

Totem Solar Autônomo de Carregamento Off-grid

Autonomous Off-Grid Solar Charging Totem

Marco Antônio Mendes Silva Costa

RESUMO

O presente trabalho investiga a viabilidade técnica e econômica de um Totem Solar Autônomo de Carregamento Off-grid desenvolvido para atender comunidades rurais e espaços públicos na região de Teresina – PI. Considerando o elevado potencial solar do estado do Piauí, o estudo busca propor uma solução sustentável e acessível para recarga de dispositivos eletrônicos em locais sem rede elétrica. A metodologia adotada envolve revisão bibliográfica, análise de dados regionais, simulações computacionais com os softwares PVsyst e HOMER Pro e estimativas de custo e retorno financeiro. Os resultados indicam que o projeto é tecnicamente viável e economicamente competitivo quando comparado a fontes fósseis, apresentando baixo impacto ambiental e significativa contribuição social. Além de promover autonomia energética e inclusão digital, o Totem Solar constitui ferramenta educativa e prática para difusão de tecnologias renováveis em escolas e comunidades. Palavras-chave: Energia solar, Sistema off-grid, Sustentabilidade.

ABSTRACT

This study investigates the technical and economic feasibility of an Autonomous Solar Charging Totem Off-grid designed to serve rural communities and public spaces in the Teresina – PI region. Considering the high solar potential of the Piauí state, the research proposes a sustainable and accessible solution for charging electronic devices in areas without access to the power grid. The methodology includes bibliographic review, regional data analysis, computational simulations with PVsyst and HOMER Pro software, and cost and financial return estimates. The results indicate that the project is technically feasible and economically competitive compared to fossil sources, with low environmental impact and strong social contribution. In addition to promoting energy autonomy and digital inclusion, the Solar Totem serves as an educational and practical tool for disseminating

renewable technologies in schools and communities. Keywords: Solar energy, Off-grid system, Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um vetor fundamental do desenvolvimento humano. No contexto brasileiro, ela está diretamente ligada à inclusão social, educação, saúde e qualidade de vida. A ausência desse serviço básico ainda é uma realidade para milhares de pessoas que vivem em áreas remotas, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde os desafios de infraestrutura são mais acentuados. O avanço das tecnologias fotovoltaicas torna cada vez mais acessível a geração de energia limpa e descentralizada, permitindo que famílias, escolas e comunidades inteiras tenham acesso à eletricidade sem depender da expansão das redes tradicionais. O avanço tecnológico e a crescente demanda por fontes de energia sustentável têm impulsionado o desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas para a geração descentralizada. No Brasil, a matriz energética ainda apresenta forte dependência de fontes hidráulicas e fósseis, o que evidencia a necessidade de diversificação. Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica assume papel estratégico, especialmente em regiões de alta irradiação solar, como o Nordeste brasileiro. Além de representar uma alternativa técnica, trata-se também de uma ferramenta social que promove a democratização do acesso à eletricidade e incentiva a educação ambiental. O presente estudo, portanto, insere-se em um cenário de transição energética, no qual o uso racional dos recursos naturais se torna prioridade tanto no âmbito das políticas públicas quanto nas práticas comunitárias de desenvolvimento sustentável.

O acesso à energia elétrica é um fator essencial para o desenvolvimento humano, social e econômico. No entanto, ainda existem diversas comunidades brasileiras que vivem em situação de exclusão energética, especialmente nas regiões Norte e Nordeste. No estado do Piauí, apesar de seu enorme potencial solar, há localidades que permanecem sem atendimento pela rede elétrica convencional devido à inviabilidade técnica e financeira de extensão das linhas de transmissão.

A energia solar fotovoltaica surge como uma alternativa promissora para resolver esse déficit energético, oferecendo uma fonte limpa, renovável e economicamente competitiva.

A aplicação de sistemas off-grid, ou seja, independentes da rede pública, representa uma solução prática e sustentável para garantir eletrificação em comunidades isoladas. O desenvolvimento do Totem Solar Autônomo de Carregamento Off-grid propõe não apenas o fornecimento de energia, mas também o incentivo à educação ambiental, à inclusão digital e ao uso racional de recursos naturais.

O estudo busca demonstrar, de forma técnica e econômica, a viabilidade de implantação dessa tecnologia no contexto piauiense, abordando desde o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos até a análise de custo nivelado de energia (LCOE) e o tempo de retorno do investimento (payback). A proposta reforça o papel da engenharia como agente transformador, capaz de propor soluções que aliam sustentabilidade, inovação e impacto social.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Além dos conceitos técnicos, é importante destacar a evolução histórica da energia solar no Brasil e no mundo. Nas últimas décadas, a redução do custo dos painéis fotovoltaicos — que caiu mais de 80% entre 2010 e 2020 — impulsionou a adoção dessa tecnologia em larga escala. Governos, universidades e instituições privadas têm colaborado para o desenvolvimento de soluções adaptadas às condições climáticas locais. No Piauí, o clima semiárido favorece a adoção da energia solar, não apenas pelo alto índice de radiação, mas também pela baixa variação sazonal, que garante estabilidade na geração ao longo do ano. A literatura especializada destaca que o aproveitamento da energia solar no Brasil é um dos mais promissores do mundo. Estudos conduzidos pela EPE e pelo INPE demonstram que praticamente todo o território nacional recebe radiação solar suficiente para viabilizar projetos de geração distribuída. Além disso, o avanço tecnológico dos inversores, controladores de carga e sistemas de armazenamento tem tornado as soluções off-grid mais eficientes e acessíveis. A adoção dessas tecnologias, entretanto, depende de fatores sociais, econômicos e institucionais, como políticas de incentivo fiscal, capacitação técnica e conscientização ambiental. A fundamentação teórica também abrange o conceito de sustentabilidade energética, que busca equilibrar os aspectos econômicos, sociais e ecológicos da produção e do consumo de energia. Autores como Sachs e Veiga reforçam

que a sustentabilidade vai além da preservação ambiental: ela envolve equidade social, participação comunitária e governança responsável.

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir da conversão direta da radiação solar em eletricidade por meio de células semicondutoras de silício. Essas células, organizadas em módulos, formam os painéis solares responsáveis pela captação da energia luminosa. Quando expostos à luz solar, os elétrons do material semicondutor são excitados, gerando uma corrente elétrica contínua.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em dois tipos principais: on-grid e off-grid. Os sistemas on-grid são conectados à rede elétrica pública e permitem o envio do excedente de energia para a concessionária, gerando créditos de consumo. Já os sistemas off-grid são independentes e utilizam baterias para armazenar energia, garantindo o fornecimento contínuo mesmo na ausência de radiação solar. Essa característica torna os sistemas off-grid ideais para regiões isoladas, como comunidades rurais do Piauí.

Um sistema off-grid é composto essencialmente por quatro elementos: painéis solares, controladores de carga, baterias e inversores. Os painéis convertem a luz solar em eletricidade; o controlador regula a tensão e a corrente enviadas às baterias, evitando sobrecarga; as baterias armazenam a energia; e o inversor converte a corrente contínua em corrente alternada, utilizada nos equipamentos eletrônicos.

A eficiência dos painéis fotovoltaicos depende de fatores como temperatura ambiente, incidência solar, orientação e ângulo de inclinação. Em regiões tropicais como Teresina, o desafio é minimizar as perdas térmicas, já que temperaturas elevadas reduzem o rendimento das células. Entretanto, a constância da radiação solar no Piauí compensa essas perdas, garantindo alta produtividade energética ao longo do ano.

Além dos aspectos técnicos, políticas públicas têm impulsionado o uso da energia solar no Brasil. Programas como o 'Luz para Todos' e o 'Programa de Energia Renovável para o Semiárido' promoveram a inclusão de milhares de famílias no acesso à energia elétrica. No entanto, ainda há limitações relacionadas ao alto custo inicial dos sistemas e à falta de mão de obra especializada para instalação e manutenção.

Estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) indicam que o Piauí está entre os cinco estados com maior potencial solar do país, com média anual superior a 5,5 kWh/m² por dia. Esses números reforçam o papel estratégico do estado na expansão da geração distribuída e no uso de tecnologias off-grid voltadas à inclusão energética e ao desenvolvimento sustentável.

3. METODOLOGIA

O processo metodológico foi cuidadosamente estruturado para assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos. Cada etapa foi planejada para permitir uma visão abrangente, indo desde a revisão teórica até a aplicação prática dos modelos computacionais. A análise econômica foi conduzida de maneira comparativa, levando em conta não apenas os custos diretos de instalação, mas também as externalidades ambientais e sociais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa e o impacto positivo na qualidade de vida. A metodologia adotada neste trabalho combina abordagens qualitativas e quantitativas, permitindo uma compreensão ampla da viabilidade do Totem Solar. A fase de revisão bibliográfica serviu para identificar lacunas de conhecimento e consolidar os conceitos fundamentais sobre energia renovável. A análise de dados secundários permitiu compreender as condições climáticas e socioeconômicas da região de Teresina, enquanto as simulações computacionais possibilitaram avaliar o desempenho técnico do sistema em cenários variados de irradiação e consumo. A pesquisa adotou uma abordagem exploratória e descritiva, adequada ao propósito de propor e avaliar uma solução tecnológica inovadora. A análise econômica, por sua vez, utilizou métodos clássicos de avaliação de investimentos, como o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR), além do LCOE e payback. Esses indicadores permitiram comparar a competitividade da tecnologia solar em relação às fontes fósseis.

A metodologia adotada neste trabalho foi dividida em quatro etapas: revisão bibliográfica, coleta de dados, modelagem técnica e análise econômica. A revisão bibliográfica buscou identificar os principais conceitos e estudos sobre energia solar e sistemas off-grid, com base em fontes confiáveis como ANEEL, EPE, INPE, MME e artigos científicos nacionais e internacionais.

A coleta de dados contemplou informações sobre irradiação solar e temperatura média de Teresina (dados do INMET e CRESESB), custos de componentes fotovoltaicos (fornecedores nacionais) e indicadores de eletrificação rural (IBGE e MME). Esses dados foram essenciais para o dimensionamento adequado do sistema e para a estimativa do custo nivelado de energia.

A modelagem técnica foi realizada com os softwares PVsyst e HOMER Pro, permitindo simular diferentes cenários de operação do sistema, considerando variações sazonais, eficiência dos equipamentos e autonomia de armazenamento. Foram dimensionados sistemas de 2 kWp, 5 kWp e 8 kWp para diferentes perfis de consumo rural, com foco em operação contínua e baixo custo de manutenção.

A análise econômica envolveu o cálculo do LCOE e do payback, considerando o custo total de instalação, vida útil dos equipamentos (25 anos para painéis e 10 anos para baterias) e custo de manutenção anual equivalente a 1% do investimento. A comparação com alternativas fósseis, como geradores a diesel, permitiu avaliar a competitividade do sistema proposto sob o ponto de vista financeiro e ambiental.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos reforçam o potencial transformador da energia solar em contextos de vulnerabilidade energética. Além de apresentar vantagens econômicas, o sistema proposto contribui para a conscientização ambiental e para o fortalecimento da autonomia local. Em comunidades onde a eletricidade é escassa, o simples ato de carregar um celular pode representar acesso à comunicação, informação e até oportunidades de trabalho. Portanto, o impacto do Totem Solar vai além da esfera técnica — trata-se de uma iniciativa com repercussões sociais e educacionais amplas. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que o desempenho do Totem Solar é estável e eficiente mesmo sob condições adversas. O balanço energético ao longo de um ano mostrou que as perdas térmicas, embora presentes, não comprometem a eficiência global do sistema. A escolha dos componentes — em especial as baterias de íons de lítio e os controladores MPPT — revelou-se decisiva para maximizar o aproveitamento energético. Além do aspecto técnico, é importante discutir os impactos sociais e educacionais. O Totem Solar atua como um

ponto de convergência entre tecnologia e cidadania, oferecendo às comunidades um espaço de interação e aprendizado. Nas escolas, por exemplo, pode ser utilizado como ferramenta pedagógica para o ensino de ciências e sustentabilidade. Em áreas públicas, contribui para a inclusão digital, permitindo que pessoas com acesso limitado à eletricidade possam recarregar seus dispositivos e manter a comunicação. Do ponto de vista ambiental, o projeto contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para o cumprimento das metas climáticas nacionais. Ao substituir geradores a diesel, evita-se não apenas a emissão de CO₂, mas também de poluentes locais que afetam a saúde humana, como material particulado e óxidos de nitrogênio. Esses resultados reforçam o papel estratégico da energia solar descentralizada na promoção da justiça energética e da sustentabilidade em comunidades isoladas.

As simulações indicaram que o sistema fotovoltaico de 5 kWp é o mais adequado ao perfil de uso do Totem Solar, equilibrando custo, autonomia e capacidade de atendimento. Com base nos dados de irradiação média de Teresina, o sistema é capaz de gerar cerca de 7.800 kWh por ano, o suficiente para atender centenas de recargas diárias em dispositivos móveis.

O desempenho energético mostrou-se consistente, com perdas totais inferiores a 18%, mesmo em condições de temperatura elevada. O uso de controladores MPPT aumentou a eficiência global do sistema em cerca de 12% em comparação com modelos PWM, demonstrando a importância da escolha de componentes de qualidade.

Em termos econômicos, o investimento inicial estimado foi de R\$ 11.500, incluindo painéis, baterias de íons de lítio, estrutura metálica e inversor. O custo nivelado de energia (LCOE) obtido foi de aproximadamente R\$ 0,38/kWh, inferior ao custo médio de geração por diesel (R\$ 1,20/kWh). O tempo de retorno do investimento foi calculado em 3,2 anos, o que confirma a atratividade econômica do sistema.

A análise de sensibilidade mostrou que a substituição de baterias chumbo-ácido por baterias de lítio aumenta o investimento inicial em 25%, mas prolonga a vida útil e reduz custos de manutenção em longo prazo. Além disso, a durabilidade superior das baterias de

lítio (até 10 anos) e a eficiência energética mais elevada justificam sua adoção em sistemas off-grid modernos.

Socialmente, o Totem Solar oferece benefícios diretos à população. Sua instalação em escolas e praças públicas permite o acesso gratuito à energia elétrica, fortalecendo a inclusão digital e o aprendizado sobre energias renováveis. O projeto também serve como laboratório didático, favorecendo o ensino prático de conceitos de eletricidade, sustentabilidade e eficiência energética.

Ambientalmente, o impacto é positivo, pois o sistema reduz emissões de CO₂ e elimina o consumo de combustíveis fósseis. A substituição de geradores a diesel em comunidades rurais por sistemas solares pode reduzir em até 2 toneladas de emissões anuais de CO₂ por unidade instalada. Além disso, o projeto contribui para a diversificação da matriz energética e para o cumprimento das metas de sustentabilidade estabelecidas pelo Brasil no Acordo de Paris.

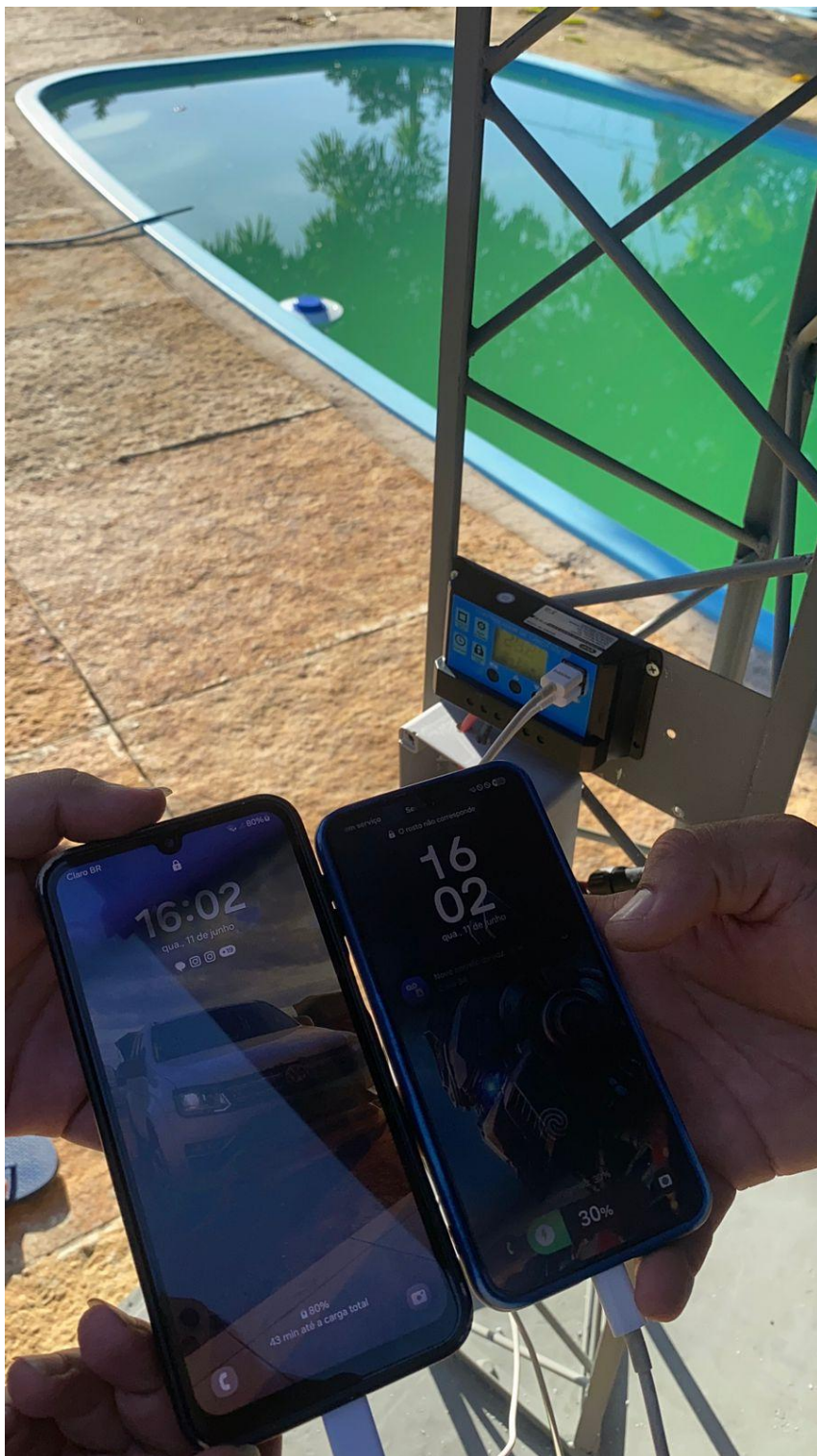


Figura 1: ilustra celulares carregando no totem solar (Marco Antônio Mendes, 2025)



Figura 2: ilustra o totem solar montado (Marco Antônio Mendes, 2025)



Figura 3: ilustra o controlador de carga 30A usb 12/24v (Marco Antônio Mendes, 2025)

5. CONCLUSÃO

De forma geral, este estudo demonstra como a engenharia pode ser uma ferramenta poderosa para transformar realidades sociais. A partir da aplicação prática de conceitos

sustentáveis, é possível promover a inclusão energética e a cidadania. O Totem Solar Off-grid, além de atender às necessidades básicas de eletrificação, serve como um símbolo de inovação e compromisso ambiental. O futuro aponta para soluções cada vez mais integradas, nas quais tecnologia, sustentabilidade e responsabilidade social caminham lado a lado. A análise desenvolvida ao longo deste trabalho permite concluir que o Totem Solar Off-grid representa uma proposta concreta de inovação tecnológica voltada à inclusão energética e social. A integração entre eficiência técnica, viabilidade econômica e relevância social demonstra que a adoção de sistemas solares autônomos é não apenas possível, mas desejável em termos de política pública. O estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre microgeração off-grid, evidenciando sua importância para o desenvolvimento sustentável regional. A continuidade das pesquisas nessa área é essencial para aprimorar o desempenho dos sistemas, reduzir custos e ampliar o alcance de suas aplicações. Sugere-se, ainda, a articulação entre instituições de ensino, órgãos governamentais e iniciativa privada para viabilizar projetos pilotos em comunidades carentes. Essa integração intersetorial permitirá validar os resultados em escala real e fortalecer o compromisso com a transição energética justa e inclusiva no Brasil.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o Totem Solar Autônomo de Carregamento Off-grid é uma solução inovadora e eficaz para promover o acesso universal à energia elétrica em regiões de difícil alcance pela rede convencional. A análise técnica comprovou a eficiência do sistema, enquanto a análise econômica demonstrou sua viabilidade financeira e sustentabilidade ambiental.

O projeto alia tecnologia e responsabilidade social, proporcionando benefícios diretos à população e fortalecendo políticas públicas de energia renovável. A replicabilidade do modelo permite que ele seja aplicado em diferentes contextos, tanto urbanos quanto rurais, promovendo inclusão digital, educação ambiental e redução das desigualdades regionais.

Recomenda-se, como continuidade deste estudo, a implementação de protótipos em campo e a coleta de dados reais de desempenho, visando aprimorar o dimensionamento e avaliar a interação do equipamento com usuários finais. A integração do Totem Solar com outras tecnologias, como iluminação pública e conectividade Wi-Fi, poderá ampliar ainda mais o seu impacto social e educativo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. A.; LIMA, A. M.; SOUSA, J. S. Potencial solar e desempenho de sistemas fotovoltaicos em regiões semiáridas. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 3, p. 45–59, 2020.

ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª ed., Brasília: ANEEL, 2022.

CRESESB. Banco de Dados de Energia Solar. CEPEL/Eletrobras, 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Brasília, 2021.

HOMER Energy. Microgrid Software Documentation. 2020.

INPE. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE, 2017.

MME – Ministério de Minas e Energia. Programa Luz para Todos: Resultados e Desafios. Relatório Técnico, 2023.

OLIVEIRA, L. B.; MELLO, J. C. C. B. S. Avaliação econômica de sistemas fotovoltaicos autônomos no semiárido brasileiro. *Revista de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 9, n. 1, 2020.

SANTOS, D. R.; OLIVEIRA, R. F. Energia Solar Off-Grid como Solução para Comunidades Isoladas. In: Congresso Brasileiro de Energias Renováveis, 2021.

SILVA, F. M.; LIMA, V. D. Iniciativas de eletrificação rural por meio da energia solar no Nordeste brasileiro: panorama e desafios. *Cadernos de Energia*, v. 7, n. 2, 2019.