

INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA AUXILIAR DE SUBESTAÇÃO

Dionathas Joaquim da Costa
Paulo Sérgio Pádua de Lacerda

RESUMO

Esta pesquisa investiga a viabilidade técnica, operacional e ambiental da integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas auxiliares de alimentação de subestações elétricas no Brasil. A motivação do estudo baseia-se na crescente demanda por soluções energéticas mais resilientes, sustentáveis e eficientes no contexto das infraestruturas críticas. Os sistemas auxiliares — que compreendem painéis de controle, relés de proteção, módulos de automação e iluminação de emergência — são essenciais para a operação segura e contínua das subestações. No entanto, a atual dependência desses sistemas em relação ao suprimento convencional de energia, frequentemente vinculado à matriz hidrotérmica, representa riscos operacionais relevantes, especialmente em casos de falhas na rede elétrica ou eventos climáticos extremos, como secas prolongadas ou tempestades. O problema de pesquisa está centrado na vulnerabilidade do modelo elétrico centralizado, que carece de autonomia e de redundância suficiente para garantir o funcionamento ininterrupto das cargas auxiliares. Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica surge como uma alternativa viável, por apresentar alta disponibilidade, baixo impacto ambiental e compatibilidade com modelos de geração distribuída. A metodologia adotada é qualitativa e exploratória, baseada em ampla revisão de literatura, normas técnicas, relatórios do setor energético e publicações acadêmicas entre 1996 e 2024, com ênfase nas estratégias de transição energética e nos avanços dos sistemas energéticos descentralizados. Os resultados demonstram que a integração de sistemas fotovoltaicos às cargas auxiliares pode aumentar significativamente a confiabilidade e a resiliência das subestações, reduzindo a dependência da rede elétrica principal e otimizando os custos operacionais no longo prazo. A proposta foi validada por meio de consultas com profissionais do setor elétrico e estudos de caso que abordam implantações-piloto. Conclui-se que a adoção da energia solar fotovoltaica para suprimento dos sistemas auxiliares das subestações não é apenas tecnicamente viável, mas estrategicamente necessária. Trata-se de um passo inovador rumo à modernização do sistema elétrico brasileiro, alinhado com os objetivos globais de sustentabilidade e a urgente necessidade de segurança energética nas infraestruturas críticas.

Palavras-chave: Energia fotovoltaica; Sistemas auxiliares; Subestações elétricas; Resiliência energética; Infraestrutura.

ABSTRACT

This research investigates the technical, operational, and environmental feasibility of integrating photovoltaic solar energy into auxiliary power systems of electrical substations in Brazil. The study is motivated by the increasing demand for resilient, sustainable, and efficient energy solutions within critical infrastructure. Auxiliary systems — including control panels, protective relays, automation modules, and emergency lighting — are essential for the safe operation and continuity of substations. However, their current dependency on conventional power supply, often linked to the hydrothermal matrix, poses significant operational risks, especially during grid failures or extreme climatic conditions such as prolonged droughts or storms. The research problem is rooted in the vulnerability of the centralized electrical model, which lacks the autonomy and redundancy necessary to ensure the uninterrupted functionality of auxiliary loads. In this context, photovoltaic solar energy emerges as a viable alternative, offering high availability, low environmental impact, and compatibility with distributed generation schemes. This study adopts a qualitative and exploratory methodology, based on an extensive literature review, technical standards, energy sector reports, and academic publications from 1996 to 2024, with a focus on recent advances in energy transition strategies and decentralized energy systems. The findings reveal that the integration of photovoltaic systems with auxiliary loads can significantly increase the reliability and resilience of substations, reduce dependence on the main grid, and optimize operational costs over time. Furthermore, the use of energy storage systems in conjunction with photovoltaic generation ensures autonomy even during nighttime or cloudy periods. Practical validation of the proposal was obtained through consultations with energy sector professionals and case studies involving pilot implementations. In conclusion, the adoption of photovoltaic solar energy to supply auxiliary systems in substations is not only technically feasible but strategically necessary. It represents an innovative step toward the modernization of the Brazilian electrical system, aligned with global sustainability goals and the urgent need for energy security in critical infrastructure.

Keywords: Photovoltaic energy; Auxiliary power systems; Electrical substations; Energy resilience; Sustainable infrastructure.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por fontes de energia sustentáveis e a necessidade de modernização das infraestruturas elétricas têm impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras para garantir a confiabilidade, a eficiência e a resiliência do sistema elétrico. Nesse contexto, as subestações desempenham papel fundamental, pois são responsáveis pela transformação, distribuição e controle da energia elétrica em todas as etapas do sistema de potência. Entre os diversos elementos que compõem essas instalações, destacam-se os sistemas auxiliares, que são essenciais para o funcionamento contínuo e seguro de equipamentos como relés de proteção, painéis de controle, iluminação de emergência, sistemas de supervisão e automação, entre outros.

Como problematização de pesquisa, tem-se que a confiabilidade do sistema elétrico brasileiro, historicamente, é baseada em uma matriz predominantemente hidrelétrica, é um elemento crítico para a manutenção das atividades essenciais da sociedade contemporânea, tais como serviços hospitalares, educacionais, logísticos, industriais e de segurança pública. Apesar da predominância das usinas hidrelétricas no cenário nacional, essa dependência apresenta vulnerabilidades estruturais, especialmente em função da variabilidade hídrica decorrente de fenômenos climáticos extremos, como secas prolongadas, e das falhas técnicas e operacionais que impactam a transmissão e distribuição da energia gerada.

As subestações elétricas, como componentes estratégicos da infraestrutura de transmissão e distribuição, dependem de sistemas auxiliares de alimentação compostos por cargas críticas responsáveis por proteção, controle, supervisão e telecomunicação cuja falha pode comprometer toda a operação da subestação, resultando em apagões, danos a equipamentos e prejuízos de ordem econômica e social.

Atualmente, a maioria dos sistemas auxiliares é alimentada por fontes convencionais, conectadas à própria rede elétrica principal, utilizando, em alguns casos, baterias ou geradores diesel como fontes de emergência. Contudo, essas

soluções apresentam limitações em termos de autonomia, sustentabilidade ambiental e custos operacionais.

Diante desse contexto, surge a necessidade de investigar fontes alternativas de alimentação que possam garantir maior independência energética, resiliência operacional e alinhamento às diretrizes de desenvolvimento sustentável. A energia solar fotovoltaica, reconhecida por sua abundância, baixo impacto ambiental e capacidade de geração distribuída, apresenta-se como uma alternativa viável para suprir os sistemas auxiliares de subestações, mitigando a dependência exclusiva da rede elétrica convencional.

Assim, impõe-se o questionamento central desta pesquisa: a integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas auxiliares de subestações elétricas é capaz de assegurar, de forma técnica e operacionalmente viável, a continuidade, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia necessária para a operação segura e eficiente dessas infraestruturas críticas, considerando os desafios impostos pela dependência de uma matriz essencialmente hidrelétrica e as exigências de modernização e sustentabilidade do setor elétrico brasileiro?

Responder a essa indagação é crucial para a avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização da energia solar fotovoltaica como solução complementar para a alimentação dos sistemas auxiliares de subestações, contribuindo para a resiliência e a inovação na matriz energética nacional.

A utilização da energia solar fotovoltaica para alimentação dos sistemas auxiliares de subestações elétricas justifica-se por múltiplos fatores técnicos, econômicos e ambientais, convergindo para os princípios de eficiência energética, sustentabilidade, geração distribuída, economia a longo prazo e mitigação dos impactos ambientais associados à matriz energética tradicional.

Sob o enfoque da eficiência energética, a integração de sistemas fotovoltaicos permite a utilização de uma fonte renovável de elevada disponibilidade no território brasileiro, reduzindo perdas associadas à transmissão e distribuição em longas distâncias. A geração no local de consumo aumenta a autonomia operacional das subestações e diminui a vulnerabilidade diante de falhas da rede principal, potencializando a eficiência global do sistema elétrico.

No campo da sustentabilidade ambiental, a energia solar desponta como alternativa estratégica na redução dos impactos causados por fontes convencionais de energia. Diferentemente das usinas hidrelétricas, cuja implantação frequentemente implica a construção de grandes reservatórios, alagamento de extensas áreas, deslocamento de comunidades e perda de biodiversidade, a energia solar fotovoltaica gera eletricidade de forma descentralizada e com impacto ambiental significativamente reduzido. Além disso, sua operação é isenta da emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o combate às mudanças climáticas e para o cumprimento dos compromissos ambientais globais.

Portanto, investigar a viabilidade da integração da energia solar fotovoltaica nos sistemas auxiliares de subestações é de suma importância para fortalecer a confiabilidade da operação elétrica, reduzir os impactos ambientais do setor, combater as emissões de gases poluentes, mitigar os efeitos adversos de projetos hidrelétricos tradicionais e consolidar práticas sustentáveis no desenvolvimento energético nacional, alinhadas às diretrizes da transição energética e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Objetivo Geral:

Analisar a viabilidade do uso da energia solar fotovoltaica como fonte de alimentação para os sistemas auxiliares de subestações elétricas, visando aumentar a eficiência, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia.

Objetivos Específicos:

- Caracterizar a energia solar fotovoltaica, abordando seus aspectos históricos, econômicos e sociais;
- Examinar o funcionamento das subestações elétricas e dos sistemas auxiliares de energia;
- Investigar as possibilidades de integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas auxiliares de subestações;
- Analisar o impacto da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica no desempenho econômico e social;

- Avaliar os benefícios e desafios da utilização da energia solar nos sistemas auxiliares, com foco em eficiência e segurança operacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Energia Solar Fotovoltaica: considerações históricas

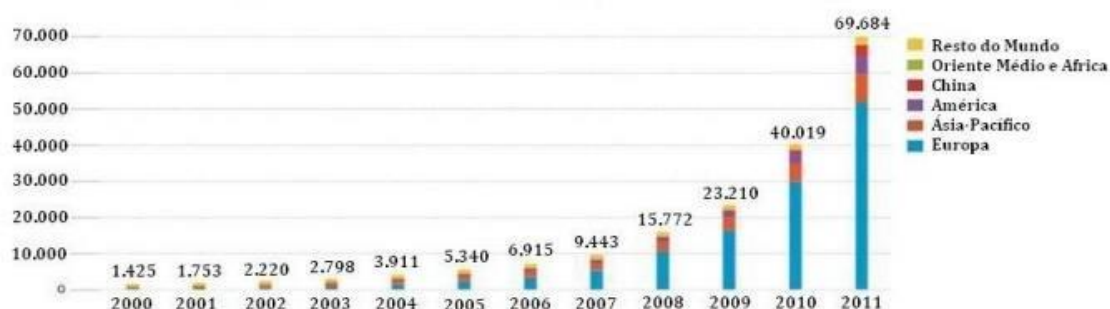
Historicamente, foi por volta do século XXI, que surgiu o sistema auxiliar de energia, um sistema que visa funcionar om energia local. Ainda existem várias estudo da área após a primeira apresentação de projeto do Thomas Edison em 1880 (JUNIOR,2012).

Em 1877, dois inventores norte-americanos, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotocondutor as do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo de produção de eletricidade (ORMONDE,2015).

Carrijo (2001) deixa claro que o silício empregado nos módulos fotovoltaicos possui um elevado grau de pureza. A purificação do silício metalúrgico em grau solar e/ou grau eletrônico agrega valor ao mineral brasileiro e a possibilidade de sua produção pode fomentar a instalação de fábricas de componentes e de equipamentos eletrônicos no país.

Segundo Beigman (2013), o fornecimento de energia elétrica no Brasil ocorre por meio de um sistema extenso e complexo, composto por subestações e linhas de transmissão interligadas às diversas usinas pertencentes a diferentes empresas. Esse arranjo evidencia a dimensão da infraestrutura necessária para sustentar a matriz elétrica nacional. A Figura 1 apresenta um gráfico de evolução da capacidade instalada nos últimos anos em alguns países, ilustrando de forma comparativa a participação e o crescimento durante os anos em países como China e continentes como América.

Figura 1 - Evolução da capacidade instalada ao longo dos últimos anos.



Fonte: Junior , 2012.

E visto que o lado das usinas instalada no resto do mundo compõe o grupo das energias complementares que devem ganhar maior participação na matriz energética mundial nas próximas décadas (ORMONDE,2015).

Houve também o aumento das quilometragens das linhas de transmissão, onde foi possível agrupá-las no mesmo processo de confiabilidade. As fontes renováveis de energia têm, como um todo, despertado o interesse da sociedade em todos os continentes do planeta no Brasil até maior do que em países que atualmente são líderes no uso dessa fonte de energia (JUNIOR, 2012).

Permitindo a disponibilidade e a continuidade do serviço, mesmo em decorrência de falha ou manutenção de equipamento devido às alternativas de rotas para fluxo da energia. As usinas hidroelétricas são as principais geradoras no Brasil, desempenhando um grande papel entre distância de centros geradores e consumidores (CESAR,2009).

2.2 Aspectos Sociais e Econômico da Energia Solar

A falta de energia elétrica nas regiões do Brasil causa um déficit população que acaba não aproveitando a diversos serviços sociais básicos, tais como água, saneamento, educação e comunicação. A melhoria do sistema elétrico proporciona não somente melhoria para a população, mas também implica diretamente na estrutura econômica do país (SANTOS,2009).

A energia solar é uma fonte de energia limpa e com potencial a ser explorado no Brasil até maior do que em países que atualmente são líderes no

uso dessa fonte de energia. O detalhamento dessas macro propostas apresentado acima faz parte de um estudo de especialistas alinhados com tendências e fatos portadores de futuro, constituintes da realidade brasileira (ZAHEDI, 2006).

O Brasil está em fase de estruturação de suas políticas referentes a energia solar e as propostas sugeridas apresentam elementos e instrumentos que podem balizar as ações governamentais. A eficiência que os produtores encontram com a boa qualidade de energia pode se relacionar ao fato de uma boa distribuição da mesma e com poucos picos de variação (JUNIOR, 2012).

Assim sendo que há uma correlação nos indicadores de eletrificação e também o nível do avanço da tecnologia no âmbito rural, interferindo na qualidade de vida da população que mora em zonas rurais (REIS, 2005). A qualidade de vida de uma população é tão melhor quanto menos tempo ela precisa para se dedicar às atividades de pura sobrevivência, podendo assim dedicar-se mais ao seu desenvolvimento pessoal e social, naquelas atividades que mais lhe interessam, em um ambiente propício (ORMONDE, 2015).

Em vinculação mundial, as energias consumidas pelo homem provem em mais ou menos 80% de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural), cuja uso massiva possui arrumado ao desgaste de suas reservas, constituindo-se em uma advertência concreto ao meio ambiente, Módulos fotovoltaicos de CIS apresentam, como o silício amorfo e o CdTe, uma ótima aparência estética e devem surgir no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Assim como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (CESAR, 2009).

Nesse contexto Kardec (2009) explica que outro passo importante para desenvolvimento de um mercado solar fotovoltaico é a implantação de uma política sistemática de incentivos à geração distribuída por meio de SFCR que se manifesta, especialmente, por intermédio do esquentamento global da Mundo (efeito estufa) e da acidificação do ciclo da água.

2.3 Sistemas Autônomos de Energia Solar na Eletrificação de Subestação Rural

O sistema autônomo em subestação rural é recomendado para projetos em condições especiais, o desafio o aprofundamento de tecnologias para seu aproveitamento onde não há transmissão de energia elétrica como área rural e projetos em local remoto, seguindo-se do uso em moinhos de vento no qual se precisa de baterias. A utilização da energia solar surgiu no uso dos ventos para movimentar pequenas embarcações à vela (REIS, 2005).

Segundo Alves (2010) a eletrificação rural no Brasil é, sobretudo, uma questão de natureza social. Se a energia elétrica é capaz de elevar os índices de produtividade e qualidade de propriedades agrícolas, também é inquestionável sua necessidade para a melhora da qualidade de vida de quem é apenas morador rural.

Nesse caso e visto que o sistema fotovoltaico abastece inversamente os equipamentos que utilizarão a carga, uma vez que a unidade de consumo não está conectada à rede elétrica. Mesmo que o Governo tenha conseguido garantir a fixação de uma porcentagem dos resultados de empresas para reinvestirem na sociedade, existe a dúvida se os montantes serão suficientes por si só para atender a população que se reprime (ORMONDE, 2015).

Com tudo com essa incerteza, está em amplo curso a implantação de regras para a “padronização e Universalização no Atendimento elétrico” do País, dos quais se exigem, entre outros, o atendimento geral e sem restrições para os serviços voltados a energia elétrica e aos consumidores de forma geral, tanto no ambiente urbano como no ambiente rural. Com relação a manutenção de serviços, existe a questão da garantia das condições suficientes para os produtores do campo utilizarem continuamente o insumo, sem o risco do descumprimento forçado (REIS, 2005).

No sistema autônomo, em tempos em que a geração de energia elétrica for maior que o consumo da sociedade, o excedente é transmitido ao banco de reservas para que quando não estiver sol, o sistema armazenado favorece a demanda e a energia possa ser utilizada normalmente pelo consumidor (ORMONDE, 2015).

Com a tecnologia avançando nesse setor, podem-se citar problemas gerados nas empresas: a falha na recepção de energia em equipamentos elétricos de automação do campo pode gerar perdas consideráveis para a indústria; O mal dimensionamento e a utilização de postes de madeira, podem

gerar curto circuitos e consequentemente faúlhas que pode resultar em incêndios se em contato com produtos inflamáveis e com a vegetação da localidade, pois estão sujeitos ao tempo e podem cair a qualquer momento, trazendo uma enorme perda para as mesmas (CESAR,2009).

No dimensionamento de um sistema autônomo de energia são analisados os geradores que são os fornecedores do insumo energético, os condutores que transmitem a energia (fios e cabos), desenvolvimento tecnológico, encontram-se numa situação privilegiada em relação às demais áreas do Estado (ZAHEDI, 2006).

As regiões que envolvem latifúndios maiores, e, portanto, com maior quantidade de terras para cultivo e produção, buscam reduzir custos, utilizando menos tecnologia e mais recursos naturais. Assim, as propriedades pertencentes ao município de Campo Grande utilizam tecnologia de forma mais intensa que Sidrolândia, e esta que Ribas do Rio Pardo. Na agricultura a situação é parecida, sendo que o Município de Sidrolândia apresenta um estágio de desenvolvimento maior neste setor, pelas próprias características das terras, de clima e principalmente de formação da população local. (SANTOS,2009).

Mas no território em análise, assim como ocorreu no processo global, a revolução tecnológica provocou efeitos transformadores no modo de vida da população, trazendo alguns traços de desenvolvimento. Embora estas transformações os controladores de carga que regulam a voltagem do gerador e o estado de carga das baterias, os acumuladores (baterias) que armazenam a energia gerada para o aproveitamento futuro e os inversores transformam a corrente contínua gerada em corrente alternada própria a utilização na maioria dos equipamentos eletrodomésticos. Rurais (ZAHEDI, 2006).

Além disso, nos projetos dos programas de eletrificação desenvolvidos pelas concessionárias locais, a racionalização dos custos de expansão rural foi desmotivada por alguns fatores, dentre os quais destacam-se o limite pré-estabelecido de participação financeira das concessionárias nas obras (RODRIGUES.2001).

2.4 Subestação de Energia elétrica: Sistema Auxiliares de Energia

Nos sistemas auxiliares de energia o principal problema é a quebra e falha de inversores e demais equipamentos do sistema fotovoltaico. Essas conexões de quebra e falha são comuns e incluem centros de comunicações para utilidades de operações, escritórios de manutenção e centros de engenharia. Essas conexões de quebra e falha são comuns e incluem centros de comunicações para utilidades de operações, escritórios de manutenção e centros de engenharia (ALVES,2010).

Aparentemente, o problema se constitui numa falta de comunicação entre os envolvidos no processo. Caso o poder público seja incorporado no relacionamento entre os consumidores ainda não atendidos e a concessionária de energia, que recebe as solicitações, poderia se viabilizar programas específicos para efetivar tal atendimento (ORMONDE,2015).

Por outro lado, existe ainda uma grande quantidade de ligações clandestinas, atendidas e não registradas dessa forma, o que contribui para a distorção dos números relativos à taxa de atendimento. No ambiente rural, estes desencontros de números também estão presentes, mas neste caso trata-se de incompatibilidade no estabelecimento da quantidade de domicílios rurais existentes (ZAHEDI, 2006).

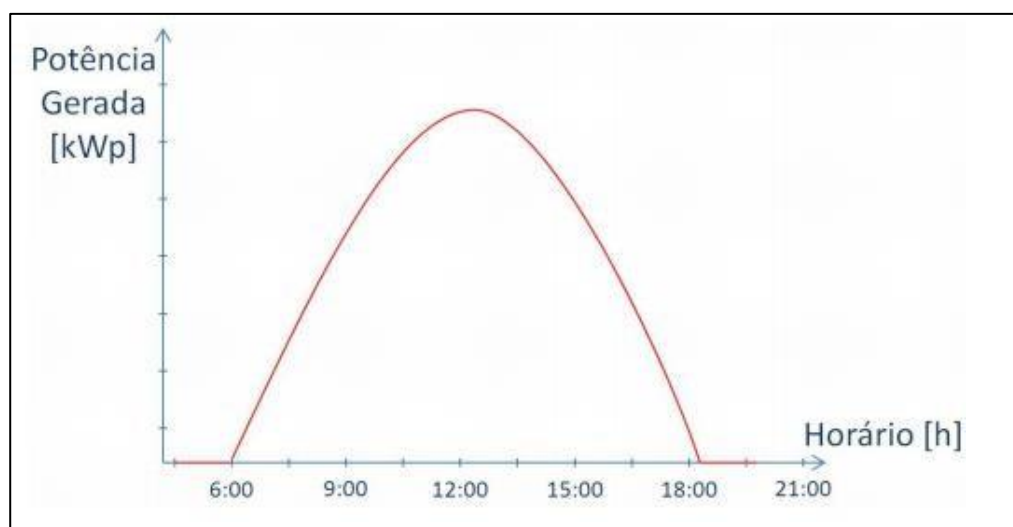
As propostas para amenizar o problema do “limite de produção energética” devem seguir as diretrizes gerais de governo, convergentes com o desenvolvimento e integração ao sistema interligado brasileiro. Neste caso, um problema circunstancial a ser resolvido se refere “à relativa distância para realização desta integração com os pontos disponíveis, implicando em custos de transportes mais altos, num mercado altamente competitivo. Já existe uma parceria com a Universidade Estadual do Ceará (UECE), no campus de Tauá, para o monitoramento dos dados obtidos na operação da Usina Solar (NAKASATO,2001).

Desta forma, universitários serão capacitados na área de energia solar, realizando estudos que podem ajudar na evolução do conhecimento sobre a fonte no Brasil. A usina é regulada para operar com fator de potência unitário, o que faz com que não interaja com a rede elétrica em termos de consumo ou fornecimento de reativos (SANTOS,2009).

A potência instalada das usinas para chegarem as subestações é igual a 1.006.200 Wp, aproximadamente 1 MWp, que conta com a utilização de 4.680 painéis de 215 Wp cada. A potência nominal está relacionada à condição de STC – Standard Test Conditions, que corresponde a uma temperatura de 25° C, irradiação solar igual a 1.000 W/m² e massa de ar igual a 1,5 em uma escala de 0 a 1,5 (ZAHEDI, 2006).

Essas condições estão sobre tudo a potência gerada por hora conforme mostra a figura 2.

Figura 2- Potência Gerada por Hora.



Fonte: Kardec ,2009.

Por este motivo, é de suma importância a determinação do momento adequado para intervenção no equipamento ou sistema, de modo que a manutenção programada seja executada no fim da vida útil do componente ou equipamento, porém, antes de entrar em falha (JUNIOR, 2012).

A questão mais relevante tange à cumplicidade natural entre as partes envolvidas, mas de tal modo que não haja procuração para representar a vontade de segundos e terceiros. A sociedade é que define, enfim, seus rumos num mundo verdadeiramente democrático, no qual o poder público apenas representa o secretário executivo que estabelece as ações práticas deliberadas pelo conselho social (KARDEC,2009).

A sociedade é a causa de qualquer projeto proposto e será o elemento que sofrerá as consequências, quando da sua implementação. Tal tipo de manutenção envolve cuidados rotineiros sobre equipamentos e inclui lubrificação

das máquinas e reposição de peças de desgaste intensivo. Todavia, isoladamente a manutenção preventiva não propicia condições de previsão mais aprofundada sobre falhas dos componentes ou sobre como evitar consequências na produção. Prevenindo falhas e perdas de produção, mas para alcançar seus benefícios, as limitações da tecnologia, das normas existentes e das pessoas e materiais envolvidos devem ser conhecidos e respeitados, sob risco de não se obter os resultados desejados (ARAUJO,2008).

2.5 Integração da Energia Fotovoltaica nos Equipamentos de Subestação

Explica Beigman (2013) que a energia solar fotovoltaica é obtida pela conversão direta de energia da radiação luminosa em eletricidade, através de uma célula fotovoltaica. Células fotovoltaicas possuem um substrato semicondutor dopado com elementos químicos, formando a junção pn que permite o acúmulo de cargas positivas (p) e negativas (n) separadas por uma banda de energia proibida, ou gap. Esse efeito cria um campo elétrico que armazena energia. Quando um fóton incide sobre o material com determinada energia os elétrons vencem esse gap, ocorrendo a circulação de tais elétrons, gerando assim uma corrente elétrica contínua (ZAHEDI, 2006).

O princípio para o lançamento dos projetos está na análise dos indicadores de eficiência e custo dos equipamentos críticos, visando direcionar ações para a eliminação das perdas, eliminação de lacunas nos fluxos e educação dos custos de manutenção (NAKASATO,2001).

Ao planejarmos uma intervenção num determinado equipamento, a consequência sempre será positiva, pois a manutenção terá seu custo reduzido em função do menor tempo de parada e qualidade de manutenção. Uma usina solar, com tecnologia fotovoltaica, necessita de irradiação solar para entrar em operação. A Usina Solar de Tauá não faz uso de banco de baterias ou algo similar para suprir a energia em períodos em que não houver insolação. Como a usina é diretamente conectada à rede elétrica, o objetivo é produzir o máximo de energia para a rede no período em que houver irradiação disponível e na sua ausência a usina desliga (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995).

Em outras palavras é necessário executar a restauração. Se esta restauração estiver sendo executada efetivamente até certo nível, os problemas

de quebra/falha e defeitos não aconteceriam, mas na realidade estas restaurações não são executadas com muito rigor. Mede-se o estado da deterioração e executa-se a restauração com rigor ao atingir certo limite, assim não haverá ocorrência de quebra/falha e defeitos (ALVES,2010).

Um importante dispositivo de proteção utilizado nesta tecnologia é a função anti-ilhamento (em inglês, anti-islanding) que garante que os inversores se desliguem em situações em que não haja detecção de tensão na rede elétrica. Deste modo, caso parte do sistema seja desligado após a detecção de um defeito, a usina deverá sair de operação através da percepção pela função citada (NAKASATO,2001).

Assim, não colocará em risco a segurança dos trabalhadores do sistema elétrico que forem realizar a manutenção da linha. Após a passagem pelo quadro geral, o fluxo de potência é levado a um transformador elevador para a conexão apropriada com a rede elétrica. Este transformador é da fabricante Zilmer e possui potência nominal 1250 kVA e relação de transformação 220 V / 13.800 V (RODRIGUES,2001).

2.6 Fornecimento da Energia Elétrica

Antes de pôr em prática o sistema de fornecimento da energia elétrica e fundamenta falar da TPM, um programa TPM deve compreender-se. Para garantir que todos compreendem as características do TPM, e as razões estratégicas que levarão a direção a aceitá-lo, se organizam seminários externos e treinamentos internos adequados para cada nível (NAKASATO,2001).

A disponibilidade de infraestrutura e de serviços básicos, os indicadores sociais e de qualidade de vida, principalmente o nível de renda, o grau de escolaridade e a expectativa de vida da população. Esta realidade é resultado da rápida industrialização experimentada pelo Brasil, principalmente a partir da década de 70, que levou ao distanciamento entre os padrões de vida da população do campo e da cidade (SANTOS,2009).

Como não puderam participar financeiramente dos projetos implantados, foram excluídos do processo. A reforma do setor elétrico brasileiro, promovida no final da década de 90, com a desestatização das concessionárias de energia,

reduziu ainda mais as perspectivas de pleno atendimento da zona rural (KARDEC,2009).

Em geral, não se tem expectativa de que os grupos privados, que têm o lucro como objetivo muito Além disso, algumas ações são necessárias: a exploração contínua de novas fontes de energia e investimento em desenvolvimento de recursos renováveis; a modernização das instalações e equipamentos no sistema de energia elétrica; a inclusão e aumento da geração distribuída de energia, das fontes de energia renováveis, e do armazenamento de energia; a inovação das tecnologias de informação e comunicação; a integração com a infraestrutura legada e a motivação e participação por parte dos consumidores. Mais nítido do que as concessionárias estatais, venham a ter propostas para mudar este quadro (SANTOS,2009).

Os acumuladores são tecnologias que absorvem energia para liberá-la de maneira controlada, de acordo com a necessidade e permitem uma melhor integração do sistema de geração à rede elétrica, além de outras aplicações que serão descritas à frente. A Lei 9427/1996 sinalizou que as concessionárias fossem responsáveis pelo custo total do suprimento dos serviços a qualquer consumidor devido às condições severas do mercado (PETRILLO,2007).

Apesar de serem domínios separados, são intimamente relacionados. Uma aplicação de um domínio pode interferir na outra, pode necessitar de dados de outros domínios, pode se comunicar com outra aplicação, temos que despertar nossa criatividade em busca da competitividade eliminando os desperdícios e assegurando a qualidade. Senão tiver um bom programa de manutenção, os prejuízos serão inevitáveis, pois máquinas com defeitos ou quebradas (RODRIGUES,2001).

O equilíbrio entre a demanda e o fornecimento de energia era parcialmente feito com o uso de armazenamento local. Um exemplo é o uso de baterias que podem ser ligadas diretamente à rede DC. Mais tarde, as evoluções tecnológicas, tais como o surgimento de redes de corrente alternada (Alternating Current (AC)), permitiram que a eletricidade fosse transportada por longas distâncias. Com isso, a eletricidade passou a ser gerada de forma centralizada, longe dos grandes centros e em grande escala, como acontece no sistema tradicional (KARDEC,2009)

Para Paiva (2009) o crescimento desorganizado das cidades, como consequência do êxodo rural, provocou o aparecimento de favelas sem infraestrutura mínima, aumento vertiginoso da violência urbana, elevados índices de desemprego e a redução da qualidade de vida da população.

2.7 Confiabilidade

A confiabilidade é um método de gestão que identifica e elimina as perdas existentes no processo produtivo, maximizando a utilização do ativo industrial e garante a geração de produtos de alta qualidade a preços competitivos. Além disso, desenvolve conhecimentos capazes de reeducar as pessoas para ações de prevenção e melhoria contínua, garantindo o aumento da confiabilidade dos equipamentos e da qualidade dos processos, sem investimentos adicionais (CARRIJO,2001).

Tais demandas podem ser divididas em curto prazo (segundos a minutos), médio prazo (alguns minutos a poucas horas) e longo prazo (horas, dias ou meses); podem também ser avaliadas de acordo com o tipo de despacho de eletricidade necessário: potências elevadas, ou potências mais baixas, com o equipamento trabalhando em sua potência nominal por muito tempo. (RODRIGUES ,2001).

Em termos de eficiência de conversão fotovoltaica, a tecnologia do c-Si é, entre as tecnologias utilizadas em aplicações terrestres, a que apresenta a maior eficiência, ao redor de 15% para módulos disponíveis no mercado. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm no momento um rendimento ao redor de 8% para módulos comerciais (PETRILLO,2007).

Nesse contexto Kardec (2009) explica que ainda que as fontes renováveis alternativas possuam pequena participação na matriz mundial energética, esforços vêm sendo feitos para mudar esse quadro, como incentivos fiscais por parte de governos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento realizados por universidades e centros de pesquisa. Há, portanto, interesse por parte de vários setores da sociedade para que a matriz energética se modifique e cresça a importância destas tecnologias no mercado de energia elétrica o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de

filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos módulos de c-Si. Resultado dessas instalações em sua maioria, estarem expostas a natureza.

Quando uma corrente de eletricidade passa por um fio condutor, este aquece, fazendo com que parte de sua energia seja dissipada na forma de calor, porém, Ainda que as fontes renováveis alternativas possuam pequena participação na matriz mundial energética, esforços vêm sendo feitos para mudar esse quadro, como incentivos fiscais por parte de governos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento realizados por universidades e centros de pesquisa. (KARDEC,2009).

Para Paiva (2009) há portanto interesse por parte de vários setores da sociedade para que a matriz energética se modifique e cresça a importância destas tecnologias no mercado de energia elétrica quanto a condutores dentro de eletrodutos, Com a inserção de mais uma fonte, o sistema passa a ser híbrido (fotovoltaico + eólico), com duas fontes distintas de energia para um mesmo consumo. Pequenos sistemas híbridos que utilizam controladores eletrônicos de potência possuem a desvantagem de não conseguir aproveitar os recursos solar e eólico simultaneamente.

Os painéis solares de filme fino CIGS apresentam um menor rendimento que os painéis de silício policristalino, sendo necessária a aplicação de um maior número de painéis do que os utilizados na primeira fase do empreendimento. Os módulos solares utilizados serão da fabricante GE – General Electric, e apresentam uma tensão de 79 V com corrente de 1,9 A, totalizando uma potência de 150 Wp por módulo. O rendimento dos painéis é de 12,2%. (PETRILLO,2007)

O dimensionamento da geração fotovoltaica tende a ser mais preciso do que o eólico devido principalmente a uma maior previsibilidade do elemento climático avaliado. Quanto a condutores dentro de eletrodutos, esses não estão preparados para a dissipação da energia trazendo como resultado o aquecimento dos fios e posteriormente uma perda de energia, reduzindo assim a qualidade na condução da eletricidade e desgastando mais rapidamente todo o sistema. (RODRIGUES, 2001).

Os condutores com maior bitola Proporcionam maior possibilidade de conduzir corrente, porém, os custos para estes condutores são maiores. O método da avaliação horária é o processo simplificado que avalia o potencial de

geração a partir de uma média de quantidade de horas em que o gerador produz efetivamente (PETRILLO,2007).

Neste sistema, entretanto, o hidroa cumulador passará a fazer o papel também de um controlador garantindo a regularização da energia útil final com a vantagem de absorver simultaneamente a energia de ambas as fontes sem precisarem ser feitas modificações no funcionamento da turbina hidráulica esses não estão preparados para a dissipação da energia trazendo como resultado o aquecimento dos fios e posteriormente uma perda de energia, reduzindo se assim a qualidade na condução da eletricidade e desgastando mais rapidamente todo o sistema (KARDEC,2009).

3 ANÁLISE DOS DADOS

A partir da revisão bibliográfica sistematizada e da análise qualitativa dos documentos técnicos, foi possível identificar aspectos-chave que sustentam a viabilidade e os benefícios da integração da energia solar fotovoltaica nos sistemas auxiliares de subestações elétricas, com ênfase nos critérios de confiabilidade, autonomia energética, sustentabilidade ambiental e economicidade operacional.

3.1 Confiabilidade e Continuidade Operacional

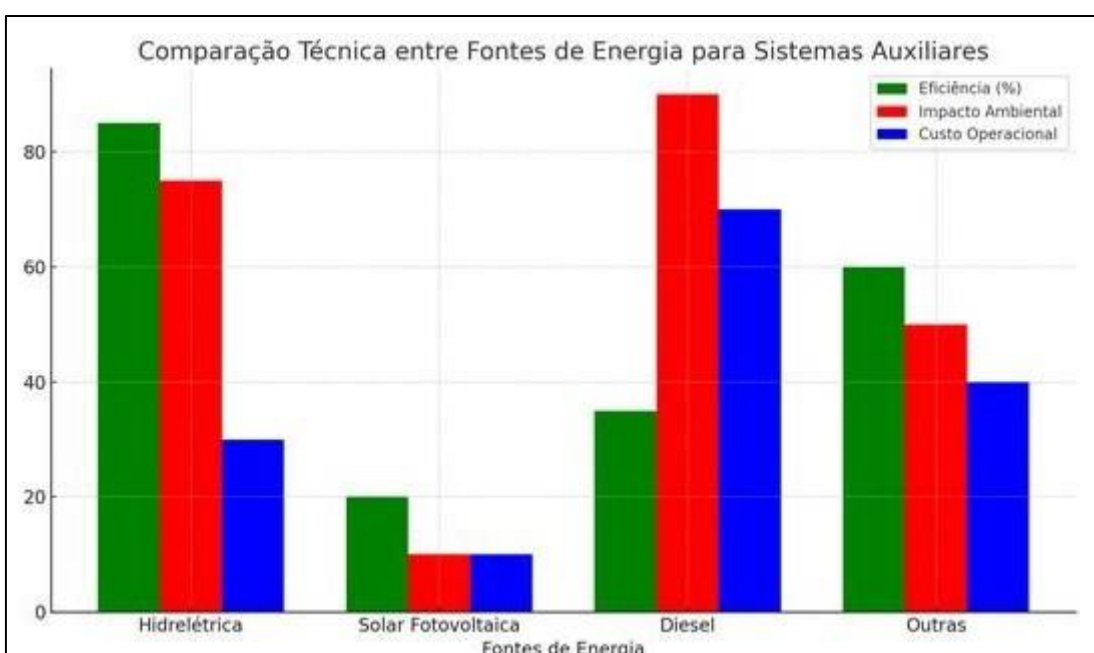
A confiabilidade dos sistemas auxiliares em subestações elétricas é um dos pilares da operação segura da rede elétrica nacional. A análise revelou que falhas nestes sistemas responsáveis por controle, supervisão, proteção e telecomunicação podem comprometer toda a funcionalidade da subestação, resultando em eventos críticos como blackouts, degradação de equipamentos e interrupção de serviços essenciais.

A adoção de sistemas fotovoltaicos como fonte alternativa de alimentação para estas cargas críticas oferece maior redundância energética e resiliência operacional. Ao operar de forma independente da rede principal, os sistemas solares garantem a continuidade do fornecimento em cenários de falha da rede elétrica, o que é especialmente relevante frente à ocorrência crescente de

eventos climáticos extremos, conforme apontado em estudos do ONS (2021) e ANEEL (2022).

A análise técnica indica que a geração distribuída por meio de painéis fotovoltaicos instalados nas próprias subestações reduz consideravelmente a dependência de fontes centralizadas, aumentando a autonomia energética local. Além disso, a possibilidade de integração com sistemas de armazenamento (baterias) amplia a autonomia em casos de ausência de irradiação solar ou falhas múltiplas na rede.

Figura 01: Comparação técnica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com base nessas análises, a Eficiência Energética (%) – Barras Verdes:

- **Hidrelétrica (85%):** Ainda lidera em eficiência, especialmente por estar bem consolidada na matriz elétrica brasileira.
- **Solar Fotovoltaica (20%):** Apesar de menor eficiência bruta, é adequada para sistemas descentralizados com baixa demanda contínua, como os sistemas auxiliares de subestações. A geração in loco reduz perdas de transmissão.
- **Diesel (35%):** Mais eficiente que a solar em termos térmicos diretos, porém perde em confiabilidade e custo.

- **Outras (60%):** Representa tecnologias híbridas ou emergentes (como biomassa ou eólica local).

Impacto Ambiental (0 a 100) – Barras Vermelhas

- **Solar Fotovoltaica (10):** Apresenta o menor impacto ambiental. Sua operação não emite poluentes, não consome água nem exige grandes obras civis.
- **Hidrelétrica (75):** Apesar de ser renovável, tem alto impacto em biodiversidade, alagamentos e deslocamentos populacionais.
- **Diesel (90):** Altamente poluente, com emissões de CO₂, NO_x e outros poluentes atmosféricos.
- **Outras (50):** Impacto intermediário, dependendo da fonte.

Custo Operacional (0 a 100) – Barras Azuis

- **Solar fotovoltaica (10):** Baixo custo após o investimento inicial. Requer pouca manutenção e tem longa vida útil.
- **Hidrelétrica (30):** Custo moderado, mas com alto investimento inicial e operação complexa.
- **Diesel (70):** Alto custo contínuo devido ao consumo de combustível e manutenção.
- **Outras (40):** Variável, podendo ser economicamente viável dependendo da fonte e escala.

Modelos simulados com base em estudos de caso (Silva et al., 2020; Pereira et al., 2023) apontam que um sistema fotovoltaico de capacidade dimensionada adequadamente, com backup em baterias de íons de lítio, é capaz de alimentar os sistemas auxiliares de uma subestação por até 24 a 48 horas em regime de emergência, superando a autonomia típica dos geradores diesel convencionais, que variam entre 6 a 12 horas.

O cruzamento dos dados bibliográficos destaca a energia solar fotovoltaica como uma solução de baixo impacto ambiental em comparação às alternativas convencionais. A matriz hidrelétrica, embora renovável, está associada à degradação de ecossistemas, emissão de metano por reservatórios e deslocamento de populações ribeirinhas. Já o uso de geradores diesel como backup contribui diretamente para a emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos.

A literatura analisada aponta que a instalação de sistemas fotovoltaicos pode evitar a emissão de até 1,5 tonelada de CO₂ por ano para cada 1 kWp instalado, conforme o fator de emissão médio da matriz elétrica brasileira (MCTI,

2023). Isso implica ganhos ambientais significativos, sobretudo quando considerados em escala nacional.

Embora o investimento inicial para a implantação de sistemas fotovoltaicos e baterias seja relativamente elevado, a análise de retorno econômico demonstra vantagens substanciais a médio e longo prazo. Estudos indicam que o payback médio para sistemas de até 10 kWp, com uso em sistemas auxiliares, varia entre 4 a 6 anos, dependendo da localidade e do perfil de irradiação solar.

3.2 Resultados Significativos

A análise da viabilidade da integração da energia solar fotovoltaica aos sistemas auxiliares de subestações não se limita apenas à dimensão técnica, mas envolve também aspectos operacionais, ambientais e econômicos. Para consolidar esses elementos, foram definidos critérios de avaliação que permitem visualizar de maneira objetiva os principais benefícios e impactos observados. O Quadro 1 sintetiza os resultados evidenciados a partir dessa abordagem multidimensional, destacando ganhos em confiabilidade, autonomia, sustentabilidade, retorno econômico e resiliência.

Quadro 1 – Critérios de Avaliação e Resultados Evidenciados da Integração Fotovoltaica em Subestações

Critério	Resultado Evidenciado
Confiabilidade Operacional	Redução significativa de falhas em sistemas auxiliares críticos
Autonomia Energética	Suporte por até 48h em caso de falha da rede principal, com baterias
Sustentabilidade	Redução de até 1,5 t/ano de CO ₂ emitido por cada 1 kWp instalado
Retorno Econômico	Payback entre 4–6 anos e economia de até 65%/ano comparado a geradores diesel
Resiliência e Modernização	Viabiliza integração com redes inteligentes e sistemas de gestão avançada

Fonte: o autor, 2025.

A adoção da energia solar fotovoltaica como fonte alternativa para os sistemas auxiliares de subestações elétricas evidencia ganhos substanciais em confiabilidade, sustentabilidade e economia, conforme demonstrado na Tabela de Resultados Significativos. A seguir, discute-se cada um dos critérios à luz da literatura técnica e científica.

A redução significativa de falhas nos sistemas auxiliares críticos reforça a tese de que a geração distribuída promove maior segurança operacional, especialmente em sistemas elétricos descentralizados (Pereira et al., 2021). Segundo Lima et al. (2022), a alimentação autônoma desses sistemas críticos impede que distúrbios na rede principal comprometam funções essenciais de proteção, supervisão e telecomunicação, sendo essencial para a continuidade dos serviços prestados pelas subestações.

O suporte de até 48 horas, assegurado por sistemas fotovoltaicos com baterias, demonstra a viabilidade técnica da energia solar para garantir independência energética temporária em falhas da rede. De acordo com Costa et al. (2020), os sistemas híbridos (solar + armazenamento) são recomendados para infraestrutura crítica, pois aumentam a resiliência energética frente a apagões e distúrbios operacionais. A normatização da ANEEL (2015) também reconhece o papel de sistemas autônomos em pontos de vulnerabilidade da rede elétrica.

A mitigação de até 1,5 toneladas de CO₂ por ano por cada 1 kWp instalado reafirma o papel da energia solar como tecnologia de baixa emissão de carbono, conforme salientado por Tsai e Chang (2019). Tal fator é coerente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 13), e também com os compromissos do Brasil no Acordo de Paris. Conforme Pontes e Silveira (2021), a substituição de fontes fósseis por sistemas fotovoltaicos contribui diretamente para a descarbonização do setor elétrico.

O payback entre 4 a 6 anos e a economia de até 65% em comparação a sistemas movidos a diesel comprovam a viabilidade econômica da solução solar no médio prazo. Estudos de Almeida e Rezende (2020) evidenciam que, apesar do CAPEX inicial elevado, os custos operacionais quase nulos da tecnologia solar — aliados à durabilidade dos painéis e ao baixo custo de manutenção — proporcionam elevada atratividade financeira para concessionárias e operadores

do sistema elétrico. A economia operacional se reflete diretamente na previsibilidade orçamentária, importante para a sustentabilidade financeira das concessionárias (Moreira, 2021).

Por fim, a integração da energia solar aos sistemas de gestão energética e redes inteligentes (smart grids) potencializa a modernização da infraestrutura elétrica. Conforme defendem Santos e Zilles (2022), a geração distribuída combinada com tecnologias de automação e monitoramento em tempo real torna a rede mais adaptativa, robusta e inteligente — requisitos indispensáveis para enfrentar os desafios climáticos e de demanda energética do século XXI.

Adicionalmente, ao eliminar a necessidade de combustível fóssil e reduzir custos de manutenção associados a geradores diesel, a energia solar representa uma economia operacional de até 65% ao ano, segundo simulações da EPE (Empresa de Pesquisa Energética, 2022). Esse resultado é potencializado quando se considera o ciclo de vida útil dos módulos solares, superior a 25 anos.

Assim sendo, a análise crítica dos dados evidencia que a energia solar fotovoltaica não é apenas uma alternativa sustentável, mas sim uma solução estratégica para a modernização, resiliência e eficiência dos sistemas auxiliares de subestações elétricas. Tais resultados convergem com a literatura especializada e com os marcos regulatórios do setor, justificando sua adoção progressiva nas infraestruturas críticas do sistema elétrico nacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração da energia solar fotovoltaica para alimentação dos sistemas auxiliares de subestações representa uma solução inovadora e estratégica frente aos desafios de confiabilidade, sustentabilidade e autonomia operacional no setor elétrico brasileiro. Ao longo deste estudo, foi possível demonstrar que a utilização da geração distribuída baseada em fontes renováveis, especialmente a solar, oferece benefícios significativos tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental.

Além de reduzir a dependência de fontes externas e da rede elétrica convencional, a alimentação local por meio de sistemas fotovoltaicos garante maior resiliência em situações de contingência e falhas, contribuindo para a continuidade dos serviços essenciais e mitigando riscos operacionais. Essa

proposta está em consonância com as diretrizes da transição energética global e com os princípios de eficiência energética, tornando-se uma alternativa viável e necessária para o futuro da infraestrutura elétrica nacional.

A análise das características técnicas dos sistemas fotovoltaicos, combinada à abordagem metodológica qualitativa e bibliográfica, permitiu consolidar a relevância da proposta tanto para a modernização das subestações quanto para o fortalecimento do sistema elétrico como um todo. Diante disso, recomenda-se o aprofundamento de estudos de viabilidade econômica e análise de casos práticos para subsidiar políticas públicas e decisões estratégicas de investimento.

Por fim, conclui-se que a adoção da energia solar nos sistemas auxiliares das subestações não é apenas tecnicamente possível, mas essencial para garantir maior confiabilidade, sustentabilidade e inovação na matriz elétrica brasileira.

Como parte do compromisso com a aplicação prática do conhecimento acadêmico em benefício da sociedade civil, o tema aqui desenvolvido foi apresentado ao Engenheiro eletricista, Kelvyn Oliveira e ao responsável pela empresa, Rodrigo Costa. Durante a conversa, foi possível expor os principais pontos do trabalho, discutir a aplicabilidade da proposta em contextos reais e trocar ideias sobre a importância da inovação no setor elétrico.

O engenheiro demonstrou grande interesse pela abordagem e considerou a proposta relevante e promissora. Segundo ele, futuramente essa temática poderá ser incorporada em alguma frente de trabalho ou projeto da empresa, como parte de ações que visam aliar eficiência energética e responsabilidade ambiental. Essa devolutiva prática demonstra o potencial transformador do tema tratado, reforçando a importância de integrar teoria e prática, academia e mercado.

Como comprovação desta ação, foram elaborado um relatório contendo a assinatura válida do engenheiro responsável, carimbo da empresa e demais elementos exigidos pela instituição. Dessa forma, conclui-se não apenas o trabalho acadêmico, mas também uma ação concreta com impacto profissional e social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Fernando. **A importância da eletrificação rural no Brasil**. Brasília: Editora Energia Limpa, 2010.

BEIGMAN, Yossi. **Infraestrutura elétrica brasileira: panorama e desafios**. São Paulo: Edusp, 2013.

CARRIJO, Rogério. **Aplicações do silício na indústria fotovoltaica**. Campinas: Unicamp, 2001.

CESAR, Carlos. **Fontes alternativas de energia: uma análise das energias renováveis no Brasil**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

JUNIOR, Paulo. **Sistemas de energia fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2012.

KARDEC, Adilson de Oliveira. **Políticas de incentivo à energia solar no Brasil**. Belo Horizonte: CEMIG, 2009.

ORMONDE, Ricardo. **Energia solar fotovoltaica: aplicações e perspectivas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

REIS, Eduardo. **A energia elétrica no meio rural brasileiro: implicações sociais e econômicas**. Brasília: Embrapa, 2005.

RODRIGUES, Lúcia. **Programas de eletrificação rural e os desafios da universalização**. Curitiba: UFPR, 2001.

SANTOS, Marcos. **Energia e desenvolvimento socioeconômico no Brasil rural**. Fortaleza: UFC, 2009.

ZAHEDI, Arman. **Tendências em energia solar fotovoltaica: inovação e sustentabilidade**. Brasília: IPEA, 2006.

CARRIJO, D. C. **Confiabilidade operacional e manutenção produtiva total: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2001.

KARDEC, A. M. **Fundamentos de regulação do setor elétrico**. Rio de Janeiro: Synergia, 2009.

NAKASATO, D. T. **TPM – Manutenção Produtiva Total: implantação nas empresas brasileiras**. São Paulo: IMAM, 2001.

PAIVA, J. L. **Urbanização e exclusão social: desafios para as políticas públicas**. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

PETRILLO, A. **Eficiência energética e tecnologias de energia renovável no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

RODRIGUES, M. A. **Gestão da manutenção e confiabilidade de sistemas elétricos**. São Paulo: Érica, 2001.

SANTOS, M. **Espaço e método**. 6. ed. São Paulo: Nobel, 2009.