. Políticas Públicas e Regulamentações como Vetores da Transição

Desde o início dos anos 2000, a transição energética brasileira vem sendo impulsionada por um sólido conjunto de políticas públicas e regulação. Nessa estrutura, a ANEEL normatiza incentivos, leilões e tarifas que configuram tanto o ambiente regulado (ACR) quanto o livre (ACL) [23]; o MME, assistido pela EPE, desenvolve estudos estratégicos como o Balanço Energético Nacional (BEN) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) para estabelecer metas de capacidade e a composição do mix energético até 2033 [23]; e o ONS coordena a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), garantindo a estabilidade e a

confiabilidade do despacho de geração [24].

Programas de fomento direto foram determinantes nessa trajetória, tendo o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) se destacado como marco inicial. Criado em 2002, o programa contratou 3,3GW de usinas distribuídos igualmente entre PCHs, biomassa e eólica gerando aproximadamente 150 mil empregos e reduzindo cerca de 2,5 MtCO₂ eq/ano [24]. Em 2024, a ANEEL aprovou as quotas de custeio do PROINFA para 2025, determinando um custo médio de R\$ 543,56/MWh e assegurando a continuidade dos contratos e a estabilidade econômica do programa [25].

Desde 2007, leilões voltados para fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, têm garantido contratos de 20 anos a preços competitivos. Em 2024, verificou-se que mais de 91% dos 10,9GW contratados em leilões de energia nova referiam-se a parques eólicos e solares, de maneira que a Figura 3 representa a Expansão da Matriz Energética Brasileira evidenciando o crescimento expressivo dessas fontes na matriz elétrica [26].

A micro e mini-geração distribuída (MMGD) ganhou nova relevância com a Resolução ANEEL nº 482/2012, que possibilitou a compensação dos excedentes de pequenos geradores na conta de energia [27]. Esse arcabouço normativo foi fortalecido pela Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da GD), que definiu as tarifas de uso da rede (TUST/TUSD) e estabeleceu prazos de transição para manter os incentivos até 2045, buscando equilibrar subsídios e sustentabilidade do sistema. Além disso, a Resolução Normativa ANEEL 1.076/2023 complementou essas medidas ao exigir critérios de suportabilidade para os geradores distribuídos, prevenindo riscos de desconexões em massa durante eventos de instabilidade [28].

Como complemento às políticas já citadas, incentivos fiscais como descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para projetos renováveis estão em revisão para manter a competitividade sem onerar o consumidor [29].

Paralelamente, o governo anunciou, para 2025, a realização de leilões específicos para soluções de armazenagem de energia (baterias) e a condução de estudos de viabilidade para o hidrogênio verde, iniciativas que abrem novos mercados e enfrentam os desafios da intermitência das fontes eólica e solar [29].

c. Desafios Técnicos e Regionais na Consolidação da Transição

A transição energética brasileira é impulsionada por políticas públicas, planejamento técnico e regulação, com apoio da ANEEL, MME/EPE e ONS, que coordenam o Sistema Interligado Nacional (SIN). Programas como o PROINFA e leilões temáticos incentivam fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa [14, 21, 24]. Além disso, o país oferece incentivos fiscais, como descontos nas tarifas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para projetos renováveis, e planeja leilões para baterias e hidrogênio verde [20, 24]. A Figura 4 demonstra a Matriz de Energia Elétrica no SIN em 2024 e 2028 a partir disso o Plano Decenal de Expansão de Energia e o PAR/PEL 2024 projetam que, até 2029, eólica, solar e biomassa superarão a

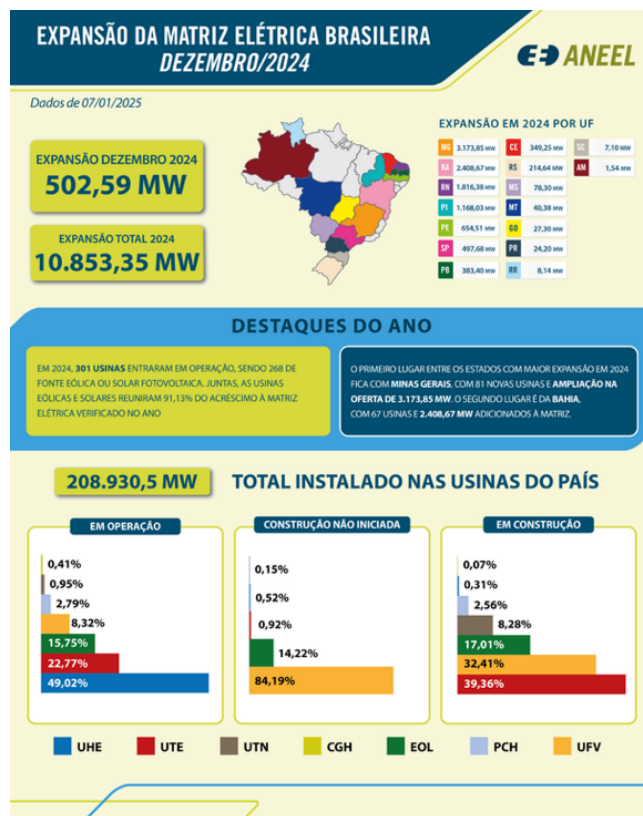


Figura 3: Expansão da Matriz Energética Brasileira [14].

capacidade hidráulica no SIN [14, 21, 26].

Desafios intrínsecos técnicos e regionais interseccionam a consolidação da transição como os Sistemas Isolados, concentrados no Norte, Mato Grosso e Fernando de Noronha, consomem cerca de 3,7 milhões de MWh anuais, operando com termelétricas a diesel, que geram altos custos e impactos ambientais [25]. Parte desses custos é coberta pela Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), que representa R\$ 1,5 bilhão ao ano em Manaus [25]. A Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) também subsidia até 100% dos custos de interligação desses sistemas ao SIN, substituindo o diesel por fontes mais limpas e econômicas, via sub-rogação [30]. Estudos da EPE sugerem que interligar localidades como Nhamundá (AM), Faro (PA) e Terra Santa (PA) pode evitar até 640 mil toneladas de CO₂ entre 2028 e 2042, enquanto conectar comunidades no Acre pode reduzir custos em 20% [31].

A Amazônia Legal enfrenta desafios para universalizar o acesso à energia, com 990 mil pessoas sem eletricidade e 62 hidrelétricas ainda fora do SIN. Inovações como solar flutuante em Tucuruí, que reduziu a área alagada em 12%, e sistemas off-grid com baterias de lítio para 83 comunidades ribeirinhas avançam nessa direção [29]. No Nordeste, R\$ 120 bilhões foram investidos para escoar 18 GW de excedentes, usando tecnologias como STATCOM e linhas HVDC de 800 kV para estabilizar a rede [26].

A integração de fontes intermitentes no SIN exige melhorias para lidar com variações de 70% na eólica e 100% no solar. Inteligência artificial, com dados de 487 estações meteorológicas, reduziu erros de previsão para 3,2%, enquanto 2,4 GW em baterias para controle de frequência garantem 89% de renováveis em 2024, com

MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA

CAPACIDADE INSTALADA NO SIN EM 2024 E 2028

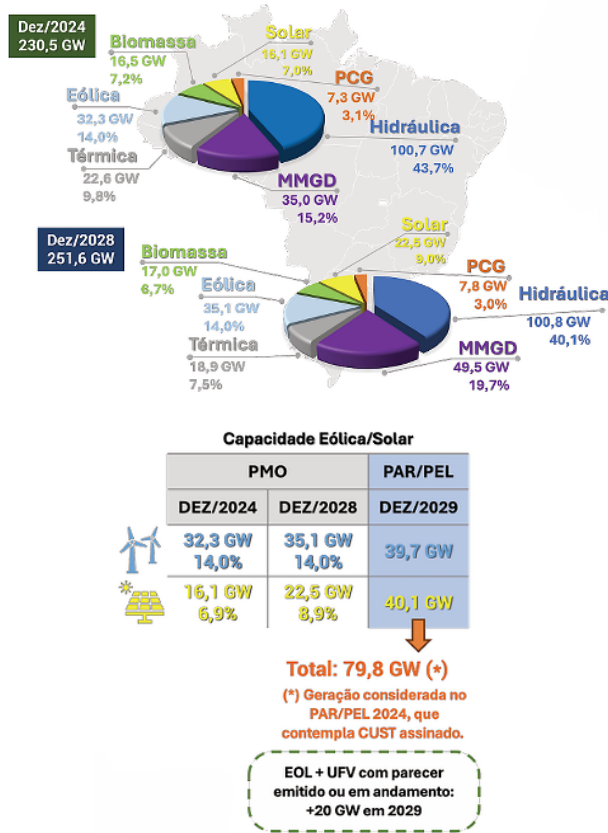


Figura 4: Matriz de Energia Elétrica no SIN em 2024 e 2028 [13].

99,7% de disponibilidade [24, 27].

A modernização da infraestrutura de transmissão no Brasil é essencial para integrar fontes intermitentes e garantir a qualidade e confiabilidade do fornecimento, exigindo investimentos em redes inteligentes, sistemas de armazenamento e tecnologias digitais para monitoramento em tempo real [32]. Essa atualização é crucial para flexibilizar o sistema, assegurar a segurança no fornecimento e expandir o acesso a fontes renováveis [32]. Além disso, a integração dessas tecnologias e a adaptação regulatória para geração distribuída são fundamentais para tornar o sistema energético mais resiliente e sustentável.

III. CONTRIBUIÇÕES DA ENGENHARIA ELÉTRICA

A Engenharia Elétrica desempenha papel central na transição energética brasileira por meio da ampliação de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e PCHs, além da inserção de sistemas de armazenamento em regiões isoladas. Avanços em automação com *smart grids*, IoT e inteligência artificial modernizam a gestão da energia, enquanto a expansão da transmissão, a eletrificação dos transportes e os programas de eficiência energética promovem um sistema mais limpo, seguro e sustentável.

a. Geração de Energia Sustentável no Brasil

A região Nordeste consolidou-se como polo estratégico para a geração solar fotovoltaica, com crescimento de 48% entre 2022 e 2024, alcançando 18 GW de capacidade instalada. O Complexo Solar de São Gonçalo (PI), maior da América Latina, contribuiu com 1,2 GW, utilizando inversores modernos e sistemas bifaciais com rastreamento solar, que aumentam a eficiência em 22% [33].

No mesmo período, o Rio Grande do Norte liderou a geração eólica *offshore*, com 13 novos parques totalizando 2,3 GW, utilizando turbinas de 8 MW e torres hibridizadas para resistência a ventos de até 45 m/s [34]. A conexão dessas usinas à rede foi viabilizada por subestações flutuantes e cabos submarinos de 500 kV, que reduziram perdas de transmissão para 3,5% [35].

A cogeração a partir de biomassa alcançou 21,4 TWh em 2024, com destaque para a usina de Lençóis Paulista (SP), equipada com caldeiras de leito fluidizado circulante de 80 MW. Essas permitem o uso combinado de diferentes tipos de biomassa, com eficiência térmica de 85% e redução de 40% nas emissões de particulados [36]. A usina utiliza controle PID para otimização em tempo real da combustão [37].

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), com potência entre 1 MW e 30 MW, representam 4,7% da capacidade hidráulica nacional, com 127 unidades em operação em Minas Gerais [38]. Avanços técnicos incluem turbinas Kaplan de velocidade variável e geradores de ímã permanente acoplados a conversores *full-scale*, que aumentam a eficiência e reduzem a necessidade de bancos de capacitores em 75% [39]. Apesar disso, o licenciamento ambiental ainda é um entrave, com tempo médio de 8,2 anos [40].

b. Armazenamento de Energia no Contexto Brasileiro

Até 2024, o programa “Energia Sustentável na Amazônia” implantou 34 micros redes híbridas, com painéis fotovoltaicos de 5 MWp e baterias LiFePO4 de 12 MWh. Em Maués (AM), a solução reduziu o consumo de diesel em 87% por meio de algoritmos preditivos LSTM (*Long Short-Term Memory*) com acurácia de 92% [41]. Essas redes utilizam barramentos DC de 1500 V e conversores bidirecionais, integrando baterias e geradores emergenciais. O Programa Energias da Amazônia, com R\$ 820 milhões previstos em investimentos, incluirá um leilão de 49 MW em sistemas isolados com 22% mínimo de fontes renováveis [41].

Segundo a ABSAE, o LCOE (*Levelized Cost of Energy*) de baterias deve cair 28% até 2030, alcançando R\$ 240/MWh, impulsionado por ganhos de escala na produção de células Li-Ion e sistemas de gestão térmica passiva [42]. Modelagens com sistemas de 100 MW/400 MWh projetam receitas adicionais de R\$ 18/MWh via arbitragem temporal no mercado ACR [42]. Análises de fluxo de potência ótimo (OPF) indicam que o armazenamento pode adiar R\$ 2,3 bilhões em investimentos em transmissão na região Norte até 2035 [43].



Figura 5: “Cidades do Futuro” da Cemig (Sete Lagoas - MG) [46].

c. Automação e Controle de Sistemas Energéticos

As *smart grids* brasileiras evoluem com a integração de dispositivos digitais, comunicação bidirecional e algoritmos, incluindo IA, para otimizar a operação do sistema elétrico, com previsão de carga, detecção de falhas e reconfiguração automatizada [44]. Projetos como o “Cidades do Futuro” da Cemig (Sete Lagoas - MG), Figura 5, demonstram ganhos com 5.000 medidores inteligentes e 46 pontos de automação *self-healing*, suportados por redes de fibra óptica [45].

As *smart grids* permitem fluxo bidirecional de energia e dados, promovendo eficiência energética, integração de renováveis, redução de perdas e maior participação do consumidor por meio da geração distribuída (GD) e resposta à demanda [44, 47]. Tecnologias como medidores inteligentes, AMI (Infraestrutura de Medição Avançada), sensores, automação da distribuição, SEM (Sistema de Gerenciamento de Energia), comunicação robusta (fibra, RF, PLC) e armazenamento suportam essa transformação [44, 48].

Desafios para ampliação incluem custos iniciais, padronização, cibersegurança, interoperabilidade e engajamento do consumidor [49]. O projeto “Energia do Futuro” da Enel GO (Equatorial) também evidenciou melhorias com uso de *smart meters* e religadores automáticos [35].

A IoT e a IA complementam essas redes em cidades inteligentes, otimizando consumo, previsão da GD e monitoramento [50]. A engenharia elétrica contribui com sensores, comunicação (5G, LoRaWAN), plataformas de gestão e algoritmos para análise de dados [36].

d. Transmissão e Distribuição de Energia no Brasil

A infraestrutura de transmissão e distribuição é essencial para transportar a energia gerada até os centros de carga. No contexto da transição energética, a integração de fontes renováveis, muitas vezes distantes dos centros consumidores, exige soluções inovadoras da engenharia elétrica.

A inserção de eólica e solar no Nordeste e Norte requer a expansão da malha de transmissão. O PDE 2033 inclui projetos como o bipolo de 800 kV Silvânia – Graça Aranha, conectando o norte de Goiás ao SIN, e a ampliação de subestações (ex.: Luziânia 500/138 kV) [47]. No Norte, linhas de 500 kV interligarão usinas como Belo Monte e hidrelétricas de Rondônia ao eixo Norte-Sul, aumentando a

confiabilidade e levando energia limpa ao Centro-Sul [47].

Em 2023, as perdas elétricas chegaram a 14,1% da energia injetada, com 7,3% técnicas (42,0 TWh) e 6,7% não técnicas (38,2 TWh). As perdas técnicas decorrem do transporte e transformação de energia (efeito Joule, perdas em transformadores, etc.), sendo influenciadas por resistência dos materiais, carregamento e condições ambientais [51, 47]. A engenharia contribui com redes otimizadas, troca de equipamentos obsoletos, bancos de capacitores, modernização da infraestrutura (transformadores mais eficientes, substituição de cabos antigos), do uso de monitoramento digital com sensores e IoT e do planejamento otimizado da rede (melhoria de trajetos e distâncias) [51, 47].

As perdas não técnicas são causadas por furtos, fraudes e erros de leitura. A redução envolve medidores inteligentes, IA para análise de consumo e tecnologias de inspeção [47]. A gestão dessas perdas é vital para a sustentabilidade das distribuidoras e modicidade tarifária.

e. Eletrificação dos Transportes

A mobilidade elétrica global tem crescido rapidamente. Em 2024, a frota mundial de veículos elétricos (VEs), incluindo os modelos totalmente elétricos (BEV) e híbridos *plug-in* (PHEV), em números totais, os modelos eletrificados superaram 17 milhões de unidades emplacadas em todo o mundo, um salto substancial de 25,6% em relação a 2023 [52]. No Brasil, a participação ainda é modesta, mas crescente. Em 2024, a frota veicular brasileira atingiu 123,97 milhões, sendo cerca de 170 mil VEs emplacados, dos quais mais de 70% eram BEVs ou PHEVs. O número de eletropostos cresceu de 4,3 mil para 12,1 mil entre 2023 e 2024 [53].

Esse avanço reflete a articulação entre o setor privado e as políticas públicas. A engenharia elétrica desempenha papel essencial ao desenvolver carregadores rápidos (DC) e ultrarrápidos. Para carregar 80% da bateria em 30 minutos, são necessárias potências de até 100 kW por ponto de recarga. Exemplos como o EFAPOWER EV QC 45, instalado em Vitória-ES, demandam planejamento adequado da rede elétrica para absorver a carga adicional [54].

A integração em larga escala dos VEs pode gerar impactos como sobrecargas, quedas de tensão e distorções harmônicas. Por outro lado, abre oportunidades como a gestão inteligente da demanda, a aplicação de soluções V2G (*Vehicle-to-Grid*), melhoria na qualidade da energia e sinergia com fontes renováveis [54].

Capitais brasileiras têm implementado iniciativas para eletrificar o transporte coletivo. Em São Paulo, o orçamento de 2025 destinou R\$ 2,5 bilhões à eletrificação da frota de ônibus, com decreto municipal exigindo comprovação de viabilidade econômica. A SPTrans prevê a entrega de 100 novos ônibus elétricos no primeiro semestre de 2025. Em Curitiba, um projeto de lei sancionado prevê a aquisição de 70 ônibus elétricos com investimento de R\$ 317 milhões, com operação prevista para iniciar em 2024. Emendas viabilizam receitas extra tarifárias, como publicidade, para reduzir os custos operacionais [55].

Essas iniciativas demonstram o papel ativo dos governos locais na transição energética, com apoio da engenharia

elétrica para especificação técnica, integração à infraestrutura existente e avaliação de viabilidade [53, 55].

f. Eficiência Energética no Brasil

A eficiência energética é um pilar estratégico da transição energética brasileira, com impacto direto na redução da demanda, da tarifa e das emissões. O Programa de Eficiência Energética (PEE), regulado pela ANEEL, exige que distribuidoras invistam 0,5% da receita operacional líquida em projetos de eficiência. Com cerca de R\$ 570 milhões aplicados anualmente, o programa apoiou 1.485 projetos entre 2008 e 2022, gerando 1.776 GWh/ano em economia [56].

Casos de destaque incluem o Pequeno Cotelengo (Curitiba), que reduziu 40% do consumo com energia solar, e várias indústrias que modernizaram iluminação, motores e sistemas de climatização, alcançando economias de 20% a 50%. Em edifícios comerciais, medidas como sensores, HVAC eficientes e gestão automatizada têm gerado resultados consistentes [50, 57].

No setor privado, o Grupo Casas Bahia economizou mais de R\$ 2 milhões/ano com sistemas eficientes em Jundiá (SP), reduzindo 45% do consumo (6,5 GWh) e 270 tCO₂. A Ecogen opera a maior planta de cogeração em edifício comercial do país [56]. A padaria Kim Pães alcançou 27% de economia em iluminação e R\$ 50 mil/ano. PMEs apoiadas pelo PotencializEE também apresentaram retornos rápidos [58].

Tecnologias digitais como BMS, IoT, IA e Big Data ampliam a eficiência, permitindo controle em tempo real e tomada de decisão baseada em dados. Segundo projeções da IEA, essas soluções podem reduzir o consumo energético de edifícios em até 10% entre 2017 e 2040 [59].

Portanto, a engenharia elétrica desempenha papel central na concepção, execução e avaliação técnica desses projetos, contribuindo com conhecimento em sistemas de potência, conversores eletrônicos, controle e instrumentação para uma matriz elétrica mais eficiente e sustentável.

IV. DESAFIOS E OPORTUNIDADE NO BRASIL

A transição energética brasileira enfrenta barreiras significativas, como custos elevados de tecnologias críticas, deficiências tecnológicas em regiões isoladas e déficit de mão de obra especializada. Simultaneamente, o país dispõe de vantagens competitivas substanciais, com elevado potencial solar, políticas públicas de eficiência energética e crescente oportunidade de exportação de tecnologia renovável.

a. Desafios

Um dos principais desafios da transição energética no Brasil é o alto custo e a ausência de um marco regulatório para o armazenamento de energia (*BESS – Battery Energy Storage Systems*). Apesar da queda de 85% nos preços das baterias de íon-lítio entre 2010 e 2023, atingindo cerca de US\$ 115/kWh em 2024, a elevada carga tributária, que pode chegar a 85% do valor do produto, torna projetos economicamente inviáveis [60]. Além disso, a consulta pública da ANEEL (CP 39/2023) e a falta de leilões

específicos para baterias criam insegurança jurídica e atrasam a adoção em larga escala. Estima-se que as perdas associadas ao *curtailment* já somam R\$ 4,8 bilhões desde 2020, montante que poderia ser mitigado pelo uso de armazenamento [61].

A intermitência das fontes renováveis e a limitação da infraestrutura de transmissão também são críticas. A concentração da geração solar e eólica no Nordeste, distante dos centros consumidores, levou o ONS a restringir até 28% da geração solar centralizada. Projeções indicam que o *curtailment* poderá atingir média de 8% no país até 2035, chegando a 11% no Nordeste [61]. Essa restrição já ocasionou fechamento de fábricas e a perda de cerca de 11 mil empregos entre 2024 e 2025, evidenciando graves impactos socioeconômicos.

Outro ponto central é a falta de mão de obra especializada. Apesar de programas como os do SENAI em hidrogênio verde e iniciativas-piloto de eólica *offshore*, a capacitação ainda é insuficiente. A Siemens Energy, por exemplo, destacou a escassez de engenheiros e técnicos qualificados para atuar em tecnologias emergentes [62]. Sem ampliar a formação em áreas como redes inteligentes, mobilidade elétrica e armazenamento, a inovação e a expansão da matriz limpa podem ser comprometidas.

b. Oportunidades

O Brasil apresenta oportunidades estratégicas na transição energética, com destaque para o potencial solar, políticas de eficiência energética e exportação de *know-how* em renováveis. A energia solar é o recurso mais promissor: a capacidade instalada superou 53,9 GW em fevereiro de 2025, representando 21,9% da matriz elétrica e posicionando o país entre os cinco maiores produtores mundiais. O Atlas Solar Brasileiro registra irradiação média entre 4.500 e 6.300 Wh/m², superior a países líderes como a Alemanha que apresenta cerca de 3.500 Wh/m². Essa abundância, aliada à queda dos custos dos equipamentos, sustenta previsões de expansão acelerada e investimentos acima de US\$ 8 bilhões em 2024 [63].

A eficiência energética também é um vetor essencial. O (PEE) da ANEEL mobiliza cerca de R\$ 570 milhões anuais e, entre 2008 e 2022, financiou 1.485 projetos que economizaram aproximadamente 1.776 MWh/ano. No acumulado de 1998 a 2019, políticas públicas evitaram 63,6 TWh de consumo e reduziram 2,8 GW da demanda de ponta [64]. Além do impacto econômico, os programas beneficiam consumidores de baixa renda e promovem inovação em setores como iluminação eficiente, sistemas HVAC e gestão digital de energia [65].

Por fim, o país tem potencial de exportar tecnologia em renováveis. A experiência consolidada em hidrelétricas e biocombustíveis já conferiu ao Brasil reconhecimento internacional, e novos segmentos como solar, eólica, biomassa e hidrogênio verde ampliam essa perspectiva. Projetos em Minas Gerais (hidrogênio verde) e no Nordeste (eólica *offshore*) evidenciam capacidade de liderança tecnológica. Essa inserção pode gerar empregos de alta qualificação e fortalecer a posição brasileira na cadeia global de inovação energética [63].



Figura 6: Complexo Eólico Lagoa do Barro (PI) [68].

V. ESTUDOS DE CASOS NO BRASIL

A transição energética no Brasil é marcada por projetos inovadores que demonstram a aplicação da engenharia elétrica na modernização e diversificação da matriz energética. Estes casos ilustram avanços na geração de energia renovável em larga escala, redes inteligentes e eficiência energética urbana. A seguir, três exemplos notáveis evidenciam as contribuições da engenharia elétrica neste contexto transformador.

a. Complexo Eólico Lagoa do Barro (PI)

O Complexo Eólico Lagoa do Barro, no Piauí, apresentado na Figura 6, é um marco na geração eólica brasileira. Iniciou operações em 2018 com 195 MW de potência, gerados por 65 aerogeradores em 2.854 hectares [66, 67]. Em 2021, uma expansão adicionou 18 aerogeradores e 82,8 MW, elevando a capacidade total para 277,8 MW com 83 aerogeradores [66, 67]. O investimento de R\$ 444 milhões nesta expansão consolidou-o como o maior empreendimento da CGNBE em potência e investimento [66].

Este projeto, da Atlantic Energias Renováveis em parceria com a Acciona Energia e operado pela CGN Brasil, aproveita o alto potencial eólico do Nordeste. A engenharia elétrica foi crucial no dimensionamento, instalação e integração dos aerogeradores à rede nacional. Complexos eólicos de grande porte na região podem gerar mais de 3,3 TWh anualmente [67].

O sucesso do Complexo Lagoa do Barro reside na sua capacidade de geração e no impacto socioeconômico regional característico, impulsionando o desenvolvimento e a modernização tecnológica [66].

b. Usina Solar de Pirapora (MG)

A Usina Solar de Pirapora, em Minas Gerais, é um dos maiores projetos fotovoltaicos da América Latina, com capacidade instalada de 400 MWp [69, 70]. Operada pela EDF Renewables, a usina iniciou operações em 2017, utilizando mais de um milhão de painéis solares em 800 hectares, capazes de abastecer cerca de 420 mil residências anualmente [69, 71].

O investimento total superou R\$ 2 bilhões, com financiamento do BNDES e BNB, sendo a fabricação local dos painéis em São Paulo uma condição para o apoio do



Figura 7: Usina Solar de Pirapora (MG) [72].



Figura 8: Smart Grid em Búzios (RJ) [76].

BNDES [69, 71]. A engenharia elétrica foi essencial no projeto e instalação dos painéis, sistemas de rastreamento solar para maximizar a captação de energia e integração à rede. Mesmo em dias nublados, a produção se mantém cerca de 70% da capacidade [69]. A Atlas Renewables Energy também contribui com projetos como o complexo Lar do Sol, representado na Figura 7, com capacidade de 505 MWac e 579 MWdc, expandindo a energia solar na região [70].

c. Smart Grid em Búzios (RJ)

O projeto *Smart Grid* em Búzios, RJ, pioneiro na modernização da rede elétrica e em cidades inteligentes na América Latina, foi liderado pela Ampla (atual Enel). Visava transformar Búzios, Figura 8, na primeira cidade inteligente da região, com foco em sustentabilidade e eficiência energética [73, 74, 75].

Iniciado em 2011 com R\$ 40 milhões de investimento, o projeto, uma parceria entre Ampla, ANEEL e empresas, instalou medidores inteligentes em domicílios, permitindo monitoramento e gestão eficiente do consumo. Esses medidores viabilizam tarifas horárias e medição bidirecional para geração distribuída, incentivando a produção de energia por moradores [74, 75].

A engenharia elétrica foi central, com oito blocos de trabalho, incluindo Medição Eletrônica Inteligente, Automação de Rede, Veículos Elétricos, Iluminação Pública Eficiente e Geração Distribuída [73]. A iluminação pública com lâmpadas LED e controle remoto reduziu o consumo em 60%, com potencial para 80% [74].

A frota de veículos elétricos, incluindo carros e bicicletas para a Guarda Municipal, e eletropostos, demonstra a abrangência das soluções [73, 74]. O projeto foi reconhecido pela KPMG como um dos dez mais inovadores em infraestrutura sustentável globalmente [74].

VI. CONCLUSÕES

A transição energética não é apenas uma resposta às mudanças climáticas é uma oportunidade histórica de redefinir o modelo de desenvolvimento do Brasil. Este trabalho demonstrou que a Engenharia Elétrica é protagonista nesse processo, articulando inovação tecnológica, eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Ao integrar fontes renováveis, automatizar sistemas, expandir redes inteligentes e viabilizar soluções de armazenamento, a engenharia elétrica transforma desafios em soluções concretas.

O Brasil possui uma matriz elétrica exemplar, com mais de 89% de geração renovável, e avança rapidamente na diversificação de fontes e na modernização da infraestrutura. A convergência entre energia e telecomunicações, por meio de redes ópticas, IoT e inteligência artificial, fortalece a resiliência do sistema e amplia a capacidade de resposta a variações de demanda e geração. Casos de sucesso em geração distribuída, eletrificação de transportes e automação urbana comprovam que a transição energética já está em curso e é viável.

No entanto, é preciso reconhecer as limitações da análise econômica, especialmente no que se refere à estimativa de *payback*. O acesso a dados financeiros, como o valor pago ou contratado por kWh, envolve questões sensíveis e restritas às empresas do setor. Por isso, este estudo adotou o consumo específico (kWh/m³ ou kWh por unidade gerada) como métrica técnica confiável, capaz de refletir ganhos reais de eficiência energética, independentemente da modalidade de contratação ou das fontes envolvidas.

Diante desse cenário, é hora de transformar potencial em política, inovação em impacto. Recomenda-se o fortalecimento de programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), a capacitação técnica de profissionais, a ampliação de incentivos para tecnologias limpas e a criação de ambientes regulatórios que favoreçam a geração distribuída, o armazenamento e a digitalização da rede. A Engenharia Elétrica deve ser vista não apenas como suporte técnico, mas como vetor estratégico de transformação.

REFERÊNCIAS

- [1] GIZ, “Energy transition in brazil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/SCr87>
- [2] PETROBRAS, “Tudo sobre transição energética.” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/MzYAZ>
- [3] 123 ECOS, “Transição energética: caminhos para o futuro,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/yJxKW>
- [4] NEOENERGIA, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/emYgc>
- [5] ANEEL, “Programa de eficiência energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/AomQO>
- [6] MME, “Transição energética: a mudança que o planeta precisa,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/RPzFZ>
- [7] ATLAS RENEWABLE ENERGY, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/BX0Pg>
- [8] ECHO ENERGIA, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/DljsT>
- [9] IBERDROLA, “Redes elétricas e transição energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/S6Kpg>
- [10] FI-GROUP, “O papel das novas tecnologias na transição energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YNZDZ>
- [11] ENERGIA DO FUTURO, “Projeto sistemas de energia do futuro,” 2025, acesso em: 14 out. 2025. [Online]. Available: <https://energiadofuturo.org.br/>
- [12] BRASIL ENERGIA, “Infraestrutura de telecomunicações no setor elétrico,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/Kkyej>
- [13] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS), “Plano da operação elétrica de médio prazo do sin (par/pel 2024): Ciclo 2025–2029, sumário executivo,” ONS, Brasília, DF, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/uRlII>
- [14] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Matriz elétrica brasileira alcança 200 gw,” ANEEL, Brasília, DF, Tech. Rep., Mar. 2024, publicado em: 07 mar. 2024. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/jhrkk>
- [15] M. F. B. d. Oliveira and E. P. d. Rocha, “Análise dos impactos da lei n° 14.300/2022 no setor fotovoltaico de microgeração distribuída,” in *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2022, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/BnkcA>
- [16] S. C. B. Vieira, “Tratamento de dados do programa de eficiência energética no estado do tocantins,” Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Elétrica). Orientador: Alcy Monteiro Júnior, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2023.
- [17] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Matriz energética e elétrica,” EPE, Rio de Janeiro, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/LDrx3>
- [18] —, “Balanço energético nacional 2024: Ano base 2023, relatório síntese,” EPE, Rio de Janeiro, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/nXRvW>
- [19] J. R. d. F. Rodrigues *et al.*, “Transição energética e geração de energia solar fotovoltaica: revisão sistemática do panorama nacional e internacional,” *Revista OKARA: Geografia em debate*, vol. 18, no. 1, pp. 151–176, 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ICpIJ>
- [20] RAÍZEN, “Matriz energética brasileira: o que é e do que é composta,” São Paulo, Apr. 2023, publicado em: 14 abr. 2023. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/uBCik>
- [21] BRASIL. Secretaria de Comunicação Social, “Matriz elétrica brasileira registra maior expansão da história em 2024,” SECOM, Brasília, DF, Tech. Rep., Jan. 2025, publicado em: 10 jan. 2025. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/PUqMt>
- [22] L. N. d. Silva, “Transição energética em sistemas de distribuição de energia elétrica: um estudo de caso com foco na inserção de recursos energéticos distribuídos,” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Gestão de Energia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tramandaí, 2022.
- [23] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Aneel aprova quotas de custeio e energia elétrica do proinfa para 2025 com custo médio de r\$ 543,56/mwh,” ANEEL, Brasília, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/KspJw>
- [24] T. P. M. d. Oliveira, “Potencial inclusivo da energia solar: análise dos aspectos jurídicos,” Master’s thesis, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018, dissertação (Mestrado em Direito Político e Econômico). Acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ggvsvx>

- [25] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Fact sheet: Sistemas isolados,” EPE, Brasília, DF, Tech. Rep., 2024, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/kYMuS>
- [26] G. D. d. O. Rolim, L. J. Petribú, V. P. Perruci, L. H. C. Medeiros, and A. Costa, “Uma análise estatística com emprego de técnicas de regressão linear múltipla para a suavização da variabilidade da geração solar fotovoltaica em larga escala conectada ao sistema interligado nacional (sin),” in *Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)*. Gramado: Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), 2018, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/hVWJj>
- [27] L. D. O. Altoé Filho, “Proposição de critério de incentivo à energia renovável e eficiência energética para as leis de icms ecológico no brasil,” *Revista da Madeira*, vol. 17, no. 2, pp. 1–20, 2022, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/UyGbV>
- [28] A. d. S. Nascimento, “Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro,” Master’s thesis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015, dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/TjWFJ>
- [29] INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA), “Exclusão elétrica na amazônia legal: quem ainda está no escuro?” IEMA, São Paulo, Tech. Rep., 2021, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/LXiWG>
- [30] SOLFUS, “O que são sistemas isolados?” Rio de Janeiro, 2024, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/hXotM>
- [31] CENÁRIO ENERGIA, “Epe avalia benefícios econômicos da interligação de localidades isoladas no amazonas para e acre,” João Pessoa, Jul. 2024, publicado em: 24 jul. 2024. Acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ZhVwS>
- [32] ISA ENERGIA BRASIL, “Transição energética – apresentação,” 2025, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/tQUoG>
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR), “Brasil alcança marco histórico em energia solar e pernambuco amplia participação,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kbCIJM>
- [34] TRIBUNAL DO NORTE, “Com 13 novos parques em 2024, rn gera 32% da energia eólica no país,” 2025. [Online]. Available: <https://bit.ly/43hJJxr>
- [35] LA SOLAR, “Energia solar bate recordes de expansão no brasil em 2024,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3H5OHES>
- [36] C. S. Ramos, “Cogeração de biomassa terá maior acréscimo em 10 anos,” *Globo Rural*, 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kcQYwz>
- [37] AGRIMÍDIA, “Nova usina de biomassa de cana com início previsto para 2024 no estado de são paulo,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4jqFnZz>
- [38] D. A. Carneiro and R. Menescal, “A força das pchs - um potencial a ser destravado,” *MegaWhat*, 2025. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kEHbPK>
- [39] J. P. R. Silva *et al.*, “Análise da viabilidade econômica de pequenas centrais hidrelétricas (pchs) considerando incertezas,” *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 12, 2023.
- [40] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Plano decenal de expansão de energia 2034,” EPE, Tech. Rep., 2024.
- [41] AGÊNCIA CENÁRIO ENERGIA, “Investimento bilionário leva energia limpa e sustentável às comunidades isoladas da amazônia,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/45oFVf6>
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLUÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA (ABSAE), “Contribuição para o pde 2034,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kFTm7>
- [43] INSTITUTO ACENDE BRASIL, “White paper nº 31: Armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4dzmBxT>
- [44] B. C. d. Silva, F. J. M. d. Albuquerque, and M. P. Ludwig, “Smart grid e smart cities: uma análise bibliométrica da produção científica brasileira,” *Cadernos de Prospecção*, vol. 14, no. 1, pp. 144–163, 2021.
- [45] B. Moreira, “Cidades inteligentes: o futuro do smart grid no brasil,” *O Setor Elétrico*, Nov. 2014, publicado em: 19 nov. 2014. Acesso em: 26 maio 2025.
- [46] VIVA SETE LAGOAS, “Lagoa da boa vista: oásis de diversão e natureza em sete lagoas,” VIVA SETE LAGOAS, s.d., acesso em: 14 out. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/PoMBq>
- [47] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Diagnóstico regional – pde 2033 – volume iii – get centro-oeste,” EPE, Brasília, Tech. Rep., 2024. [Online]. Available: <https://shre.ink/etsH>
- [48] —, “Avaliação de modelos regulatórios para implantação de sistemas de medição inteligentes no sistema de distribuição brasileiro,” EPE, Brasília, Tech. Rep., 2024.
- [49] G. B. A. Lima, D. Simões, and J. A. P. d. Oliveira, “Cidades inteligentes: mapeamento da produção científica brasileira e internacional,” *Cadernos EBAPE.BR*, vol. 18, no. 1, pp. 138–155, 2020, acesso em: 25 maio 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/etWH>
- [50] P. d. Siqueira, “Projeto de eficiência energética,” *OMS Engenharia*, Aug. 2021, publicado em: 24 ago. 2021. Acesso em: 26 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/KeYov>
- [51] CODEX UTILITIES, “Perdas técnicas de energia: causas, tipos e estratégias de mitigação,” *Blog*, Jun. 2025, publicado em: 02 jun. 2025. Acesso em: 25 maio 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/etsv>
- [52] H. Rodriguez, “Vendas de evs e phevS cresceram no mundo todo em 2024, exceto na europa,” *Quatro Rodas*, Jan. 2025, publicado em: 17 jan. 2025. Acesso em: 02 jun. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/ny9Lh>
- [53] R. F. Orfo Júnior and V. I. Hara, “Avaliação dos impactos de veículos elétricos na rede elétrica da concessionária,” Master’s thesis, Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2023, trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo e Recursos Renováveis).
- [54] L. M. d. Souza, R. B. d. Santos, O. G. Simoes, W. D. Casagrande, and A. L. Pereira, “Análise do perfil de carregamento dos veículos elétricos,” 2025, artigo científico.
- [55] DIÁRIO DO TRANSPORTE, “Financiamento de ônibus elétricos na cidade de são paulo pode ser mudado com decreto de nunes,” São Paulo, Jan. 2025, publicado em: 20 jan. 2025. Acesso em: 26 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/jFOxK>
- [56] ECOGEN BRASIL, “Maior planta de cogeração em edifício comercial do brasil,” 2024, acesso em: 07 mar. 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/BOAWD>
- [57] GREENYELLOW, “Eficiência energética na indústria,” 2024, acesso em: 14 maio 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/fyLLi>
- [58] POTENCIALIZEE, “Cases de sucesso do potencializee: conheça três empresas que implementaram eficiência energética por meio do programa,” 2024, acesso em: 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/fhSWS>
- [59] INATEL, “Automação e eficiência energética: transformando indústrias com tecnologia inteligente,” 2025, acesso em: 21 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/UogdA>
- [60] O SETOR ELÉTRICO, “Redução de custos de baterias abre novos caminhos para a energia renovável no brasil,” *Dec*, 2024, publicado em: 18 dez. 2024.
- [61] BLOOMBERG LÍNEA, “Com excesso de energia, setor eólico e solar no brasil enfrenta crise sem precedente,” *Bloomberg Línea*, Jun. 2025, publicado em: 25 jun. 2025.
- [62] S. Schuck, “Siemens energy lança programa de capacitação em transição energética na amazônia,” *Exame ESG*, Aug. 2025, publicado em: 05 ago. 2025.
- [63] ABSOLAR, “Associação brasileira de energia solar fotovoltaica. dados do setor solar brasileiro,” São Paulo, 2025, acesso em: 30 ago. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/tcRB>
- [64] REUTERS, “Brasil lidera projetos solares em pré-construção na américa latina,” *Reuters*, 2024, acesso em: 30 ago. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YmCIr/>

- [65] PROCEL, “Programa nacional de conservação de energia elétrica. balanço energético 2023,” Eletrobras/Procel, Tech. Rep., 2023, acesso em: 29 ago. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YHHJ/>
- [66] CGNBE, “Complexo eólico lagoa do barro,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQc>
- [67] INFOMONEY, “Enel inicia operação comercial no piauí de parque eólico de r\$ 3 bilhões, o maior da américa do sul,” InfoMoney, Jun. 2021, publicado em: 10 jun. 2021. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQn>
- [68] CORTEZ ENGENHARIA, “Complexo eólico lagoa do barro,” 2025, acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://cortezengenharia.com.br/lagoa-do-barro/>
- [69] FRANCE PRESSE, “Conheça a maior usina de energia solar da américa latina, em pirapora,” G1, Nov. 2017, publicado em: 10 nov. 2017. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQ1>
- [70] EDF RENEWABLES, “Solar energy,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAk4>
- [71] SOLIS ENERGIA, “Usina fotovoltaica em pirapora, mg,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkV>
- [72] HITECH VIDEO PRODUTORA, “Institucional wamag - usina solar pirapora mg,” 2019, vídeo (12 min 9 s). Acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SIMM>
- [73] N. M. C. A. A. Vilaça *et al.*, “Smart city – caso da implantaÇÃO em búzios,” *Revista SODEBRAS*, vol. 9, no. 98, Feb. 2014, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQT>
- [74] O GLOBO, “Búzios torna-se primeira cidade inteligente da américa latina,” *O Globo*, Nov. 2012, publicado em: 21 nov. 2012. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkE>
- [75] ENEL, “Inovação e sustentabilidade em búzios,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkz>
- [76] ARETÊ VENDAS, “Aretê búzios - condomínio de casas e terrenos - preços aqui!” 2025, acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://aretevendas.com/>

