

AVALIAÇÃO DO IMPACTO AMBIENTAL E ECONÔMICO DA MODERNIZAÇÃO DA REDE ELÉTRICA COM FOCO NA GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Ana Clara da Silva Mário¹; Marcelo Lucas¹; Aline Alves Ribeiro¹;
Cleiton Silvano Goulart¹

¹Universidade de Uberaba - Uniube, Brasil

Autor Correspondente: anaclaramario02@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.31496/retii.v3i1.2563>

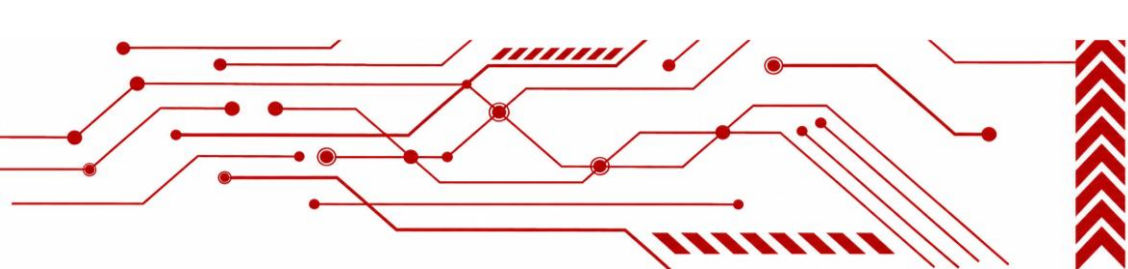
RESUMO

Este trabalho avalia o impacto ambiental e econômico da modernização do sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil, com ênfase na implementação de redes inteligentes (*Smart Grids*) e seu potencial para a geração de créditos de carbono. Diante da crescente demanda energética e da urgência climática, a pesquisa analisa como a redução de perdas técnicas e não técnicas, viabilizada pela automação e medição avançada, contribui diretamente para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. O trabalho analisa a viabilidade econômica dessas tecnologias, quantificando o retorno financeiro obtido pela eficiência energética e pela comercialização de créditos de carbono. Os resultados demonstram que a modernização da rede não apenas amplia a eficiência energética, a sustentabilidade e a confiabilidade do fornecimento, mas também viabiliza novas receitas por meio do mercado de carbono, confirmando que a transição para uma infraestrutura digital é financeiramente estratégica e ambientalmente necessária para o setor elétrico nacional.

Palavras-chave: smart grids; créditos de carbono; eficiência energética; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study evaluates the environmental and economic impact of modernizing Brazil's electricity distribution system, with an emphasis on Smart Grid



implementation and its potential for generating carbon credits. Given the growing energy demand and climate urgency, the research analyzes how the reduction of technical and non-technical losses—enabled by automation and advanced metering—directly contributes to mitigating greenhouse gas emissions. The study assesses the economic viability of these technologies by quantifying the financial returns derived from energy efficiency and carbon credit trading. The results demonstrate that grid modernization not only enhances energy efficiency, sustainability, and supply reliability but also unlocks new revenue streams through the carbon market, confirming that the transition to a digital infrastructure is both financially strategic and environmentally essential for the national electricity sector.

Keywords: smart grids; carbon credits; energy efficiency; sustainability.

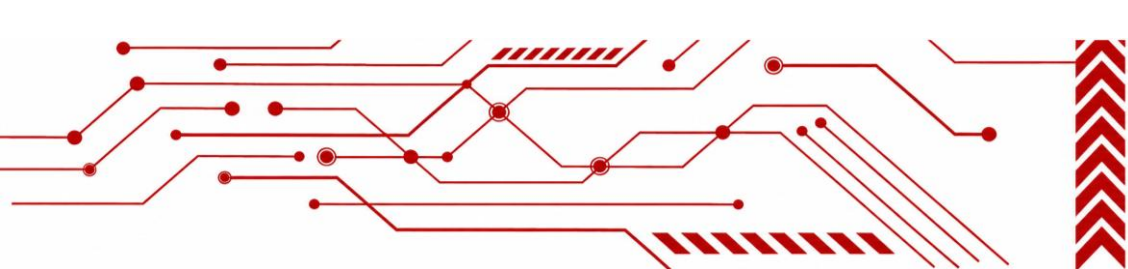
1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional brasileiro, estimado em 213,4 milhões de habitantes para 2025 (IBGE, 2025, p. 1), tem ampliado substancialmente a demanda por infraestrutura energética moderna, eficiente e resiliente. Esse aumento, associado ao avanço tecnológico, à urbanização e à expansão das atividades industriais e agrícolas, impõe pressões ao sistema elétrico nacional, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental. Em 2024, a geração de energia elétrica no Brasil alcançou 751,3 TWh, representando incremento de 6,1% em relação ao ano anterior (EPE, 2025, p. 11). Apesar disso, perdas no sistema de distribuição, técnicas e não técnicas, continuam expressivas, alcançando 14% da energia injetada em 2024 (ANEEL, 2025, p. 4), o que reforça a urgência da modernização das redes elétricas.

Embora a matriz elétrica brasileira seja predominantemente renovável, com 88,0% da oferta interna de eletricidade proveniente de fontes hidráulica, eólica, solar e biomassa (EPE, 2025, p. 12), há participação significativa de fontes fósseis, especialmente de termelétricas, cuja contribuição é fundamental em períodos de escassez hídrica, mas aumenta o volume de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Em 2023, o setor de energia foi responsável por 420 milhões de toneladas de CO₂e, somando-se ao desmatamento, que sozinho ultrapassou 1,04 GtCO₂e, tornando o Brasil o quinto maior emissor mundial (SEEG, 2024, p. 4).

Nesse contexto, a modernização das redes elétricas brasileiras, com ênfase na digitalização, automação e monitoramento inteligente, que são tecnologias referentes às smart grids, representa uma estratégia central para a redução de perdas, melhoria da eficiência energética e mitigação dos impactos ambientais. Redes inteligentes permitem a detecção automática de falhas, recomposição do sistema e integração eficiente de fontes distribuídas, promovendo maior participação de consumidores e aumento da confiabilidade do sistema.





Além dos avanços tecnológicos, instrumentos econômicos como o mercado de créditos de carbono ganham relevância como estratégia de descarbonização e incentivo à modernização da infraestrutura elétrica nacional. A modernização integral das redes, baseada em automação, gerenciamento eletrônico de energia e expansão da geração distribuída, proporciona segurança e viabiliza a transição para uma matriz de baixo carbono. A inserção desses mecanismos se alinha às diretrizes nacionais de transição energética justa, conforme proposto pelo Observatório do Clima, que projeta a redução de até 80% das emissões do setor energético até 2050 (Observatório do Clima, 2024, p. 6).

A cidade de Araxá–MG destaca-se como exemplo estratégico, por associar atividades industriais, turísticas e agrícolas, apresentando consumo energético elevado. Atualmente, a cidade de Araxá passa por diversas quedas de energia que comprometem a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico. Diante disso, o estudo busca realizar uma análise técnica e quantitativa estimada da modernização da rede, a fim de proporcionar maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica e inserir o município e a concessionária CEMIG no mercado de créditos de carbono, proporcionando a descarbonização do setor elétrico e a transição energética para fontes de energia mais limpas e sustentáveis de forma segura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

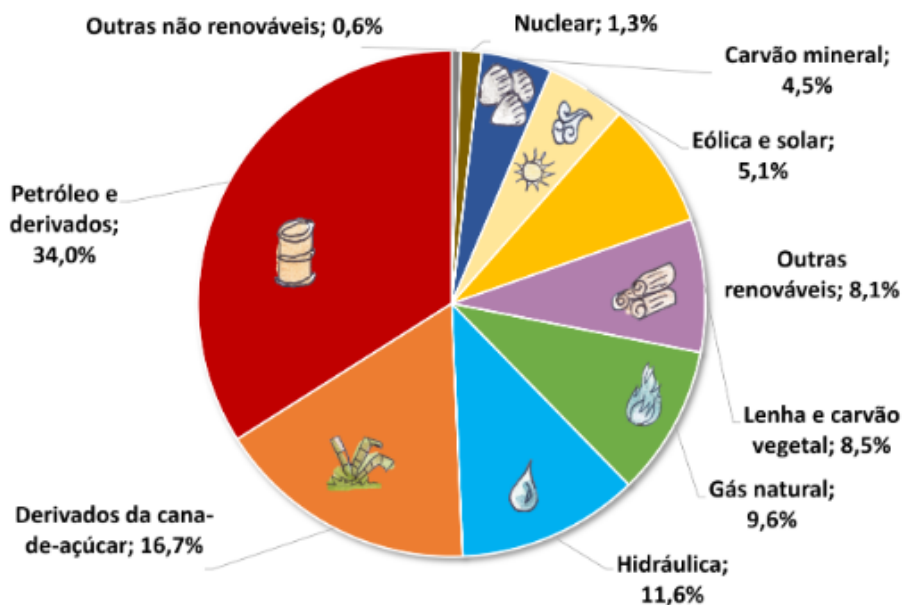
2.1 Configuração da Matriz Energética Brasileira

A matriz Energética brasileira é composta predominantemente por fontes renováveis, se destacando no cenário mundial, com ênfase para as hidrelétricas. Porém, em períodos de falta de chuvas, e o nível das represas baixa, é necessário acionar fontes não renováveis, derivadas de petróleo, gás natural, carvão mineral e energia nuclear, para suprir a demanda energética, aumentando a emissão dos gases de efeito estufa (GEE).

A matriz energética brasileira, se destaca mundialmente devido a sua predominância de fontes renováveis, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil atingiu, em 2024, uma porcentagem de 50% na sua oferta interna total de energia. Como pode ser observado na figura 1.



Figura 1 – Matriz Energética 2024

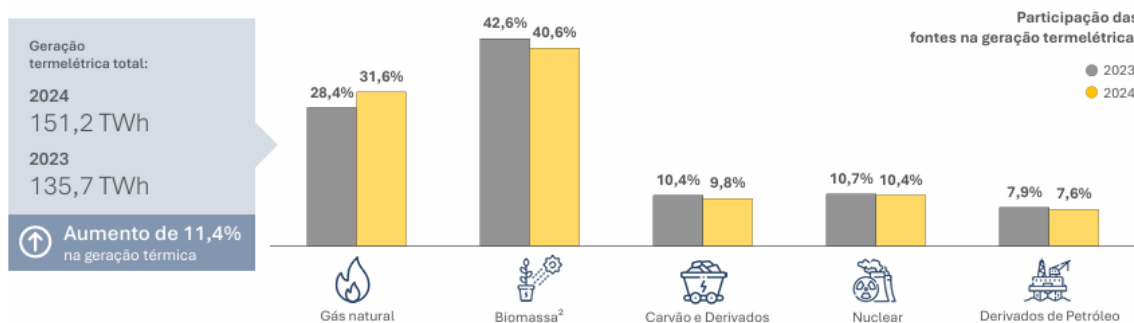


Fonte: Matriz Energética, EPE (2024).

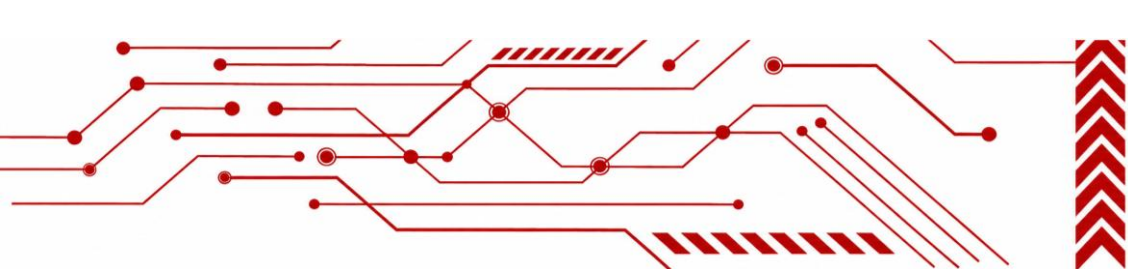
É evidente a participação de diversas fontes renováveis para geração de energia elétrica, especialmente a hidráulica, eólica e solar. Entretanto, a rede elétrica não está preparada para uma geração totalmente limpa, uma vez que, “Esse avanço acelerado, no entanto, não tem sido acompanhado por atualizações no planejamento, na regulação e na infraestrutura do sistema, o que compromete a eficiência e a segurança da integração.” (IEMA,2024, p. 37).

Como resultado da falta de planejamento, em 2024, houve aumento de 11,4% na geração termelétrica (EPE, 2024, p.44). Na imagem abaixo, é possível visualizar o crescimento da geração termelétrica de 2024 em relação ao ano de 2023.

Figura 2 – Participação das fontes na geração termelétrica



Fonte: Relatório Síntese, BEN (2024).



Dessa forma, é necessário o uso de fontes oriundas de petróleo e derivados para suprir a demanda que varia ao longo do dia e atinge horários de pico, em que é necessário a injeção de energia de fontes não renováveis, a fim de garantir maior estabilidade e segurança, fato que aumenta a emissão dos gases de efeito estufa.

Na busca pela solução, em 2012, o físico e especialista em energia norte-americano, Amory Lovins realizou uma palestra com o tema “*A 40 Year Plan for Energy*”, ou Um Plano de 40 anos para a energia, na palestra ele disse algo que reflete a situação energética que vivemos hoje.

[...] Esses combustíveis fósseis construíram nossa civilização, criaram nossa riqueza e melhoraram a vida de bilhões de pessoas. Mas eles têm custos cada vez maiores para nossa segurança, economia, saúde e meio ambiente que começam a ruir, senão a superar seus benefícios. (Lovins, 2012).

E ainda afirmou, “O sistema de energia atual não é apenas ineficiente, mas também descoordenado, envelhecido, poluente e inseguro. Por isso precisa ser renovado” (Lovins, 2012).

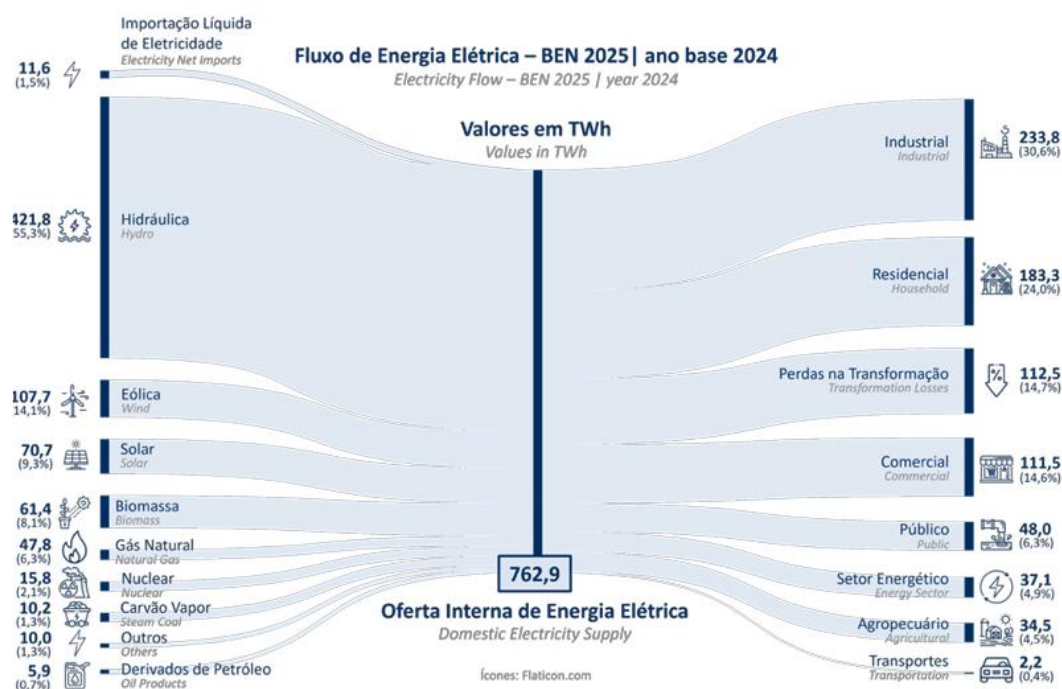
Mesmo 13 anos após a palestra, sua fala ainda é relevante e mostra como a busca pela melhoria do sistema é antiga e necessita de mudança nos seus modos operantes. A Organização das Nações Unidas (ONU), também estabeleceu metas para implantar melhorias nesses setores, que podem ser consultados na agenda 2030, nos objetivos de desenvolvimento sustentável,” Objetivo 7. Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos [...] 13. Tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos.” (ONU, 2015, p. 18).

Nesse contexto, a modernização da rede entra como aliada para tornar a energia mais acessível, confiável e minimizar os efeitos adversos no meio ambiente.

De acordo com os dados da Empresa de Pesquisa energética (EPE), 88% da energia elétrica gerada no Brasil é oriunda de fontes renováveis, enquanto 12% são derivadas de petróleo e outras fontes poluentes (EPE, 2024, p.12). Quanto ao consumo final, os maiores setores são, industrial, residencial e comercial, que juntos representam aproximadamente 70% da demanda energética nacional, tornando cada vez mais importante a busca pela eficiência e distribuição equalizada para garantir a dignidade da população e o bom funcionamento da economia. Dessa forma, destaca-se a modernização da rede elétrica. Na figura 3, é possível visualizar o Fluxo de energia Elétrica no Brasil em 2024, evidenciando a predominância desses setores no consumo final.



Figura 3 – Fluxo de Energia Elétrica no Brasil em 2024



Fonte: Relatório Final, BEN (2024).

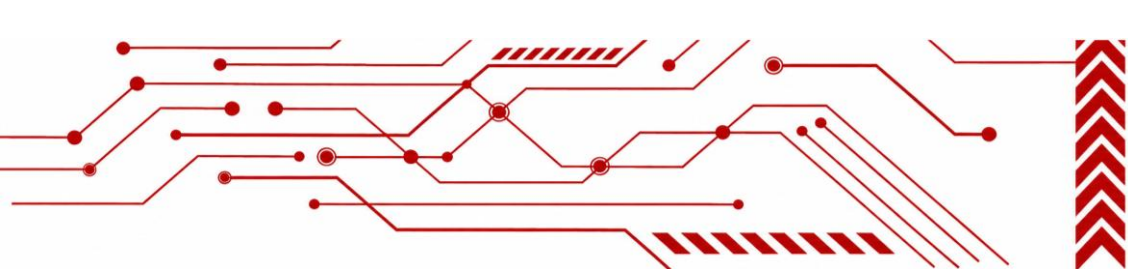
2.2 Sistema de medição de energia elétrica

O sistema de medição de energia elétrica, teve início na década de 1880, quando se iniciou o uso de energia elétrica no Brasil, a técnica de medição era simples e rudimentar, realizada a partir de uma taxa fixa por lâmpada instalada, desconsiderando o consumo real mensal.

Com a popularização da energia elétrica, em meados de 1910, o sistema de medição foi alterado, realizando a cobrança a partir do consumo real de cada consumidor, com taxas que variavam a cada cidade, devido às diferentes empresas geradoras. A medição era realizada com medidores eletromecânicos, também conhecidos como relógios de luz, seu princípio de funcionamento era a indução eletromagnética, que girava um pequeno disco metálico proporcional ao consumo, que era registrado em kWh.

A partir de 1940, o governo brasileiro iniciou o processo de tornar as empresas geradoras de energia em estatais, equalizando e padronizando as taxas cobradas em todas as regiões, tornando o processo mais justo para os consumidores.

Com a criação da Eletrobras em 1982, foi possível realizar um crescimento urbano e fornecimento de energia em todo o país, o processo de cobrança se manteve mensal e manual, utilizando os medidores eletromecânicos.



Através da Lei nº 9.427/1996, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável por regular o setor elétrico brasileiro, proporcionando justiça e energia de qualidade para os consumidores, a partir dela, foram criadas as bandeiras tarifárias e a regulação de todo o mercado nacional de energia.

O sistema de tarifação foi criado para precificar o uso de energia elétrica de forma padronizada e varia de acordo com as condições de geração das usinas, incentivando o uso consciente. Pode ser dividido nas seguintes classificações

- **Bandeira verde:** A geração de energia é fornecida com baixo custo, sem acréscimos na fatura, geralmente em meses com chuvas regulares, que garantem o bom funcionamento das hidrelétricas;
- **Bandeira Amarela:** Condições intermediárias de geração com menor índice de chuvas e necessidade de acionamento de termelétricas, adiciona uma pequena taxa fixa por KWh;
- **Bandeira Vermelha, Patamar 1:** Necessidade de acionamento de termelétricas mais onerosas, acrescentando uma taxa maior que a estabelecida na bandeira amarela;
- **Bandeira Vermelha, Patamar 2:** Período de escassez hídrica e maior volume de termelétricas para atender a demanda, a taxa de acréscimo supera as taxas anteriores;
- **Tarifa Branca:** Modalidade para consumidores que não utilizam energia em horários de pico, sua taxa não é fixa e varia de acordo com o horário do dia, sendo final do dia mais caro e fora de pico, mais barata.

2.3 Perdas técnicas e não técnicas na transmissão e distribuição

As perdas na transmissão e distribuição são as principais responsáveis pela eficiência e custo final da energia elétrica, se define como a energia gerada e transmitida que não chega ao consumidor final e podem ser classificadas como perdas técnicas e não técnicas.

Perdas técnicas acontecem de forma inevitável, são toda energia dissipada no processo de transmissão e transformação de energia. São monitoradas pela Câmara de Comercialização de energia elétrica (CCEE) e seu custo é igualmente dividido entre os consumidores e a geração.

Perdas não técnicas são a diferença entre as perdas totais e perdas técnicas, são oriundas de furto de energia, erros de medição e erros de faturamento.



Além disso, de acordo com a ANEEL, cerca de 14% da energia injetada em 2024, não foi consumida devido as perdas técnicas e não técnicas (ANEEL, 2025, p. 4), fato que torna ainda mais necessário o monitoramento eficiente do consumo e atualização do sistema de medição de energia elétrica, a fim de reduzir as perdas e aumentar a eficiência do sistema.

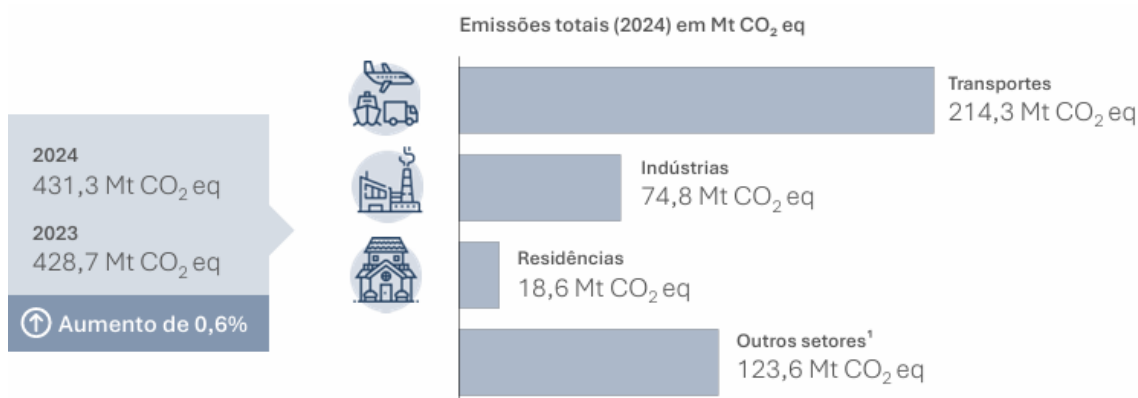
2.4 Emissão de CO₂ no setor elétrico

A geração de energia elétrica, representa grande porcentagem na emissão de gases do efeito estufa, principalmente o CO₂, a partir do acionamento de usinas como as termelétricas, para suprir a demanda energética. Uma maneira de reduzir a emissão desses gases é amenizar as perdas técnicas e não técnicas, dessa forma, as fontes renováveis poderiam aumentar sua área de atuação, mitigando a dependência das fontes poluentes.

Com o acionamento de fontes não renováveis, o setor energético se torna grande responsável pela emissão de gases de efeito estufa (GEE), de acordo com o Balanço Energético (BEN) ano base 2024, as emissões de CO₂ ligadas à matriz energética brasileira, atingiu 431,3 milhões de toneladas, representando um aumento de 0,6% em relação ao ano 2023, que registrou um total de 428,7 toneladas (EPE, 2024, p. 54)

De acordo com a figura 4, fornecido pelo relatório BEN 2025, é possível observar as emissões de CO₂ por setor relacionados ao consumo de energia no ano de 2024.

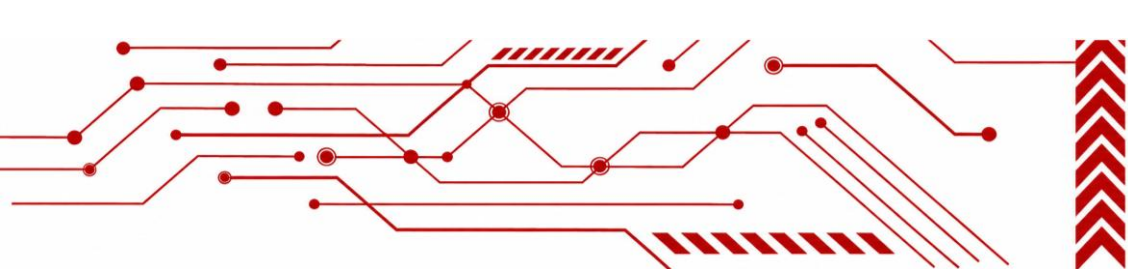
Figura 4 – Emissão de CO₂ por setor no Brasil em 2024



Fonte: Relatório Síntese Final, BEN (2024).

2.5 Tecnologias de modernização da rede elétrica

A modernização da rede elétrica é uma ferramenta para automatizar o processo, atenuando perdas e tornando a rede mais eficiente, segura e confiável.



Além disso, proporciona a integração de fontes de energia renováveis e comunicação bidirecional entre consumidor e concessionária.

As redes inteligentes são um sistema de comunicação entre sensores e medidores para proporcionar monitoramento do consumo de energia em tempo real, que possibilita facilidade na integração de fontes renováveis com geração própria e reduz sobrecarga na rede.

Atualmente, com o advento da tecnologia, é incentivado a implementação de medidores inteligentes para eliminar erros de medição humanos para tornar o processo de cobrança mais confiável e monitorar possíveis furtos de energia, reduzindo as perdas de energia não técnicas.

Atualmente, o fluxo de detecção e manutenção da rede é falho, com uma conduta reativa. Quando ocorre uma falha no sistema, os consumidores informam o fornecedor, que mobiliza uma equipe de campo para encontrar e solucionar a fonte do problema. Com o sistema inteligente, é possível monitorar os equipamentos para realizar manutenções preditivas e preventivas mais específicas e quando houver falha, a detecção e resolução é mais rápida, podendo até ser sanada remotamente.

A implantação de redes inteligentes, nas linhas de transmissão e distribuição, permite monitorar o consumo da rede e o perfil do consumidor em tempo real, podendo estimar os períodos de maior e menor demanda energética e minimizar as falhas da rede, integrando geradoras, distribuidoras e consumidores de energia elétrica em tempo real.

O novo passo para o sistema elétrico é a modernização da rede, que envolve diferentes tecnologias com o objetivo de integrar fontes de energia renovável, reduzir as perdas, tornar a rede mais eficiente, detectar e solucionar falhas da rede reduzindo o tempo de interrupção, tornar os consumidores mais conscientes do seu uso de energia e amenizar as emissões de gases do efeito estufa.

A base da modernização são os medidores inteligentes que são instalados nas residências, comércios e indústrias. Através da comunicação com sensores IoT (Internet das coisas), é possível realizar a medição e monitoramento de variáveis como tensão, corrente, frequência e potência, fornecida e consumida. Enviando as informações em tempo real para o sistema de gestão.

A comunicação pode ser realizada sem fio, através de 4G/5G ou por *Power Line Communication* (PLC), realizado através da própria linha de energia elétrica. Estabelecendo um fluxo contínuo de informações entre consumidores, equipamentos e operadores do sistema.

Os dados coletados são armazenados e analisados por sistemas como Big Data e inteligências artificiais, que alimentam gêmeos digitais, uma cópia virtual da realidade, tornando possível, através de uma interface homem-máquina, encontrar e corrigir falhas no sistema, tornar o sistema mais eficiente e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Na figura 5, é possível visualizar a arquitetura de uma rede elétrica inteligente.



Figura 5 – Arquitetura de uma Rede Elétrica Inteligente
Arquitetura de uma Rede Elétrica Inteligente



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

As Smart Grids podem facilitar a integração com as fontes renováveis, reduzindo a necessidade de fontes de energia elétrica poluentes, e consequentemente ampliar a participação do setor elétrico brasileiro no mercado de créditos de carbono.

2.6 Mercado de créditos de carbono

O mercado de créditos de carbono foi criado para reduzir a emissão de CO₂ a partir de uma compensação financeira, já que pode ser usada como moeda de troca entre organizações que evitaram e emitiram os gases de efeito estufa, seja via mercado voluntário ou mercado regulado.

Os créditos de carbono são como moedas verdes, controlando a emissão dos gases do efeito estufa, sendo que 1 crédito de carbono equivale a 1 tonelada de dióxido de carbono que deixou de ser emitida na atmosfera. Foram criados em 1997, como resposta às mudanças climáticas, através do Protocolo Quioto.

O Protocolo Quioto foi um acordo internacional, que envolveu 84 países, assinado em 1997 e entrou em vigor em 2005, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, que contribuem com o aquecimento global, a partir de metas obrigatórias entre os países desenvolvidos.

Com o protocolo consolidado, foram criados diversos mecanismos, dentre eles, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que promove projetos para a redução da emissão de gases de efeito estufa e geração de créditos de carbono.

Apesar do tratado representar um grande passo para combater as mudanças climáticas, não atingiu os resultados esperados, uma vez que os Estados Unidos, o maior emissor de dióxido de carbono da época, se retirou do acordo e as metas estabelecidas foram impostas somente para países desenvolvidos, excluindo países em desenvolvimento com alto percentual de emissão, como China e Índia.

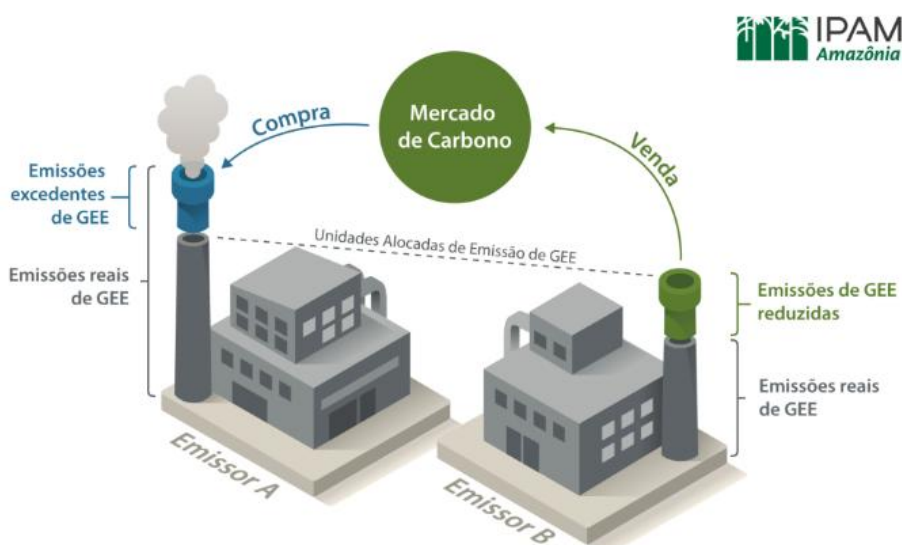
Com isso, o tratado foi substituído pelo Acordo de Paris em 2015, que entrou em vigor em 2016, assinado por 194 países e a União Europeia, com os mesmos objetivos, porém com maior abrangência, através da determinação de metas para todos os países envolvidos e a meta limiar de aquecimento do país em 1,5°C.

Existem duas formas de movimentação de créditos de carbono, o mercado regulado e o mercado voluntário.

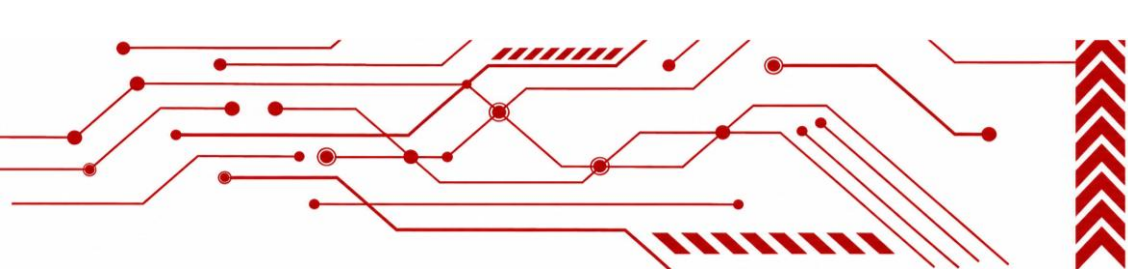
- O mercado regulado é uma medida governamental que determina que as empresas façam compensação de suas emissões e comprem créditos de carbono;
- O mercado voluntário permite que as empresas negociem voluntariamente entre elas, a compra e venda para compensação das emissões sem a obrigação legal.

Na figura 6, fornecida pela IPAM AMAZÔNIA (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia), é possível visualizar o fluxo de compra e venda de créditos de carbono, sendo que as empresas que emitiram maior quantidade que estabelecido em acordo, podem comprar créditos de carbono de empresas que emitiram menor quantidade e conseguiram gerar saldo, para compensar sua emissão.

Figura 6 – Fluxo do Mercado de Carbono



Fonte: IPAM Amazônia (2025).



No Brasil, foi implementada a Lei N° 15.042, que atribui ao SBCE (Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa) o controle, limitação e comercialização de emissões de gases de efeito estufa, determinando que setores que emitam mais de 10 mil toneladas de CO₂ por ano devem relatar suas emissões e setores que emitam mais de 25 mil toneladas devem, além de relatar, reduzir suas emissões.

Dessa forma, a integração de fontes renováveis através da modernização da rede, pode gerar créditos de carbono e melhorar a participação do país no cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se enquadra como pesquisa aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa. O objetivo principal foi estruturar um modelo de modernização para a rede elétrica e quantificar seus impactos ambientais e econômicos, utilizando o município de Araxá-MG como estudo de caso. O desenvolvimento do estudo foi estruturado em quatro etapas principais:

3.1 Coleta e organização de dados

A primeira etapa consistiu no levantamento bibliográfico sobre Smart Grids, eficiência energética e mercado de carbono, consultando bases de dados acadêmicas e relatórios técnicos. A coleta de dados quantitativos foi realizada através de instituições oficiais e governamentais, abrangendo:

- **Dados de consumo e infraestrutura:** Informações obtidas junto à CEMIG e ao IBGE (dados populacionais e econômicos de Araxá);
- **Indicadores de perdas e emissões:** Dados da ANEEL (índices de perdas técnicas e não técnicas), EPE (Balanço Energético Nacional) e SEEG/IEMA (emissões de gases de efeito estufa por município e setor);
- **Parâmetros financeiros e regulatórios:** Considerações baseadas na Lei nº 15.042/2024 (SBCE), cotações do mercado de carbono e tarifas médias de energia vigentes.

3.2 Caracterização do Estudo de Caso

O Estudo de caso é baseado na simulação da modernização da rede elétrica de Araxá-MG, verificando os possíveis impactos socioambientais da integração de fontes renováveis para a geração de energia e a possível geração de créditos de carbono, a partir da redução de emissão de gases do efeito estufa.



De acordo com o relatório de Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação, publicado pelo IBGE, com data de referência de 1 de julho de 2025, o município de Araxá atingiu a população de 118.786 habitantes. É uma cidade com diferentes atividades econômicas, como: Turismo, Mineração, Agropecuária e comercial. No ano de 2021, registrou um PIB per capita de R\$ 82.570,25.

Foi escolhida como objeto de estudo por ter destaque em diferentes setores e necessidade de alta demanda de energia, sendo assim, tem alto potencial para representar o impacto socioambiental que a modernização da rede elétrica pode trazer.

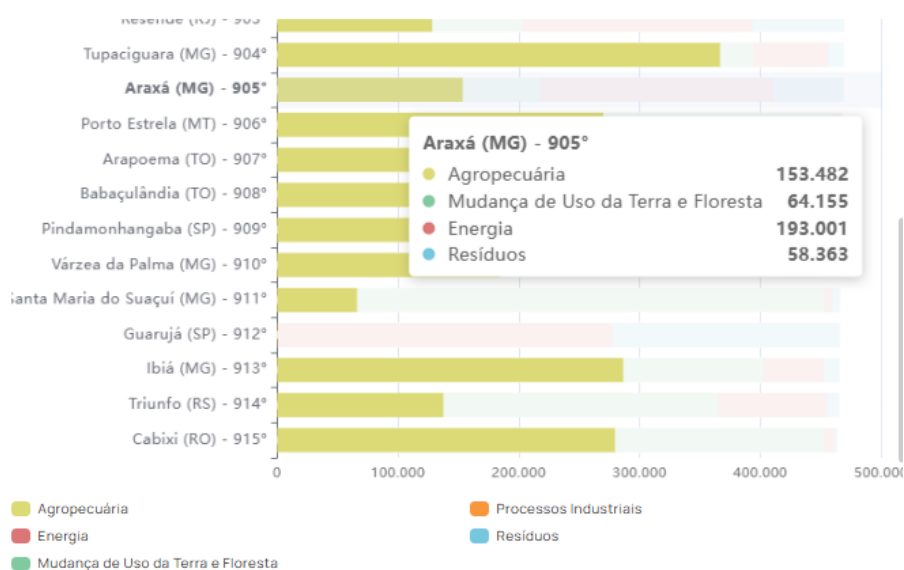
Além disso, o município tem passado por diversas interrupções de energia elétrica, como foi ressaltado pelo prefeito da cidade Robson Magela, em reunião com o governo de Minas Gerais em 2025 (Prefeitura de Araxá, 2025).

Os moradores estão cansados de perder eletrodomésticos por causa dos picos de energia. Sem contar com o produtor rural que tem perdido suas produções por conta disso. [...] A Cemig não pode continuar agindo de forma irresponsável, prejudicando não apenas Araxá, mas toda a região (Robson Magela, 2025, p. 1).

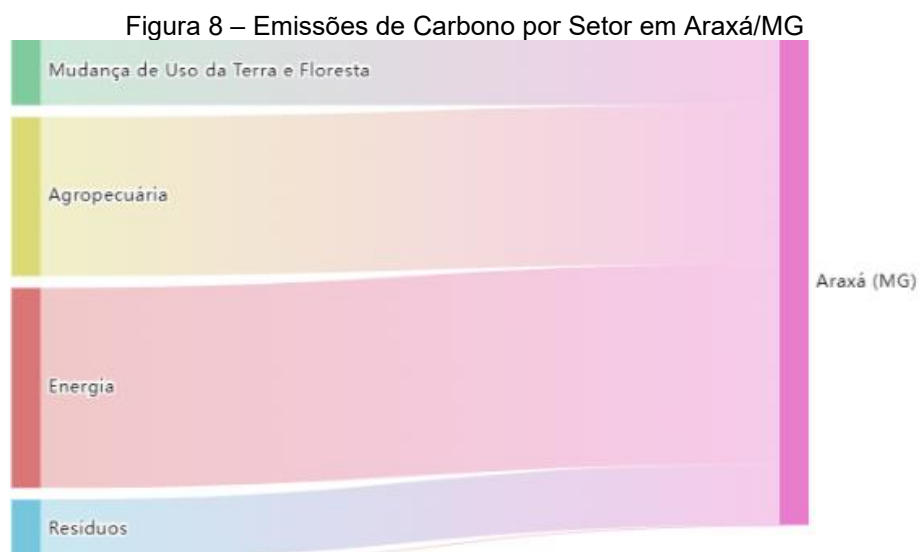
A energia elétrica é fornecida pela CEMIG, a maior distribuidora de energia elétrica do país, cobrindo 96% do território de Minas Gerais e ocupa a terceira posição como maior geradora de energia do país, com capacidade instalada de 5,9GW.

A partir da análise dos dados fornecidos pela concessionária em 2023, foi possível verificar que o consumo anual do município de Araxá foi de 330 GWh/ano. Estratificando o consumo por setores, temos que 38% foi residencial, 35% Industrial, 24% Comercial e serviços e 3% Poder público e outros (CEMIG, 2023).

Figura 7 – Ranking de emissões de Carbono no Brasil por Município



Fonte: SEEG Brasil (2024).



Fonte: SEEG Brasil (2024).

Sendo o setor de energia com maior índice de emissões, com 193.001 TCO_{2e}, seguido pelo setor agropecuário, com 153 482 TCO_{2e}, mudança de uso da terra e floresta, 64 155 TCO_{2e} e resíduos, com 58 363 TCO_{2e}(SEEG Brasil, 2024).

3.3 Cenários da Modernização da Rede

Nesta etapa, foi definido um cenário técnico de modernização baseado na implementação de tecnologias de Redes Inteligentes (Smart Grids). O modelo contempla:

3.3.1 Automação das redes

A automação da rede é fundamental para o funcionamento correto do sistema, está relacionada a monitoração, controle e aquisição de informações e permite monitorar e operar o sistema elétrico à distância.

Um dos sistemas com maior efetividade é o SCADA, do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*, que significa supervisão, controle e aquisição de dados.

Para maior eficiência o sistema SCADA incorporado a chaves com abertura e fechamento automáticos distribuídas estrategicamente por setores, a fim de isolar ou liberar regiões de acordo com a necessidade.

O sistema SCADA é o controle da operação, possibilitando a comunicação bidirecional em tempo real entre a distribuidora de energia e o

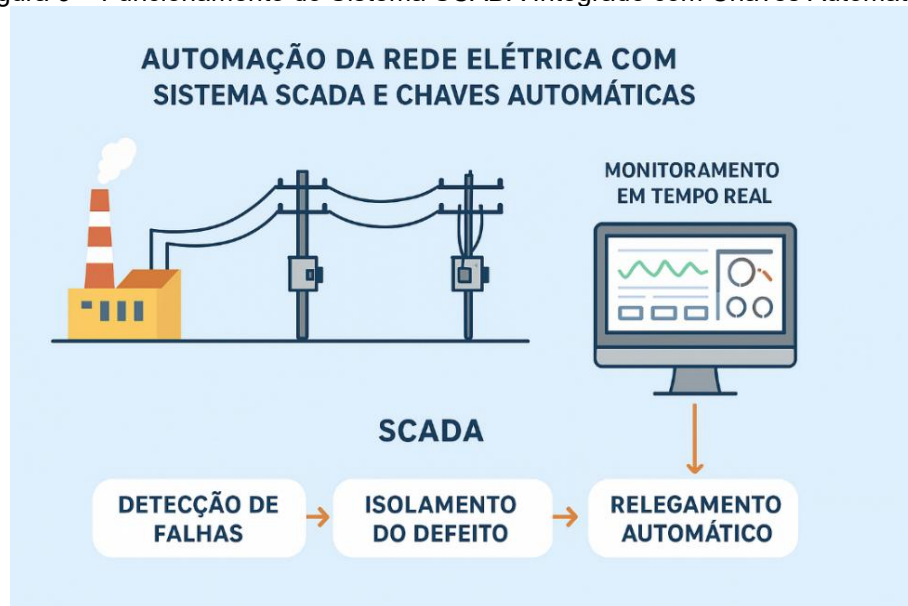
consumidor. Através da comunicação estabelecida, é possível realizar o comando da rede elétrica através da coleta de dados como condição das chaves, tensão, corrente, potência e fator de potência.

Quando ocorre uma situação crítica no sistema, como rompimento de cabos, sobrecarga e curto-circuito, os sensores detectam a falha, enviam dos dados e condições para o SCADA, e este dá o comando para as chaves automáticas, que isolam a área afetada.

Caso o problema possa ser solucionado a distância, o comando é enviado pelo setor responsável e as chaves são religadas, caso contrário, a equipe de campo é direcionada para o local de defeito com parâmetros e dados selecionados para uma solução mais rápida.

Quando o problema é solucionado, os dados são armazenados e ficam disponíveis para análises posteriores mais profundas, que podem estabelecer planos de manutenção preditivas e preventivas. A figura 9, simplifica o esquema de funcionamento do sistema SCADA integrado com chaves automáticas.

Figura 9 – Funcionamento do Sistema SCADA Integrado com Chaves Automáticas



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Alguns dos benefícios são: Melhorias dos indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção), Isolação das falhas, dispensando a propagação da falha e evitando o corte de alimentação de setores em bom funcionamento, Maior confiabilidade do sistema, Maior segurança para a equipe de campo e Monitoramento em tempo real e diagnóstico remoto.

3.3.2 Medição inteligente

A instalação de medidores inteligentes é uma etapa fundamental para a implementação do projeto. Os medidores inteligentes substituem os medidores convencionais e permitem a comunicação bidirecional entre fornecedor e consumidor.

Os medidores inteligentes registram e enviam dados de consumo e qualidade da energia em tempo real, proporcionando comunicação em tempo real para localizar falhas e quedas de energia, além da redução de perdas não técnicas causadas por erro de medição, faturamento e furto.

Com a comunicação bidirecional, é fornecido um histórico de consumo para o cliente, que consegue ajustar seu perfil de uso, adotando boas práticas e gerenciando melhor seus recursos.

Além disso, concede maior adesão ao sistema de geração distribuída, uma vez que, enviando dados de consumo para o sistema SCADA, a central pode realizar o balanceamento automático da rede, reduzindo a sobrecarga na rede oriunda de injeção de energia excedente na matriz.

Recentemente a CEMIG iniciou a implantação de medidores inteligentes em algumas cidades de Minas Gerais, pretendendo concluir a troca de 400 mil aparelhos com um investimento de 70 milhões de reais (CEMIG,2025). Espera-se resultados como redução de perdas não técnicas, redução no tempo de atendimento de chamados e resolução e falhas e aumento da eficiência de energia.

De acordo com reportagem local, em 2022, Araxá registrou cerca de 47.735 residências e 109.454 habitantes em 2022 (Portal Imbiara,2023), dessa forma, há uma média de 2,29 habitantes por residência. Seguindo o mesmo raciocínio, estimasse 51.807 residências em 2025. Dessa forma, essa é a quantidade de medidores inteligentes importados que devem ser instalados, com custo médio de R\$ 343,73 por medidor (Pazzine; Barbosa, 2024, p. 126).

3.3.3 Geração distribuída

A geração distribuída consiste na geração de energia, proveniente de fontes verdes, mais próxima do consumidor, reduzindo a distância da linha de transmissão e conseqüentemente amenizando significativamente as perdas técnicas. Essa modalidade de geração representa a descentralização do fornecimento de energia e apresentou um alto crescimento na região. Na figura 10, é descrito como foi a evolução da geração distribuída entre 2012 e 2022.

Figura 10 – Evolução do Crescimento de GD entre 2012 e 2022



Fonte: Panorama de geração distribuída, ANEEL 2023

Em 2022 foi estabelecida a Lei nº14.300/2022, nomeada como Marco Legal da Geração Distribuída, definindo parâmetros para a microgeração e minigeração distribuída conectadas a rede. Ela propõe um sistema de compensação, que permite a troca de energia injetada por créditos com a concessionária da rede, válidos por 60 meses, porém deve pagar tarifas pelo uso da rede, como uso para injeção de energia e conexão com o sistema em dias que a geração não for eficiente. Não houve mudança formal, mas passa por regulamentação contínua.

A geração distribuída contribui diretamente com a integração de fontes renováveis à rede e à redução da emissão de carbono, possibilitando a geração em duas modalidades:

- Geração por consumidores, onde a geração ocorre no próprio local de consumo, como por exemplo, instalação de placas solares no telhado de uma residência;
- Geração por empresas ou cooperativas, que permite geração de maior potencial de energia, distribuída entre consumidores específicos que não estão no local da geração, por exemplo, instalação de micro usina solar em zona rural para alimentar 3 empresas localizadas em zona urbana.

A concessionária principal, no caso, CEMIG, não pode possuir um sistema de GD, mas possui papel efetivo através do gerenciamento e mediação de compensação de energia, destacando que os custos para a implantação do sistema são de responsabilidade do cliente, ficando a cargo da concessionária, a instalação do medidor inteligente.

3.3.4 Iluminação pública

A iluminação urbana é o que garante a segurança e a continuidade das atividades dos moradores, por isso, deve estar disponível em todas as áreas da cidade. Buscando uma solução para saciar objetivos ambientais e econômicos, a forma mais viável seria a implantação de iluminação urbana com postes acoplados a placas solares.

Usualmente, os postes de iluminação possuem entre 6 e 9 metros de altura com iluminação em LED, com essas características, é possível encontrar opções que apresentam IP67, ou seja, resistência a poeira e água ideal para aparelhos eletrônicos com instalação em ambiente externo, bateria com autonomia de até 12 horas e tempo de carregamento entre 6 e 8 horas, além disso, possuem sensores fotossensíveis, que ligam automaticamente ao anoitecer e desligam ao amanhecer.

Essas luminárias, substituem as convencionais, desse modo, além de contribuir com o meio ambiente, utilizando uma fonte renovável, a implementação desses postes apresenta grande benefício econômico, uma vez que, eliminam a dependência de cabos elétricos, infraestrutura subterrânea e/ou aérea, proporcionam independência da rede e apresentam rápido retorno financeiro.

3.3.5 Sistema de comunicação

Para viabilizar a comunicação bidirecional nas redes inteligentes, diferentes tecnologias podem ser empregadas, como PLC (*Power Line Communication*), RF Mesh, ZigBee, Ethernet e redes móveis.

Nos medidores inteligentes, a troca de informações ocorre por meio de módulos de comunicação integrados, capazes de registrar dados de consumo, tensão, corrente e eventos da rede. Quando operam com PLC, esses dados são transmitidos utilizando os próprios cabos de energia elétrica, sem necessidade de infraestrutura adicional. Já nas redes que utilizam RF Mesh, cada medidor atua como um nó da rede, retransmitindo informações por radiofrequência até os concentradores instalados nos transformadores.

Após o agrupamento das informações nos concentradores, os dados são enviados para o sistema central da concessionária, como o SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), por meio de links de comunicação dedicados, como Ethernet, fibra óptica ou redes móveis (4G/5G).

Dessa forma, a rede inteligente estabelece uma comunicação contínua, segura e eficiente, explorando tanto a infraestrutura elétrica existente quanto tecnologias modernas de telecomunicações, permitindo supervisão em tempo real e maior confiabilidade no sistema elétrico.

3.4 Análise quantitativa e viabilidade

Para a análise dos resultados, utilizou-se um modelo de cálculo para estimar a redução de perdas, o volume de emissões evitadas e o retorno financeiro. Os cálculos seguiram as seguintes diretrizes:

- **Energia Economizada:** Estimada pela diferença entre as perdas atuais (14%) e a meta de perdas pós-modernização (7%), aplicada sobre o consumo total anual.
- **Emissões Evitadas (TCO_{2e}):** Calculadas multiplicando-se a energia economizada pelo Fator de Emissão oficial do Sistema Interligado Nacional (SIN), fornecido pelo MCTI.
- **Viabilidade Econômica:** Foram contabilizadas as receitas provenientes da economia direta de energia (tarifa média da concessionária) e da venda de créditos de carbono.
- **Indicador Financeiro:** O *Payback* simples foi calculado confrontando o CAPEX estimado com o benefício anual total projetado, verificando o tempo de retorno do investimento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cálculo de Viabilidade

As etapas supracitadas são de extrema importância para atingir os resultados esperados no projeto e estimar as emissões evitadas de gases de efeito estufa no ambiente.

Com os dados analisados anteriormente e projetos semelhantes, como é o caso da cidade inteligente, Búzios-RJ, é possível estimar o custo do projeto e seu retorno financeiro, porém, alguns dados não foram fornecidos a partir de medições diretas da cidade de Araxá, dessa forma, os cálculos são baseados em dados estimados.

4.1.1 Dados para base de cálculos:

- Consumo anual do município, registrado pela CEMIG em 2023: 330 GWh/ano
- Perdas totais anuais, estimado a partir: 14%

- Dado estimado a partir da média de perdas anuais da energia injetada, publicado pela ANEEL.
- Perdas após modernização, estimado a partir de projetos semelhantes que previram uma redução de aproximadamente 50% de redução com as tecnologias de smart grids: 7%
- Fator de emissão adotado, fornecido por MCTI (Ministério da ciência, tecnologia e inovação) para geração de energia elétrica no Brasil: 38,5KgCO₂/MWh
- Valor do médio do crédito de carbono para geração de energia de fontes renováveis, US\$ 83,79, convertendo em reais e adotando uma cotação de 5,47, temos R\$458,18 reais.
- Preço médio da tarifa CEMIG R\$ 0,80 /KWh, considerando um cenário médio em 2025.
- CAPEX estimado a partir de projetos semelhantes de semelhantes de implantação de redes elétricas inteligentes, tomando como referência a cidade de Búzios-RJ. O capex foi estimado considera as informações coletadas do projeto de búzios, adequadas para as características da cidade de Araxá, de acordo com a Figura 11. Dessa forma, estimasse capex de: R\$ 71.018.938,93.

Figura 11 – Custo Estimado por Bloco

CUSTO ESTIMADO POR BLOCO	
Automação das Redes	R\$ 11.263.122,80
Telecomunicação e Sistemas	R\$ 13.249.434,27
Iluminação Pública	R\$ 2.169.937,04
Despesas Administrativas	R\$ 9.336.444,82
Mão de Obra	R\$ 35.000.000,00
Total	R\$ 71.018.938,93

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4.1.2 Cálculos para estimativa de viabilidade:

- Quantidade de energia economizada em MWh / ano, a partir da fórmula 1.

$$\text{Energia Econ.} = \text{Energia total(MWh)} \times (\text{Perdas antes} - \text{Perdas depois}) \quad (1)$$

$$\text{Energia Econ.} = 330000 \times 0,14 - 0,07 = 23\ 100 \text{ MWh/ano} \quad (2)$$

Onde:

Energia Econ.: Energia economizada

- Quantidade de emissões evitadas em TCO₂, a partir da fórmula 3

$$\text{Emissões Evit.} = \frac{\text{Energia Econ. (MWh/ano)} \times K \text{ (KgCO}_2\text{/MWh)}}{1000} \quad (3)$$

$$\text{Emissões Evit.} = \frac{\text{Energia Econ. (MWh/ano)} \times K \text{ (KgCO}_2\text{/MWh)}}{1000} \quad (4)$$

Onde:

Emissões Evi.: Emissões evitadas

Energia Econ.: Energia economizada

K: Fator de Emissão

- Receita anual de créditos de carbono em reais, a partir da fórmula 5

$$\text{Emissões Evit.} = \frac{\text{Energia Econ. (MWh/ano)} \times K \text{ (KgCO}_2\text{/MWh)}}{1000} \quad (5)$$

$$\text{Receita anual} = 889,35 \times 458,18 = 407\,482,38 \quad (6)$$

- Economia anual de energia elétrica em reais, a partir da fórmula 7

$$\text{Economia anual e. e.} = \text{Energia Econ. (MWh)} \times \text{Valor médio (R\$/MWh)} \quad (7)$$

$$\text{Economia anual e. e.} = 23\,100 \times 800 = 18\,480\,000,00 \quad (8)$$

Onde:

Economia Anual e.e.: Economia anual de Energia Elétrica

Energia Econ.: Energia Economizada

Valor médio: Valor médio da tarifa CEMIG

- Benefício Anual Total: R\$ 18.887.482,38

- Payback da implantação do projeto a partir da fórmula 9.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Capex}}{\text{Benefício Anual}} \quad (9)$$

$$\text{Payback} = \frac{71.018.938,93}{18.887.482,38} = 3,76 \text{ anos} \quad (10)$$

A partir dos cálculos realizados é possível analisar a viabilidade estimada do projeto e confirmar, apesar de represar baixo valor, a capacidade do projeto de gerar créditos de carbono a partir da modernização da rede.

Os cálculos apresentam uma estimativa de payback em 3 anos, 9 meses e 3 dias após a conclusão do projeto, para pagar os investimentos com a modernização da rede, e a partir desse prazo, a geração de lucro para os envolvidos no projeto, conforme a fórmula 10.

A implantação das Smart Grids, além de proporcionar maior eficiência no sistema de energia elétrica, trará uma alternativa sustentável para as falhas elétricas na cidade de Araxá e proporcionará uma nova fonte de renda, créditos de carbono.

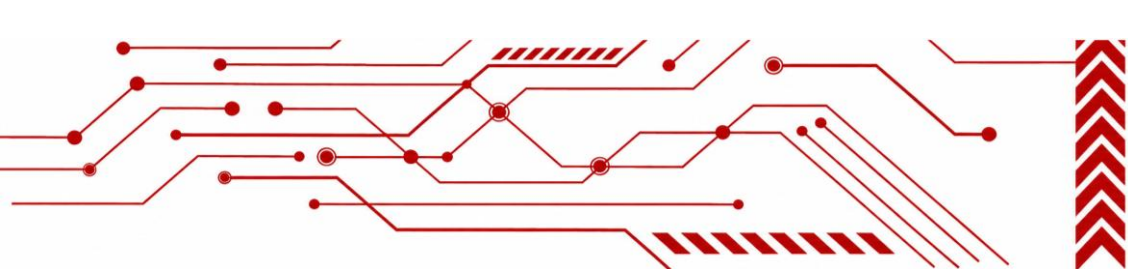
Em contrapartida, algumas limitações podem dificultar a implantação do projeto, como o alto investimento inicial, falta de protocolo robusto de segurança para proteger as informações coletadas, falta de mão de obra especializada para instalação e manutenção dos equipamentos, obsolescência dos equipamentos durante a execução do projeto, tornando necessária a troca e adequação de alguns equipamentos e ausência de mudança do comportamento de uso de energia elétrica do consumidor, que pode comprometer a economia de energia elétrica.

5 CONCLUSÕES

A proposta do projeto de analisar o impacto da modernização da rede elétrica na cidade de Araxá-MG sobre a redução de emissões de gases de efeito estufa e o potencial de geração de créditos de carbono, identificando benefícios ambientais, econômicos e sociais foi cumprida.

De acordo com a análise dos resultados obtidos, foi comprovado que a modernização da rede pode alcançar maior eficiência e confiabilidade a partir da modernização da rede elétrica e integração de fontes de energia renováveis, além de retorno financeiro e geração de créditos de carbono.

Entre os impactos socioambientais estão, redução da emissão de toneladas de CO₂ no ambiente, melhoria nos índices de Duração Equivalente de Interrupção (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção (FEC), redução de perdas técnicas e não técnicas do sistema, maior confiabilidade no sistema



elétrico, além da redução significativa do acionamento de termelétricas para geração de energia.

O projeto é uma alternativa econômica e socialmente viável para implantação e pode se tornar um impulso para uma mudança no cenário atual, tornando a integração de fontes limpas na matriz energética cada vez maior e aumentando a relevância do país no cenário ambiental e no mercado de créditos de carbono.

Para trabalhos futuros, podem ser feitas medições reais em campo e entrevista com a concessionária CEMIG, criar modelos de simulação realistas e realizar cotações atualizadas para o volume de equipamentos e o valor de mão de obra para implantação do projeto. Dessa forma, será possível obter o impacto da modernização com dados mais precisos e entender todas as necessidades dos consumidores e do fornecedor de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ARAXÁ (MG). Prefeitura Municipal. **Prefeitura de Araxá cobra melhorias no fornecimento de energia da CEMIG em reunião com o governo de Minas**. 2025. Disponível em: <https://www.araxa.mg.gov.br/noticia/8369/prefeitura-de-araxa-cobra-melhorias-no-fornecimento-de-energia-da-cemig-em-reuniao-com-o-governo-de-minas>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BARRETTO, E. P. B. M. **Smart grid**: eficiência energética e a geração distribuída a partir das redes inteligentes. 2018. Projeto de Graduação (Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL ENERGIA. Perdas menores em Búzios. **Brasil Energia**, [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/energia/consumidor/perdas-menores-em-buzios>. Acesso em: 6 ago. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **ANEEL regulamenta marco legal da micro e minigeração distribuída**. Brasília, DF: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-regulamenta-marco-legal-da-micro-e-minigeracao-distribuida>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Classes de Consumo**. Brasília, DF: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/classes-de-consumo>. Acesso em: 14 out. 2025.



BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Indicadores de Desempenho Operacional das Distribuidoras 2023**. Brasília, DF: ANEEL, 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Perdas de energia elétrica na distribuição 2025/2024**. Brasília, DF: ANEEL, 2025.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acesso em: 14 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>. Acesso em: 19 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Relatórios bienais de transparência (BTRs)**. Brasília, DF, [2024]. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs>. Acesso em: 17 ago. 2026.

BRASIL. Ministério da Fazenda. **Programa de transformação ecológica: Mercado de Carbono**. Brasília, DF, [202-]. Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica/programas-em-destaque/mercado-de-carbono>. Acesso em: 17 ago. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **GT Modernização do setor elétrico**. Brasília, DF, [2019]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-executiva/modernizacao-do-setor-eletrico/gt-modernizacao>. Acesso em: 30 ago. 2026.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Página inicial**. Brasília, DF, [202-]. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br>. Acesso em: 30 out. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes. **Relatório smart grid**. Brasília, DF: MME, [2010].

BRASIL. Senado Federal. **Plenário aprova adesão do Brasil à segunda fase do Protocolo de Kyoto**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>. Acesso em: 15 ago. 2026.

CARBON FREE BRASIL. **Créditos de carbono**: o que são e como surgiram. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://carbonfreebrasil.com/blog/creditos-de-carbono-o-que-sao-e-como-surgiram/>. Acesso em: 11 out. 2025.

CAVALCANTE, Ney Wagner Freitas et al. Smart Grid na América Latina: Caso Ampla de Inovação no Setor Elétrico. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 23, n. 3, p. 416-435, 2019.

CEMIG. **Conheça a linha de distribuição Araxá 2 – Jaguará**. Belo Horizonte, [s.d.]. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/programa-sustentabilidade/conheca-a-linha-de-distribuicao-araxa-2-jaguara/>. Acesso em: 23 out. 2025.

CEMIG. **Programa Cemig Smart**: Relatório Técnico de Resultados. Belo Horizonte: CEMIG, 2023.

CIGRÉ. **Technical brochure 816**: Smart Grid Benefits Evaluation. Paris: CIGRÉ, 2019.

CPqD. **Projeto P&D ANEEL 043/2021**: Redução de Perdas com Medição Inteligente e Análise de Dados. Campinas: CPqD, 2021.

DEVELOPING WORLD CONNECTIONS. **Carbon calculator**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://developingworldconnections.org/carbon-calculator/>. Acesso em: 12 ago. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço energético nacional 2025**: Ano base 2024: Relatório Final. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

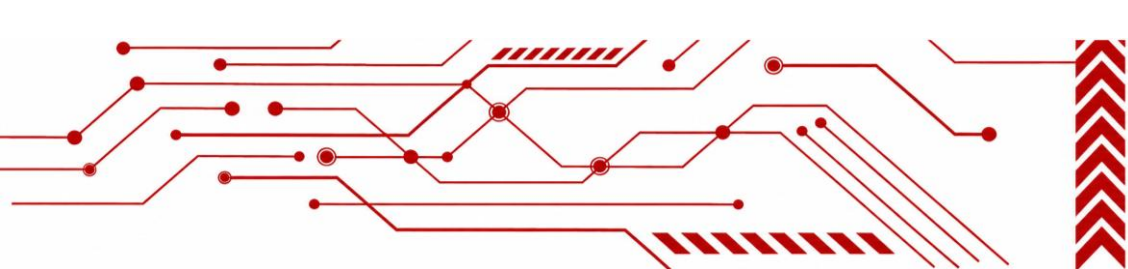
EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e Elétrica**. Rio de Janeiro, [s.d.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/Abcdenergia/Matriz-Energetica-E-Eletrica>. Acesso em: 12 ago. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Relatório técnico**: Smart Grids no Brasil – Diagnóstico e Perspectivas. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

ENEL. **Cidade inteligente Búzios**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt/Sustentabilidade/iniciativas/archive/Cidade_Inteligente_Buzios.html. Acesso em: 15 out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2025**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Entenda as emissões de gases de efeito estufa nos setores de energia e de processos industriais no Brasil em 2023**. São Paulo, 2024. Disponível em:



<https://energiaeambiente.org.br/entenda-as-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-nos-setores-de-energia-e-de-processos-industriais-no-brasil-em-2023-20241113>. Acesso em: 4 ago. 2026.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Integração de energias renováveis ao sistema elétrico brasileiro**. São Paulo: IEMA, 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Relatório anual 2024**. São Paulo: IEMA, 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Transição justa exige reduzir a demanda por petróleo**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/transicao-justa-exige-reduzir-a-demanda-por-petroleo-20250721>. Acesso em: 4 ago. 2026.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA (IPAM). **O que é e como funciona o mercado de carbono?** [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/>. Acesso em: 23 ago. 2026.

INVESTING.COM. **Valor do crédito de carbono hoje — cotação e dados do mercado de créditos de carbono**. *Investing.com*, 2025. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>. Acesso em: 10 dez. 2025.

LOVINS, A. **A 40-year plan for energy**. [S.l.]: TED, 2012. 1 vídeo (27 min). Disponível em: https://www.ted.com/talks/amory_lovins_a_40_year_plan_for_energy?lang=pt&subtitle=pt-br. Acesso em: 6 ago. 2026.

LUMINÁRIA LED Solar 300 W All in One IP67. **Luminária solar**, [s.d.]. Catálogo eletrônico. Disponível em: <https://www.luminariasolar.com.br/product-page/luminaria-led-solar-300-w-all-in-one-ip67-p-postes-de-5-8-m-5-000-lumens>. Acesso em: 29 out. 2025.

MOREIRA, B. Cidades inteligentes: o futuro do smart grid no Brasil. **Revista O Setor Elétrico**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ielider.com.br/noticia/78/Cidades%20inteligentes%3A%20o%20futuro%20do%20smart%20grid%20no%20Brasil%20.html>. Acesso em: 23 out. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Futuro da energia**: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil. São Paulo: Observatório do Clima, 2024. (Brasil 2045: construindo uma potência ambiental, v. 4). ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Tradução: Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio). Rio de Janeiro: UNIC Rio, 2015.



PASSARI, G. H. da S.; VARGAS, F. J. T. Redes elétricas Smart Grid: Estudo de aplicação nas redes de distribuição. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [S.l.], ano 5, ed. 12, v. 5, p. 05-25, dez. 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/redes-de-distribuicao>. Acesso em: [data de acesso não informada].

PAZZINI, L. H. A.; BARBOSA, B. D. Proposta para revisão dos requisitos técnicos da medição de energia elétrica: expansão da abertura do mercado livre no Brasil. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 113-138, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/RMEC.v24n1p113-138>.

PORTAL IMBIARA. IBGE em Araxá derruba prévia do TCU e aponta município com 109.454 habitantes. **Portal Imbiara**, Araxá, [2023]. Disponível em: <https://www.portalimbiara.com.br/noticia/categoria/1/cidade/link/12647/ibge-em-araxa-derruba-previa-do-tcu-e-aponta-municipio-com-109-454-habitantes>. Acesso em: 18 out. 2025.

PROCEL/ELETOBRAS. **Guia de eficiência energética em redes de distribuição**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2021.

RÁDIO VIA 5. **Moradores de Búzios sofrem com quedas de energia constantes e cobram soluções da Enel**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://radiovia5.com/noticia/1654296/moradores-de-buzios-sofrem-com-quedas-de-energia-constantes-e-cobram-solucoes-da-enel>. Acesso em: 15 out. 2025.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL). **O que foi o Protocolo de Quioto e o que é o Acordo de Paris?** 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/o-que-foi-o-protocolo-de-quioto-e-o-que-e-o-acordo-de-paris/>. Acesso em: 13 ago. 2026.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2023**: Relatório Analítico. São Paulo: Observatório do Clima, 2024.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Plataforma SEEG**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em: 11 out. 2025.

WRI BRASIL. **Entenda o que significa o limite de 1,5°C crucial para o aquecimento global**. [S.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/entenda-o-que-significa-o-limite-de-15c-crucial-para-o-aquecimento-global>. Acesso em: 3 nov. 2025.