

MOBILIDADE ELÉTRICA NA UFTM: DESAFIOS, OPORTUNIDADES E A EVOLUÇÃO DA INFRAESTRUTURA DE CARREGAMENTO

Geisla Aparecida de Carvalho – e-mail d201810194@uftm.edu.br
Juliane Cristina de Oliveira Fandi – e-mail Juliane.fandi@uftm.edu.br
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *O estudo avaliou a infraestrutura de recarga de veículos elétricos (VEs) da UFTM, integrada a uma microrrede composta por geração fotovoltaica (FV), gerador a diesel e conexão à rede pública. Durante os picos de demanda, a estação alcançou até 81% da capacidade do sistema elétrico. A geração FV supriu parte expressiva da demanda, mas o gerador a diesel foi necessário para complementar a recarga no período noturno. Embora a operação do sistema a diesel seja viável em situações emergenciais, a ampliação da capacidade FV, associada ao armazenamento de energia em baterias, reduziria a dependência dessa fonte, promovendo maior sustentabilidade ao sistema. A análise também apontou a necessidade de melhorias na infraestrutura elétrica, como a atualização do cabeamento e a implementação de sistemas de controle dinâmico de carga, de modo a garantir eficiência, segurança e capacidade de atender ao crescimento da demanda.*

Palavras-chave: *Geração FV, Infraestrutura de recarga, Microrrede.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa têm levado governos e organizações a adotar políticas de incentivo à transição para modos de locomoção mais sustentáveis. O setor de transportes, um dos principais responsáveis pelas emissões globais, exige uma transformação estrutural em direção a alternativas mais ecológicas. Nesse contexto, a adoção de veículos elétricos (VEs) surge como estratégia fundamental no enfrentamento das mudanças climáticas (International Energy Agency [IEA], 2021).

Embora os VEs não sejam uma tecnologia recente, sua popularização ao longo do século XX foi limitada pela predominância dos motores a combustão. Nos últimos anos, entretanto, fatores como o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e os impactos ambientais da mobilidade convencional têm acelerado sua adoção, impulsionada pela maior conscientização ambiental (Baran, 2015; Barbosa e Lima, 2019). Segundo a IEA (2021), essa transição é essencial para o cumprimento das metas de sustentabilidade.

No Brasil, apesar de alguns avanços, a adoção em larga escala ainda enfrenta obstáculos relevantes. O elevado custo dos VEs, com modelos variando entre R\$ 150.000 e R\$ 300.000 em 2024, e a autonomia limitada, geralmente inferior a 300 km, são fatores restritivos (Gaines, 2019; Barbosa e Lima, 2020). Soma-se a isso a insuficiência da infraestrutura de recarga, sobretudo em áreas urbanas e rodovias, o que dificulta viagens mais longas (Baran, 2015). A ausência de padronização e de regulamentações específicas também se configura como entrave para a criação de uma rede eficiente (IEA, 2021).

A integração de fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica (FV), às estações de recarga de VEs apresenta-se como solução promissora para mitigar tais desafios. No Brasil, diversas iniciativas já demonstram esse potencial, como a estação do Instituto Nacional de Energia Renovável (INER) em Minas Gerais, os sistemas híbridos no campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) (Silva, Santos e Pereira, 2019; Oliveira, Santos e Pereira, 2021) e o projeto da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), que associa geração FV a armazenamento em baterias (Carvalho e Silva 2022). No Rio de Janeiro, o projeto *Sol da Paz* integra fontes solares a sistemas de recarga em locais de grande circulação, como shoppings e estacionamentos (Almeida, Silva e Costa, 2021).

Essas iniciativas evidenciam que a produção solar pode reduzir a dependência de fontes convencionais e aumentar a sustentabilidade das estações de recarga no país. A estação híbrida da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), que combina geração FV com um gerador a diesel, ilustra como a otimização do uso de energia renovável, especialmente em horários de baixa produção solar, pode garantir a continuidade do fornecimento (Almeida e Costa, 2020). Outros projetos, como os da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), também adotam sistemas híbridos, reforçando o potencial dessa abordagem para promover uma mobilidade elétrica sustentável (Lima, Rodrigues e Costa, 2020).

A UFTM implementou uma microrrede híbrida composta por um sistema FV de 10,8 kWp, um gerador a diesel LEÃO LGD38 (30 kW) e uma estação de recarga. O objetivo é otimizar o uso da energia solar e assegurar o fornecimento contínuo, especialmente em horários de pico ou quando a geração solar é insuficiente. Apesar de inovadora, essa solução suscita questionamentos quanto à eficiência do uso de geradores a diesel, sobretudo em uma região cuja matriz energética já é majoritariamente renovável, com forte presença da hidroeletricidade. Em situações de falha na rede elétrica, o uso de

geradores pode se justificar, mas seus impactos ambientais e econômicos precisam ser melhor avaliados no contexto das microrredes urbanas (Pereira e Costa, 2018).

Assim, este estudo analisa a viabilidade técnica e os impactos da integração de sistemas híbridos FV em estações de recarga de VEs, com foco nos benefícios econômicos, operacionais e ambientais dessa solução. A principal contribuição é a avaliação detalhada da microrrede da UFTM, fornecendo subsídios para o uso de fontes renováveis em instituições públicas. A análise do funcionamento combinado do gerador a diesel e da geração FV permitirá uma reflexão crítica sobre práticas operacionais de sistemas híbridos e seus impactos na eficiência energética e na sustentabilidade de longo prazo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O aumento da necessidade por soluções sustentáveis no setor de transportes, aliada à necessidade urgente de mitigar os impactos ambientais, tem impulsionado a adoção da eletromobilidade como alternativa viável. A transição para VEs busca reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a dependência de combustíveis fósseis, promovendo um deslocamento mais limpo e eficiente. Mendonça e Silva (2021) destacam que o uso de fontes renováveis, como a energia solar FV, é essencial nesse processo, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável.

Apesar dos avanços, a eletrificação dos sistemas de locomoção ainda enfrenta barreiras para sua adoção em larga escala. Entre os principais entraves estão o elevado custo de aquisição dos veículos, a infraestrutura de recarga insuficiente e a complexidade de integração com as redes elétricas locais. No Brasil, os preços dos VEs variam entre R\$ 150.000 e R\$ 300.000 em 2024, ao mesmo tempo em que a autonomia média permanece inferior a 300 km, o que dificulta sua popularização (Barbosa e Lima, 2019). Além disso, a escassez de pontos de recarga adequados, especialmente em áreas urbanas e rodovias, limita a viabilidade do uso cotidiano (Baran, 2015).

No que se refere à infraestrutura de recarga e ao uso de energia renovável, a integração de sistemas FV em estações de recarga de VEs tem se mostrado uma solução promissora para reduzir a sobrecarga da rede elétrica convencional. A geração solar oferece uma alternativa eficiente e ecológica para suprir a demanda energética, sobretudo em microrredes híbridas que associam fontes renováveis a geradores a diesel (Rodrigues, Oliveira e Costa, 2022). Experiências internacionais, como as da Alemanha e da China, evidenciam que esses arranjos híbridos contribuem tanto para a ampliação da eletromobilidade em larga escala quanto para a estabilidade da rede elétrica (Carvalho e Silva, 2022).

No Brasil, a região Sudeste apresenta elevado potencial para implantação de sistemas FV, em razão da alta irradiância solar (Brasil, 2022). Silva (2020), em sua dissertação, simulou um sistema de 100 kWp para um eletroposto localizado nessa região, demonstrando a viabilidade técnica e econômica da utilização da energia solar para recarga de VEs. A simulação, realizada no software PVsol, considerou as condições de irradiação solar ao longo do ano, evidenciando que a potência instalada era suficiente para atender à demanda sem sobrecarregar os inversores, garantindo eficiência e confiabilidade.

Assim, a combinação de sistemas FV com armazenamento de energia e geradores a diesel em microrredes híbridas mostra-se uma alternativa eficaz para assegurar a continuidade do fornecimento, sobretudo nos períodos de baixa geração solar. Esse modelo é especialmente aplicável em locais de alta demanda energética, como universidades e instituições públicas. A UFTM, por exemplo, implementou uma microrrede híbrida composta por um sistema FV de 10,8 kWp e um gerador a diesel de 30 kW. Essa abordagem permite otimizar o uso da energia solar e garantir o suprimento contínuo para a estação de recarga, tanto em horários de pico quanto em situações de baixa geração FV.

No que se refere aos problemas técnicos e operacionais, a operação simultânea de múltiplas fontes de energia, como as microrredes híbridas que combinam FV e geradores a diesel, pode apresentar desafios técnicos consideráveis. A operação desses sistemas híbridos, como destacam Carvalho e Silva (2022), requer controle rigoroso sobre sobrecargas e instabilidade de tensão, que podem ocorrer quando a demanda energética das estações de recarga é elevada ou durante flutuações na geração solar. A adoção de estratégias avançadas de controle, como o gerenciamento inteligente de carga, é essencial para prevenir desequilíbrios operacionais e assegurar o desempenho estável do sistema.

A implementação de sistemas de controle em tempo real, conforme demonstrado por Silva e Oliveira (2019), tem se mostrado eficiente na otimização desses sistemas híbridos, especialmente com o emprego de tecnologias de automação e monitoramento inteligente. Ademais, a integração da energia solar à rede elétrica local exige cuidados específicos quanto à qualidade da energia. Silva e Oliveira, (2019) destacam que picos elevados de carga e flutuações de tensão podem comprometer a qualidade energética nos sistemas híbridos, demandando planejamento rigoroso e monitoramento contínuo para garantir o funcionamento seguro e eficiente das estações de recarga.

No âmbito de políticas públicas e incentivos institucionais, a implementação de medidas governamentais representa um fator crucial para o avanço da eletromobilidade. Santos e Lima (2020) ressaltam que o fortalecimento da infraestrutura de recarga depende de incentivos fiscais, benefícios para a instalação de sistemas FV e da criação de normas claras que favoreçam a interoperabilidade das estações. A conscientização da sociedade e o estímulo à inovação tecnológica nas universidades também desempenham papel essencial, conforme apontam Pereira e Costa (2019), destacando a importância das instituições acadêmicas no desenvolvimento de soluções inovadoras e sustentáveis voltadas à mobilidade elétrica.

A coleta de dados técnicos é igualmente fundamental para avaliar o desempenho das infraestruturas de recarga e identificar oportunidades de melhoria. A análise de dados operacionais, incluindo informações sobre carga elétrica em tempo real, permite identificar padrões de uso e ajustar a demanda energética conforme a evolução do sistema. Por

exemplo, o estudo de caso realizado no eletroposto CPFL-Decathlon, em Campinas, utilizou uma taxa de amostragem de 5 minutos para monitorar o perfil dinâmico de recarga de VEs. Esses dados foram essenciais para compreender o comportamento da demanda energética ao longo do tempo e planejar ajustes na infraestrutura de recarga (Cunha, 2022).

A integração da energia solar à infraestrutura de recarga de VEs constitui uma solução promissora para a melhoria da eletromobilidade no Brasil. Sistemas híbridos, que combinam fontes renováveis e geradores a diesel, garantem a continuidade do fornecimento de energia e promovem a sustentabilidade energética. Contudo, para uma implementação bem-sucedida, é imprescindível um planejamento técnico detalhado, o uso de tecnologias avançadas para gerenciamento de carga e o apoio de políticas públicas que incentivem a adoção de soluções sustentáveis. Além disso, o monitoramento constante da demanda energética e da qualidade da energia é crucial para assegurar a eficiência e a viabilidade econômica desses sistemas.

Fontes renováveis, como a energia solar FV, desempenham um papel chave na redução da dependência de combustíveis fósseis e na mitigação das emissões de poluentes (International Energy Agency, 2018; Nehrir, Wang, Strunz e Ramakumar, 2011). A energia solar se destaca pela baixa manutenção, custo reduzido e ampla distribuição, sendo essencial para a transição energética (Villalva e Gazoli e Ruppert, 2009; Yang e French e Bruckman, 2019). No entanto, sua intermitência pode gerar oscilações na qualidade da energia, impactando o desempenho das usinas (Denholm, Kuss e Margolis, 2013; King e Kratochvil, 1997).

A modelagem e simulação do comportamento FV são fundamentais para mitigar esses efeitos e otimizar a gestão da geração. O modelo proposto utiliza uma Rede de Petri Generalizada (GSPN), conectando estados de operação e calculando a geração de energia com base na irradiância solar e no tempo de produção. A equação a seguir define o tempo necessário para a geração de energia, considerando a faixa viável de irradiância (100 W/m² a 1000 W/m²) e o intervalo de observação:

$$\lambda_2 = \frac{\Delta RM \cdot (RM - \min(RM))}{T}$$

Onde:

- RM é o recurso real (medido);
- $\Delta RM = \max(RM) - \min(RM)$ define a faixa viável de irradiância (100 W/m² a 1000 W/m²);
- T é o intervalo de observação.

3. METODOLOGIA

3.1 Tipo e Abordagem do Presente Estudo

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e descritiva (Minayo, 2010), centrada na infraestrutura de recarga de VEs da UFTM e sua integração com a geração FV. A análise baseia-se em documentos técnicos institucionais (Creswell, 2018) e é complementada por uma revisão normativa e bibliográfica sobre tecnologias emergentes no setor energético, bem como inovações no uso de fontes renováveis na mobilidade elétrica (Silva e Oliveira, 2019; Oliveira et al., 2021). O objetivo principal é compreender as dinâmicas operacionais da infraestrutura de recarga, identificar desafios técnicos e explorar possibilidades de otimização, com ênfase nas práticas de operação e na eficiência energética da microrrede da UFTM.

3.2 Lócus do Presente Estudo

O estudo foi conduzido nas instalações da UFTM, em Uberaba, Minas Gerais, onde opera uma estação de recarga de VEs integrada a uma microrrede híbrida. Essa microrrede combina fontes renováveis, como a geração FV, e fontes convencionais, incluindo um gerador a diesel e a rede elétrica pública. A universidade constitui um ambiente estratégico para soluções sustentáveis e inovações tecnológicas, conforme destacam Pereira e Silva (2016), devido ao seu papel na experimentação e disseminação de inovações energéticas.

3.3 Sujeitos e Fontes de Dados

- A principal fonte de dados foi a documentação técnica fornecida pelo professor Arnaldo Rosentino Junior, responsável pelo projeto da infraestrutura energética da UFTM. Os dados coletados incluíram:
- Plantas e diagramas elétricos da microrrede;
- Registros de consumo e operação da estação de recarga;
- Relatórios institucionais sobre o desempenho da geração FV;
- Estudos técnicos dos equipamentos utilizados na microrrede.

A análise documental, conforme Fontanella et al. (2018), foi essencial para compreender a configuração operacional do sistema, identificar limitações técnicas e validar as hipóteses com base em dados reais. Esse processo permitiu comparar os dados operacionais com as previsões do projeto e entender o desempenho da estação de recarga. A Tabela 1 apresenta os padrões de uso e a frequência de carregamento da estação de recarga de VEs da UFTM.

Tabela 1 – Padrões de uso e frequência de carregamento

Veículo Elétrico	Número de Carregamentos Diários	Consumo Médio por Carregamento (kWh)	Total de Consumo Diário (kWh)
Carregamento de VE 1	3	15	45 kWh

Com base nos registros operacionais e nas especificações do veículo BYD Song Plus (bateria de 18,3 kWh), a média de consumo estimado por carga foi calculada em 15 kWh. Este valor reflete o consumo diário do veículo, considerando condições de uso comuns e a eficiência do processo de carregamento, que pode variar dependendo da utilização real do veículo. A análise detalhada desses documentos possibilitou a identificação dos padrões de uso do ponto de recarga e das especificações técnicas dos equipamentos envolvidos, como plantas elétricas, relatórios de desempenho e diagramas técnicos. Além disso, uma revisão normativa foi realizada, com o estudo das regulamentações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Ministério de Minas e Energia (MME), para entender as diretrizes e políticas relacionadas à implementação de infraestruturas de recarga.

3.4 Instrumentos e Procedimentos de Coleta de Dados

Os procedimentos de coleta de dados adotados neste estudo foram:

1. Análise documental: Avaliação detalhada dos registros técnicos da estação de recarga e da microrrede, incluindo informações sobre o sistema de geração FV (10,8 kWp), o gerador a diesel LEÃO LGD38 (30 kW), inversores, painéis de controle, disjuntores e medidores de energia.
2. Revisão normativa: Estudo das regulamentações da ANEEL, MME e ABNT relacionadas à recarga veicular e integração de fontes renováveis, com o objetivo de compreender as políticas e normativas que impactam a implementação da infraestrutura de recarga.
3. Pesquisa bibliográfica aplicada: Levantamento de estudos sobre carregamento inteligente, geração FV, sistemas híbridos e desempenho energético em estações de recarga (Kuhn, 2017; Rodrigues et al., 2022).

A coleta de dados abordou aspectos técnicos da infraestrutura e limitações operacionais, como a capacidade de recarga, a variabilidade solar e a gestão de carga. A Tabela 2 resume os principais obstáculos identificados na operação do sistema:

Tabela 2 – Gargalos técnicos e operacionais da infraestrutura

Gargalo Identificado	Descrição	Impacto no Sistema
Capacidade da Rede de Recarga	A infraestrutura de recarga é limitada pela capacidade do inversor e da rede elétrica local.	A capacidade da rede pode ser insuficiente em períodos de alta demanda.
Flutuação na Geração FV	A variabilidade solar afeta a geração FV, podendo não suprir toda a demanda.	Pode haver necessidade de acionamento do gerador a diesel.
Gestão da Carga	A microrrede não conta ainda com automação total na gestão da carga entre as fontes de energia.	A gestão manual limita a eficiência no balanceamento de carga.

Esses obstáculos foram identificados a partir da análise dos dados documentais e da operação do sistema. Eles não apenas impactam a eficiência da microrrede, mas também podem afetar diretamente o custo operacional e a sustentabilidade a longo prazo. A capacidade limitada de recarga, combinada com a variação da geração FV, implica em períodos de inatividade ou uso do gerador a diesel, o que aumenta os custos e diminui os benefícios ambientais do sistema.

3.5 Técnicas de Análise

Os dados coletados foram analisados por meio da categorização qualitativa, conforme Fontanella, Ricas e Santos (2018), utilizando as seguintes categorias de análise:

- Capacidade elétrica instalada no eletroposto: Considerando a geração FV de 10,8 kWp e o apoio do gerador a diesel LEÃO LGD38.
- Padrões de uso e frequência de carregamento: Identificação dos padrões de utilização da estação de recarga, com base nos dados de operação da estação e no consumo de energia.
- Limitações técnicas e operacionais: Avaliação das limitações do sistema, como a capacidade da rede de recarga e a gestão das fontes de energia.
- Potencial de crescimento da geração FV e da rede de recarga: Projeções sobre a expansão da capacidade de geração FV e da infraestrutura de recarga, levando em conta o aumento da frota de VEs e os avanços tecnológicos.

A categorização identificou limitações operacionais e sugeriu melhorias no funcionamento do sistema. A Tabela 3 mostra as projeções de crescimento da unidade de recarga e geração FV.

Tabela 3 – Potencial de crescimento da geração FV e da rede de recarga

Fatores Considerados	Projeção de Crescimento	Justificativa
Aumento da Frota de VEs	Espera-se crescimento de 20% ao ano na frota de VEs.	Baseado nas tendências de adoção de VEs no Brasil.
Aumento da Geração FV	Aumentar 5 kWp a cada 2 anos.	O crescimento depende de recursos e novas instalações solares.
Capacidade de Recarga	Necessidade de aumentar o número de pontos de recarga.	A demanda tende a aumentar com o crescimento da frota.

Essas projeções, apresentadas na Tabela 3, foram baseadas em dados sobre as tendências de adoção de VEs no Brasil (Oliveira et al., 2021) e em estimativas de especialistas nos setores de energia solar e mobilidade elétrica. Os valores refletem o crescimento esperado da frota elétrica, assim como da capacidade de geração FV, levando em consideração as condições específicas da UFTM e a crescente demanda por soluções sustentáveis.

3.6 Caracterização da Microrrede da UFTM

A microrrede da UFTM integra três fontes principais de energia:

1. Geração FV de 10,8 kWp: Instalada em carports e telhados da universidade, esta fonte abastece a estação de recarga e outras instalações com energia renovável.
2. Gerador diesel LEÃO LGD38 (30 kW): Ativado automaticamente em situações de baixa geração solar ou alta demanda, garantindo a continuidade do fornecimento de energia.
3. Rede elétrica pública: Complementa a geração de energia, fornecendo eletricidade quando a produção FV é insuficiente para atender à demanda.

A análise inicial de desempenho da microrrede considerou estimativas de geração FV e o consumo da estação de recarga. Com 10,8 kWp, a geração FV está projetada para produzir aproximadamente 243 kWh/dia, com base em uma irradiância média de 5 kWh/m²/dia e 4,5 horas de sol efetivas por dia, valores típicos para Uberaba, MG.

A geração FV foi estimada com base nos dados históricos de irradiância solar e nas especificações do sistema instalado, considerando as condições locais de Uberaba. O cálculo da produção excedente, considerando a demanda diária de 150 kWh da estação de recarga, forneceu uma visão mais precisa da capacidade da rede local em atender a essa demanda.

Tabela 4: Estimativas de Geração FV e Demanda

Componente	Estimativa Diária (kWh)
Geração FV	243 kWh
Demanda da estação de recarga	150 kWh
Geração excedente	93 kWh

A Figura 1 apresenta o gerador diesel LEÃO LGD38, que entra em operação automaticamente em caso de falha na geração FV ou na rede pública, garantindo o fornecimento contínuo de energia.



Figura 1 – GMG

O gerador foi dimensionado para fornecer energia adicional durante períodos de baixa irradiância solar ou picos de demanda, quando a geração FV não é suficiente. Estima-se que o consumo diário de combustível seja de 12,5 litros, com um custo aproximado de R\$ 62,50 por dia.

Além disso, o sistema de geração FV apresenta impacto ambiental positivo, contribuindo para a redução das emissões de CO₂. A produção diária de 243 kWh de energia renovável evita a emissão de cerca de 109,35 kg de CO₂, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade da UFTM. A Figura 2 ilustra a estação de carregamento de VEs da Universidade, que utiliza fontes híbridas de energia para abastecer a frota da instituição. Esse ponto de recarga desempenha papel essencial na rede local, embora também apresente desafios devido à concentração de demanda em horários específicos.



Figura 2 – Estação de carregamento de veículos

A Figura 3 apresenta a microrrede da universidade de estudo em foco, detalhando a interligação entre o sistema de geração FV e a rede elétrica pública. O sistema híbrido possibilita o balanceamento entre as fontes de energia, com o gerador a diesel sendo acionado apenas quando necessário. Entretanto, para aumentar a eficiência energética, é fundamental ampliar a capacidade de geração renovável e otimizar o controle de carga, reduzindo a dependência de fontes não renováveis.



Figura 3 – Microrrede da UFTM

A Figura 4 ilustra o carregamento de um VE específico, utilizado por uma professora da UFTM. Esse exemplo é representativo do uso diário da estação de recarga. A análise dos padrões de recarga permite prever os picos de demanda, otimizando a gestão do sistema, minimizando sobrecargas e promovendo a sustentabilidade da infraestrutura de abastecimento.



Figura 4 – Carregamento do veículo

A Figura 5 apresenta o diagrama trifilar da microrrede da UFTM, destacando as interconexões entre o gerador a diesel, os inversores FV e a rede pública. O sistema automatizado ajusta dinamicamente a carga, priorizando a geração solar sempre que possível, e assegura a continuidade do fornecimento de energia, especialmente em situações de falha na rede elétrica ou na geração solar. A implementação de controle inteligente, aliada à ampliação da capacidade FV, é fundamental para reduzir a dependência do gerador a diesel, tornando o sistema mais autossustentável e alinhado aos princípios de eficiência energética.

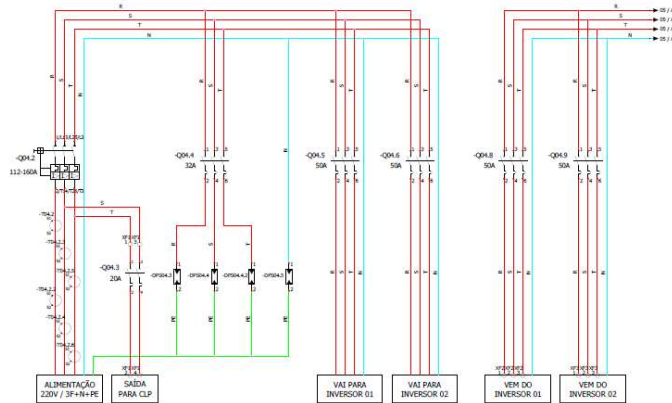


Figura 5 – Diagrama trifilar da microrrede da UFTM

A imagem ilustra as principais conexões do sistema, incluindo a unidade geradora, os inversores FV e os medidores de energia. O gerador a diesel é acionado automaticamente quando necessário, garantindo o fornecimento contínuo em caso de falhas na geração solar ou na rede elétrica. A configuração híbrida da microrrede permite o balanceamento de carga entre as fontes de energia, com gestão inteligente dos recursos, o que otimiza a eficiência e reduz os custos operacionais. A automação completa, prevista para implementação futura, proporcionará maior flexibilidade e eficiência na operação.

A Figura 6 apresenta o inversor utilizado na estação de carregamento de VEs da instituição de ensino, conectado aos painéis FV. Esse dispositivo de conversão converte a energia de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), tornando-a compatível com o sistema elétrico da estação. Dessa forma, a energia solar pode ser utilizada diretamente na recarga dos veículos, reduzindo custos e promovendo a sustentabilidade. Além disso, o sistema de conversão facilita a integração com a rede elétrica pública, gerenciando o fluxo de energia e assegurando uma operação estável, com alta eficiência e mínima perda.



Figura 6 – Inversor

A Figura 7 apresenta os dados operacionais da estação de carregamento, informações essenciais para avaliar o desempenho e a demanda da estação ao longo do tempo. A análise de parâmetros como tempo de carga, potência média consumida e picos de demanda fornece dados valiosos para o planejamento e dimensionamento adequados de futuras ampliações da infraestrutura de recarga. Com base nesses elementos, é possível implementar ajustes no sistema, como controle inteligente de carga e balanceamento dinâmico entre as fontes de energia, visando otimizar a operação da estação e reduzir custos operacionais e impactos ambientais.

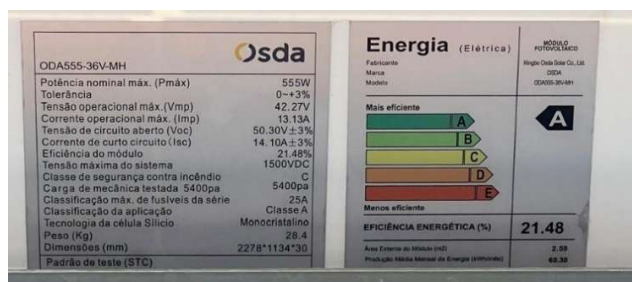


Figura 7 – Dados da Estação de Carregamento

3.7 Funcionamento e Gestão da Microrrede

A microrrede da UFTM opera de acordo com dois modos principais:

1. **Modo Conectado:** Nesse modo, a microrrede está interligada à rede elétrica pública, o que possibilita complementar a geração FV e acionar o gerador a diesel quando há alta demanda ou baixa geração solar.
2. **Modo Ilha (Isolado):** Quando há falha na rede pública ou no sistema FV, a unidade opera de forma isolada, utilizando apenas as fontes locais de geração (solar e diesel).

De forma complementar, a rede local realiza o monitoramento contínuo de parâmetros elétricos, como corrente e tensão, nos pontos críticos da rede. Isso permite o ajuste automático da potência de recarga, evitando sobrecargas e falhas no fornecimento de energia. Caso a demanda ultrapasse a capacidade de geração, o sistema reduz automaticamente a potência de recarga para manter a estabilidade da rede.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perfil de Operação e Desempenho da Estação de Recarga

O aumento da frota de VEs em estados como São Paulo tem sido amplamente estudado, evidenciando uma projeção de crescimento relevante até 2035. A pesquisa de Dias (2020), por exemplo, demonstra que o crescimento da frota de veículos no estado, aliado ao crescimento do PIB, sugere um impacto direto na demanda por energia elétrica, resultando em uma pressão sobre as infraestruturas de carregamento. Embora, os dados desse autor se concentrem no estado de São Paulo, a tendência de crescimento da frota de VEs pode ser extrapolada para cidades do interior, como Uberaba, que, assim como outras regiões, está inserida no movimento global de transição para a mobilidade elétrica. Tabela 5. Este crescimento da frota evidencia a necessidade de uma infraestrutura de recarga mais robusta e atualizada.

Tabela 5: Projeção do índice de crescimento do PIB do estado de São Paulo (%). (Matriz SP 2035)

Ano	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035
PIB	3,54	4,32	3,39	3,38	3,31	3,20	2,90

A Figura 6, que ilustra a projeção do crescimento da frota de VEs no estado de São Paulo, é representativa de uma tendência mais ampla de adoção de tecnologias sustentáveis no Brasil.

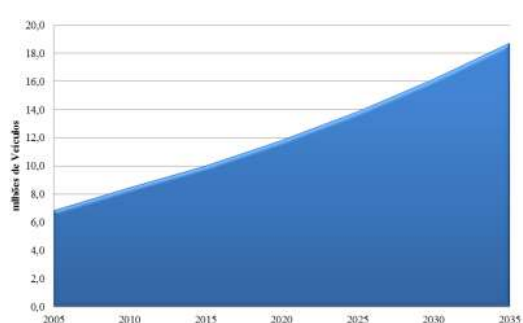


Figura 6 – Projeção da frota total de automóveis do estado de São Paulo.

Conquanto, o foco da pesquisa de Dias seja em São Paulo, é razoável supor que esse aumento também se refira a Uberaba, especialmente com o aumento do interesse e da adoção de carros elétricos nas regiões urbanas e no interior.

A demanda crescente por recarga de VEs requer adaptações nas bases, como o aprimoramento das estações de recarga e o crescimento da capacidade da rede elétrica local.

A UFTM, atualmente, possui uma microrrede trifásica projetada para operar com tensão de 220 V e suportar até 160 A por fase. Contudo, com o crescimento previsto de 15% na frota de VEs em Uberaba, o consumo energético da instituição aumentará relativamente, exigindo atualizações na infraestrutura elétrica existente. Essas melhorias, que incluem a substituição do cabeamento, a implementação de sistemas de proteção adicionais e o controle dinâmico de carga, são fundamentais para garantir o funcionamento seguro e eficiente das estações de recarga, acompanhando o crescimento da frota de VEs.

Atualmente, a geração FV já atende até 60% das necessidades energéticas durante o dia. No entanto, o uso de gerador a diesel para suprir o consumo noturno resulta em elevados custos operacionais e impactos ambientais. Para reduzir essa dependência, recomenda-se a ampliação da capacidade de geração FV em 5 kWp a cada dois anos, juntamente com a implementação de baterias de grande capacidade, visando aumentar a autossuficiência e a sustentabilidade no fornecimento de energia.

Em relação aos investimentos necessários para essas melhorias, estudos realizados estimam um valor inicial de R\$ 500.000,00, o qual será recuperado por meio de uma economia de 15% nos custos operacionais anuais, com destaque para a redução no consumo de combustível do gerador a diesel. Segundo Bertoldi e Rezessy (2015), investimentos em eficiência energética e em tecnologias renováveis são essenciais para reduzir os custos operacionais a longo prazo, ao mesmo tempo em que atendem aos objetivos de sustentabilidade das instituições de ensino superior. A substituição do gerador a diesel por soluções mais sustentáveis não só reduziria a pegada de carbono, mas também alinharia a universidade com suas metas ambientais.

A viabilidade econômica dessa abordagem é respaldada por Oliveira (2018), que observa que a adoção de infraestruturas sustentáveis em instituições acadêmicas tem gerado retorno considerável, tanto na redução de custos quanto no cumprimento das metas ambientais. Seixas e Azevedo (2017) reforçam que a infraestrutura verde é essencial para garantir que as universidades públicas atendam às crescentes demandas por mobilidade elétrica e energia renovável, contribuindo também para a redução das emissões de carbono.

Portanto, com base nas projeções de crescimento e nas necessidades identificadas, é possível concluir que os investimentos necessários para a UFTM não são apenas financeiramente viáveis, mas também estratégicos para garantir sustentabilidade, eficiência energética e a redução de custos operacionais a longo prazo.

4.2 Características Operacionais da Estação de Carregamento

A estação de carregamento de VEs da UFTM tem potência nominal de 7,4 kW e integra uma microrrede híbrida, composta por três fontes principais: geração FV de 10,8 kWp, gerador a diesel de 30 kW e conexão à rede pública. A curva de carga apresentada na Figura 7 mostra picos de demanda de até 25 kW, principalmente nos horários de maior movimento no campus, com quatro picos diários, coincidentes com o final do expediente acadêmico. Para otimizar a operação e reduzir os picos simultâneos, recomenda-se a implementação de algoritmos de controle inteligente, que distribuirão a carga ao longo do dia e aumentarão a eficiência do sistema. A adoção de sistemas de controle dinâmico de carga também ampliará a flexibilidade e o gerenciamento da energia. Os dados utilizados foram extraídos em 30/01/2025.



Figura 7 – Gráfico de Curva de Carga da Estação de Carregamento de VEs da UFTM no Período de 7 dias

A implementação de algoritmos de controle inteligente pode melhorar consideravelmente a eficiência energética e a flexibilidade operacional, permitindo um gerenciamento mais dinâmico da energia disponível e prevenindo sobrecargas. Esta figura apresenta a variação da carga da estação ao longo de sete dias consecutivos, destacando os quatro picos de demanda que coincidem com os períodos de maior movimento, como o final do expediente acadêmico. Embora a estação opere dentro dos parâmetros adequados, esses picos indicam a necessidade de otimizar a infraestrutura para acomodar o crescimento da frota de VEs. A adoção desses algoritmos ajudaria a distribuir a carga de maneira mais equilibrada ao longo do dia, garantindo maior eficiência e sustentabilidade na operação.

4.3 Análise das Oscilações de Tensão e Capacidade da Micro Rede

A Figura 8 ilustra as oscilações de tensão na estação de carregamento de VEs. Embora flutuações de até $\pm 5\%$ estejam dentro dos limites estabelecidos pela ABNT NBR 5410, essas variações podem afetar a durabilidade dos

equipamentos da microrrede, especialmente inversores e controladores de carga. A implementação de sistemas de controle de tensão, como bancos de capacitores, poderia melhorar a qualidade da energia fornecida, prevenindo falhas nos sistemas e aumentando a eficiência operacional ao longo do tempo.



Figura 8 – Gráfico de Curva de Carga da Estação de Carregamento de VEs da UFTM no Períodos Analisados

Outrossim, a adoção de controladores dinâmicos de carga e tecnologias inteligentes de gerenciamento energético contribuiria para minimizar essas flutuações, potencializando a confiabilidade e a durabilidade da microrrede, assegurando um desempenho otimizado e prolongando a vida útil dos componentes.

4.4 Impacto do Carregamento Simultâneo e Necessidade de Ajustes na Infraestrutura

Durante os horários de pico, especialmente quando o carregamento de VEs coincide com outras demandas do campus, o sistema elétrico se torna um ponto crítico. A segmentação dessa rede surge como uma solução estratégica para gerenciar sobrecargas e otimizar o desempenho geral. A Figura 9 ilustra a sobrecarga observada nesses períodos, quando o abastecimento dos veículos coincide com outras necessidades do campus. A carga elevada registrada evidencia a urgência de modernizar os componentes, incluindo a substituição de transformadores e cabeamento. Tais ajustes são essenciais para garantir que a estação de recarga possa suportar o crescimento da frota de VEs e o aumento da demanda. A reconfiguração da infraestrutura elétrica possibilitará um controle mais eficiente dos picos de carga, prevenindo danos aos componentes da microrrede. Por outro lado, a atualização dessa estrutura não só aprimoraria a operação, mas também reduziria os riscos de falhas e interrupções, garantindo maior confiabilidade no fornecimento de energia. Os dados foram extraídos em 04/02/2025.



Figura 9 – Gráfico de Curva de Carga da Estação de Carregamento de VEs da UFTM no Monitoramento de 2 dias

Recomenda-se, portanto, a atualização dos transformadores e do cabeamento, garantindo que o sistema suporte as demandas máximas previstas. Outro ponto importante é que, a segmentação da rede em zonas específicas será fundamental para proporcionar maior controle e eficiência no gerenciamento das sobrecargas, preservando a estabilidade e a eficácia do sistema.

4.5 Padrões de Uso, Picos de Demanda e Limitações Identificadas

Embora a microrrede da UFTM esteja operando de forma eficiente nas condições atuais, a análise da carga revela que os picos de demanda, registrados principalmente entre 7h-10h e 16h-19h, evidenciam fragilidades estruturais na infraestrutura de distribuição de energia. Esses picos, que ocorrem durante os horários de maior consumo, expõem limitações estruturais críticas no sistema, o que pode comprometer a sua capacidade de atender à crescente demanda por energia. Esses picos de demanda também podem causar oscilações de tensão, que, embora dentro dos limites permitidos pela ABNT NBR 5410, podem afetar a durabilidade dos equipamentos da microrrede, como inversores e controladores de carga. Essas fragilidades não afetam apenas a estabilidade operacional a curto prazo, mas também comprometem a viabilidade do sistema a longo prazo. Sem as devidas correções, o aumento da frota de VEs e a expansão das necessidades energéticas do campus podem resultar em sobrecargas, aumento de custos operacionais devido a manutenções corretivas mais frequentes e maior dependência de fontes de energia não renováveis, como o gerador a diesel, o que contraria as metas ambientais da instituição. Portanto, resolver essas questões é essencial para garantir a eficiência e sustentabilidade do sistema.

Dentre as soluções propostas para mitigar os efeitos das oscilações de carga e garantir a estabilidade do sistema, destacam-se o uso de sistemas de controle adaptativo, que ajustam a distribuição de carga em tempo real, e a integração de bancos de baterias para otimizar a autossuficiência, reduzir a dependência do gerador a diesel e melhorar o desempenho da estação de recarga. A implementação de dispositivos IoT, permitindo o monitoramento em tempo real, também desempenha um papel fundamental, proporcionando uma gestão dinâmica e preditiva da carga. Essas soluções não apenas aumentam a confiabilidade do sistema, mas também prolongam a vida útil de seus componentes, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência geral.

Para garantir a estabilidade a longo prazo, é fundamental adotar mecanismos automáticos que limitem a corrente de recarga durante os horários críticos, evitando sobrecargas e assegurando o funcionamento contínuo da microrrede. Com o crescimento contínuo da frota de VEs e as crescentes necessidades energéticas do campus, a implementação dessas melhorias não só garantirá a operação eficiente do sistema no curto prazo, mas também preparará a microrrede da UFTM para um futuro mais sustentável e independente.

5. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que, durante os períodos de maior demanda, a estação de recarga atingiu 81% da capacidade nominal do circuito. Esse valor foi obtido comparando a carga máxima registrada com a capacidade total do sistema, levando em consideração os picos de demanda que ocorreram simultaneamente ao funcionamento de outros sistemas do campus, como climatização. Esses picos de carga elevados geraram flutuações de tensão de até 5%, comprometendo parcialmente a estabilidade da microrrede.

Embora a geração FV tenha atendido até 60% da demanda nos períodos de maior irradiação solar, o uso do gerador a diesel não se mostra uma solução sustentável a longo prazo. A energia elétrica proveniente da rede e do sistema solar local representa uma alternativa mais limpa e eficiente, com os geradores a diesel indicados apenas para situações emergenciais. Para aprimorar a operação, recomenda-se a implementação de sistemas automáticos de controle dinâmico de carga e de balanceamento de potência, fundamentais para evitar sobrecargas e garantir maior estabilidade. A integração de sistemas de armazenamento de energia, como baterias, é também essencial para aumentar a autossuficiência, reduzir a intervenção manual e proporcionar maior flexibilidade ao sistema.

Portanto, embora a microrrede seja funcional para as necessidades acadêmicas e institucionais, são necessárias melhorias técnicas para superar suas limitações. A otimização do controle de carga, a redução da dependência de geradores a diesel e o aprimoramento da gestão de energia são essenciais para garantir a sustentabilidade e escalabilidade do sistema, promovendo uma operação mais eficiente e alinhada aos princípios ambientais.

Agradecimentos

Agradeço à Prof^ª Dr^ª Juliane Cristina de Oliveira Fandi pela orientação dedicada e apoio durante todas as etapas deste trabalho. Aos professores Dr. Fabrício Augusto Matheus Moura e Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, pela valiosa contribuição acadêmica e incentivo. Ao colega Guilherme Nascimento, pela colaboração na coleta de dados e elaboração dos gráficos. Ao meu esposo, Alexandre Santana de Oliveira, pelo suporte e motivação constantes. Dedico este trabalho ao meu pai, José Eustáquio, e à memória de minha mãe, cuja inspiração segue presente em minha trajetória.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2004.
- ALMEIDA, C. A. S. de; LIMA, NILSON G.; PEREIRA, R. P. A.; CASTRO, M. C. de. Estudo da viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos em microrredes urbanas. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 9, n. 2, p. 21-34, 2020.
- ALMEIDA, P. A.; OLIVEIRA, L. M.; RODRIGUES, R.; COSTA, A. Projeto Sol da Paz: Expansão da infraestrutura de recarga de VEs com fontes renováveis no Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 16(4), 120-133, 2021.
- ANFAVEA. Anuário da Indústria Automotiva Brasileira. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. São Paulo. 2009.
- BARAN, E. Desafios para a adoção de veículos elétricos no Brasil: custo, infraestrutura e regulamentação. *Revista de Mobilidade Sustentável*. 2015.
- BARAN, M. Electric vehicles in Brazil: Opportunities and challenges. *Journal of Sustainable Transport*, 12(4), 253- 267, 2015.
- BARBOSA, A. C., LIMA, R. F. Desafios para a adoção de veículos elétricos no Brasil: Análise do cenário atual e perspectivas futuras. *Revista Brasileira de Mobilidade Sustentável*, v. 8, n. 1, p. 56-72, 2019.
- BARBOSA, L. S.; LIMA, P. R. Desafios e custos da adoção de veículos elétricos no Brasil: uma análise da infraestrutura de recarga e viabilidade econômica. *Revista Brasileira de Mobilidade Sustentável*, 5(1), 42-59, 2020.
- BERTOLDI, P., & REZESSY, S. (2015). "Energy Efficiency and Renewable Energy in the Public Sector: A Review of Policies and Financing." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 7(3).
- BRASIL. Potencial solar para geração fotovoltaica no Brasil: O mercado e a viabilidade. Ministério de Minas e Energia, Instituto Nacional de Energia Solar. 2022.

- BIONDO, E. Painel Microrrede UFTM: Esquema elétrico. 1. ed. Uberaba, MG: Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), 2024. Documento ENGEUP-P051-PQDG-00-02.
- CARVALHO, A. S.; SILVA, R. F. Integração de sistemas fotovoltaicos e armazenamento em baterias em estações de recarga de veículos elétricos: O caso da UFES. *Energia e Sustentabilidade*, 33(2), 159-171, 2022.
- CUNHA, G. Análise de dados operacionais em eletropostos de recarga de veículos elétricos: Estudo de caso do eletroposto CPFL-Decathlon, Campinas, 2022.
- CRESWELL, John W. *Pesquisa qualitativa: planejamento e design*. 4. ed. Porto Alegre: Penso, 2018.
- DENHOLM, P., KUSS, M., MARGOLIS, R. M. Co-benefits of large scale plug-in hybrid electric vehicle and solar PV deployment. *Journal of Power Sources* 236 (2013) 350-356. Elsevier, 2013.
- DIAS, M V, X. Impacto no consumo de energia elétrica e nas emissões decorrente da introdução de carros elétricos na frota de automóveis. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, 2013.
- IEA, I. E. A. (2018). World energy balances: Overview. <https://shorturl.at/fuL46>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2021. International Energy Agency.2021.
- KING, D. L., KRATOCHVIL, J. A., and Boyson, W. E. (1997). Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors. In IEEE Conference on Photovoltaic Specialists, pages 1113–1116.
- KUNH, M. Desempenho energético e otimização de sistemas fotovoltaicos em estações de recarga de veículos elétricos. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, 21(3), 310-325, 2017.
- LIMA, P. R., SILVA, F. A., RODRIGUES, J. P., COSTA, A. P. Sistemas híbridos de recarga de veículos elétricos na UFPE: Impactos operacionais e energéticos. *Energia e Meio Ambiente*, 22(4), 400-411, 2020.
- MATRIZ ENERGÉTICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - 2035. Secretaria de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo.2010.
- MENDONÇA, M., SILVA, A. O uso de fontes renováveis na transformação da matriz energética para mobilidade elétrica. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*.2021.
- MINAYO, Maria Célia de Souza. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde*. 13. ed. São Paulo: Hucitec, 2010.
- NEHRIR, M., WANG, C., STRUNZ, K., AKI, H., RAMAKUMAR, R., Bing, J., Miao, Z., and Sala-meh, Z. (2011). A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(4):392–403.
- OLIVEIRA, L. M., SANTOS, A. C., PEREIRA, J. R., MARTINS, M. A. Sistema de recarga híbrido de veículos elétricos no campus da UFJF: Análise de desempenho e custos. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 24(3), 202-210, 2021.
- OLIVEIRA, L. M. Viabilidade Econômica de Projetos Sustentáveis em Instituições de Ensino: O Caso da Energia Renovável em Universidades." *Revista Brasileira de Sustentabilidade*, 12(4),2018.
- PEREIRA, C. P., E SILVA, R. F. O papel das universidades na experimentação e difusão de inovações energéticas. *Revista Brasileira de Energia Sustentável*, 12(4), 345-360, 2016.
- PEREIRA, C. P.; COSTA, M. Análise da viabilidade dos geradores a diesel em sistemas híbridos no Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, 29(6), 717-729, 2018.
- PEREIRA, D.; COSTA, M. A inovação tecnológica nas universidades e o desenvolvimento da mobilidade elétrica sustentável. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, 10(2), 56-70, 2019.
- RODRIGUES, R.; OLIVEIRA, P.; COSTA. A integração de geração fotovoltaica nas estações de recarga de veículos elétricos: uma análise de soluções híbridas. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 15(2), 101-114, 2022.
- SILVA, F. Análise de viabilidade de sistemas fotovoltaicos em eletropostos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. 2020.
- SILVA, R. F.; OLIVEIRA, L. M. Sistemas híbridos de recarga de veículos elétricos na UFJF: Experiência e desafios. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 11(1), 45-56, 2019.
- SEIXAS, J.; AZEVEDO, I. Infraestrutura Verde e Mobilidade Elétrica em Instituições de Ensino: A Necessidade de Modernização Energética. *Revista de Energia e Sustentabilidade*, 21(2), 2017.
- VILLALVA, M. G., GAZOLI, J. R., RUPPERT, F, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5):1198–1208.
- YANG, H. E., FRENCH, R., BRUCKMAN, L., editors (2019). *Durability and Reliability of Polymers and Other Materials in Photovoltaic Modules*. William Andrew, 1 edition.

Abstract. *The study evaluated the electric vehicle (EV) charging infrastructure at UFTM, integrated into a microgrid composed of photovoltaic (PV) generation, a diesel generator, and connection to the public grid. During peak demand periods, the station reached up to 81% of the electrical system's capacity. PV generation supplied a significant portion of the demand, but the diesel generator was necessary to complement charging during nighttime. Although operating the system with diesel is viable in emergency situations, expanding PV capacity combined with energy storage in batteries would reduce dependence on this source, promoting greater sustainability for the system. The analysis also highlighted the need for improvements in the electrical infrastructure, such as upgrading the cabling and implementing dynamic load control systems, to ensure efficiency, safety, and the ability to meet growing demand.*

Keywords: *PV generation, Charging infrastructure, Microgrid.*