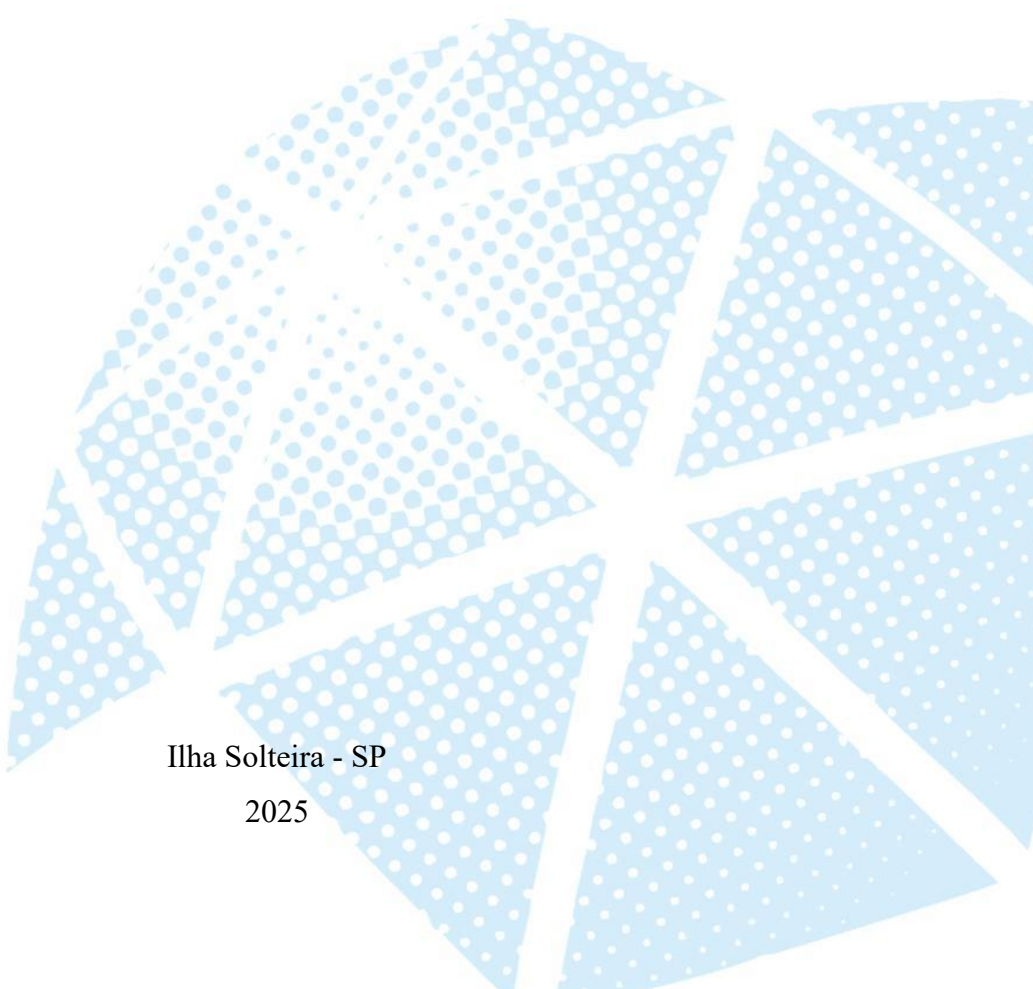


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GUILHERME ROSANTE PEREIRA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM UMA PROPRIEDADE RURAL CONSIDERANDO A
PRESENÇA DE UM SAE**

Ilha Solteira - SP
2025



GUILHERME ROSANTE PEREIRA

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM UMA PROPRIEDADE RURAL CONSIDERANDO A
PRESENÇA DE UM SAE**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha
Solteira - UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de
Potência

Orientador(a): Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi

Ilha Solteira - SP

2025

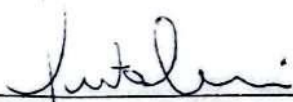
FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- P436a Pereira, Guilherme Rosante.
Análise de viabilidade econômica de implantação de um sistema fotovoltaico em uma propriedade rural considerando a presença de um SAE /
Guilherme Rosante Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
57 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025
- Orientador: Antonio Marcos Cossi
- Inclui bibliografia
1. Energia fotovoltaica. 2. Sistema on-grid. 3. Sistema off-grid.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dezessete dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente *Guilherme Rosante Pereira*, matriculado sob o nº. 181050358, tendo como banca examinadora seu orientador o *Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi*, a *Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer* e a *Profa. Dra. Thays Aparecida de Abreu Santos*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "*Análise de viabilidade econômica de implantação de um sistema fotovoltaico em uma propriedade rural considerando a presença de um SAE*", obtendo a nota 10,00 (DEZ) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi

- orientador -



Guilherme Rosante Pereira

- discente -



Profa. Dra. Christiane Marie Schweitzer

- membro da banca -



Profa. Dra. Thays Aparecida de Abreu Santos

- membro da banca -

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui tecnicamente para o dimensionamento e avaliação comparativa de sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid aplicados ao meio rural, com base em dados reais de consumo e simulações energéticas. O estudo permite identificar cenários de viabilidade econômica, impactos da Lei nº 14.300/2022 e limitações operacionais dos sistemas isolados, fornecendo subsídios para decisões mais seguras por parte de usuários, engenheiros e gestores públicos. A metodologia aplicada pode ser replicada em outras regiões com características semelhantes, favorecendo a inserção regional e nacional de tecnologias sustentáveis. Além disso, promove o uso racional de recursos energéticos, alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável e à expansão da geração distribuída no Brasil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study provides a technical contribution to the sizing and comparative evaluation of on-grid and off-grid photovoltaic systems in rural areas, based on real consumption data and energy simulations. It identifies scenarios of economic feasibility, the effects of Law nº 14.300/2022, and the operational limitations of isolated systems, offering support for decision-making by users, engineers, and policymakers. The proposed methodology is replicable in other regions with similar characteristics, promoting the regional and national adoption of sustainable technologies. It also encourages the rational use of energy resources, aligned with sustainable development goals and the expansion of distributed generation in Brazil.

Dedico este trabalho ao meu avô, Senhor Alcides,
por ser a raiz que tornou possível este primeiro
diploma da nossa linhagem.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, força e discernimento concedidos ao longo desta jornada. Sem Ele, nada disso teria sido possível.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, pelo ensino público de qualidade e pela estrutura oferecida ao longo da graduação, fundamentais para minha formação profissional.

À minha família, em especial aos meus pais, tios e avós da família Rosante, pelo suporte emocional, incentivo constante e apoio decisivo nos primeiros anos desta trajetória acadêmica.

À república TR, pelo convívio coletivo que contribuiu diretamente para meu desenvolvimento pessoal e por me proporcionar vínculos que fortaleceram minha permanência e dedicação durante o curso.

À empresa Ener 3, pela oportunidade de aplicar e aprofundar conhecimentos técnicos adquiridos em sala de aula, possibilitando a consolidação prática deste trabalho.

Aos colegas Vinicius, Leandro e Victor, pela parceria contínua ao longo de todas as etapas da graduação, sempre colaborando com suporte técnico e pessoal.

Ao Prof. Dr. Antonio Marcos Cossi, pela orientação dedicada neste trabalho e por ter ministrado minha primeira aula na graduação, marcando o início e o encerramento desta jornada.

“É um erro pensar que você pode resolver qualquer grande problema apenas com batentes, parafusos e alicates. Às vezes, você precisa de chá.”

— Douglas Adams, *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy* (1979).

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise comparativa entre sistemas fotovoltaicos on-grid com sistema convencional (sem energia fotovoltaica) e on-grid com off-grid aplicados a uma residência rural no município de Três Lagoas–MS. Foram considerados critérios técnicos e econômicos como consumo mensal de energia, irradiação solar local, custos de implantação, manutenção e viabilidade operacional, com base em simulações no software Solar Z. A avaliação foi realizada conforme as diretrizes da legislação vigente, especialmente a Lei nº 14.300/2022. O sistema conectado à rede (on-grid) apresentou maior viabilidade econômica para o contexto estudado, enquanto o sistema isolado (off-grid) se mostrou mais adequado em situações específicas de restrição de infraestrutura elétrica. Os resultados contribuem para o entendimento técnico e estratégico da aplicação de geração fotovoltaica no meio rural, oferecendo subsídios para tomadas de decisão por parte de engenheiros, produtores e formuladores de políticas públicas.

Palavras-chave: energia fotovoltaica; sistema on-grid; sistema off-grid; geração distribuída; energia rural.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of on-grid and off-grid photovoltaic systems applied to a rural residence in Três Lagoas–MS. Technical and economic criteria such as energy consumption, local solar irradiation, installation and maintenance requirements, and operational feasibility were evaluated through simulations using the Solar Z software. The analysis followed current legislation, particularly Law No. 14.300/2022. The grid-connected system proved to be more economically viable for the analyzed context, while the isolated system may be suitable in areas with limited electrical infrastructure. The results contribute to the technical and strategic understanding of photovoltaic generation in rural areas, supporting decision-making by engineers, producers, and policymakers.

Keywords: photovoltaic energy; on-grid system; off-grid system; distributed generation; rural energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do efeito fotovoltaico em células solares	Erro! Indicador não definido.
Figura 2 – Gráfico da evolução da energia solar no Brasil (potência instalada em GW, até 2025)	22
Figura 3 – Tipos de Células Fotovoltaicas	23
Figura 4 – Diferenças entre sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid	24
Figura 5 – Composição Tarifa de Energia	25
Figura 6 – Perfil de consumo do exemplo	27
Figura 7 – Consumo diário vs Geração de Energia	28
Figura 8 – Irradiação Latitude: 20,10° S / Longitude: 52,44°	36
Figura 9 – Fluxo de caixa da geração fotovoltaica On-Grid em 7 anos	49
Figura 10 – Fluxo de caixa da geração fotovoltaica Off-Grid em 40 anos	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração real mensal do cliente (2023–2024)	39
Tabela 2 – Conta de energia mensal antes da instalação do sistema fotovoltaico	39
Tabela 3 – Índice de simultaneidade do sistema	41
Tabela 4 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2023	42
Tabela 5 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2024	43
Tabela 6 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2025	43
Tabela 7 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2026	44
Tabela 8 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2027	44
Tabela 9 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2028	45
Tabela 10 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2029	45
Tabela 11 – Valores mensais e anuais pagos em taxas pela Lei 14.300 entre 2023 e 2029	46
Tabela 12 – Detalhamento dos custos do sistema on-grid	47
Tabela 13 – Comparativo entre baterias de chumbo-ácido e baterias de lítio	48
Tabela 14 – Estimativa de custo total do sistema off-grid	49
Tabela 15 – Comparativo de custos entre energia convencional e sistema fotovoltaico ligado à rede	50
Tabela 16 – Comparativo entre sistema on-grid e sistema off-grid	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COES	Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional
GD	Geração Distribuída
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MS	Mato Grosso do Sul
NBR	Norma Brasileira
OC	Operador de Carga
PV	Photovoltaic
TIR	Taxa Interna de Retorno
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	PROBLEMÁTICA	15
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	OBJETIVOS	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	19
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	19
2.2	TARIFAS TUSD E TE.....	23
2.3	REGULAÇÃO E LEGISLAÇÃO.....	24
2.4	A IMPORTÂNCIA DA SIMULTANEIDADE EM SISTEMAS ON-GRID.....	25
2.5	TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E BATERIAS	28
2.6	TIPOS DE BATERIAS UTILIZADAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ...	31
2.7	CARGAS CRÍTICAS E O USO DE CHUVEIROS ELÉTRICOS EM SISTEMAS OFF-GRID	32
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	JUSTIFICATIVA DO USO DO SOFTWARE SOLAR Z	33
3.2	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	33
3.3	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID	34
3.4	DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO OFF-GRID	36
4	RESULTADOS	37
4.1	GERAÇÃO REAL MEDIDA (2023–2024).....	37
4.2	CONTA DE ENERGIA CONVENCIONAL (SEM SISTEMA FOTOVOLTAICO)	37
4.3	SIMULTANEIDADE E PERFIL DE CONSUMO.....	38
4.4	IMPACTO DA LEI Nº 14.300/2022	39
4.5	ESTIMATIVA DE CUSTO DO SISTEMA ON-GRID.....	43
4.6	ESTIMATIVA DE CUSTO DO SISTEMA OFF-GRID	45
4.7	COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE ENERGIA CONVENCIONAL E SOLAR ON-GRID	46
4.8	ECONOMIA ANUAL (OFF-GRID):.....	48

4.9	COMPARATIVO FINAL: SISTEMA ON-GRID VERSUS SISTEMA OFF-GRID.....	49
4.10	COMPARAÇÃO PAYBACK DOS SISTEMAS.....	51
4.11	SÍNTESE DAS LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS.....	51
4.12	CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA ENERGÉTICA E RESILIÊNCIA	52
4.13	ANÁLISES PRINCIPAIS PARA 25 ANOS.....	52
5	CONCLUSÃO.....	54
6	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso de fontes renováveis para geração de energia tem se intensificado nas últimas décadas como resposta às mudanças climáticas, à elevação dos custos da energia elétrica e à necessidade de promover maior segurança energética. Entre essas fontes, a energia solar fotovoltaica destaca-se como uma das alternativas mais promissoras, especialmente no Brasil, país que possui alta incidência de radiação solar ao longo de todo o ano (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o país já ultrapassou a marca de 37 GW em potência instalada de geração distribuída, sendo aproximadamente 99% deste total proveniente de sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede [2]. A facilidade de acesso a linhas de crédito, a redução dos custos dos equipamentos e os incentivos regulatórios contribuíram significativamente para esse crescimento acelerado.

Em áreas rurais, a expansão da energia solar apresenta um impacto ainda mais relevante, não apenas pela economia na fatura de energia, mas também pela melhoria na confiabilidade do fornecimento. Em muitas regiões, interrupções constantes e instabilidade na rede convencional são desafios recorrentes enfrentados por produtores rurais e moradores afastados dos centros urbanos. A energia solar, nesse contexto, se consolida como uma ferramenta de autonomia e sustentabilidade, permitindo o suprimento local de energia com baixa emissão de carbono e custos operacionais reduzidos.

A discussão em torno da escolha entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on-grid) e sistemas isolados (off-grid) tornou-se cada vez mais relevante. Essa decisão envolve não apenas critérios técnicos, mas também fatores econômicos, regulatórios e de segurança energética, especialmente após a sanção da Lei nº 14.300/2022, que estabelece a cobrança progressiva de encargos para sistemas on-grid a partir de 2023.

1.2 PROBLEMÁTICA

Embora a energia solar seja uma solução ambientalmente adequada e tecnicamente viável, a escolha entre um sistema fotovoltaico conectado à rede (on-grid) e um sistema isolado (off-grid) levanta dúvidas importantes no campo da viabilidade econômica e da segurança energética.

Os sistemas on-grid, amplamente utilizados no Brasil, historicamente ofereciam isenção de tarifas sobre a energia injetada na rede. No entanto, com a promulgação da Lei nº

14.300/2022 — conhecida como o novo marco legal da micro e minigeração distribuída — passou-se a estabelecer uma cobrança gradual de encargos (especialmente da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD fio B) sobre essa energia compensada, impactando diretamente a atratividade econômica dos sistemas conectados (BRASIL, 2022). Mesmo sistemas instalados após a vigência da lei já começaram a sentir os efeitos dessas mudanças regulatórias, com projeções de aumentos progressivos na carga tributária até o ano de 2029. Por outro lado, os sistemas off-grid oferecem independência da rede elétrica e, consequentemente, não são impactados por tais cobranças. Todavia, essa autonomia energética vem acompanhada de maiores custos iniciais, sobretudo devido à necessidade de um robusto banco de baterias, inversores específicos e controladores de carga. Além disso, o dimensionamento desses sistemas exige um planejamento mais rigoroso, especialmente para garantir a operação em períodos de baixa insolação, o que acarreta custos adicionais e limitações técnicas — como a exclusão de cargas críticas com alto consumo de corrente, a exemplo do chuveiro elétrico.

Diante disso, surge a seguinte questão: é mais vantajoso investir em um sistema conectado à rede com custos recorrentes crescentes ao longo do tempo, ou em um sistema isolado, mais caro inicialmente, mas livre de encargos e capaz de operar com independência? Essa problemática se torna especialmente pertinente em propriedades rurais que buscam soluções confiáveis e sustentáveis de fornecimento de energia em longo prazo, especialmente em regiões onde a rede elétrica apresenta falhas frequentes e interrupções prolongadas.

1.3 JUSTIFICATIVA

A análise comparativa entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on-grid) e sistemas isolados (off-grid) torna-se fundamental em um cenário de mudanças regulatórias e crescentes preocupações com a segurança energética no meio rural. Com a entrada em vigor da Lei nº 14.300/2022, que estabelece um novo regime de compensação de energia elétrica e determina o início da cobrança escalonada de encargos sobre a energia excedente injetada na rede, tornou-se necessário reavaliar a viabilidade econômica dos projetos fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil (BRASIL, 2022).

Essa reavaliação é ainda mais relevante quando se considera o contexto das propriedades rurais, frequentemente situadas em regiões onde o fornecimento de energia elétrica apresenta instabilidade, oscilações de tensão e quedas constantes de energia. Nessas localidades, a segurança no abastecimento elétrico é tão importante quanto o aspecto

econômico. Em muitos casos, os produtores enfrentam perdas em processos produtivos e prejuízos logísticos em decorrência da interrupção do fornecimento pela rede convencional. Nesse sentido, os sistemas off-grid, embora mais onerosos na etapa inicial, despontam como alternativa estratégica para garantir independência energética, especialmente quando projetados com foco em eficiência, autonomia e confiabilidade. A substituição de cargas críticas, como o chuveiro elétrico, por alternativas mais eficientes (ex: aquecimento solar de água), bem como o uso de equipamentos otimizados para sistemas isolados, são medidas viáveis que podem tornar o off-grid competitivo em determinadas condições.

Além disso, o presente estudo se justifica pela utilização de dados reais de geração de uma instalação pós-Lei 14.300, situada na cidade de Três Lagoas – MS, o que confere embasamento prático e atual ao trabalho. Ao comparar o desempenho e os custos entre as duas abordagens com base em um mesmo orçamento inicial, será possível identificar de forma clara os benefícios e desafios técnicos, econômicos e regulatórios de cada alternativa.

Portanto, este trabalho contribui com o setor ao oferecer uma visão crítica e embasada sobre a viabilidade técnica e econômica da adoção de sistemas fotovoltaicos em áreas rurais sob as novas condições regulatórias brasileiras.

1.4 OBJETIVOS

- **Objetivo Geral**

Analisar comparativamente a viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede (on-grid) e de um sistema isolado (off-grid) para uma residência rural localizada em Três Lagoas – MS, utilizando o mesmo orçamento de investimento inicial e considerando os impactos da Lei nº 14.300/2022.

- **Objetivos Específicos**

- Dimensionar um sistema fotovoltaico on-grid com base em dados reais de geração e consumo da propriedade;
- Estimar o valor acumulado das tarifas e encargos incidentes sobre a energia compensada, conforme estabelecido pela Lei nº 14.300/2022, ao longo de um horizonte de 6 anos (2023–2029);
- Projetar um sistema fotovoltaico off-grid com a mesma potência instalada, incluindo um banco de baterias dimensionado para garantir 2 dias de autonomia energética;
- Comparar os custos de implantação e operação de ambos os sistemas, incluindo os equipamentos adicionais exigidos no modelo off-grid (controlador de carga, baterias e sistema de aquecimento solar);

- Identificar as principais limitações técnicas, operacionais e econômicas de cada sistema em uma aplicação rural;
- Avaliar as vantagens da independência energética proporcionada pelo sistema off-grid, especialmente frente a falhas frequentes no fornecimento pela rede convencional.

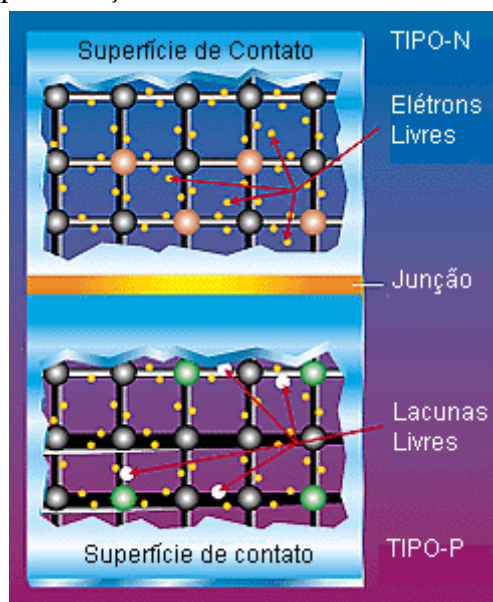
2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a tecnologia de conversão direta da luz do Sol em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Trata-se de uma fonte renovável e limpa, pois não emite poluentes nem consome recursos escassos, além de operar de forma silenciosa (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Nesse processo, a radiação solar incidente sobre um dispositivo semicondutor é convertida em corrente elétrica, diferentemente da energia solar térmica, que aproveita o calor do Sol para aquecimento ou geração térmica de energia elétrica (JUNG, 2010).

Em termos práticos, ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica – normalmente uma junção p-n de silício –, os fótons elevam a energia dos elétrons do material, gerando pares elétron-lacuna que são separados pelo campo elétrico interno da junção. Com isso, estabelece-se uma diferença de potencial que força a circulação de corrente elétrica quando a célula está conectada a um circuito externo. Esse princípio permite gerar eletricidade de forma direta e robusta, uma vez que os módulos fotovoltaicos não possuem partes móveis e requerem pouca manutenção, características atrativas especialmente para aplicações em áreas remotas e rurais (JUNG, 2010).

Figura 1 - Representação do efeito fotovoltaico em células solares.



Fonte: <https://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/luischan/comofunciona.htm>

Legenda: Diagrama esquemático que ilustra o funcionamento básico do efeito fotovoltaico, destacando a incidência da radiação solar sobre a célula e a consequente movimentação de elétrons que gera corrente elétrica contínua.

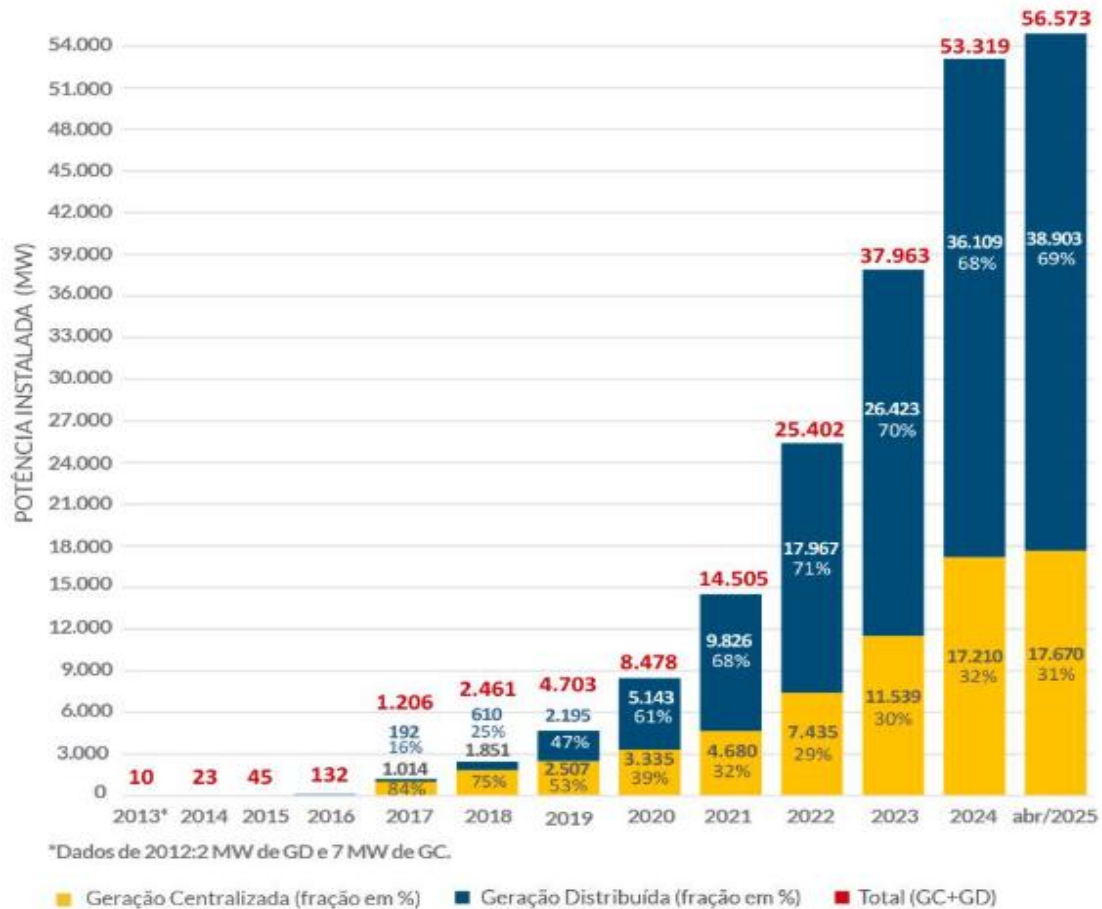
O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, mas a implementação prática demorou algumas décadas para se concretizar. Os

primeiros dispositivos conhecidos como células solares foram produzidos em 1883, utilizando selênio metálico. Contudo, foi somente no século XX que a tecnologia fotovoltaica ganhou viabilidade: em 1954, nos Estados Unidos, desenvolveram-se as primeiras células de silício cristalino com eficiência em torno de 6%. A produção comercial em escala industrial desses dispositivos iniciou-se em 1956 (JUNG, 2010).

Nas décadas seguintes, a energia solar fotovoltaica foi empregada inicialmente em satélites e sistemas isolados, devido ao alto custo dos módulos. Entretanto, a partir dos anos 2000, o setor presenciou ganhos expressivos em eficiência e reduções de custo dos painéis, impulsionados por avanços tecnológicos e economias de escala (KRUGER; ZANELLA; BARICHELLO, 2023). Esse progresso resultou em um crescimento exponencial da capacidade solar instalada no mundo na última década. Os sistemas fotovoltaicos vêm apresentando uma das maiores taxas de expansão entre as fontes de geração elétrica, impulsionados pela busca por alternativas energéticas sustentáveis e por políticas de incentivo em diversos países (PINHO; GALDINO, 2014).

No Brasil, embora a adoção tenha sido inicialmente tímida, a situação começou a mudar com a criação de regulamentações específicas. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou em 2012 a Resolução Normativa nº 482, estabelecendo o sistema de compensação de energia (net metering) que permitiu a conexão de micro e minigeradores fotovoltaicos à rede elétrica. Desde então, a capacidade instalada de energia solar no país vem dobrando quase anualmente. Destaca-se que o Brasil, por ser um país de clima tropical com elevada incidência solar, possui um potencial solar excepcional, o que está favorecendo sua rápida ascensão no cenário fotovoltaico mundial (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 2 - Gráfico da evolução da energia solar no Brasil (potência instalada em GW até 2025).



Fonte: <https://canalsolar.com.br>

Legenda: Gráfico de linha que apresenta o crescimento acumulado da potência instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil, considerando dados históricos e projeções até o ano de 2025.

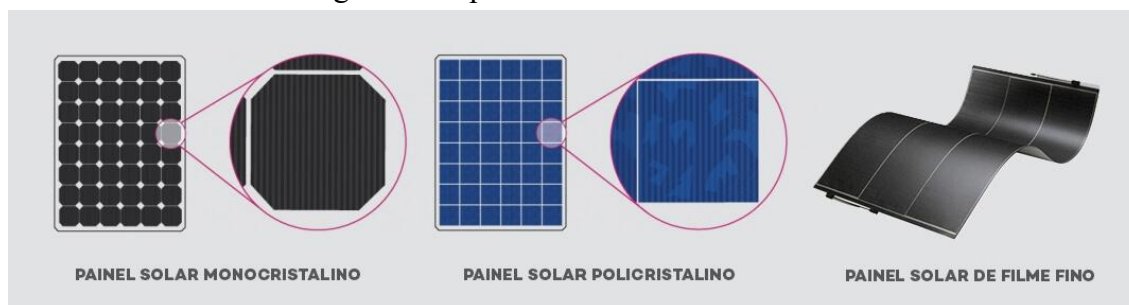
A célula fotovoltaica é a unidade básica dos sistemas solares. Tipicamente composta de material semicondutor dopado, ela forma internamente uma junção p-n. Quando a luz solar incide sobre a célula, os fótons com energia suficiente libertam elétrons das ligações atômicas do semicondutor. Devido à polarização interna da junção, os elétrons livres são deslocados para a região n enquanto as lacunas (cargas positivas) se deslocam para a região p, gerando uma diferença de potencial elétrico entre as duas regiões. Se os terminais da célula forem conectados a um circuito externo, essa diferença de potencial produz uma corrente elétrica contínua.

Cada célula individual gera uma tensão em torno de 0,5 V a 0,6 V e corrente proporcional à intensidade luminosa. Para obter níveis úteis de tensão e corrente, associa-se um conjunto de dezenas de células em série e paralelo, formando um módulo fotovoltaico encapsulado. Módulos individuais podem fornecer tipicamente de dezenas a algumas centenas de Watts de potência.

Os módulos mais comuns no mercado são os de silício cristalino, presentes em duas variantes principais: monocristalino e policristalino. Módulos monocristalinos são fabricados a partir de um único cristal de silício de alta pureza, apresentando maior eficiência (entre 18% e 22%) e melhor desempenho em baixas irradiações. Já os policristalinos são produzidos com silício fundido e solidificado em múltiplos cristais, oferecendo eficiência inferior (entre 15% e 18%), porém com menor custo (PINHO; GALDINO, 2014).

Além desses, existem os módulos de filme fino, que utilizam materiais como o telureto de cádmio (CdTe) ou silício amorfo. Esses painéis apresentam menor eficiência (em torno de 10% a 12%), mas são mais leves e flexíveis, adaptando-se melhor a superfícies curvas ou aplicações específicas.

Figura 3 - Tipos de Células Fotovoltaicas.



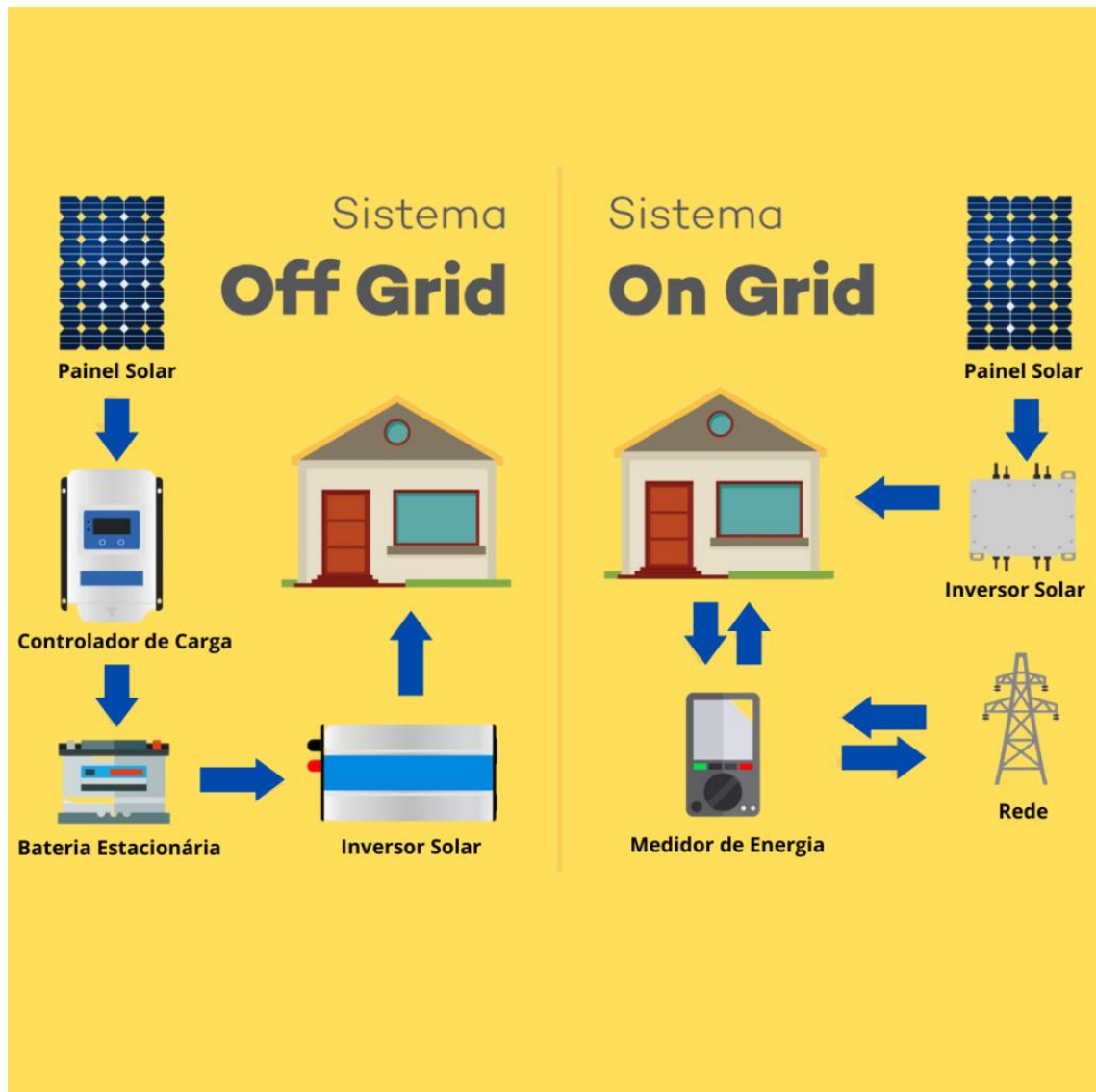
Fonte: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/placa-solar-fotovoltaica/tipos>

Legenda: Imagem comparativa entre os principais tipos de células solares disponíveis no mercado: monocristalina, policristalina e de filme fino, com destaque para suas eficiências e características estruturais.

Conforme a forma de utilização da energia gerada, os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados como conectados à rede (on-grid) ou isolados (off-grid). Nos sistemas on-grid, o arranjo fotovoltaico opera em paralelo com a rede elétrica. A energia gerada supre o consumo local e o excedente é injetado na rede pública, permitindo a compensação de energia por meio de créditos. Não há necessidade de baterias, pois a rede elétrica funciona como um "armazenador virtual" da energia excedente.

Já os sistemas off-grid são completamente independentes da rede elétrica. Neles, toda a energia gerada deve ser consumida diretamente ou armazenada em bancos de baterias para posterior uso. Por isso, é essencial o uso de controladores de carga e inversores específicos, além de dimensionamento cuidadoso da capacidade de armazenamento, especialmente para garantir autonomia durante dias nublados ou à noite (SANTOS et al., 2017).

Figura 4 – Diferenças entre sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid.



Fonte: <https://www.evs.eng.br/noticias/qual-a-diferenca-entre-um-sistema-off-grid-e-on-grid/>

Legenda: Comparativo apontando as principais diferenças entre sistemas conectados à rede (on-grid) e sistemas autônomos (off-grid).

Apesar de exigirem maior investimento inicial, os sistemas off-grid oferecem autonomia e segurança energética, o que os torna viáveis para locais remotos e regiões com fornecimento de energia instável. Em contrapartida, os sistemas on-grid são mais econômicos, porém dependem integralmente da rede pública para operar.

2.2 TARIFAS TUSD E TE.

A estrutura tarifária aplicada aos consumidores de energia elétrica é composta por dois elementos fundamentais: a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa de Energia (TE). A TUSD representa o custo associado à utilização da infraestrutura de distribuição de energia, abrangendo despesas com manutenção, operação e investimentos na

rede. Já a TE reflete o custo da própria energia consumida. No contexto da geração distribuída, esses componentes tarifários exercem um papel crucial na economia de um sistema fotovoltaico, pois influenciam diretamente o retorno financeiro do investimento. A compensação de créditos de energia, por exemplo, é calculada com base na estrutura tarifária vigente, permitindo que os consumidores reduzam significativamente suas faturas ao injetar o excedente produzido. Assim, a interação entre a TUSD e a TE é determinante para a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que a redução de custos com energia elétrica depende da forma como esses encargos são estruturados e aplicados pelas concessionárias.

Figura 5 - Composição Tarifa de Energia.

TARIFA DE ENERGIA					
TE		TUSD			
ENERGIA	ENCARGOS	FIO A (trans.)	FIO B (distribuição)	ENCARGOS	PERDAS
38%	12%	6%	28%	8%	8%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Legenda: Componentes da tarifa de energia elétrica no Brasil, incluindo encargos, tributos e parcelas referentes ao uso da rede de distribuição.

2.3 REGULAÇÃO E LEGISLAÇÃO.

A regulamentação da geração de energia elétrica distribuída no Brasil passou por importantes transformações nas últimas décadas. Inicialmente, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram regulamentados por meio da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, que introduziu o sistema de compensação de energia elétrica. Esse marco regulatório permitiu que consumidores com micro ou minigeração própria pudessem injetar energia na rede e receber créditos para abater em seu consumo futuro, sem pagar encargos sobre a energia injetada.

Com o crescimento exponencial da geração distribuída, especialmente da solar fotovoltaica, surgiram debates sobre os custos de manutenção da infraestrutura elétrica e a necessidade de tornar o sistema mais equilibrado entre todos os usuários. Como resposta, foi sancionada em janeiro de 2022 a Lei nº 14.300, que instituiu o chamado Marco Legal da Geração Distribuída. Essa legislação substituiu a RN 482/2012 e passou a regulamentar de

forma mais ampla a geração distribuída no país, incluindo regras de transição e novas formas de tarifação (BRASIL, 2022).

Segundo a nova lei, sistemas conectados à rede elétrica instalados a partir de 7 de janeiro de 2023 passaram a ser gradualmente tarifados pela TUSD Fio B (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição, componente referente ao custo da infraestrutura da rede elétrica), mesmo sobre a energia compensada. Essa cobrança será escalonada até 2029, da seguinte forma:

- 2023: 15% da TUSD Fio B sobre a energia injetada;
- 2024: 30%;
- 2025: 45%;
- 2026: 60%;
- 2027: 75%;
- 2028: 90%;
- A partir de 2029: 100% da TUSD Fio B sobre a energia injetada.

Essa nova estrutura altera significativamente a atratividade econômica de novos projetos on-grid, especialmente em propriedades rurais com geração próxima ao consumo mensal. Mesmo que a energia injetada gere créditos, ela passará a ser parcialmente tarifada, o que reduz o retorno financeiro do investimento ao longo do tempo (BRASIL, 2022).

Além disso, vale destacar que a energia consumida da rede, mesmo em projetos com compensação, segue sujeita à cobrança da TE (Tarifa de Energia) e TUSD Fio A, além dos encargos e tributos já aplicáveis. No caso de sistemas off-grid, por outro lado, todas essas tarifas são eliminadas, já que não há conexão com a distribuidora.

Dessa forma, a Lei nº 14.300 representa um divisor de águas para o planejamento de novos sistemas solares no Brasil, sendo fundamental considerar seus efeitos tarifários futuros ao comparar sistemas conectados e isolados.

2.4 A IMPORTÂNCIA DA SIMULTANEIDADE EM SISTEMAS ON-GRID.

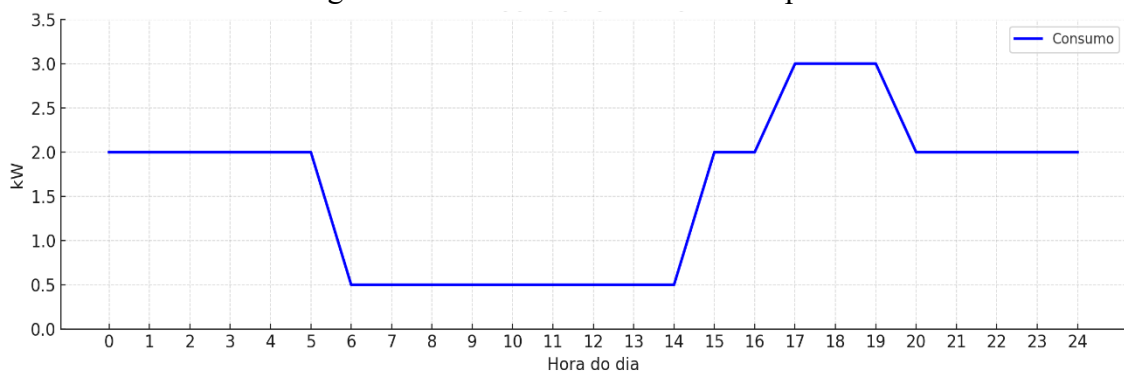
Para ilustrar esse conceito, vamos considerar um cenário hipotético envolvendo a família de Carlos e Ana. Carlos é proprietário de uma pequena padaria no centro da cidade, enquanto Ana trabalha como professora em uma escola pública. O casal tem um filho adolescente, Lucas, e uma filha universitária, Mariana.

A rotina da família segue um padrão diário: Carlos sai de casa às 4h da manhã para abrir a padaria e só retorna às 16h. Ana, por sua vez, deixa a residência às 6h e permanece na escola

até as 17h. Lucas e Mariana saem de manhã cedo para estudar e voltam no fim da tarde. Durante esse período, a casa permanece praticamente sem consumo significativo de energia, com exceção de eletrodomésticos básicos como a geladeira, roteador de internet e alguns aparelhos eletrônicos em stand-by.

Porém, a partir das 18h, o consumo cresce consideravelmente. Ao chegarem em casa, os membros da família utilizam eletrodomésticos como micro-ondas, máquina de lavar roupas, televisores e computadores, além do chuveiro elétrico, que representa um dos maiores picos de consumo no período noturno. O ar-condicionado também é acionado nos quartos, e esse padrão de consumo permanece elevado até por volta da meia-noite.

Figura 6 - Perfil de consumo do exemplo.

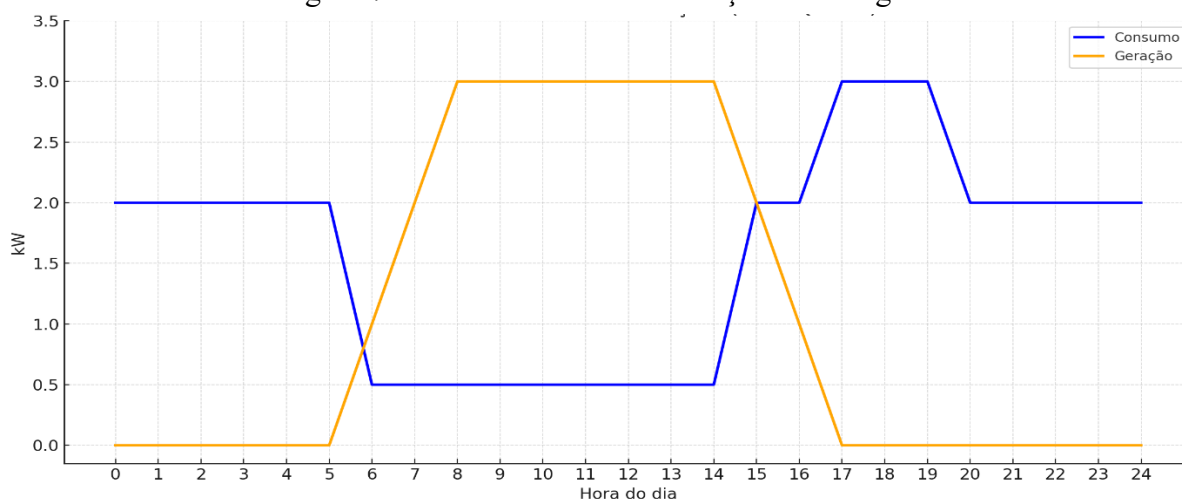


Fonte: <https://canalsolar.com.br/tarifacao-do-fio-b-previsto-na-lei-14-300/>

Legenda: Curva de carga da residência rural utilizada como estudo de caso, demonstrando a variação diária do consumo elétrico ao longo de 24 horas.

A família decidiu instalar um sistema fotovoltaico de 4,5 kWp com um inversor de 3 kW para reduzir os custos com eletricidade. Em um dia típico, sem nebulosidade excessiva, o sistema inicia sua geração por volta das 6h30, atinge seu pico entre 10h e 14h e reduz gradualmente a produção até encerrar a geração ao anoitecer.

Figura 7 - Consumo diário vs Geração de Energia.



Fonte: <https://canalsolar.com.br/tarifacao-do-fio-b-previsto-na-lei-14-300/>

Legenda: Comparativo entre o consumo elétrico diário e a geração fotovoltaica estimada para o mesmo período.

O comportamento do sistema pode ser analisado em três regiões distintas:

- **Região de Consumo Ativo Fora do Momento de Geração:**

Representa os períodos em que a residência consome energia exclusivamente da rede elétrica, como no início da manhã antes do nascer do sol e no período noturno. Durante esses momentos, a família de Carlos depende totalmente da concessionária para suprir sua demanda, sendo tarifada com base na TUSD e na TE, além da incidência do "Fio B".

- **Região de Energia Injetada:**

Durante o dia, enquanto a casa está praticamente vazia e o consumo é reduzido, a geração fotovoltaica ultrapassa a demanda e o excedente é injetado na rede elétrica. Essa energia, conforme a Lei 14.300, ainda pode gerar créditos para compensação futura, mas agora está sujeita à cobrança parcial do "Fio B", mesmo que beneficie a distribuidora ao aliviar o sistema.

- **Região de Simultaneidade:**

Quando a família retorna para casa no final da tarde, há um pequeno período em que o consumo e a geração coincidem. Neste momento, a energia produzida pelo sistema fotovoltaico é utilizada instantaneamente, sem passar pelo medidor da distribuidora. Como essa fração de energia não utiliza a rede elétrica, ela não é tarifada, proporcionando uma economia significativa para o consumidor.

A maximização da simultaneidade é um fator estratégico para reduzir os impactos da nova tarifação imposta pela Lei 14.300. Consumidores que conseguem adaptar seus hábitos de

consumo para coincidir com os períodos de geração solar aproveitam melhor a energia produzida, evitando a incidência de tarifas sobre a energia injetada na rede.

No caso da família de Carlos e Ana, uma possível estratégia para otimizar essa simultaneidade seria programar o funcionamento de eletrodomésticos como a máquina de lavar roupas e o ferro elétrico para o período da manhã ou início da tarde, enquanto o sol ainda está em alta. Assim, mais energia gerada seria consumida instantaneamente, reduzindo a necessidade de compensação futura e minimizando o impacto das novas regras tarifárias.

As alterações tarifárias e o novo modelo de compensação, com base no valor do "Fio B", estabelecem um sistema de gestão energética que valoriza a simultaneidade entre geração e consumo. Essa configuração permite que os consumidores aproveitem a energia produzida no próprio momento de demanda, eliminando a cobrança de encargos sobre essa parcela e promovendo uma redução real dos custos operacionais. Ao mesmo tempo, a necessidade de transparência na divulgação dos custos e o ajuste dinâmico dos parâmetros tarifários incentivam uma operação mais eficiente e sustentável da rede elétrica, contribuindo para a modernização e descentralização do sistema energético brasileiro.

2.5 TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E BATERIAS

Além da escolha adequada do tipo de módulo fotovoltaico, a viabilidade técnica e econômica de um sistema solar — especialmente do tipo off-grid — depende diretamente da tecnologia de armazenamento de energia adotada. O banco de baterias é o componente responsável por garantir autonomia durante os períodos de baixa ou nenhuma geração solar, como à noite ou em dias chuvosos, sendo fundamental em sistemas isolados da rede pública.

No contexto de um sistema fotovoltaico, é importante diferenciar o conceito de bateria utilizada em um SAE daquelas empregadas em aplicações convencionais, como automóveis ou eletrônicos portáteis. Um SAE para sistemas fotovoltaicos é projetado para operar em condições específicas, caracterizadas por ciclos diários de carga e descarga, variações de temperatura e exigências de alta confiabilidade. Esses sistemas demandam baterias com um sistema de gerenciamento (Battery Management System – BMS) sofisticado, que monitora parâmetros como tensão, corrente, temperatura e estado de carga, garantindo assim a otimização do desempenho e a maximização da vida útil. Por outro lado, baterias comuns podem não oferecer a robustez necessária para suportar ciclos profundos e frequentes, sendo muitas vezes dimensionadas para cargas esporádicas e condições de operação menos rigorosas.

Além disso, a integração de um SAE (Sistema de Armazenamento de Energia) a um sistema fotovoltaico impõe uma série de requisitos técnicos que vão além da simples

compatibilidade física dos componentes. É imperativo que o SAE seja perfeitamente compatível com os inversores e os sistemas de controle empregados, de modo a garantir que a energia gerada pelos módulos solares possa ser gerenciada de forma eficaz, mesmo diante das variações intrínsecas à produção fotovoltaica. Essa produção é naturalmente intermitente e sujeita a flutuações diárias e sazonais, o que exige que o sistema de armazenamento seja capaz de suportar e compensar essas oscilações.

Para tanto, a seleção da tecnologia de bateria não pode se restringir à comparação dos custos iniciais de aquisição, mas deve incluir uma análise aprofundada de diversos parâmetros críticos, tais como a eficiência de conversão, a profundidade de descarga permitida, o número de ciclos de carga/descarga suportados e os custos operacionais e de manutenção ao longo do ciclo de vida do equipamento. A eficiência do SAE é diretamente impactada pela capacidade de minimizar perdas energéticas durante os processos de carga e descarga, o que pode representar uma diferença significativa na energia efetivamente disponível para uso final.

Enquanto os módulos fotovoltaicos podem variar em eficiência e custo — por exemplo, os módulos monocristalinos, com alta eficiência, versus os policristalinos ou de filme fino, que podem oferecer soluções mais econômicas, mas com desempenho inferior — a seleção das baterias para o SAE assume papel ainda mais estratégico. Tecnologias como as baterias de íon de lítio, embora apresentem um investimento inicial mais elevado, tendem a oferecer melhor desempenho em termos de eficiência, capacidade de ciclo e profundidade de descarga, fatores que, a longo prazo, podem compensar o custo maior e proporcionar uma operação mais confiável e econômica.

No contexto de aplicações, especialmente em cenários de Geração Distribuída, a implementação de um SAE integrado a um sistema fotovoltaico confere uma flexibilidade operacional notável. Em propriedades rurais, por exemplo, a possibilidade de acumular energia durante períodos de alta produção solar e liberá-la quando a rede elétrica é instável ou indisponível, permite alcançar uma autonomia energética que reduz a dependência do sistema convencional de distribuição. Essa característica é essencial para atender a demandas energéticas de locais remotos, onde a continuidade do fornecimento pode ser comprometida. A relevância dessa integração é ainda evidenciada pelo papel estratégico que ela desempenha na busca pela neutralidade de carbono e na otimização dos recursos energéticos disponíveis.

A implementação técnica de um SAE envolve uma série de desafios que precisam ser abordados para assegurar a viabilidade econômica e operacional do sistema fotovoltaico. Entre os principais aspectos técnicos e desafios, destacam-se:

- **Densidade Energética:**

Este parâmetro indica a quantidade de energia que pode ser armazenada por unidade de volume ou massa. Em sistemas onde o espaço é limitado, como em instalações urbanas ou áreas com restrição física, uma maior densidade energética é crucial para maximizar a capacidade de armazenamento sem a necessidade de expandir significativamente o sistema físico.

- **Ciclos de Carga/Descarga:**

A durabilidade das baterias está diretamente relacionada ao número de ciclos de carga e descarga que elas suportam antes de uma queda significativa em sua capacidade. Baterias que permitem ciclos mais profundos e numerosos reduzem a frequência de substituição, impactando positivamente os custos de manutenção e aumentando a confiabilidade do sistema ao longo do tempo.

- **Eficiência Operacional e Perdas Energéticas:**

Durante os processos de carga e descarga, inevitáveis perdas de energia ocorrem devido à resistência interna e outros fatores. A eficiência operacional, que reflete a relação entre a energia armazenada e a energia efetivamente recuperada, é um indicador fundamental para a performance do SAE. Minimizar essas perdas é essencial para otimizar a utilização da energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

- **Gestão Térmica:**

A performance das baterias pode ser significativamente afetada por variações de temperatura. Sistemas de gestão térmica são necessários para manter as baterias dentro de uma faixa operacional ideal, prevenindo a degradação acelerada e assegurando a consistência do desempenho, especialmente em climas extremos.

- **Custos Operacionais e Impacto Ambiental:**

Além dos custos iniciais de aquisição, é fundamental avaliar os custos operacionais ao longo da vida útil do sistema, incluindo manutenção, monitoramento e eventual substituição dos componentes. Do ponto de vista ambiental, a análise deve incluir considerações sobre o ciclo de vida dos materiais, a reciclagem e o descarte adequado, uma vez que tecnologias mais avançadas podem apresentar perfis de impacto ambiental variados.

Em suma, a integração de um SAE com um sistema fotovoltaico não se limita à simples adição de baterias, mas envolve um complexo conjunto de decisões técnicas e econômicas que

determinam a eficiência e a sustentabilidade do sistema como um todo. Essa avaliação detalhada dos requisitos técnicos, combinada com uma análise dos desafios operacionais, é indispensável para a implementação de sistemas de geração distribuída que sejam ao mesmo tempo viáveis economicamente e robustos do ponto de vista operacional. Essa abordagem multidisciplinar, que abrange desde a seleção de tecnologias até a gestão de custos e impactos ambientais, constitui a base para uma tomada de decisão fundamentada e para o desenvolvimento de projetos de energia renovável que atendam às demandas contemporâneas de eficiência e sustentabilidade

2.6 TIPOS DE BATERIAS UTILIZADAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As baterias utilizadas em sistemas solares off-grid são projetadas para suportar profundos ciclos de carga e descarga. No contexto de sistemas residenciais, as principais categorias de baterias são:

- Chumbo-ácido (estacionárias): custo inicial menor, vida útil de 3 a 8 anos, exigem maior volume físico e manutenção periódica.
- Íons de lítio (LiFePO_4): maior eficiência, vida útil de até 15 anos, custo inicial maior, menor necessidade de manutenção.
- SAE (Serviço Auxiliar de Energia): são baterias de ciclo profundo, aplicadas em sistemas fotovoltaicos com durabilidade intermediária e projeto robusto.

Adicionalmente, em contextos como o de comunidades rurais, onde o poder aquisitivo dos moradores é limitado, torna-se relevante considerar alternativas de menor custo para viabilizar a implantação de sistemas solares off-grid. Baterias estacionárias de menor capacidade, como modelos de 12V com 70Ah a 150Ah, podem ser encontradas no mercado nacional por preços a partir de R\$ 400,00, o que permite modular o investimento inicial conforme a realidade financeira do usuário. Ainda que apresentem menor vida útil e eficiência, essas baterias podem representar uma solução viável para famílias que desejam autonomia energética parcial ou escalonada.

Além disso, deve-se considerar as perdas associadas ao armazenamento. A eficiência do ciclo carga/descarga varia de 70% a 90%, conforme a tecnologia e o sistema de gerenciamento adotado (SILVA; BORTONI, 2016). Essa eficiência impacta diretamente a energia efetivamente aproveitada pelo sistema, sendo um fator determinante no dimensionamento do arranjo fotovoltaico em sistemas isolados.

2.7 CARGAS CRÍTICAS E O USO DE CHUVEIROS ELÉTRICOS EM SISTEMAS OFF-GRID

Em sistemas fotovoltaicos off-grid (isolados da rede), a energia gerada pelos módulos deve ser consumida ou armazenada em baterias, sem a possibilidade de injeção ou compensação com a rede elétrica. Por essa razão, é comum a classificação das cargas em categorias: cargas essenciais (críticas), que precisam ser mantidas mesmo em contingências, e cargas secundárias, que podem ser desligadas ou substituídas por fontes alternativas. Cargas críticas, nesse contexto, são aquelas cujo funcionamento é prioritário (como iluminação, geladeira ou bomba de água) e que não podem sofrer interrupções, exigindo especial atenção no dimensionamento do sistema quanto à autonomia e à profundidade de descarga das baterias.

O chuveiro elétrico, embora bastante comum em residências brasileiras, é considerado uma carga crítica no sentido de que seu uso impõe alto estresse ao sistema: trata-se de um dos equipamentos de maior consumo instantâneo de potência, com modelos variando entre 4.800 W a 7.800 W. Essa elevada demanda implica correntes acima de 35 A em redes de 220 V e até 43 A em redes de 127 V, valores significativamente superiores aos exigidos por equipamentos convencionais, como lâmpadas ou televisores. Além da corrente elevada, o uso do chuveiro pode ultrapassar a potência suportada pelo inversor e causar sobrecarga imediata no sistema, desligando-o por proteção.

O maior impacto, porém, recai sobre o banco de baterias. Em um sistema típico de 48 V, um chuveiro de 7.800 W demandaria aproximadamente 163 A, levando a uma descarga extremamente rápida da capacidade útil do banco. Em termos energéticos, um banho de 10 minutos representa um consumo aproximado de 1,3 kWh. Em um banco de baterias de 48 V e 200 Ah, com profundidade de descarga recomendada de até 50%, isso já corresponderia a mais de 25% da energia utilizável em um único uso. Três banhos diários em uma família poderiam consumir até 3,9 kWh/dia, esgotando a reserva de forma crítica. Além disso, a descarga profunda recorrente reduz drasticamente a vida útil das baterias, especialmente em tecnologias como chumbo-ácido, e pode inviabilizar o fornecimento de energia para outras cargas durante dias com baixa irradiação solar.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para o dimensionamento e a comparação entre os sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid em uma propriedade rural situada em Três Lagoas – MS. A análise se baseia em dados reais de geração de energia e considera um consumo médio mensal de 950 kWh. Os cálculos foram realizados com apoio do software Solar Z, amplamente utilizado para simulação de sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais no Brasil.

3.1 JUSTIFICATIVA DO USO DO SOFTWARE SOLAR Z

O Solar Z foi escolhido como ferramenta de simulação por sua ampla aceitação no setor técnico-comercial brasileiro, por ser gratuito, acessível e por permitir configurações específicas de localidade, inclinação dos módulos, perdas por temperatura, sombreamento, tipo de inversor, eficiência do sistema, entre outros. Ele utiliza como base os dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE/CRESESB) e possibilita estimativas confiáveis de geração mensal e anual conforme a irradiação da região.

Além disso, o Solar Z possui recursos para calcular o retorno financeiro de sistemas solares conectados à rede (on-grid), e permite ajustes manuais nos parâmetros para simulações off-grid, mesmo que de forma indireta. A interface permite visualização de curvas de geração, comparação de tecnologias e análise de desempenho com base na localização geográfica e nos dados de consumo fornecidos.

3.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Para garantir a consistência na comparação entre os dois sistemas, os seguintes parâmetros foram padronizados nas simulações:

- Local de instalação: Três Lagoas – MS (Latitude: 20,10° S / Longitude: 52,44° O)
- Irradiação média considerada: 5,11 kWh/m²/dia (plano horizontal – valor conservador)

Figura 8 – Irradiação Latitude: 20,10° S / Longitude: 52,44° O.

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Três Lagoas

Município: Três Lagoas, MS - BRASIL

Latitude: 20,101° S

Longitude: 52,449° O

Distância do ponto de ref. (20,126611° S; 52,463139° O) : 3,2 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]												Média
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
✓	Plano Horizontal	0° N	5,74	5,89	5,45	4,83	4,16	3,87	4,09	4,90	5,00	5,44	5,85	6,15	5,11
✓	Ângulo igual a latitude	20° N	5,24	5,63	5,57	5,37	5,00	4,85	5,04	5,66	5,26	5,31	5,39	5,52	5,32
✓	Maior média anual	19° N	5,27	5,65	5,57	5,36	4,97	4,81	5,00	5,64	5,26	5,33	5,43	5,56	5,32
✓	Maior mínimo mensal	25° N	5,05	5,49	5,52	5,43	5,14	5,02	5,20	5,77	5,25	5,21	5,21	5,29	5,30

Fonte: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>

Legenda: Gráfico ou mapa com a distribuição de irradiação solar média anual incidente na localização da residência analisada (Três Lagoas–MS), com base em dados climáticos históricos.

- Potência total instalada: 8,325 kWp (15 módulos de 555 Wp)
- Consumo médio mensal: 950 kWh
- Inclinação dos módulos: 0° (horizonte)
- Perdas do sistema: 24% (coeficiente PR = 0,76)
- Vida útil do sistema: 25 anos

No caso do sistema on-grid, foi considerada a tarifa de energia convencional da concessionária local, e as projeções de taxaço progressiva da Lei 14.300 foram aplicadas conforme cronograma até 2029. Para o sistema off-grid, considerou-se autonomia energética de 2 dias, sem conexão à rede, e inclusão de banco de baterias e controlador de carga no dimensionamento, com exclusão de cargas críticas como o chuveiro elétrico, por conta de ser uma carga crítica substituído por aquecimento solar de água.

3.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede, foram considerados os dados de irradiação solar da cidade de Três Lagoas – MS, conforme divulgado por bases reconhecidas como o CRESESB. Nesta localidade, a média de irradiação solar diária no plano horizontal é de aproximadamente 5,11 kWh/m².dia. Com o objetivo de adotar uma abordagem conservadora, foi considerada a instalação dos módulos em plano horizontal, com inclinação de 0°, representando o pior caso em termos de captação solar.

O sistema projetado é composto por 15 módulos fotovoltaicos com potência unitária de 555 Wp, totalizando 8,325 kWp de potência instalada. A seleção dessa quantidade de módulos tem como finalidade atender à demanda mensal média da propriedade, estimada em 950 kWh, com leve margem para eventuais variações sazonais ou perdas. A escolha por módulos de maior

potência permite uma redução na quantidade total de painéis e, conseqüentemente, simplifica a instalação e reduz o espaço necessário.

Para estimativa da produção energética, adotou-se um fator de desempenho (Performance Ratio – PR) igual a 0,76, que já contempla perdas por temperatura, sujeira, sombreamento parcial, perdas em cabos, inversores e demais fatores do sistema. O inversor considerado no dimensionamento é de tipo on-grid, com eficiência comercial típica em torno de 96%.

- **Geração diária estimada (E_{dia}):**

$$E_{dia} = P_{pico} \times HPS \times PR \quad (1)$$

em que:

P_{pico} : Potência de pico do sistema (kWp).

HPS : Horas de Sol Pleno (radiação solar média em kWh/m²/dia).

PR : Performance Ratio (Fator de Perdas do Sistema, geralmente entre 0,7 e 0,85, considerando perdas por temperatura, sombreamento, sujeira, e etc. (Usaremos 0,76).

- **Geração mensal estimada (E_{mes}):**

$$E_{mes} = E_{dia} \times 30 \quad (2)$$

- **Geração anual estimada (E_{ano}):**

$$E_{ano} = E_{dia} \times 365 \quad (3)$$

- **Custo total do sistema (CTS):**

$$CTS = C_{equipamentos} + C_{instalação} + C_{homologação} \quad (4)$$

- **Economia anual (on-grid) (EA_{on}):**

$$EA_{on} = E_{gerada} \times (C_{kWh} - T_{taxa}) \quad (5)$$

em que:

E_{gerada} : Energia gerada e injetada na rede.

C_{kWh} : Custo do kWh da concessionária.

T_{taxa} : Taxa de disponibilidade/min (Tarifa Fio B + Taxa de disponibilidade, ou tarifas progressivas no caso da legislação 14.300)

- **Economia anual (off-grid) (EA_{off}):**

$$EA_{off} = E_{consumida} \times C_{kWh_evitado} \quad (7)$$

em que:

$E_{consumida}$: Energia consumida do próprio sistema off-grid.

$C_{kWh_evitado}$: Custo do kWh que seria pago à concessionária se não houvesse sistema.

- **Payback simples (PBS):**

$$PBS = \frac{\text{Custo Inicial}}{\text{Economia Anual Líquida}} \quad (8)$$

3.4 DIMENSIONAMENTO FOTOVOLTAICO OFF-GRID

Para avaliar a viabilidade da alternativa isolada (off-grid), considerou-se o mesmo arranjo fotovoltaico de 15 módulos de 555 Wp (totalizando 8,325 kWp), acrescido de um banco de baterias com autonomia de dois dias, além dos componentes essenciais como controlador de carga, inversor e um sistema de aquecimento solar de água. A seguir são apresentados os resultados estimados de custo e desempenho do sistema off-grid em dois cenários: com baterias de chumbo-ácido e com baterias de lítio.

Com um consumo médio diário de $950 \text{ kWh/mês} \div 30,42 \approx 31,2 \text{ kWh/dia}$, a autonomia de 2 dias exige o fornecimento de 62,4 kWh úteis. Considerando perdas típicas de eficiência no ciclo de carga e descarga (70% a 90%), a capacidade bruta deve ser ajustada conforme a tecnologia da bateria utilizada. Também se considerou uma profundidade de descarga (DoD) de 50% para baterias de chumbo-ácido e de 90% para baterias de lítio.

1. Baterias Estacionárias Chumbo-Ácido – 12V / 70Ah a 150Ah:

- Possuem faixa de preço por unidade (Mercado Livre / Amazon):
 - 12V / 70Ah $\rightarrow$ R\$ 430,00 a R\$ 550,00
 - 12V / 150Ah $\rightarrow$ R\$ 880,00 a R\$ 1.100,00

Para um banco de baterias com aproximadamente 62,5 kWh de capacidade útil (considerando profundidade de descarga de 50%), seriam necessárias cerca de 24 a 30 unidades de 12V / 150Ah, dispostas em série-paralelo.

Custo total estimado realista: R\$ 25.000 a R\$ 35.000

2. Baterias de Lítio – 48V / 100Ah (LiFePO₄):

- Possui faixa de preço por unidade (Amazon / portais especializados):
 - 48V / 100Ah $\rightarrow$ R\$ 4.900,00 a R\$ 6.000,00

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta a análise comparativa entre os sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid com base em dados reais da propriedade em estudo, situada em Três Lagoas/MS. Foram utilizados dados de geração do cliente coletados entre 2023 e 2025, os quais serviram como base de validação para as estimativas realizadas por meio do software Solar Z. Além disso, avaliou-se o impacto da taxação progressiva estabelecida pela Lei nº 14.300/2022 sobre a compensação de energia elétrica e os custos mensais e acumulados da unidade consumidora ao longo de sete anos.

Com base nas simulações e dados reais fornecidos pelo cliente, foram obtidos os seguintes resultados em termos de consumo, geração, custos de energia e impacto financeiro da taxação aplicada pela Lei 14.300.

4.1 GERAÇÃO REAL MEDIDA (2023–2024)

A Tabela 1 apresenta os dados reais de geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico da propriedade analisada, com base nos registros do inversor entre janeiro de 2023 e dezembro de 2024. Em razão da localização rural da residência, alguns meses não possuem registros devido a quedas de internet, o que comprometeu a comunicação com o sistema de monitoramento remoto. Ainda assim, os dados disponíveis refletem o padrão sazonal esperado, validando a estimativa de geração média mensal em torno de 950–980 kWh.

Tabela 1 – Geração real mensal do cliente (2023–2024).

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2023	1023	998	1056	1001	947	920	1005	1033	-	970	1012	-
2024	995	-	1060	1011	978	-	1035	1009	985	-	999	1004

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 CONTA DE ENERGIA CONVENCIONAL (SEM SISTEMA FOTOVOLTAICO)

Antes da instalação do sistema, o consumo médio mensal da unidade era de 950 kWh, com uma conta mensal estimada em R\$ 877,98. Essa fatura reflete o pagamento integral das tarifas TE e TUSD, além de tributos e encargos, conforme detalhado a seguir.

Tabela 2 – Conta de energia mensal antes da instalação do sistema fotovoltaico.

Descrição	Qtd.	Tarifa de	Valor	Base Calc.	ICMS	Valor	Valor Total
	Registrada	Fornec.	Fornec.	Imposto		ICMS	
TE	950,00	0,26649	R\$ 253,17	R\$ 326,16	18%	R\$ 58,71	R\$ 311,87
TUSD	950,00	0,42645	R\$ 405,13	R\$ 521,93	18%	R\$ 93,95	R\$ 499,07
COFINS	-	-	-	R\$ 693,45	4,39%	-	R\$ 30,44
PIS	-	-	-	R\$ 693,45	0,95%	-	R\$ 6,59
Iluminação Pública	-	-	-	-	-	-	R\$ 30,00
Total							R\$ 877,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além das cobranças relacionadas à TUSD fio B previstas pela Lei nº 14.300/2022, é importante destacar um aspecto fiscal específico que impacta diretamente a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos no estado de Mato Grosso do Sul. Na região, o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) incidente sobre a componente TUSD não é ressarcido ao consumidor, mesmo quando a energia gerada pelo sistema fotovoltaico excede o consumo e é injetada na rede. Isso significa que, mesmo compensando integralmente seu consumo com a energia produzida, o consumidor ainda arca com a tributação sobre a parcela de uso da rede elétrica. Tal característica do regime tributário estadual compromete parte dos benefícios financeiros da geração distribuída, reduzindo a economia líquida mensal do sistema on-grid em comparação com estados que isentam ou devolvem esse valor. Portanto, ao analisar a viabilidade de um sistema fotovoltaico conectado à rede, é fundamental considerar o impacto da política tributária estadual, especialmente no que se refere à não compensação do ICMS sobre a TUSD, pois tal fator representa um custo fixo não recuperável ao longo da vida útil do sistema.

4.3 SIMULTANEIDADE E PERFIL DE CONSUMO

A simultaneidade energética, definida como a fração da energia consumida no mesmo momento em que é gerada, influencia diretamente o grau de compensação e a incidência da TUSD fio B. Para o cliente estudado, foi observada uma simultaneidade de 38%, indicando que cerca de 361 kWh mensais são consumidos instantaneamente durante o dia, enquanto os 589 kWh restantes precisam ser compensados na rede elétrica convencional.

Esse fator é extremamente relevante para sistemas conectados à rede (on-grid), pois quanto maior a simultaneidade, menor o volume de energia injetada e posteriormente compensada — reduzindo proporcionalmente o valor da TUSD fio B incidente. Por outro lado,

sistemas isolados (off-grid) não possuem esse benefício. Toda a energia gerada deve ser instantaneamente consumida ou armazenada em baterias, o que exige maior capacidade de armazenamento e encarece significativamente o projeto. Isso mostra que, além de econômicos, os sistemas on-grid bem dimensionados oferecem vantagens operacionais relevantes em locais com rede elétrica disponível.

Tabela 3 – Índice de simultaneidade do sistema.

Período	Consumo (kWh)	Percentual do Consumo
Diurno	361,00	38%
Noturno	589,00	62%
Total	950,00	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 IMPACTO DA LEI Nº 14.300/2022

Após a instalação do sistema on-grid, o cliente passou a ser enquadrado nas regras de transição da Lei nº 14.300. A norma determina a cobrança gradual da TUSD fio B sobre a energia injetada, o que implica um custo mensal mesmo para unidades que produzem energia suficiente para suprir seu consumo. A seguir, apresenta-se o custo mensal e anual estimado para cada ano entre 2023 e 2029, conforme mostrado ano a ano pelas tabelas de 4 a 10.

Tabela 4 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2023.

Descrição	Tarifa Fornec.	Valor Fornec.	Calc. Impd. (R\$)	ICMS	Valor ICMS (R\$)	Valor Total (R\$)
CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (15%)	0,02934	17,283027	22,27	18%	4,01	21,29
COFINS	-	-	17,28	4,39%	-	0,76
PIS	-	-	17,28	0,95%	-	0,16
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						110,46

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2024.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (30%)	0,05869	34,566054	44,53	18%	8,02	42,58
COFINS	-	-	34,57	4,39%	-	1,52
PIS	-	-	34,57	0,95%	-	0,33
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						132,67

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2025.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (45%)	0,08803	51,849081	66,80	18%	12,02	42,58
COFINS	-	-	51,85	4,39%	-	2,28
PIS	-	-	51,85	0,95%	-	0,49
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						154,89

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2026.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (60%)	0,11737	69,132108	89,06	18%	16,03	85,16
COFINS	-	-	69,13	4,39%	-	3,03
PIS	-	-	69,13	0,95%	-	0,66
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						177,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2027.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (75%)	0,14672	86,415135	111,33	18%	20,04	85,16
COFINS	-	-	86,42	4,39%	-	3,79
PIS	-	-	86,42	0,95%	-	0,82
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						199,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2028.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (90%)	0,17606	103,698162	133,60	18%	24,05	127,75
COFINS	-	-	103,70	4,39%	-	4,55
PIS	-	-	103,70	0,95%	-	0,99
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						221,53

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Perfil de consumo considerando 589,00 kW de consumo – Ano 2029.

CONSUMO TE	0,26469	156,96261	202,22	18%	36,40	193,36
CONSUMO TUSD	0,42645	251,17905	323,20	18%	58,18	309,43
ENERGIA INJETADA TE	0,26469	-156,96261	-202,22	18%	- 36,40	- 193,36
ENERGIA INJETADA TUSD	0,42645	-251,17905	- 323,20	0%	0,00	- 251,18
CONSUMO TUSD FIO (100%)	0,19562	115,22018	148,44	18%	26,72	141,94
COFINS	-	-	115,22	4,39%	-	5,06
PIS	-	-	115,22	0,95%	-	1,09
ILUM. PÚBLICA	-	-	-	-	-	30,00
TOTAL						236,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 11 tantos os valores mensais quanto anuais pagos em taxas previstas pela lei 14.300.

Tabela 11 – Valores mensais e anuais pagos em taxas pela Lei 14.300 entre 2023 e 2029.

Ano	Valor mensal (R\$)	Valor anual (R\$)
2023	R\$ 110,46	R\$ 1.325,52
2024	R\$ 132,67	R\$ 1.592,04
2025	R\$ 154,89	R\$ 1.858,68
2026	R\$ 177,10	R\$ 2.125,20
2027	R\$ 199,32	R\$ 2.391,84
2028	R\$ 221,53	R\$ 2.658,36
2029	R\$ 236,34	R\$ 2.836,08
Total (7 anos)		R\$ 14.787,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 ESTIMATIVA DE CUSTO DO SISTEMA ON-GRID

Após a verificação do potencial de geração mensal do sistema fotovoltaico proposto, torna-se necessário avaliar sua viabilidade econômica considerando os custos típicos de implantação de um sistema on-grid em ambiente rural. A estimativa de custos contempla os principais componentes físicos (módulos, estrutura de fixação e inversor), bem como os custos indiretos associados a serviços de instalação, elaboração de projetos, homologação junto à concessionária e margem técnica/comercial da empresa integradora.

Este tipo de sistema, por não exigir o uso de baterias, apresenta custo inicial consideravelmente mais baixo quando comparado à alternativa off-grid. O modelo de precificação adotado baseia-se em práticas correntes do setor fotovoltaico brasileiro, com distribuição proporcional entre materiais e serviços. A seguir, é apresentado o cálculo energético consolidado, seguido da decomposição orçamentária do sistema fotovoltaico conectado à rede, estimado para atender integralmente ao consumo mensal médio da propriedade analisada.

Substituindo os valores adotados na fórmula (1):

- Verificação da Geração do Sistema Proposto (8,325 kWp):

$$P_{pico} = 8,325 \text{ kWp}$$

$$HPS = 5,11 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$$

$$PR = 0,76$$

$$E_{dia} = 8,325 \text{ kWp} \times 5,11 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} \times 0,76 \cong 32,33 \text{ kWh/dia} \quad (9)$$

$$E_{mes} = 32,33 \text{ kWh/dia} \times 30 \text{ dias/mês} \cong 970 \text{ kWh/mês} \quad (10)$$

$$E_{ano} = 32,33 \text{ kWh/dia} \times 365 \text{ dias/ano} \cong 11.640 \text{ kWh/ano} \quad (11)$$

Neste caso, a potência de 8,325 kWp é adequada para a demanda de 950 kWh/mês, gerando um pequeno excedente que pode ser interessante.

Para meses com 31 dias, esse valor aumenta proporcionalmente, atingindo cerca de 1.002 kWh/mês. Dessa forma, o sistema projetado é capaz de suprir integralmente o consumo mensal da residência, com pequena folga que contribui para compensar eventuais oscilações de consumo ou perdas adicionais. Esse excedente também pode gerar créditos de energia conforme as normas de compensação vigentes, reforçando a viabilidade da solução on-grid.

Assim, conclui-se que o arranjo fotovoltaico proposto, mesmo sob condições conservadoras de irradiação e inclinação, apresenta capacidade adequada para atender de forma eficiente à demanda energética mensal da propriedade rural estudada.

No sistema conectado à rede elétrica (on-grid), a energia gerada pelos painéis é consumida pela carga local e eventual excedente é injetado na rede pública, gerando créditos ao consumidor. Por não requerer baterias, esse sistema apresenta menor custo inicial. Adotou-se um custo total de R\$ 22.232,09 para o sistema on-grid, distribuído conforme modelo de precificação padrão: 70% do valor para materiais e 30% para serviços, encargos e margem integradora. Dentro dos materiais, estimou-se 70% em módulos fotovoltaicos (R\$ 10.893,72), 20% no inversor WEG SIW200G M060 W1 (R\$ 3.112,49) e 10% na estrutura de fixação (R\$ 1.556,25). O remanescente (30%, R\$ 6.669,63) refere-se a serviços de instalação, projetos e custos administrativos. A Tabela 12 detalha esses custos.

Tabela 12 – Detalhamento dos custos do sistema on-grid.

Item	Qtde.	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Módulos fotovoltaicos (15x 555 Wp)	15	726,25	10.893,72
Inversor fotovoltaico WEG SIW200G M060 W1 (6 kW)	1	3.112,49	3.112,49
Estrutura de fixação (para 15 módulos)	1	1.556,25	1.556,25
Subtotal (materiais) (70%)	—	—	15.562,46
Serviços, encargos e margem (30%)	—	—	6.669,63
Total Geral do Sistema	—	—	22.232,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 ESTIMATIVA DE CUSTO DO SISTEMA OFF-GRID

Para um banco com aproximadamente 62,4 kWh de capacidade útil (com profundidade de descarga de 90%), são necessárias 14 unidades de 48V / 100Ah, com custo total estimado realista de R\$ 68.000 a R\$ 78.000.

A Tabela 13 ilustra o comparativo entre as baterias de chumbo-ácido e baterias de lítio que podem ser utilizadas no sistema off-grid.

Tabela 13 – Comparativo entre baterias de chumbo-ácido e baterias de lítio.

Tipo de bateria	Capacidade útil estimada	DoD (%)	Ciclos de vida	Vida útil (anos)	Custo total estimado (R\$)
Chumbo-ácido (banco modular de 12V/70Ah a 150Ah)	até 62,5 kWh	50	1.000–2.000	3–6	35.000–55.000
Lítio (14x 48V/100Ah)	62,4 kWh	90	5.000–6.000	10–15	75.000–85.000

Fonte: Elaborado pelo autor.com base em pesquisa de mercado (WEG, Portal Solar, Loja Solar, PHB, Voltbras, 2025).

Esses valores demonstram que, embora as baterias de lítio tenham custo unitário mais elevado, seu maior número de ciclos e menor necessidade de manutenção pode torná-las mais vantajosas em longo prazo. A escolha ideal dependerá do perfil de uso, horizonte de retorno do investimento e da criticidade da carga alimentada.

A Tabela 14 apresenta a estimativa de custo total do sistema off-grid considerando as principais tecnologias atualmente disponíveis no mercado.

Tabela 14 – Estimativa de custo total do sistema off-grid.

Item	Faixa de custo estimado (R\$)
Módulos fotovoltaicos (15x 555 Wp)	10.893,72
Estrutura de fixação e cabos	1.556,25
Controladores de carga (2 unidades MPPT 60 A, 48 V)	1.800 – R\$ 9.600
Inversor off-grid/híbrido (3–5 kW, 48 V)	5.000 – R\$ 10.000
Aquecedor solar de água com reservatório térmico	5.000 – R\$ 7.000
Banco de baterias (chumbo-ácido – 24 a 30 unid. de 12V/150Ah)	R\$ 25.000 – R\$ 35.000
Banco de baterias (lítio – 14x 48V/100Ah)	R\$ 68.000 – R\$ 78.000
Total com baterias de chumbo-ácido	R\$ 54.000 – R\$ 81.600
Total com baterias de lítio	R\$ 97.200 – R\$ 115.000

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 COMPARATIVO ECONÔMICO ENTRE ENERGIA CONVENCIONAL E SOLAR ON-GRID

A Tabela 15 apresenta um comparativo entre o custo acumulado com energia elétrica convencional (sem sistema solar) e o custo do sistema fotovoltaico on-grid acrescido das taxas resultantes da Lei 14.300. Observa-se uma economia significativa nos primeiros anos, superior a 85%, que se reduz gradualmente conforme o aumento da TUSD fio B. Ainda assim, ao final do período avaliado, a economia acumulada ultrapassa R\$ 58 mil, correspondendo a uma redução de aproximadamente 80% nos gastos com energia.

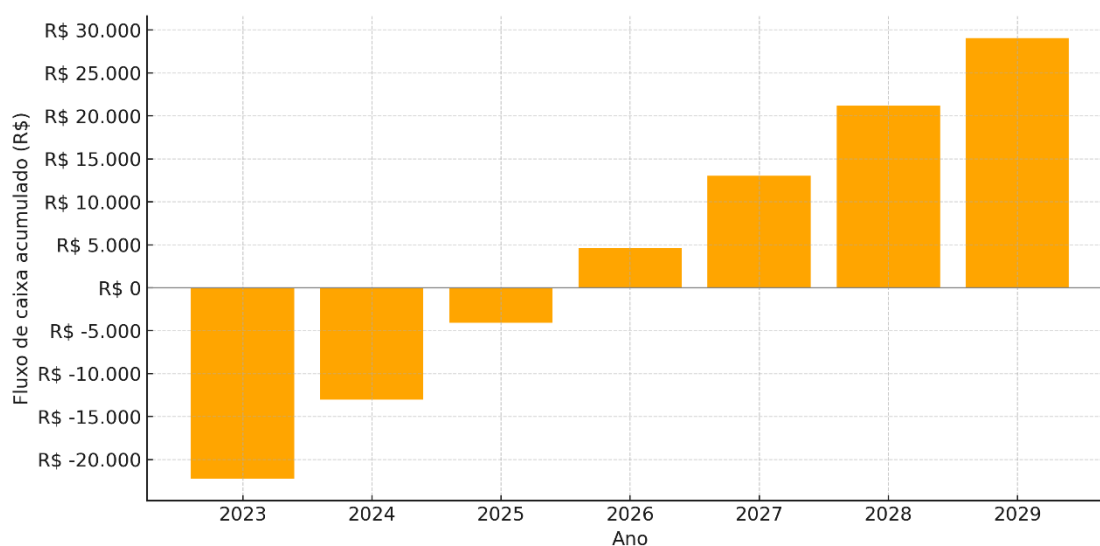
Tabela 15 – Comparativo de custos entre energia convencional e sistema fotovoltaico ligado à rede.

Ano	Custo com energia convencional (R\$)	Custo com sistema fotovoltaico + taxas (R\$)	Economia (R\$)	Economia (%)
2023	R\$ 10.535,76	R\$ 1.325,52	R\$ 9.210,24	87,4%
2024	R\$ 10.535,76	R\$ 1.592,04	R\$ 8.943,72	84,9%
2025	R\$ 10.535,76	R\$ 1.858,68	R\$ 8.677,08	82,4%
2026	R\$ 10.535,76	R\$ 2.125,20	R\$ 8.410,56	79,8%
2027	R\$ 10.535,76	R\$ 2.391,84	R\$ 8.143,92	77,3%
2028	R\$ 10.535,76	R\$ 2.658,36	R\$ 7.877,40	74,8%
2029	R\$ 10.535,76	R\$ 2.836,08	R\$ 7.699,68	73,1%
Total	R\$ 73.750,32	R\$ 14.787,72	R\$ 58.962,60	79,9%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 apresenta o fluxo de caixa acumulado do sistema fotovoltaico conectado à rede ao longo de sete anos. Considerando um investimento inicial de R\$ 22.232,09 e uma economia média anual progressivamente reduzida (devido à taxa da Lei 14.300), observa-se que o sistema atinge o ponto de equilíbrio (payback) aproximadamente no terceiro ano. A partir desse marco, o saldo acumulado torna-se positivo, alcançando R\$ 36.730,51 ao final do período analisado.

Figura 9 – Fluxo de caixa da geração fotovoltaica On-Grid em 7 anos.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.8 ECONOMIA ANUAL (OFF-GRID):

A economia anual do sistema off-grid é o custo da energia que não é paga à concessionária, portanto a economia anual inicial: $11.640 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,85/\text{kWh} = \text{R\$ } 9.894,00$.

- **Cálculo da Taxa de Retorno (TIR) e Payback.**

Payback Simples (Estimativa Inicial, sem considerar custos de substituição e inflação):

$$PBS = \frac{\text{R\$ } 54.000}{\text{R\$ } 9.894,00 \text{ (economia anual inicial)}} \cong 5,5 \text{ anos}$$

O cálculo do payback para sistemas off-grid é mais complexo devido aos custos de substituição de baterias. Com a consideração de substituição de baterias e outros componentes, o Payback real pode ser significativamente maior, frequentemente inviabilizando o retorno financeiro em 25 anos, a menos que não haja alternativa de conexão à rede ou que o custo da energia da concessionária seja proibitivo. Para este cenário, para análise do Payback com Manutenção e Substituições deve-se avaliar o fluxo de caixa, conforme mostrado no gráfico da Figura 10.

- **TIR (Estimativa):**

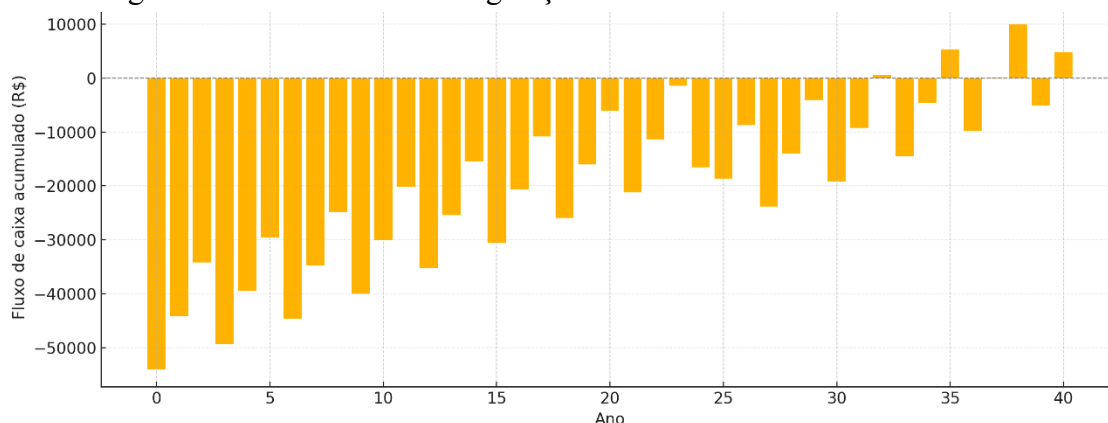
Devido aos altos custos iniciais e de manutenção (principalmente baterias), a TIR para sistemas off-grid puros, para demandas residenciais elevadas, é geralmente baixa ou negativa, tornando-os menos atrativos financeiramente em comparação com o on-grid.

- **Gráfico do fluxo de caixa ao longo dos 40 anos:**

A Figura 10 apresenta o fluxo de caixa acumulado do sistema fotovoltaico off-grid ao longo de 40 anos, considerando um investimento inicial de R\$ 54.000, a substituição do banco de baterias a cada 3 anos pelo valor de R\$ 25.000 e a necessidade de troca do inversor no ano 25, com custo de R\$ 10.000. Observa-se que, mesmo com a economia anual proporcionada pela autossuficiência energética (R\$ 9.894/ano), os custos recorrentes de manutenção – especialmente as substituições das baterias e, pontualmente, do inversor – impõem quedas acentuadas e regulares ao saldo acumulado. O gráfico evidencia que o equilíbrio financeiro é difícil de ser alcançado, pois o fluxo de caixa acumulado se aproxima

do zero em alguns momentos, mas volta a cair com cada nova troca de baterias e, de maneira ainda mais significativa, após a troca do inversor no 25º ano. Esses resultados demonstram o grande impacto dos custos de reposição dos principais componentes em sistemas off-grid, tornando o payback bastante distante e, em muitos casos, inviável ao longo do horizonte de 40 anos.

Figura 10 - Fluxo de caixa da geração fotovoltaica Off-Grid em 40 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.9 COMPARATIVO FINAL: SISTEMA ON-GRID VERSUS SISTEMA OFF-GRID

Como se observa, o sistema off-grid exige um investimento inicial significativamente maior do que o sistema on-grid, principalmente devido ao custo elevado do banco de baterias e da infraestrutura complementar necessária para garantir a autonomia. Além disso, esse tipo de sistema apresenta perdas energéticas associadas ao processo de armazenamento e conversão da energia, o que reduz a eficiência global. Os sistemas off-grid também requerem manutenção periódica dos acumuladores e do sistema de gerenciamento de energia (BMS), além de implicarem maior complexidade de instalação e operação.

Apesar dessas desvantagens, a principal vantagem do sistema off-grid reside na sua autonomia energética total, tornando-se a única opção viável em locais onde a rede elétrica é instável ou inexistente. Como forma de garantir a viabilidade do sistema, recomendou-se o uso de um sistema de aquecimento solar de água no lugar de chuveiros elétricos, reduzindo significativamente a demanda instantânea de energia e aliviando a descarga das baterias. Com base nos resultados obtidos para os dois modelos de sistema fotovoltaico, elaborou-se um comparativo técnico e econômico que evidencia as principais diferenças de investimento, operação e aplicabilidade entre as soluções on-grid e off-grid. A Tabela 16 apresenta esse comparativo consolidado.

Tabela 16 – Comparativo entre sistema on-grid e sistema off-grid.

Critério	Sistema On-Grid	Sistema Off-Grid
Investimento inicial	R\$ 22.232,09	R\$ 54.000 – R\$ 115.000
Custo com taxas (7 anos)	R\$ 14.787,72	R\$ 0,00
Autonomia energética	Não (depende da rede)	Sim (2 dias de autonomia)
Custos de Manutenção Anual	1% do custo inicial (R\$ 528,00/ano inicial)	2% do custo inicial (R\$ 2.152,50/ano inicial)
Substituição de Equipamentos	Inversor (1x em 25 anos)	Inversor/Controlador (1x), Baterias (3-4x)
Vantagens	Menor custo inicial	Independência da rede elétrica
Vantagens	Sem necessidade de banco de baterias	Maior segurança em caso de blecautes
Vantagens	Retorno financeiro mais rápido	Ideal para locais remotos sem acesso à rede
Desvantagens	Dependência da rede elétrica e da concessionária	Custo inicial significativamente mais alto
Desvantagens	Sujeito a tarifas e impostos (fio B)	Necessidade de dimensionamento e manutenção complexa das baterias
Desvantagens	Sem energia em caso de blecaute (sem backup)	Vida útil limitada das baterias (alto custo de reposição)
Desvantagens	Projeto e homologação com a concessionária (burocracia)	Perdas maiores de energia (baterias e inversores)
Payback (Estimativa)	2 a 4 anos	15 a 20+ anos (ou inviável para demanda alta)
TIR (Estimativa)	15% a 25%	Baixa ou Negativa
Geração de 950 kWh/mês	Totalmente atendido, com injeção de excedente	Totalmente atendido se o banco de baterias for dimensionado corretamente, mas o custo é o limitador.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se observa, o sistema on-grid apresenta maior simplicidade de instalação e operação, além de menor custo inicial. Em contrapartida, o sistema off-grid proporciona independência energética e continuidade de fornecimento em regiões com instabilidade elétrica, ao custo de maior investimento e complexidade técnica. O trade-off entre autonomia e economicidade deve ser analisado conforme o perfil da propriedade, a confiabilidade da rede elétrica local e os objetivos do proprietário.

4.10 COMPARAÇÃO PAYBACK DOS SISTEMAS

A análise dos fluxos de economia gerada pelo sistema fotovoltaico on-grid ao longo do período de sete anos (2023–2029), considerando a Tabela 9, demonstra que o investimento inicial de R\$ 22.232,09 é integralmente recuperado em um intervalo aproximado de 2,5 anos. Isso significa que, a partir do terceiro ano de operação, o sistema já passa a gerar retorno líquido ao proprietário, acumulando uma economia de R\$ 58.962,60 em sete anos. Esse rápido retorno financeiro evidencia a alta viabilidade econômica do sistema conectado à rede em contextos com disponibilidade de infraestrutura elétrica. Por outro lado, no cenário off-grid, o conceito de *payback* torna-se praticamente inaplicável, dado o alto custo de implantação (R\$ 54.000 a R\$ 115.000) e as despesas recorrentes com manutenção e substituição do banco de baterias, estimadas em até R\$ 60.000 ao longo de 10 anos. A proposta off-grid não se justifica por critérios puramente econômicos, mas sim por garantir segurança energética total, algo crucial em determinadas aplicações. Em ambientes rurais sem rede estável, a perda de cargas como alimentos perecíveis em *freezers*, vacinas ou até mesmo sêmen bovino de raças premiadas representa prejuízos muito superiores ao custo de manutenção do sistema. Nestes casos, a continuidade do fornecimento elétrico oferecida pelo sistema off-grid é estratégica e inegociável, pois assegura a preservação de ativos sensíveis e evita perdas irreversíveis.

4.11 SÍNTESE DAS LIMITAÇÕES IDENTIFICADAS

- **Técnica:**
 - O sistema on-grid depende de conexão com a rede elétrica, desativando-se em caso de apagões (modo anti-ilhamento);
 - O sistema off-grid exige sobredimensionamento para garantir autonomia e enfrenta perdas de eficiência nos ciclos de carga e descarga de baterias.
- **Operacionais:**
 - O sistema on-grid opera de forma automática e com baixo envolvimento do usuário;
 - O off-grid exige conhecimento técnico para gerenciar o consumo e o estado das baterias, além de planejamento energético diário.
- **Econômicas:**
 - O on-grid possui menor custo inicial, mas está sujeito à taxa futura;
 - O off-grid requer alto investimento inicial, substituições periódicas e maior manutenção, elevando o custo de ciclo de vida.

4.12 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA ENERGÉTICA E RESILIÊNCIA

A principal vantagem do sistema off-grid é sua total independência da rede elétrica. Essa característica proporciona resiliência energética em locais onde a rede apresenta quedas frequentes, instabilidade ou ausência total de fornecimento. Para propriedades rurais que dependem da energia para irrigação, refrigeração de produtos ou bem-estar familiar, a continuidade no fornecimento pode representar não apenas comodidade, mas a viabilidade da produção e preservação de bens perecíveis. Apesar de mais oneroso, o sistema off-grid se justifica plenamente em cenários onde a confiabilidade da rede é baixa ou inexistente, e a segurança energética torna-se prioridade.

4.13 ANÁLISES PRINCIPAIS PARA 25 ANOS

Ao longo de 25 anos, a principal diferença financeira entre os dois sistemas será a necessidade de substituição das baterias no sistema off-grid. As baterias representam um custo recorrente e elevado que impacta drasticamente o retorno financeiro do sistema off-grid, especialmente para uma demanda tão alta quanto 950 kWh/mês.

O sistema on-grid, mesmo com a taxa progressiva do Fio B, ainda apresenta um custo total muito menor e um payback mais atrativo. A economia gerada pela não-compra de energia da concessionária compensa os custos de manutenção e as substituições de inversor.

O sistema off-grid só se torna financeiramente competitivo em cenários onde a conexão à rede é inviável ou extremamente cara, ou em que a independência energética é a principal prioridade, independentemente do custo. Para uma residência em Três Lagoas-MS, que possui acesso à rede elétrica, o sistema on-grid é a opção financeiramente superior.

Além disso, vale ressaltar as seguintes considerações:

- **Sustentabilidade e Meio Ambiente:** Ambos os sistemas contribuem para a redução da pegada de carbono, mas o on-grid aproveita melhor o excedente de energia gerado, evitando o descarte prematuro de baterias.
- **Segurança Energética:** O sistema off-grid oferece total independência e segurança contra blecautes. No entanto, sistemas on-grid podem ser combinados com sistemas de backup (baterias menores e inversores híbridos) para fornecer energia em caso de quedas de rede, mitigando essa desvantagem.
- **Evolução Tecnológica:** O custo das baterias de lítio está em queda, e sua densidade de energia e vida útil estão aumentando. Isso pode tornar os sistemas off-grid mais viáveis no futuro.

Em resumo, para a demanda de 950 kWh/mês em Três Lagoas-MS, o sistema fotovoltaico on-grid é a escolha mais econômica e com melhor retorno financeiro no período de 25 anos, mesmo considerando a taxaçoão progressiva. O sistema off-grid, embora ofereça independência, é significativamente mais caro devido ao banco de baterias e seus custos de manutenção e substituição.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises desenvolvidas ao longo deste trabalho, conclui-se que o sistema fotovoltaico on-grid instalado na propriedade rural estudada em Três Lagoas/MS apresenta viabilidade técnica e econômica para atender à demanda média mensal de 950 kWh. A geração real monitorada entre 2023 e 2024 confirmou os valores estimados em simulação, validando o dimensionamento do arranjo de 15 módulos de 555 Wp.

A comparação entre os sistemas on-grid e off-grid permitiu responder à problemática central deste trabalho: enquanto o sistema conectado à rede oferece maior simplicidade operacional, menor custo inicial e menor exigência de manutenção, o sistema isolado exige considerável investimento adicional em armazenamento, além de ajustes no consumo (como a eliminação de cargas críticas) e estratégias para garantir a autonomia de até dois dias.

Apesar da taxa progressiva instituída pela Lei 14.300, que implicará em um custo adicional acumulado de aproximadamente R\$ 14.787,72 em sete anos, o sistema on-grid ainda proporcionou uma economia superior a R\$ 58 mil no mesmo período. A simultaneidade de 38% registrada também contribuiu para reduzir o impacto das tarifas compensadas, algo que não ocorre em sistemas off-grid, onde toda a energia deve ser consumida ou armazenada.

Importa destacar, no entanto, que a decisão por um sistema fotovoltaico off-grid não deve ser orientada exclusivamente pela análise econômica. O principal fator motivador para essa configuração é a busca por segurança energética. Em regiões rurais, é comum que a rede elétrica apresente instabilidades frequentes, interrupções prolongadas e baixa qualidade no fornecimento, o que pode comprometer atividades essenciais da propriedade. Nesses contextos, um sistema isolado representa uma alternativa resiliente, pois garante total independência da concessionária e continuidade no fornecimento mesmo em caso de apagões ou falhas prolongadas na rede.

Contudo, essa independência exige adaptações. Sistemas off-grid enfrentam limitações quanto à disponibilidade de energia contínua, especialmente em dias nublados ou períodos prolongados de baixa irradiação. Foi por isso que, neste estudo, adotou-se uma autonomia de dois dias, calculada com base no consumo médio diário de 31,2 kWh e ajustada à profundidade de descarga recomendada para preservar a vida útil das baterias. Embora essa autonomia seja tecnicamente suficiente para a maioria das situações críticas, extensões maiores implicariam em custos ainda mais elevados.

Além disso, o projeto off-grid exige a exclusão ou substituição de cargas críticas com alta demanda instantânea de corrente, como os chuveiros elétricos. Em sua substituição, foi

considerada a utilização de um sistema de aquecimento solar de água, solução mais eficiente e compatível com a lógica do autoconsumo em ambientes off-grid. Conforme pesquisa de mercado realizada em 2025, sistemas completos de aquecimento solar para residências de porte médio têm custo médio de R\$ 5.000, valor que deve ser considerado no orçamento final.

Como resposta ao objetivo geral de analisar a viabilidade econômica de sistemas solares em contextos rurais, pode-se afirmar que o sistema conectado à rede continua sendo a solução mais vantajosa, desde que haja disponibilidade da infraestrutura elétrica. Já o sistema isolado é indicado para locais remotos com ausência de rede ou onde a segurança energética se sobrepõe ao fator econômico.

Como resposta ao objetivo geral de analisar a viabilidade econômica de sistemas solares em contextos rurais, pode-se afirmar que o sistema conectado à rede continua sendo a solução mais vantajosa, desde que haja disponibilidade da infraestrutura elétrica. Já o sistema isolado é indicado para locais remotos com ausência de rede ou onde a segurança energética se sobrepõe ao fator econômico.

Finalmente, este estudo contribui para a compreensão das implicações da regulação atual e reforça a importância de considerar aspectos técnicos, econômicos e regulatórios no planejamento de sistemas de geração distribuída no meio rural.

Além das considerações econômicas, é fundamental destacar que o sistema off-grid oferece vantagens inestimáveis em termos de segurança energética. Em propriedades rurais onde a estabilidade do fornecimento elétrico é crucial, a autonomia proporcionada por esse sistema garante o funcionamento contínuo de equipamentos essenciais. Por exemplo, a preservação de alimentos em freezers, o armazenamento de vacinas em refrigeradores e a conservação de sêmen bovino de raças premiadas são atividades que não podem sofrer interrupções. A perda desses materiais não apenas representa prejuízos financeiros significativos, mas também pode comprometer a saúde pública e a produtividade agropecuária. Portanto, mesmo que o sistema off-grid não apresente um retorno financeiro direto comparável ao on-grid, sua capacidade de assegurar a continuidade operacional em situações críticas justifica plenamente o investimento, especialmente em regiões com fornecimento elétrico instável ou inexistente.

6 REFERÊNCIAS

- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Dados sobre geração distribuída no Brasil. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2022-2026/2022/lei/L14300.htm. Acesso em: 17 maio 2025.
- CANAL SOLAR. Tarifação do fio B previsto na Lei nº 14.300/2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- DASSI, J. A. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Custos – ABC, 2015. Anais do Congresso Brasileiro de Custos – ABC, 2015.
- JUNG, Jackson. Armazenamento de energia em smart grids. 2010. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- KRUGER, S. D.; ZANELLA, C.; BARICHELLO, R. Análise da viabilidade econômico-financeira para implantação de projeto de produção de energia solar fotovoltaica em uma propriedade rural. Revista de Gestão e Secretariado, v. 14, n. 1, p. 428–445, 2023.
- LOJA SOLAR. Pesquisa de preços de baterias e inversores. Disponível em: <https://www.lojasolar.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- MARTINS, Hugo. Estudo de viabilidade econômica e vantagens no uso da energia solar na propriedade rural. 2023. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônoma) — Centro Regional Universitário de Espírito Santo do Pinhal (UNIPINHAL), Espírito Santo do Pinhal, 2023.
- MERCADO LIVRE. Pesquisa de preços de equipamentos fotovoltaicos. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- PHB SOLAR. Pesquisa de preços de equipamentos fotovoltaicos. Disponível em: <https://www.phbsolar.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- PINHO, J.; GALDINO, M. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL–CRESESB, 2014.
- PORTAL SOLAR. Pesquisa de preços de baterias e equipamentos solares. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.

- RIBEIRO, R. P. Estudo de caso: dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial. Araxá – MG, 2016.
- SANTOS, A. L. M.; OLIVEIRA, L. W.; DIAS, B. H.; OLIVEIRA, J. G. Otimização da operação de baterias em sistemas de distribuição de energia elétrica. In: XII Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, 2017. Anais [...].
- SILVA, Y. F. F. C.; BORTONI, E. C. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: características, oportunidades e barreiras. Revista Brasileira de Energia, v. 22, n. 1, p. 17–43, 2016.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, 2012.
- VOLTBRAS. Pesquisa de preços de equipamentos solares. Disponível em: <https://www.voltbras.com.br>. Acesso em: 17 maio 2025.
- WEG. Pesquisa de preços de baterias e equipamentos solares. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 17 maio 2025.