



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS (UFGD)
FACULDADE DE ENGENHARIAS (FAEN)
ENGENHARIA DE ENERGIA

HENRIQUE COLMAN VIEGAS DE ARAUJO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E COMPROVAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 5,67kWp**

DOURADOS - MS

2023

HENRIQUE COLMAN VIEGAS DE ARAUJO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E COMPROVAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 5,67kWp**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia De Energia pela Faculdade De Engenharias da Universidade Federal Da Grande Dourados.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Moreira Júnior

DOURADOS - MS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

A663a Araujo, Henrique Colman Viegas De
ANÁLISE DO DESEMPENHO E COMPROVAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 5,67kWp [recurso eletrônico] / Henrique Colman
Viegas De Araujo. -- 2023.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Orlando Moreira Júnior.

TCC (Graduação em Engenharia de Energia)-Universidade Federal da Grande
Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. CONSUMO. 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. 3. ENERGIA ELÉTRICA. 4. ENERGIA
SOLAR. 5. FOTOLVAICA. I. Moreira Júnior, Orlando . II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



ANEXO G – ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 10h dia 10 de Março de 2023, realizou-se de a defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia intitulado **ANÁLISE DO DESEMPENHO E COMPROVAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 5,67kWp**, de autoria do(s) graduando(s) **HENRIQUE COLMAN VIEGAS DE ARAUJO**, como requisito para a aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso. Após a defesa e posterior arguição, a banca examinadora concluiu que o Trabalho de Conclusão de Curso deve ser:

Aprovado.

Reprovado.



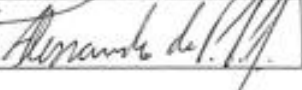
O(s) graduando(s) declara ciência de que a sua aprovação está condicionada à entrega da versão final (encadernada, corrigida e assinada) do Trabalho de Conclusão de Curso, nos termos em que especifica o regulamento da disciplina, em anexo ao Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Energia da UFGD. O orientador se responsabilizará pela verificação e aprovação das correções do manuscrito feitas pelos graduandos para a elaboração da versão final.

OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

GRADUANDO

Nome: HENRIQUE COLMAN VIEGAS DE ARAUJO

BANCA EXAMINADORA

Nome: Orlando Moreira Júnior	Assinatura: 
Nome: Etienne Biasotto	Assinatura: 
Nome: Alessandro da Paixão Pereira Junior	Assinatura: 

HENRIQUE COLMAN VIEGAS DE ARAUJO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO E COMPROVAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA
DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 5,67kWp**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia De Energia pela Faculdade De Engenharias da Universidade Federal Da Grande Dourados.

Orientador: Prof. Dr. Orlando Moreira Júnior

Data de aprovação: 10/03/2023

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Federal da Grande Dourados, pela comissão formada por:

AGRADECIMENTO

Meus maiores agradecimentos, aos meus pilares que me proporcionaram condições de estar concluindo esse ciclo, meu pai Enos Viegas De Araujo e mãe Petrona Beatriz Cardozo Colman Araujo e irmã Leticia Colman Viegas De Araujo, essa conquista é dedicada a eles.

Agradeço aos meus amigos, que estiveram me apoiando e incentivando a nunca desistir deste momento, Caio Matos, Bruna Feuser, Maria Cristina, Danielly de Paula, amigos esses que o curso me apresentou, Gustavo Fernandes, Evandro Vaz, Netto Gouveia, Jéssica Hayane, Isabele De Paula, amigos que a vida me apresentou. Meu mais sincero obrigado pelos momentos vividos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Orlando Moreira Junior, pela dedicação e respeito ao me orientar durante esta etapa tão importante em minha vida. A UFGD, meu maior carinho e sentimentos saudosos. Ao corpo de docentes do curso, obrigado pelo conhecimento transmitido.

Agradeço a mim por chegar até aqui com todo esforço e dedicação que foi possível ter durante minha evolução como acadêmico, pessoa e profissional, foi uma jornada longa cheia de desafios pessoais, mas de alguma forma, cheguei aqui e levarei meus aprendizados em sala e fora de sala até o fim dos meus dias.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	10
2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICROGERAÇÃO DE ENERGIA	15
2.3 ENERGIA SOLAR: CONTEXTUALIZAÇÃO	18
2.4 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR	21
2.5 ENERGIA FOTOVOLTAICA: FUNCIONAMENTO	22
2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO.....	29
3.2 HISTÓRICO DE CONSUMO E VALOR DAS FATURAS.....	32
3.3 ESTIMATIVA E GERAÇÃO REAL DE ENERGIA	33
3.4 COLETA DOS NÍVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA	36
3.5 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	40
4.2 GERAÇÃO DE ENERGIA.....	42
4.3 ECONOMIA DA ENERGIA	46
4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA	51
5 CONCLUSÃO	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ficha técnica da CS3U-360P sob condições de teste padrão.....	30
Tabela 2: Ficha técnica da CS3U-360P sob condições de temperatura nominal.....	31
Tabela 3: Dimensões mecânicas da CS3U-360P.....	31
Tabela 4: Entrada do inversor de corrente MIN 6000TL-X.....	31
Tabela 5: Saída do inversor de corrente MIN 6000TL-X 31.....	32
Tabela 6: Base de dados 2020.....	33
Tabela 7: Consumo de energia e Custo da fatura.....	40
Tabela 8: Geração estimada para 2021.....	43
Tabela 9: Estimativa e geração real de energia (kWh)	44
Tabela 10: Preço em R\$ de energia estimada x energia gerada.....	46
Tabela 11: Relação custo x economia no ano de 2021, em reais.....	49
Tabela 12: Balanço financeiro 2021 (R\$)	50
Tabela 13: Composição tarifa mínima.....	51
Tabela 14: Análise de viabilidade financeira do investimento.....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta de energia elétrica brasileira em 2019 e 2020.....	8
Figura 2: Instalação residencial de um sistema fotovoltaico.....	23
Figura 3: Funcionamento de um sistema fotovoltaico <i>on grid</i>	24
Figura 4: Exemplo de consumo médio e energia gerada pelo sistema.....	26
Figura 5: Inversor instalado junto com o quadro de proteção.....	30
Figura 6: Primeiro arranjo de módulos fotovoltaicos.....	34
Figura 7: Segundo arranjo de módulos fotovoltaicos.....	35
Figura 8: <i>Data logger</i> do inversor <i>Growatt</i> (a) e Interface do monitoramento fotovoltaico (b).....	37
Figura 9: Comparação de consumo de energia antes x após geração própria, em kWh.....	41
Figura 10: Comparação de geração de energia real x estimada.....	45
Figura 11: Diferença financeira entre a economia estimada de geração e a economia de energia gerada, janeiro 2021 a dezembro de 2021, em R\$.....	47
Figura 12: Custo das faturas de energia antes x após geração própria, em R\$.....	48
Figura 13: Valor presente acumulado.....	53

RESUMO

A geração de energia elétrica é objeto de debate em diversas áreas do conhecimento. As denominadas fontes de energia renováveis fazem parte de estudos em busca da identificação de seu potencial, desempenho e viabilidade para o seu uso. Uma das fontes de energia renováveis é a energia solar, que tem demonstrado grande crescimento nos últimos anos. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho energético e viabilidade econômica de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica (*on grid*). Para alcançar tal objetivo, a metodologia de pesquisa selecionada foi a pesquisa quantitativa. Foi realizado estudo de caso, com dados coletados de janeiro de 2020 até dezembro de 2021, que foram utilizados na análise do desempenho energético do sistema de geração de energia fotovoltaica. Em seguida, foi realizado um comparativo de consumo de energia gerada pelo sistema implementado e a energia elétrica anterior a instalação do sistema. Como esperado, os resultados dos dados obtidos pelo sistema fotovoltaico apresentaram desempenho energético satisfatório, bem como, efetiva diminuição nos custos de fatura de energia. Através desse estudo, foi demonstrado a viabilidade e os benefícios da implantação de sistema de energia solar fotovoltaico para geração e consumo de energia elétrica.

Palavras-chave: Consumo. Eficiência energética. Energia elétrica. Energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

Electric power generation is the debate subject in several areas of knowledge. The so-called renewable energy sources are part of studies seeking to identify their potential, performance and viability for their use. One of the renewable energy sources is solar energy, which has shown great growth in recent years. In this sense, the goal of this work was to analyze the energy performance and economic viability of a photovoltaic solar energy generation system (on grid). To achieve this goal, the selected research methodology was quantitative research. A case study was carried out, with data collected from January 2020 to December 2021, which were used in the analysis of the energy performance of the photovoltaic energy generation system. Then, a comparison was made between the energy generated by the system and the electric energy traditionally supplied by the electric power company's network. As expected, the results of the data obtained by the photovoltaic system showed satisfactory energy performance, as well as an effective decrease in energy bill costs. Through this study, it was demonstrated the feasibility and benefits of implementing a photovoltaic solar energy system for the generation and consumption of electricity.

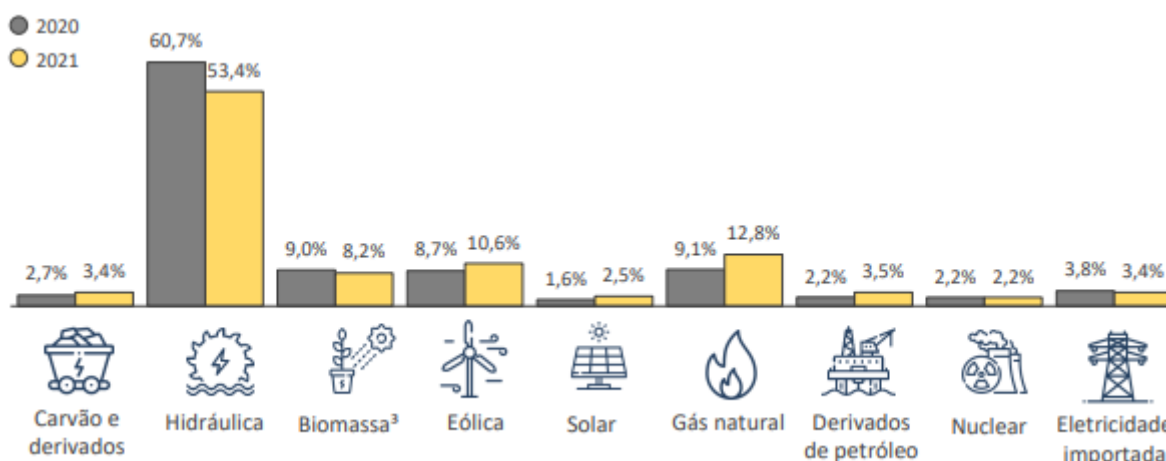
Keywords: Consumption. Energy efficiency. Electricity. Photovoltaic solar energy.

1 INTRODUÇÃO

A energia é utilizada para atender as necessidades mais básicas do ser humano e entre as energias mais utilizadas, está a energia elétrica. O ser humano criou diversas maneiras de transformar a energia e produzir energia elétrica, entre elas, destacam-se por exemplo a energia a partir de termoelétricas, usinas nucleares e hidroelétricas (MME, 2008).

Como mostrado na Figura 1, segundo dados do BEN (Balanço Energético Nacional), em 2021, a principal oferta de energia elétrica brasileira veio da fonte hidráulica (53,4%), seguida do gás natural (12,8%) e da eólica (10,6%).

Figura 1: Oferta da matriz elétrica brasileira em 2019 e 2020.



Fonte: (BEN, 2022)

Todos os principais recursos energéticos disponíveis para geração de energia elétrica apresentam limitações e problemas ligados ao seu uso. A energia hidroelétrica por exemplo, é fortemente dependente dos níveis dos reservatórios. Os rios brasileiros sofrem muitas variações em relação a vazão média anual, e quando o nível de chuvas está baixo, há queda na produção hídrica.

As barragens das centrais hidrelétricas também provocam danos ao ecossistema local, como obstrução à passagem de nutrientes, perda de terras férteis,

de reservas minerais e modificações nas paisagens e atividades socioeconômicas das populações (MME, 2008).

Além da geração a partir do gás natural causar emissões nocivas ao meio ambiente, o custo da energia termoelétrica é maior que o da hidroelétrica, valor esse que geralmente é repassado aos consumidores por meio das bandeiras tarifárias (ANEEL, S/D).

Existe também a preocupação com o suprimento e abastecimento de energia de forma geral, ligado à disponibilidade de combustível e fontes energéticas. Devido a esses e outros problemas, é necessária uma diversificação das fontes energéticas brasileiras, priorizando as energias renováveis. Em função da sua natureza, as formas de energia renováveis, além de fornecer energia elétrica, proporcionam a redução de emissão de gases de efeito estufa e possuem baixos impactos ambientais na localidade a qual é instalada.

O Sol, astro localizado a cerca de 150 milhões de quilômetros da terra, é a principal e mais importante fonte de energia do planeta terra. A energia solar está relacionada com diversos processos químicos, físicos e biológicos associados a todas as formas de vida na terra. Além disso, a radiação emitida pelo sol afeta diversos componentes na atmosfera e o clima terrestre (GOMÉZ *e. al.*, 2018).

Em meados dos anos 70 o mundo se encontrava em meio à crise do petróleo, esse marco na história fez com que eclodissem pesquisas com objetivos de encontrar fontes inesgotáveis, ou renováveis, para abastecimento de energia para população, outro fator que contribuiu consideravelmente para essas buscas é a preocupação com a preservação do meio ambiente, de modo a reduzir os desastres ambientais que tem crescido quando comparados aos últimos anos (GALDINO; LIMA, 2002).

Novas fontes de energias alternativas têm sido amplamente investigadas nas últimas décadas, como solução complementar a matriz energética atual, que baseia majoritariamente em hidráulica e biomassa. Estudos mais recentes apontam que a energia solar é uma energia que começou a ser utilizada em 1950 tem ganhado espaço e atenção no cenário nacional. A conversão de energia solar em energia elétrica a partir do princípio do elemento fotovoltaico é uma das formas mais promissoras de energia alternativa, sabe-se que módulos fotovoltaicos podem ser os grandes responsáveis pelo aumento da produção de energia limpa em grandes

centros, seja para demandas residenciais ou empresariais, ganham cada vez mais adeptos. Muitos autores acreditam que adotar geração própria de energia solar é uma decisão acertada e que garante eficiência à produção e redução de custos em médio e longo prazo (ZANESCO et al., 2011).

A geração própria de energia solar é um forte ato de sustentabilidade e amadurecimento com forte capacidade de fortalecimento do mercado, sendo promissores pelos seguintes motivos: A incidência solar sobre a Terra é mais que suficiente para a geração de energia necessária; é uma energia silenciosa; não gera poluição atmosférica, entre outros pontos.

Os maiores desafios para a popularização de tecnologias de fontes renováveis de energia estão associados ao desenvolvimento de materiais mais eficazes para a conversão de energia solar em elétrica e a disseminação de novas tecnologias sobre essas fontes. O maior obstáculo para a conversão de energia solar em energia elétrica através de módulos fotovoltaicos é o custo elevado da produção dos módulos e equipamentos, ainda que apresentem a vantagem de não precisarem de manutenção constante, o seu investimento inicial é elevado (ZANESCO et al., 2011).

Como é comum com tecnologias, a cada ano existem inovações que trazem maior efetividade e também propiciam um maior acesso dos consumidores. Hoje, é possível que qualquer consumidor conectado a rede elétrica pode instalar um sistema fotovoltaico e existem várias opções de financiamento e linhas de créditos que cobrem 100% do projeto e atendem instalações em qualquer tipo de imóvel.

A geração distribuída, que é quando o consumidor gera a própria energia, foi regulamentada em 2012 por meio da Resolução Normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e hoje o Brasil tem mais de 1,2 milhão de sistemas solares fotovoltaicos conectados. Os financiamentos são vantajosos devido a longa vida útil da tecnologia, de no mínimo 25 anos. Dessa forma, mesmo após a quitação da dívida, o consumidor pode continuar economizando por mais de uma década (PORTALSOLAR, 2022d).

1.1 OBJETIVOS

A pergunta de pesquisa que direcionou este estudo foi: qual a viabilidade econômica de um sistema de geração de energia solar e a economia que pode ser

gerada no período de um ano? Para alcançar esta resolução, foi estabelecido como objetivo geral: analisar o desempenho energético e de viabilidade econômica de um sistema de geração de energia solar. Mais especificamente, o objetivo é justificar os benefícios e motivar a geração de energia elétrica por meio de sistemas de geração por via solar. A metodologia de pesquisa foi quantitativa.

Esse estudo, além do capítulo de introdução e considerações finais, dispõe do capítulo 2 sobre o marco teórico para considerações teóricas sobre o tema. O capítulo 3 apresenta o percurso metodológico da coleta de dados e, por fim, o capítulo 4 dispõe sobre a apresentação e análise dos resultados obtidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O termo “energia” aparece no dicionário no século XVIII. Significava “atividade”. Esta sensação de energia pode ser encontrada nos usos do termo por Young, Seebeck, Ampère, de Faraday e Mayer. O conceito introduzido por Thomson difere de todos os anteriores (CAHAN, 2012).

Em 1851, Thomson aderiu à teoria dinâmica do calor. De acordo com essa teoria, calor é movimento. Como havia um fator de conversão entre calor e movimento (o equivalente mecânico do calor), o calor podia ser expresso em unidades mecânicas. Isso o capacitou a considerar a atividade mecânica de um corpo devido ao seu calor. A atividade mecânica de um corpo, que depende de seu calor total, era, no entanto, impossível de determinar (CAHAN, 2012). Para isso, ele usa o termo erudito para “atividade”, a “energia mecânica de um corpo em um determinado estado” denotará o valor mecânico dos efeitos que o corpo produziria ao passar do estado em que é dado, para o estado padrão, ou o valor mecânico de toda a agência que seria necessário para trazer o corpo do estado padrão para o estado em que é fornecido (HARRER, 2017).

Há, no entanto, uma dificuldade quanto à disponibilidade dessa energia mecânica: a quantidade de energia mecânica gasta na produção de calor não é restaurável. Como Thomson admitiu que a energia mecânica permanece constante no universo, ele concluiu que há uma tendência universal de dissipação da energia mecânica. Ele admitiu que a energia mecânica permanece constante no universo porque somente Deus pode criá-la ou aniquilá-la (KIPNIS, 2014).

A Teoria do Calor de Maxwell, publicada várias vezes na década de 1870, adotou a definição de energia como a capacidade de fazer trabalho e o princípio de conservação de energia na forma: a soma da energia cinética e potencial de um sistema permanece a mesma. No entanto, ele também considerou “calor, magnetização, eletrificação, etc.” como formas de energia (CAHAN, 2012).

Essas energias podem ser constantemente convertidas umas nas outras. Energia mecânica pode ser transferida em energia elétrica. Correntes elétricas podem

ser obtidas por meio de baterias, dínamos, ações termoelétricas e assim por diante, enquanto em outras partes do campo esta energia é novamente transformada em calor, trabalho realizado por forças eletromagnéticas ou qualquer forma de energia produzida por correntes (CAHAN, 2012).

Entre outros, o objetivo da engenharia de energia é projetar uma fonte de alimentação confiável com sistemas para atender a uma demanda de eletricidade existente ou prevista. Desde a década de 1970, após o embargo do petróleo da OPEP de 1973, o campo da engenharia de energia se expandiu, incluindo novas tecnologias e conhecimentos interdisciplinares desenvolvidos referidos como análise de energia em uma perspectiva mais ampla. Coleta de energia renovável e o primeiro lado da demanda abordagens de gestão foram examinadas para aumentar a independência do petróleo (VANNI, 2018).

Energia primária é o termo usado para descrever a energia contida em combustíveis brutos. A energia primária é extraída, processada pela economia, e, finalmente, gravita para a demanda final. Energia é conservada através deste processo, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, permitindo que o uso de energia final seja calculado a partir dos dados do consumo de combustível usando métodos convencionais de balanço de energia. O conteúdo de energia dos combustíveis pode ser medido diretamente em joules, ou com o uso de protocolos como massa, volume ou emissões de dióxido de carbono. A maioria das estatísticas oficiais são publicadas usando unidades de energia primária para medir a oferta ou demanda (ALVES, 2017).

Os combustíveis mais usados são o petróleo, gás natural e carvão. Consumo de energia elétrica – que é não considerada uma forma de energia primária – é comparada com o consumo de energia primária, levando em consideração a mistura particular de combustíveis usados para produzir a eletricidade, a eficiência de conversão das centrais elétricas e as perdas na transmissão e distribuição. O consumo de eletricidade, incluindo energia de fontes hidrelétricas, renováveis e nucleares, é normalmente medido em watts-hora (1Wh é igual a 3.600 J) (RIBEIRO, 2015).

O preço pago pela energia é talvez a medida mais abrangente da utilidade de um combustível. Na teoria econômica neoclássica, o preço de um combustível (por

equivalente de energia) é igual ao seu valor marginal produto ou utilidade econômica. Cleveland et al. (2010) argumentam que um o preço do combustível engloba fatores como densidade de energia, escassez, limpeza, perfil de emissão, flexibilidade e facilidade de armazenamento. Preço é, portanto, uma unidade de medida baseada em valor.

O benefício mais óbvio de usar o preço para medir a energia é a disponibilidade de dados detalhados para análise. Práticas contábeis garantem que a produção e o consumo de energia sejam medidos em termos monetários em todos os níveis da sociedade. As medidas baseadas em preços são também familiares para os consumidores. No entanto, o uso de medidas de valor não está imune às imperfeições do mercado. Os preços da energia muitas vezes falham em incluir muitos fatores sociais e impactos ambientais (externalidades) associados ao consumo de energia (ALVES, 2017).

Os estudos comparativos de energia continuarão a ser a escolha dominante para analistas de energia. Conhecer a escala do fluxo de energia é crítica para determinar o potencial das opções de eficiência. Análises estatísticas de energia atuais falham em rastrear o fluxo global de energia completamente, desde o combustível até os serviços, e foca em setores econômicos, em vez de dispositivos técnicos e sistemas onde soluções de eficiência podem ser aplicadas (SILVA, 2014).

Reduzir a demanda de energia usando a energia de forma mais eficiente é a estratégia mais econômica disponível para reduzir as emissões de dióxido de carbono. A Agência Internacional de Energia (IEA) afirma que, melhorias de eficiência energética em edifícios, eletrodomésticos, transporte, indústria e geração de energia representam a maior e a menor das economias em emissões. Muitas nações concordam, reivindicam que o ponto de partida para abordar os riscos da mudança climática é reduzir o uso geral de energia por meio de uma maior eficiência energética (TONIM, 2019).

No entanto, apesar disso e com grande potencial, a eficiência energética é frequentemente negligenciada em meio ao entusiasmo político em torno de estratégias alternativas, como a energia renovável e o ressurgimento da energia nuclear. É importante que os engenheiros estejam ativamente engajados no debate sobre as mudanças climáticas, e se seja dado foco igual ao desenvolvimento de

energia de baixo carbono com suprimentos e tecnologias que melhoram a eficiência energética (ALVES, 2017).

2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MICROGERAÇÃO DE ENERGIA

Em síntese, o conceito da geração distribuída se dá pela energia elétrica gerada no local de consumo ou próximo a ele, válida para a geração de energia elétrica de diversas fontes de geração. Exemplos desse tipo de geração são: cogeneradores, geradores que usam resíduos como combustíveis, geradores de emergência ou de operação no horário de ponta, painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) (INEE, S/D).

O termo “Geração Distribuída” se popularizou no Brasil pós a criação da Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor, permitindo assim, que o consumidor brasileiro pudesse gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Essa normativa também possibilitou o consumidor fornecer o excedente gerado para a rede de distribuição (ANEEL, 2015).

Essa modalidade pode gerar diversos benefícios ao consumidor e ao sistema elétrico. Ao consumidor, gera economia financeira e consciência socioambiental. Ao sistema, gera o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e diversificação da matriz energética (ANEEL, 2015).

Caso a quantidade de energia gerada seja superior a demanda em um certo período, o consumidor gera créditos que podem ser utilizados nas faturas seguintes. Também foi possibilitada a instalação de geração distribuída em condomínios e a criação da “geração compartilhada”, quando diversos interessados se unem em consórcio ou em uma cooperativa para utilizar a energia gerada na redução das faturas (ANEEL, 2015).

A implantação de uma gama de tecnologias de microgeração está avançando em ritmo acelerado, embora de forma desigual, ao redor do mundo (MOREIRA, 2018). No ano de 2022, foram instaladas na União Europeia 41,4 GW de energia solar, número que representou um avanço de 47% em relação ao ano anterior, que contou

com 28,1 GW instalados. Os países com maior acréscimo foram a Alemanha, com 7,9 GW e a Espanha, com 7,5 GW (PORTAL SOLAR, 2022c).

A fonte de energia solar fotovoltaica representa praticamente todas as instalações de geração distribuída no Brasil. Os números e as expectativas quanto a instalação de mais sistemas só aumentam, com grande destaque para a microgeração residencial (PORTAL SOLAR, 2022). Em 2022, o Brasil atingiu a marca de um milhão de sistemas residenciais de energia solar. As instalações fotovoltaicas nesse mercado somam 6,4 GW e beneficiam 1,2 milhão de consumidores que aderiram ao segmento de geração solar distribuída (PORTAL SOLAR, 2022).

O surgimento de uma mistura heterogênea de tecnologias de microgeração, conectando-se a infraestrutura de energia existente apresenta desafios para o fornecimento de energia estável e segura. No entanto, a microgeração também oferece oportunidades consideráveis para uma redução nas emissões de carbono associadas ao fornecimento de eletricidade, a co-localização de energia térmica e fontes de alimentação e a descentralização das fontes de energia (CARVALHO, 2012).

Tecnologias de microgeração normalmente se acoplam a rede de distribuição de eletricidade em níveis de baixa tensão. Isso tem o potencial de alterar as características do fluxo de energia monodirecional da distribuição de energia convencional – se a penetração da microgeração é alta o suficiente em uma seção particular, a energia em massa flui de regiões de baixa para alta potência da rede de eletricidade (PASSOS, 2014).

A coordenação e operação de um sistema de energia com fluxos de energia de direção variável e muitos geradores heterogêneos apresentam desafios técnicos significativos. Por exemplo, microgeradores produzem eletricidade em muitos níveis de tensão diferentes, frequências AC (corrente alternada) diferentes (às vezes frequência não regulada), ou produz energia DC (corrente contínua).

Vistas no contexto de um fornecimento estável de eletricidade, as tecnologias de microgeração se dividem em duas categorias amplas: despachável e não despachável. Essas categorias também se aplicam a geração de larga escala. Um gerador despachável pode ser desligado ou ter sua saída modulada conforme a demanda alterar; a saída de um gerador não despachável não pode ser controlada (exceto conectar ou desligar o gerador) (MELO, 2016).

A despachabilidade ou não da microgeração é complicada pelo fato de que a principal função dessas tecnologias não é fornecer eletricidade à rede elétrica. Em vez disso, eles existem para atender às demandas locais (eletricidade, aquecimento, refrigeração). Conseqüentemente, embora uma tecnologia que a cogeração baseada no motor pode, em teoria, ser modulada para atender a algum requisito no sistema elétrico, as demandas da carga local podem negar essa opção. Por exemplo, um sistema de cogeração que atende a uma carga de calor pode não ser capaz de desligar, conforme solicitado por um operador de rede de eletricidade como o ponto de ajuste de aquecimento na carga pode não ter sido alcançado. Isso contrasta com (por exemplo) uma estação de energia a gás, a única função da qual é atender aos requisitos da rede elétrica (MOREIRA, 2018).

Em usinas convencionais, os geradores são normalmente máquinas síncronas, produzindo CA potência sincronizada com a frequência da rede em aproximadamente 10 kV. As tecnologias de microgeração são muito mais heterogêneas, produzindo energia DC ou AC, monofásica e polifásica, operando em diferentes níveis de tensão e em frequências diferentes (às vezes variáveis) (MOREIRA, 2018).

Todos esses diferentes tipos de tecnologia precisam ter interface com a rede elétrica de baixa tensão, operando com os limites de tensão e frequência específicos do país (MOREIRA; BASTOS; SANTOS, 2018). Por exemplo, a interface para um sistema fotovoltaico irá normalmente incorporar conversão DC-DC com rastreamento de ponto de potência máximo (MPPT) e aumentando a tensão para os níveis de rede; isso seria seguido pela conversão de DC para AC. O máximo rastreamento do ponto de potência envolve o *dithering* da corrente de saída de um painel fotovoltaico, a fim de encontrar os níveis ideais de corrente e tensão DC (ALMEIDA, 2012).

Interfaces eletrônicas de potência (IEP) normalmente seriam necessárias para a maioria das tecnologias de microgeração e também seria necessário ao fazer a interface de tecnologias de armazenamento, como baterias para a rede. Uma topologia de interface geral para tecnologias de microgeração é apresentada por Kramer et al. (2018).

Conforme evidenciado, a conexão de microgeração à rede elétrica existente é crescendo a uma taxa rápida e de uma forma amplamente descoordenada. Regulamentos para a conexão de microgeração se aplicam, mas tendem a lidar

apenas com questões de segurança e qualidade de energia. Para por exemplo, no Reino Unido, existem regulamentos com relação ao tamanho da microgeração, acompanhado da qualidade da interface (MOREIRA, 2018).

O impacto potencial do crescimento descoordenado da microgeração nos fluxos de energia na rede elétrica, particularmente a rede elétrica de baixa tensão (BT) é considerável. Todos os dispositivos eletricamente conectados, como MF, micro vento, CHP e bombas de calor têm o potencial de aumentar os fluxos de energia LV: para tecnologias de geração de energia, como MF, isso decorre de sua capacidade para exportar energia para a rede, com bombas de calor, o aumento do fluxo de energia decorre do aumento demanda elétrica (MOREIRA, 2018).

2.3 ENERGIA SOLAR: CONTEXTUALIZAÇÃO

A ampla geração e consumo de energia são as principais fontes antropogênicas de emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar (dois terços de todas as emissões de Gases de Efeito Estufa induzidas pelo homem). A menos que sejam tomadas contramedidas suficientes no setor de energia, a deterioração progressiva do meio ambiente relacionada a essas emissões continuará. O movimento global rápido e crescente em direção a fontes de energia de baixo carbono em resposta ao imperativo de enfrentar o aquecimento global pode apoiar um futuro global de energia sustentável e alívio de alguns encargos ambientais (CARDOSO; LIBERATTO, 2017).

Ao introduzir novas fontes de capital natural e explorar recursos de reposição, as energias renováveis desempenham um papel crucial nos esforços para descarbonizar o abastecimento de energia e evitar impactos negativos associados às mudanças climáticas. O sistema de energia renovável usa diversas fontes, localiza a geração de energia, diminui os custos de transporte e reduz a variabilidade de preços a longo prazo (SOBRINHO, 2016).

O sol é a mais importante fonte de energia livre e inesgotável para o planeta Terra. Quase quatro milhões de exajoules ($1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$) de energia solar atinge a Terra anualmente, dos quais $5 \times 10^4 \text{ EJ}$ podem ser facilmente aproveitados. Além da disponibilidade, a instalação e utilização de sistemas solares está diretamente ligada a redução da emissão de gás carbônico na atmosfera. A energia solar também

contribuiu para a segurança energética e para geração de empregos, além de causar redução no transporte de combustíveis (KABIR *et al.*, 2018).

Segundo dados do BEN (Balanço Energético Nacional), no ano de 2021, a geração solar atingiu 16,8 TWh (geração centralizada e MMGD) no Brasil, o que representou um avanço de 55,9% em relação a 2020. Essa geração contribuiu para uma geração a partir de energias renováveis na matriz elétrica de 78,1%. Dentre as fontes que representam essa geração, a geração hidráulica é responsável por 53,4%, a biomassa por 8,2%, a eólica por 10,6% e a solar por 2,5% (MME, 2022).

Em relação ao mundo, em 2022 a energia solar ultrapassou a marca de 1 TW de capacidade instalada. O país que lidera o ranking de capacidade instalada é a China, com 360 GW em setembro de 2022, comparados com 180 GW do Brasil. Na China, a energia solar gerada em casa se tornou mais barata que a gerada pela rede nacional, devido a investimento bilionários e esforços para diminuir a poluição do país. O ranking mundial de capacidade instalada é seguido por Estados Unidos, Índia, Japão e Austrália (NEOSOLAR, 2022).

Atualmente, existem três principais maneiras de utilizar a energia solar para a geração de energia diretamente, a energia solar térmica, energia heliotérmica (ou concentração solar), e a energia fotovoltaica. A energia fotovoltaica envolve o uso de semicondutores para converter a luz solar diretamente em energia elétrica, o que tem se tornado uma opção cada vez mais atraente (KABIR *et al.*, 2018).

Na energia solar térmica, o calor da radiação solar é transferido para água ou óleo, para ser utilizado como fonte de calor. Essa utilização geralmente ocorre de forma doméstica e/ou residencial. Já a energia heliotérmica concentra raios solares por meio de espelhos e transfere calor para um absorvedor, calor este que será utilizado posteriormente para mover uma turbina a vapor por exemplo (KABIR *et al.*, 2018).

A energia solar fotovoltaica distribuída é aquela em que os painéis solares são instalados na própria unidade consumidora ou próxima a ela (PAINEL SOLAR, 2022e). A ANEEL regulou essa prática em 2012 e desde então, permitiu que o consumidor gerasse sua própria energia e fornecer o excedente para a rede de distribuição (ANEEL, 2022a).

Uma pesquisa sobre moradia divulgada pelo PORTALSOLAR (2022e) aponta que o módulo solar fotovoltaico é o item mais desejado por brasileiros que vivem em casas e apartamentos. Esse item é desejado por 73% dos brasileiros.

Existem diversos fatores que estão possibilitando o expressivo aumento na utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil, como a queda no preço das tecnologias, as linhas de financiamento disponíveis, as condições climáticas favoráveis, baixo custo de manutenção e incentivos fiscais (PORTALSOLAR, 2022d)

As amplas fontes de energia renovável têm o maior potencial para melhorar a sustentabilidade do ambiente urbano, e a energia fotovoltaica demonstrou o maior potencial para contribuir no mix de energia, entre as tecnologias de microgeração disponíveis. O número de cidades em todo o mundo que decidiram avançar para metas 100% de energia renovável e neutralidade de carbono aumentou (CARDOSO; LIBERATTO, 2017).

Nos anos de 2021 até 2022, os investimentos em sistemas de geração fotovoltaica foram de R\$ 42,4 bilhões para 76,7 bilhões, o que representou um aumento de 80,9%. Esses valores tornaram o Brasil o quarto país que mais investiu em energia solar. Há expectativas que logo a energia solar ultrapasse a energia eólica em capacidade instalada no país. Além dos benefícios econômicos, a energia solar foi capaz de evitar a emissão de 23,6 milhões de toneladas de CO₂ na geração de eletricidade (CANALSOLAR, 2022).

A poluição do ar e a degradação ambiental devem aumentar devido à utilização contínua de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis para a produção de eletricidade. A descarbonização da geração de energia elétrica é uma necessidade essencial na redução das emissões de CO₂, mitigando os impactos negativos das mudanças climáticas, alcançando o desenvolvimento sustentável e concretizando um futuro sustentável (SOBRINHO, 2016).

Uma das principais vantagens que a energia solar fotovoltaica tem sobre a produção de energia convencional baseada em combustível fóssil é a redução nas emissões de CO₂ devido ao fato da geração solar não emitir poluentes, o que promove a descarbonização, extremamente necessária do fornecimento global de energia. Globalmente, o mercado fotovoltaico teve uma taxa de crescimento de 41% entre 2000 e 2015 (CARDOSO; LIBERATTO, 2017).

2.4 HISTÓRICO DA ENERGIA SOLAR

Em 1996 foi criada a lei 2427/96 que criou a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta a utilização de energia elétrica no Brasil. Em 17 de abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 que permitiu que o cidadão gerasse a própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração, além de fornecer o excedente para a rede de distribuição, gerando créditos energéticos (ANEEL, 2022a).

Em 2015 a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015, que revisou a Resolução Normativa nº 482/2012, com o objetivo de reduzir os custos e tempo para a conexão da microgeração e minigeração, além de deixar o sistema de compensação de energia elétrica compatível com as condições da Resolução Normativa nº 1000/2021, que determina as condições gerais do fornecimento de energia (ANEEL, 2022a).

Essa resolução permitiu a utilização dos créditos de energia em até cinco anos depois do encerramento do contrato com a concessionária, antes de até três anos (HCCENERGIASOLAR, 2022).

A principal regra dá a lista das formas de geração solar permitidas no país, sendo as principais: microgeração distribuída (até 75 kW), minigeração distribuída e (acima de 75 MW e maior que 5 MW). Além disso, determina o sistema de compensação de energia elétrica, determinando que os créditos de energia podem ser usados no abatimento do consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, procedimento chamado de autoconsumo remoto. Também foi criada a figura da “geração compartilhada”, que possibilita que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa (ANEEL, 2022a).

Em 2018 foi criada a PRONASOLAR (Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica), programa com objetivo de aumentar a utilização de fontes renováveis no Brasil de forma a promover a sustentabilidade e preservação do meio ambiente. Esse programa criou linhas de crédito para a energia solar, tornando-a mais acessível (HCCENERGIASOLAR, 2022).

Em 2021 foi publicada a Resolução Normativa nº 1.000/2021, que consolida as principais regras da Agência para a prestação do serviço público de distribuição de

energia elétrica, o que engloba a geração distribuída. Já em 2022, entrou em vigor a regulação do novo marco legal da geração de energia elétrica em micro ou pequena escala pelos consumidores, cujo texto altera as determinações quanto à micro e à minigeração, em função da Lei nº 14.300/2022 e do disposto no art. 1º da Lei nº 14.120/2021 (ANEEL, 2022b).

Entre as disposições que alteram a Resolução nº 482/2012, as principais são referentes ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Foi permitido que o consumidor com micro ou minigeração distribuída não pague diretamente para utilizar a rede elétrica quando obtém em retorno a energia injetada anteriormente. Esses custos são compartilhados entre todos os consumidores na tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2022b).

Também foi determinada uma redução progressiva do custeio da TUSD (Tarifa de Utilização do Sistema de Distribuição). A partir de 6 de janeiro de 2023, a Lei criou um período de transição em que há redução progressiva do custeio da TUSD, até 2029. A partir dessa data, as unidades sofrerão tarifas no custo da energia sobre a quantidade compensada (ANEEL, 2022b).

2.5 ENERGIA FOTOVOLTAICA: FUNCIONAMENTO

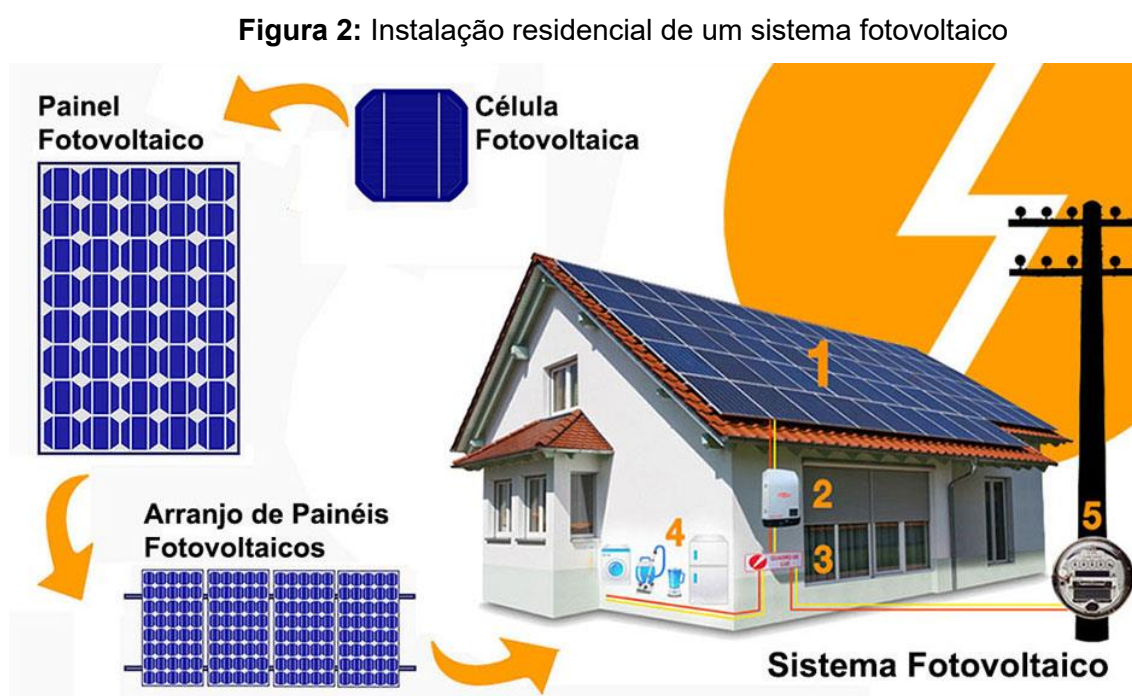
A energia solar fotovoltaica utiliza a energia que vem da radiação solar por meio dos módulos fotovoltaicos. Os Módulos fotovoltaicos usam o efeito fotovoltaico para converter a radiação solar imediatamente a eletricidade. Várias células e módulos foram desenvolvidos e estão em uso (BIANCHINNI, 2013).

As células fotovoltaicas são produzidas com materiais semicondutores. As placas solares mais utilizadas são várias células solares interligadas em série, os chamados módulos fotovoltaicos que juntos formam o painel solar. Os principais módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente são fabricados de fatias de silício cristalino, podendo ser monocristalino ou policristalino. Os módulos solares mais comuns são fabricados com 60, 66 e 72 células ou, no em módulos *Half-cell*, com 120, 132 e 144 “meias células” (PORTALSOLAR, 2022a).

A produção de células solares de silício usa a experiência abrangente da indústria eletrônica. O silício é um semicondutor indireto, cujo coeficiente de absorção

para a radiação solar mostra valores relativamente baixos. Portanto, células solares feitas de tal material semicondutor deve ser relativamente espessa (pelo menos 50 μm). A alta espessura da camada implica alto consumo de material e, portanto, altos custos. As perdas que ocorrem nos módulos fotovoltaicos ocorrem devido ao uso incompleto do espectro solar e porque uma parte da energia absorvida é convertida em calor em vez de eletricidade (BORBA, 2015).

Um único módulo fotovoltaico não é suficiente para gerar a eletricidade consumida em uma instalação. Dessa forma, são necessárias algumas poucas unidades para residências ou dezenas delas para grandes empresas e indústria. Essa quantidade de módulos, assim como dos outros equipamentos da instalação, dependem do consumo elétrico que deve ser atendido (PORTALSOLAR, 2022a). A Figura 2 mostra como funciona uma instalação residencial de um sistema fotovoltaico. Na imagem, o número 1 representa o módulo fotovoltaico, 2 o inversor, 3 o quadro de proteção elétrico, 4 os equipamentos de consumo instantâneo e 5 o medidor de energia elétrica bidirecional.



FONTE: PORTALSOLAR (2022a)

Eficiências mais altas podem ser alcançadas por células solares empilhadas ou concentrando a radiação solar. O recorde mundial de eficiência para energia solar

empilhada é de células curtas acima de 40%, mas podem atingir teoricamente acima de 60%. Para atingir tensões e correntes mais altas, as células solares são conectadas em série e paralelamente aos módulos e, em seguida, são fechadas hermeticamente (BORBA, 2015).

O funcionamento do sistema de energia fotovoltaico se dá por: Primeiro as células fotovoltaicas do painel reagem com a luz do sol e a convertem em energia elétrica. Em seguida, o inversor ajusta a corrente elétrica de contínua para alternada, deixando-a compatível com as instalações elétrica e pronta para ser distribuída, utilizada ou armazenada (NGSOLAR, 2022).

Os sistemas de energia solar podem funcionar de forma conectada à rede (*on grid*), isolada ou de forma híbrida. Nos sistemas *on grid*, a energia que não é utilizada imediatamente (excedente produzido) é fornecida a rede e utilizada por outro local. Os sistemas fora da rede utilizam baterias para armazenar a energia não utilizada. Já os sistemas híbridos operam na rede ao mesmo tempo que contam com bateria para armazenamento (PORTALSOLAR, 2022b). O funcionamento de um sistema passo a passo conectado à rede é mostrado na Figura 3.

Figura 3: Funcionamento de um sistema fotovoltaico *on grid*



FONTE: PORTALSOLAR (2022b)

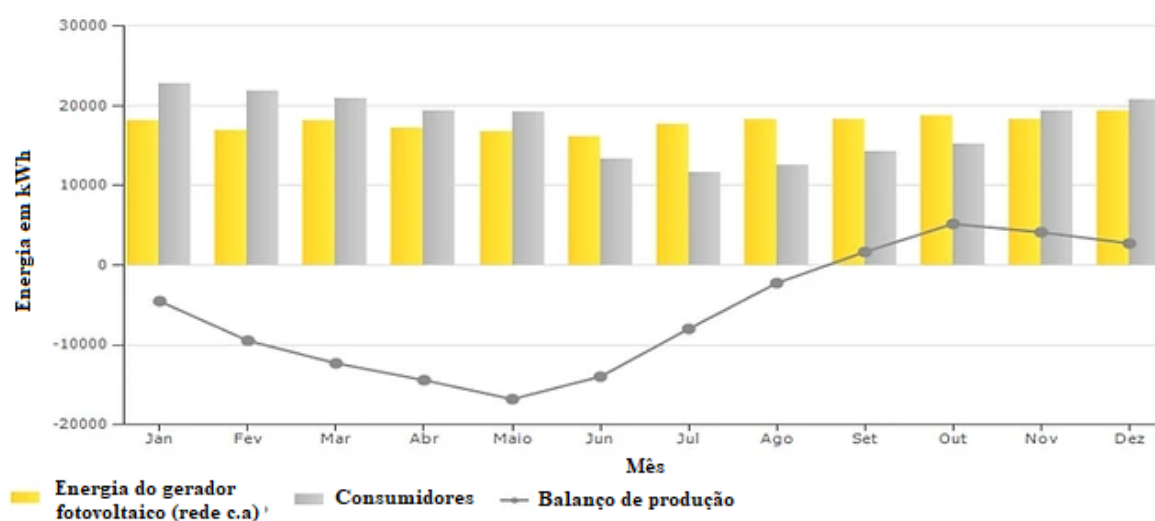
O funcionamento do sistema de geração de energia se dá em cinco passos principais (PORTALSOLAR, 2022b):

1. O painel solar capta a luz e a transforma em energia elétrica
2. O inversor fotovoltaico adapta a corrente elétrica da energia para que ela possa ser utilizada
3. A energia chega ao quadro de luz e é distribuída na sua casa ou empresa
4. A energia alimenta as luzes e equipamentos elétricos de todo o seu imóvel
5. O excesso de energia é injetado na rede elétrica, gerando créditos

Na instalação do sistema, o medidor de energia elétrica antigo é substituído por um novo modelo “bidirecional”, com o qual a distribuidora consegue computar a entrada e saída de energia e consequentemente a quantidade de energia que o usuário injetou na rede, assim como a quantidade que utilizada durante a noite e em momentos de pouca luz, quando a geração é reduzida (PORTALSOLAR, 2022b).

A energia não consumida pelo usuário é convertida em créditos de consumo que são válidos por até 5 anos. Esses créditos são utilizados em meses que o sistema não gera energia suficiente para cobrir o consumo. Caso não haja créditos para cobrir o consumo excedente, é pago o saldo do consumo (NGSOLAR, 2022).

Um sistema fotovoltaico é modelado para atender o consumo médio anual de energia. A Figura 4 apresenta um exemplo de consumo anual, em que é possível verificar um consumo menor que a produção do sistema durante o inverno e maior durante o verão.

Figura 4: Exemplo de consumo médio e energia gerada pelo sistema.

FONTE: NGSOLAR (2022)

O usuário pode reduzir a conta de energia em até 99%, devendo pagar somente as taxas cobradas pela concessionária devido a conexão, que é equivalente a 100 KWh (NGSOLAR, 2022).

A utilização da fonte solar para gerar energia elétrica proporciona diversos benefícios, tanto do ponto de vista energético como ambiental e socioeconômico. Do ponto de vista energético, contribui para diversificação da matriz, aumento da segurança no fornecimento, redução de perdas e alívio de transformadores e alimentadores. Sob o aspecto ambiental, há a redução da emissão de gases do efeito estufa, da emissão de materiais particulados e do uso de água para geração de energia elétrica. Com relação a benefícios socioeconômicos, a geração de energia solar fotovoltaica contribui com a geração de empregos locais, o aumento da arrecadação e o aumento de investimentos (NASCIMENTO, 2017).

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Bicalho, Araujo e Cardoso (2018) utilizaram coeficientes de desempenho para avaliar o sistema fotovoltaico *on grid* de 10,2 kW de potência instalada na cidade de Itabira-MG. Foi avaliado que o sistema operava com baixa eficiência devido aos

efeitos da instalação inadequada, tanto referente à inclinação dos painéis, quanto à orientação dos mesmos.

Silva et al. (2019) analisaram o custo benefício da implantação de um sistema fotovoltaico. Foi concluído que a geração de energia solar foi responsável pela redução do consumo de energia elétrica em 100% e apesar do alto custo, o sistema se paga em poucos anos. Além da questão econômica, a utilização de energia solar traz ainda como vantagens a redução do impacto ambiental gerado pelo consumo de energia elétrica não renovável.

Dantas e Pompermaye (2018) discutiram a viabilidade econômica do uso de sistemas fotovoltaicos e os seus possíveis impactos no setor elétrico brasileiro. Foi realizado um estudo da atratividade financeira da instalação desses sistemas, considerando fatores como a incidência solar local e o custo da energia fornecida pelas concessionárias de distribuição. Constatou-se que a energia fotovoltaica é atrativa, porém devem-se discutir os possíveis impactos que a inserção em massa pode causar, como a variação repentina no fornecimento de energia desses sistemas e os prejuízos que podem ocorrer para as distribuidoras e os usuários.

Olezac et al. (2022) analisaram a viabilidade econômica e os aspectos ambientais de instalações fotovoltaicas. Foi feito um estudo em função da dimensão da instalação. Os níveis de emissão de CO₂ e outros poluentes foram determinados com base na potência das instalações fotovoltaicas. Foram realizadas a Avaliação do Ciclo de Vida e análise do fluxo de caixa.

Garud e Lee (2022) conduziram análises termodinâmicas, ambientais e econômicas em sistemas fotovoltaicos/térmicos e fotovoltaicos/geradores termoelétricos em que a água, nanofluidos de partícula foram considerados como fluidos de transferência de calor em ambos os sistemas. Os resultados revelam que o sistema fotovoltaico/gerador apresentou desempenho superior ao sistema térmico.

Qiu, Wang, Lin e Lin (2021) construíram um modelo com medidas econômicas de taxa interna de retorno e período de retorno com base no fluxo de caixa descontado e investigaram um sistema fotovoltaico de 5 kW em 2.181 áreas geográficas usando análise de cenário e análise de sensibilidade. Verificou-se que os investimentos em PV residenciais (Células Fotovoltaicas) atingiram o ponto de equilíbrio em toda a China, mesmo sem quaisquer incentivos.

Cui, Zhu, Meng, Zoras, McKechnie e Chu (2020) realizaram uma avaliação técnico-econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede para aplicação em edifícios residenciais. Foram exploradas a produção de eletricidade, a eficiência da conversão de energia e a temperatura da célula. Com base nas condições climáticas locais, o custo do ciclo de vida do sistema foi avaliado com consideração da vida útil dos ativos, flutuações econômicas voláteis, fatores de influência da incerteza, valor presente líquido (VPL) e outros fatores econômicos. Os resultados da análise técnica indicam que o sistema é capaz de atender a demanda de energia elétrica do prédio de abril a outubro, sendo que a eletricidade extra de 1530,23 kWh é exportada para a rede neste período.

3 METODOLOGIA

Primeiramente, antes de aprofundar na análise dos dados de geração, são apresentados os fatores de decisão da escolha dos equipamentos do sistema de geração utilizado como estudo neste trabalho. Foi realizado um dimensionamento da potência de geração do sistema a partir dos dados de demanda energética, calculados com base no consumo de energia elétrica anual do local, detalhado no tópico 3.2. Esses dados também são utilizados para determinar as características dos componentes que compõem o sistema, que são demonstrados no tópico 3.1

O local em que foi realizado o estudo de caso, foi uma residência localizada na cidade de Dourados, Mato Grosso do Sul, região Centro Oeste do Brasil, longitude e latitude são respectivamente -22.212505518003674, -54.84010429427737

3.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO

Foi orçado, comprado, e instalado o seguinte kit:

- 1 Inversor de corrente Growatt 6kW;
- 16 módulos Canadian Solar 360W;
- 50 Metros de cabo cc (corrente contínua) vermelho 6mm²;
- 50 Metros de cabo cc (corrente contínua) vermelho 6mm²;
- 30 Metros de cabo ca (corrente alternada) vermelho 4mm²;
- 30 Metros de cabo ca (corrente alternada) verde 4mm²;
- *String Box* de proteção do sistema;
- Disjuntor bifásico 32A;
- 2 DPS 175V;
- 4 Porta fusíveis 1000V;
- 4 fusíveis 1000V;
- 2 DPS 600V;
- Demais materiais de fixação (barras de fixação de alumínio, parafusos

de fixação estrutural, grampos de fixação de módulos).

O conjunto inversor-painel elétrico é apresentado na Figura 5 a seguir.

Figura 5: Inversor instalado junto com o quadro de proteção

Fonte: Própria

Para fins de conhecimento quanto aos dados técnicos de operação do módulo fotovoltaico, são apresentados nas Tabelas 1 e 2, a ficha técnica elétrica do painel fotovoltaico Canadian CS3U-360P sob condição de teste padrão de irradiância de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura da célula de 25°C e em seguida a ficha técnica elétrica sob condição de temperatura nominal, irradiância de $800\text{W}/\text{m}^2$, temperatura ambiente de 20°C e velocidade do vento $1\text{m}/\text{s}$:

Tabela 1: Ficha técnica da CS3U-360P sob condições de teste padrão

Potência nominal máxima	360W
Tensão de operação	39,6V
Corrente de operação	9,10 A
Tensão de circuito aberto	47,0V
0Corrente de curto-circuito	9,67 A
Eficiência do módulo	18,15%
Temperatura de operação	$-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$

Fonte – Canadian Solar (2017)

Tabela 2: Ficha técnica da CS3U-360P sob condições de temperatura nominal

Potência nominal máxima	266W
Tensão de operação	36,1V
Corrente de operação	7,37 A
Tensão de circuito aberto	43,9V
Corrente de curto-circuito	7,80A

Fonte – *Canadian Solar* (2017)

Já as dimensões mecânicas do painel escolhido, são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensões mecânicas da CS3U-360P

Tipo de célula	Policristalino, (156.75 x 78.38) mm
Dimensões	(2000 x 992 x 40) mm
Peso	22.6 Kg
Espessura do cabo	4.0 mm ²
Comprimento do cabo	1670 mm

Fonte – *Canadian Solar* (2017)

As condições operacionais da entrada do inversor de corrente, são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Entrada do inversor de corrente MIN 6000TL-X

Máxima potência fotovoltaica recomendada	8100W
Máxima tensão CC	550V
Tensão de partida	100V
Faixa de tensão de MPPT / tensão nominal de MPPT	60V – 550V / 360V
Corrente máxima de entrada	12.5A / 12.5A
Máxima corrente curto-circuito por MPPT	16A / 16A

Número de MPPT/ <i>strings</i> por MPPT	2/1
---	-----

Fonte – *Growatt New Energy Technology* (2019)

Os dados de entrada do inversor, são vindos diretamente do circuito dos módulos fotovoltaicos, em corrente contínua. O inversor atua justamente para modificar a frequência da corrente, convertendo em corrente alternada. A Tabela 5 apresenta os dados de saída do inversor:

Tabela 5: Saída do inversor de corrente MIN 6000TL-X

Potência nominal de saída CA	6000W
Potência aparente máxima de CA	6000VA
Corrente máxima de saída	27,2 A
Tensão nominal de saída (faixa)	230V (160V – 300V)
Frequência de rede CA (faixa)	50HZ / 60HZ
Fator de potência ajustável	0,8i – 0,8c
Conexão CA	Fase única
Eficiência do inversor	98,4%

Fonte – *Growatt New Energy Technology* (2019)

Esse estudo se classifica como pesquisa quantitativa, tendo em vista que, o valor da energia conforme o preço a ser pagar, medido em R\$, representam variáveis de análise quantificáveis. A metodologia dos dados coletados é apresentada nos tópicos 3.2 e 3.3 abaixo..

3.2 HISTÓRICO DE CONSUMO E VALOR DAS FATURAS

Os dados referentes ao consumo de energia elétrica do local e os respectivos custos dessa energia cobrados pela concessionária de energia elétrica, foram coletados durante todo o ano de 2020, em que todas as faturas foram analisadas individualmente.

Tabela 6: Base de dados 2020

MÊS	CONSUMO DE ENERGIA (kWh)	CUSTO DA FATURA
JAN/20	638	R\$ 589,41
FEV/20	629	R\$ 581,10
MAR/20	600	R\$ 554,30
ABR/20	709	R\$ 655,00
MAI/20	547	R\$ 505,34
JUN/20	349	R\$ 322,42
JUL/20	540	R\$ 499,87
AGO/20	262	R\$ 242,05
SET/20	450	R\$ 415,73
OUT/20	567	R\$ 523,82
NOV/20	542	R\$ 500,72
DEZ/20	800	R\$ 739,07
TOTAL	6633	R\$ 6.128,83

Fonte: Própria

3.3 ESTIMATIVA E GERAÇÃO REAL DE ENERGIA

Ao analisar a média de consumo de energia elétrica anual do local, foi obtido um direcionamento referente a capacidade de geração de um sistema fotovoltaico, que deve ser instalado a fim de suprir toda demanda de 552,75 kWh (média anual de consumo), valor apresentado na Tabela 6 acima. O equipamento a ser orçado deve gerar no mínimo o mesmo valor consumido, entretanto no dimensionamento de energia solar fotovoltaica apresentado, o sistema foi dimensionado visando ampliações futuras que impactam diretamente na potência instalada do local.

Para o dimensionamento, foram considerados fatores importantes que influenciam na geração de energia elétrica. Foi avaliada a inclinação do telhado do local, que segundo o projeto estrutural da residência é de 21°, as coordenadas geográficas correspondendo a cidade de Dourados, no estado do Mato Grosso Do Sul, região Centro Oeste do Brasil, longitude e latitude são respectivamente - 22.212505518003674, -54.84010429427737. A orientação da inclinação no espaço geográfico é noroeste, verificado com uma bússola e a área total de telhado disponível para instalação de 38m², entretanto o espaço é dividido em duas áreas diferentes (porém com a mesma orientação e inclinação), sendo necessário dividir em dois

arranjos de módulos, sendo a separação 10 módulos e 6 módulos, demonstrado nas Figuras 6 e 7.

Na Figura 6, nota-se a configuração do primeiro arranjo de módulos, com 10 módulos alocados na direção noroeste. Já na Figura 7, são apresentados 6 módulos, com a mesma orientação e inclinação, entretanto em telhado diferente.

Figura 6: Primeiro arranjo de módulos fotovoltaicos



Fonte – Própria

Figura 7: Segundo arranjo de módulos fotovoltaicos



Fonte – Própria

Foi dimensionado um sistema com capacidade de geração superior ao consumo a partir dos dados apresentados na Tabela 6, dispostas no tópico 3.2, com uma média de 674 kWh mensais, deste modo, 122 kWh excedentes em relação à média de consumo (552,72 kWh), correspondendo a um superdimensionamento de 18%.

A projeção de radiação foi adotada através do portal do CRESESB, apresentados na tabela 8 no tópico de resultados. Tais dados são gerados através longitude e latitude do local, que nesse caso são respectivamente - 22.212505518003674, -54.84010429427737.

Segundo Barbosa (2017), para estimar a geração de energia em um período, é aplicada a equação 1.

$$E_p = P * I_{solar} * n_{inversor} * n^{\circ}dias \quad (1)$$

Sendo:

E_p – Energia produzida pelo gerador fotovoltaico, em kWh.

P – Potência nominal do gerador fotovoltaico, em kWp.

I_{solar} – Irradiação solar diária média mensal sobre plano inclinado (kWh/m².dia).

$n^{\circ}dias$ – Número de dias do mês em questão.

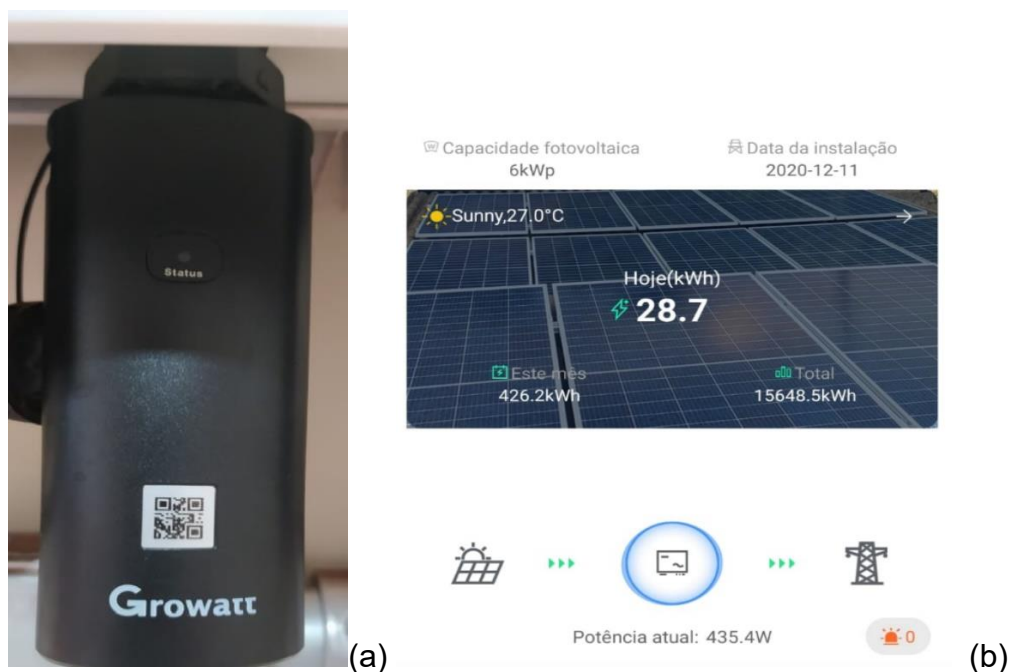
Os valores calculados, serão apresentados na tabela 8.

3.4 COLETA DOS NÍVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

O monitoramento completo da geração de energia, realizados no ano de 2021, assim como os picos de geração durante 24 horas, o acúmulo de energia nas últimas 24 horas, o acúmulo de energia durante o mês incluindo o histórico de todos os meses do ano, e por último, o acúmulo de energia no ano é realizado a partir dos dados do sistema de monitoramento interno do inversor, obtidos por meio da conexão deste com um aparelho *data logger*, apresentado na Figura 8(a), e através do cadastro da planta no servidor da *Growatt Shine Server*.

A Figura 8(b) ilustra a interface do monitoramento, que informa os resultados de potência atual do inversor, geração de energia diária, e status de funcionamento do sistema.

Figura 8: *Data logger* do inversor *Growatt* (a) e Interface do monitoramento fotovoltaico (b)



Fonte: Própria

A partir desse monitoramento, é possível obter a curva de geração de energia durante um período de 24 horas, curva a partir da qual é possível analisar as oscilações durante a geração de energia e conhecer o ponto máximo de geração durante o dia. A partir desses dados, foi feita uma análise do efeito de variáveis que atuam no desempenho, como fatores climáticos, sombreamento e temperatura.

A partir desses resultados, foi possível conhecer a geração de energia no período de um dia (24 horas), uma semana, um mês e um ano. Sendo assim, esse foi o método utilizado para se levantar os dados de geração de energia elétrica, um método analítico simples onde a principal ferramenta é fornecida pelo próprio fabricante do inversor.

Para a análise do consumo de energia após a instalação do sistema, é necessário conhecer como funciona a medição da concessionária. No caso da geração própria, o medidor de energia elétrica bidirecional contabiliza a carga energética da residência, assim como os medidores convencionais, e também mede a carga injetada na rede pelo sistema, proveniente do sistema fotovoltaico em operação na residência.

O medidor de energia elétrica não tem a capacidade de medir a carga total consumida na residência, apenas a carga sem geração própria. Isso ocorre, pois, a

residência consome a energia gerada instantaneamente durante o dia pelo sistema fotovoltaico (consumo instantâneo), não gerando deste modo, demanda de carga da rede. Isso ocorre pois o circuito da casa está ligado diretamente na saída ca (corrente contínua) do inversor, e, portanto, enquanto o sistema fotovoltaico estiver ligado, a alimentação da residência se dá pela energia gerada pelos módulos. Caso haja excedente de geração, a carga é injetada da rede. Em períodos de baixa ou nula geração de energia e alto consumo, o fluxo de energia é proveniente da rede.

Desta forma, o medidor de energia elétrica apresentará ao operador responsável pela coleta de dados da concessionária dois campos: um que registra a energia, em kWh consumida da rede (campo 03), e outro que registra a energia exportada a rede (campo 103). A diferença desses valores são os créditos disponíveis ao proprietário da residência.

3.5 CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA

Desta forma, para chegarmos ao consumo de energia com geração própria, os valores analisados são: os valores de geração no mês, a energia injetada no mês e a energia consumida no mês. Esses dados são relacionados a partir de correlações matemáticas que associam os dados registrados pela concessionária na fatura da conta de energia (comparando o mês anterior e o atual). Essas correlações são apresentadas a seguir.

Consumo de energia sem geração = canal 03 do mês atual – canal 03 do mês anterior.

Consumo instantâneo = Energia gerada – (canal 103 mês atual – canal 103 mês anterior).

Consumo total de energia = consumo de energia sem a geração + consumo durante a geração.

A partir dos valores referentes ao consumo de energia elétrica após a instalação do sistema de geração fotovoltaico, foi feita uma comparação desses dados com o consumo antes da instalação, o que demonstra de forma prática a alteração na mentalidade do consumidor. Na área de engenharia de custos, é interessante observar indicadores que informam quanto foi ganho ou perdido com a geração

própria. Para isso, é preciso transformar os dados de geração, medidos em kWh em R\$, de forma que é possível analisar a eficácia real da instalação. No ano de 2020, período em que o sistema foi orçado, dimensionado e instalado, cada kWh custava R\$0,92, valor esse que foi adotado para calcular o custo da energia consumida em 2021, sem considerar os encargos tributários, ficando para uma análise futura.

No que se refere à estratégia de estudo, optou-se pelo estudo de caso. A abordagem de estudo de caso foi selecionada para aferir o desempenho energético e a viabilidade econômico-financeira de um sistema de geração de energia fotovoltaica.

Nesse caso, os dados de geração e consumo são analisados através de uma visão econômica, mais especificamente o quanto esse sistema trouxe de economia para o usuário, assim como o quanto esse consumo excedente em relação ao passado custaria caso fosse consumido diretamente da fornecedora de energia elétrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de geração do sistema fotovoltaico, coletados no período de janeiro de 2021 até dezembro 2021 foram comparados com consumo do ano de 2020, período em que não havia a instalação do sistema. Esse consumo foi analisado a partir das faturas de energia elétrica da residência gerada pela concessionária, a Energisa.

4.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Tabela 7 apresenta os dados relativos ao consumo, em kWh no ano de 2020, assim como o custo da fatura. O custo da fatura foi calculado com o valor de R\$ 0,92/kWh, valor que era aplicado no final do ano de 2019, quando foi feito o orçamento e levantamento o projeto. A tabela também apresenta os resultados relativos ao custo das faturas cobradas referentes ao novo consumo de energia no período em que houve fornecimento de energia elétrica pelo sistema de energia fotovoltaica.

Tabela 7: Consumo de energia e Custo da fatura

Mês	Consumo de energia (kWh)	Custo da fatura	Mês	Consumo de energia (kWh)	Custo da fatura	Diferença de energia
JAN/20	638	R\$ 589,41	JAN/21	824	R\$ 96,17	23%
FEV/20	629	R\$ 581,10	FEV/21	628	R\$ 95,33	-0,2%
MAR/20	600	R\$ 554,30	MAR/21	772	R\$ 98,89	22,3%
ABR/20	709	R\$ 655,00	ABR/21	732	R\$ 96,44	3,1%
MAI/20	547	R\$ 505,34	MAI/21	550	R\$ 102,51	0,5%
JUN/20	349	R\$ 322,42	JUN/21	494	R\$ 96,00	29,4%
JUL/20	540	R\$ 499,87	JUL/21	352	R\$ 87,70	-53,4%
AGO/20	262	R\$ 242,05	AGO/21	383	R\$ 84,53	31,6%
SET/20	450	R\$ 415,73	SET/21	524	R\$ 100,62	14,1%
OUT/20	567	R\$ 523,82	OUT/21	575	R\$ 108,04	1,4%
NOV/20	542	R\$ 500,72	NOV/21	663	R\$ 107,70	18,3 %
DEZ/20	800	R\$ 739,07	DEZ/21	789	R\$ 109,27	-1,4%
TOTAL	6633	R\$ 6.128,83		7286	R\$1183,20	7,0%

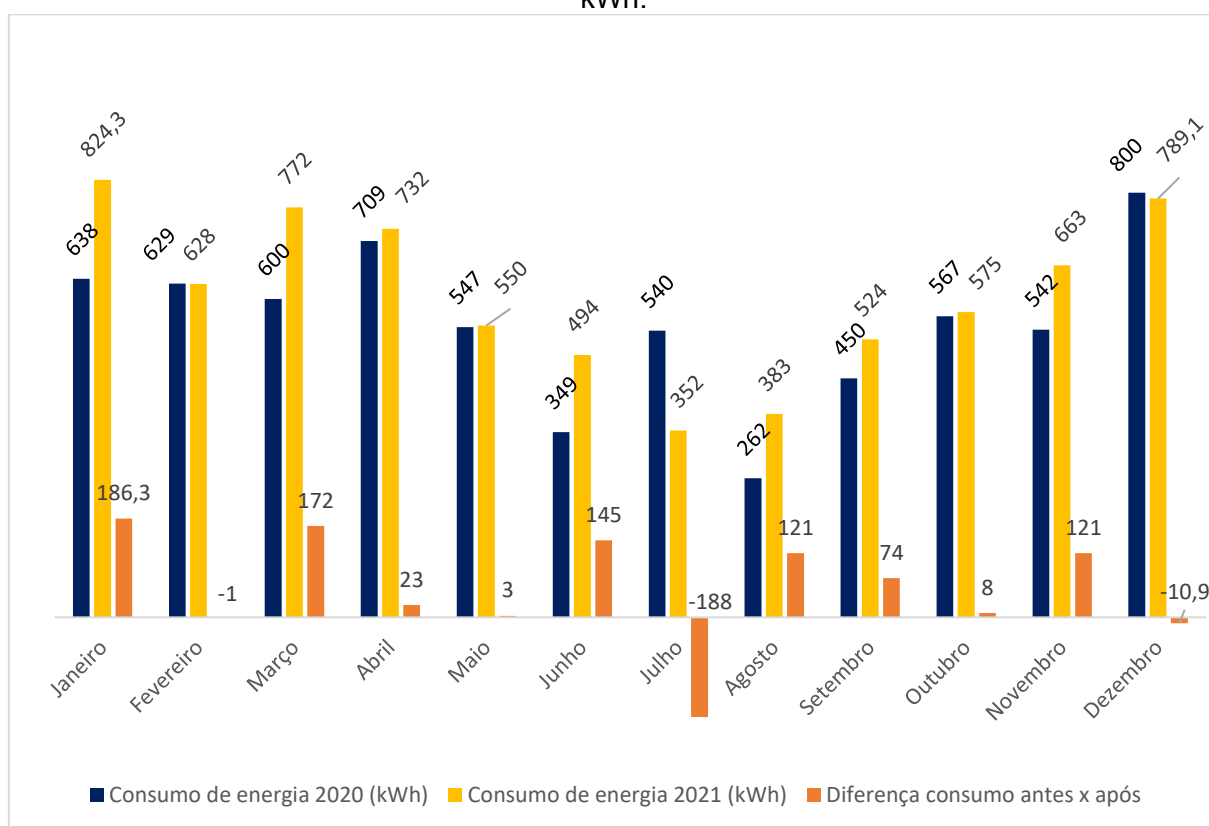
Fonte: Elaboração própria (2022)

Em uma análise sintetizada da Tabela 7 nota-se que houve um ligeiro aumento entre o consumo de energia elétrica durante o período em que houve geração de energia fotovoltaica em relação ao período em que não houve, 7,0% maior em relação ao consumo anterior a geração de energia. A redução de custo com tarifa de energia, se dá por 80,70% em relação ao custo anterior a geração de energia.

Para compreender o desempenho energético do sistema de geração de energia fotovoltaica, é necessário realizar uma análise comparativa do consumo de kWh antes e após a sua implementação.

A Figura 9 abaixo apresenta dados da tabela 7 em relação ao consumo antes e após a implementação do sistema.

Figura 9: Comparação de consumo de energia antes x após geração própria, em kWh.



Fonte: Elaboração própria (2022)

A Figura 9 dispõe acerca das diferenças de consumo energético de janeiro de 2020 em comparação a janeiro de 2021 (Nota-se que, meses como fevereiro, maio, outubro e dezembro de 2021 não apresentaram diferença significativa de consumo de

energia. Contudo, os meses de março, junho, agosto e novembro de 2021, bem como janeiro de 2022 apresentaram significativo aumento de consumo de energia elétrica. Apenas julho de 2021 apresentou maior consumo de energia elétrica em 2020 comparado ao mesmo mês em 2021. Esse é um importante indicador referente à energia solar, pois trata diretamente sobre o consumo, ao migrar para a geração própria, o consumidor pode demandar de uma potência elétrica maior sem ser refém da instabilidade tarifaria, desde que seu sistema seja dimensionado para que tenha créditos. O sistema foi projetado para ter créditos para ampliação da potência.

O desempenho energético demonstrado pelos gráficos acima apresentou dados que podem ser analisados como efetivos para a premissa que, o sistema de geração de energia fotovoltaica foi eficaz para atendimento a necessidade energética no ano analisado. Ademais, gerou mais energia do que o previsto, como pode-se notar pelos dados relativos ao consumo de kWh em 2020 comparado a 2021-2022 e o aumento desse consumo em diversos meses. A geração além do dimensionado possibilita expansão do consumo energético.

Com isso, antes de se iniciar a análise de viabilidade econômico-financeira, é preciso fazer a análise acerca da geração de energia estimada e da geração real do período de análise.

4.2 GERAÇÃO DE ENERGIA

Através da equação 1, disposta no tópico 3.3, foi elaborada a Tabela 8, que apresenta os valores estimados para geração de energia no ano de 2021:

Tabela 8: Base de dados para estimar geração de energia 2021

MÊS	Irradiação solar (kWh/m ² . dia)	Potência instalada (kWp)	Eficiência do inversor	Dias no mês	Geração estimada de energia (kWh)
JAN/21	6,34	5,67	0,984	31	823
FEV/21	6,27	5,67	0,984	28	735
MAR/21	5,76	5,67	0,984	31	747
ABR/21	4,92	5,67	0,984	30	618
MAI/21	4	5,67	0,984	31	519
JUN/21	3,66	5,67	0,984	30	459
JUL/21	3,79	5,67	0,984	31	492
AGO/21	4,72	5,67	0,984	31	612
SET/21	5,08	5,67	0,984	30	638
OUT/21	5,79	5,67	0,984	31	751
NOV/21	6,4	5,67	0,984	30	803
DEZ/21	6,89	5,67	0,984	31	894
MÉDIA	5,30	5,67	0,984		674,25

Fonte: Elaboração própria (2022)

Para configuração do cálculo de geração estimada, foi pesquisado a irradiação usando como base os dados dispostos no portal da CRESESB no ano de 2020, potência instalada é a potência máxima do sistema atingida durante o dia em seu pico de geração, eficiência do inversor adotado através das especificações técnicas do inversor.

A Tabela 9 apresenta a geração estimada e a geração real do ano de 2021, feita através da média de consumo anual de 2020.

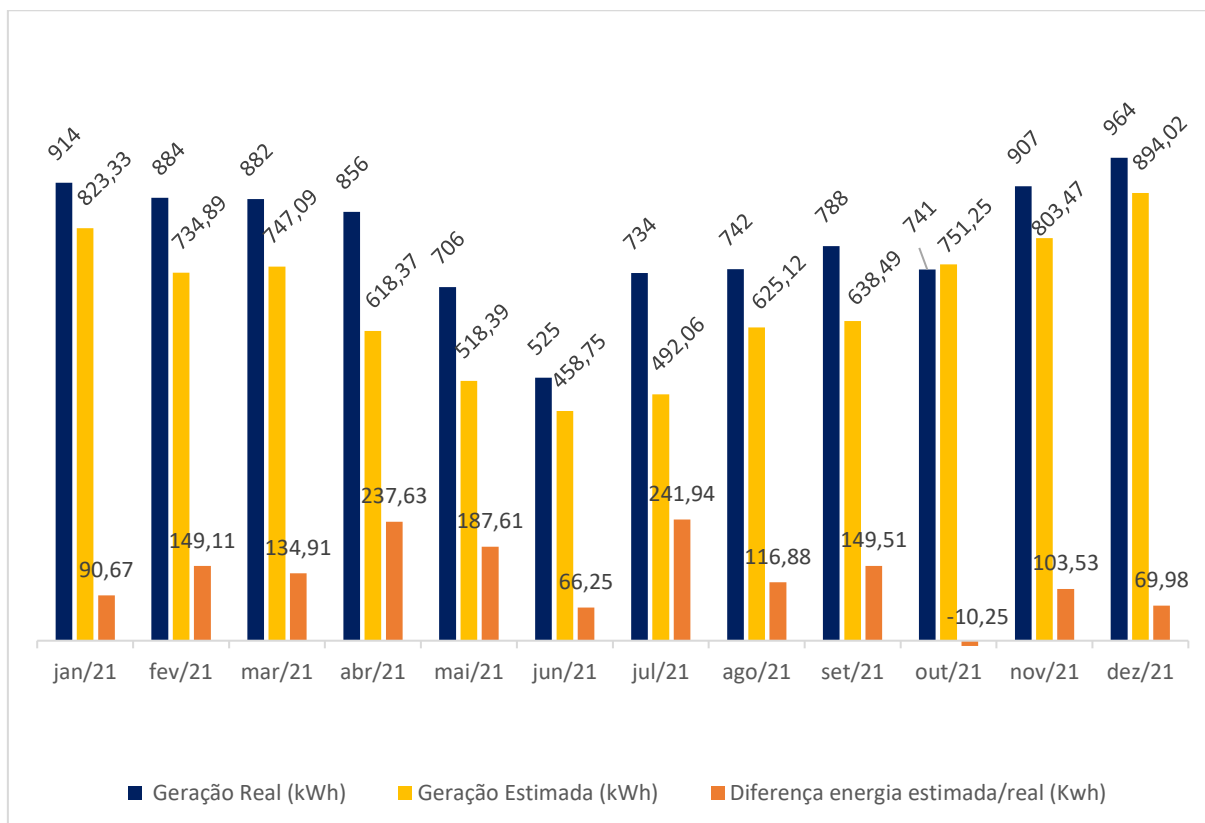
Tabela 9: Estimativa e geração real de energia (kWh)

MÊS	ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE ENERGIA (kWh)	MÊS	GERAÇÃO REAL DE ENERGIA (kWh)	DIFERENÇA (%)
JAN/21	823	JAN/21	914	9,96
FEV/21	735	FEV/21	884	16,86
MAR/21	747	MAR/21	882	15,31
ABR/21	618	ABR/21	856	27,80
MAI/21	519	MAI/21	706	26,49
JUN/21	459	JUN/21	525	12,57
JUL/21	492	JUL/21	734	32,97
AGO/21	612	AGO/21	742	17,52
SET/21	638	SET/21	788	19,04
OUT/21	751	OUT/21	741	-1,35
NOV/21	803	NOV/21	907	11,47
DEZ/21	894	DEZ/21	964	7,26
MÉDIA	674,25		803,6	16,32

Fonte: Elaboração própria (2022)

É possível observar que em todos os meses (com exceção do mês de outubro) a geração real foi maior que a estimativa de energia, notando-se que a geração real foi 16,32% maior do que o estimado.

A Figura 10 apresenta os dados da Tabela 9, em que é possível verificar que a geração real de energia foi maior do que a geração estimada em todos os meses analisados.

Figura 10: Comparação de geração de energia real x estimada.

Fonte: Elaboração própria (2022)

Como notado no gráfico, a diferença entre o estimado e o real em certos meses do ano é elevada, isso ocorre devido aos valores adotados no dimensionamento, pois a estimativa de perda foi maior do que é apresentado na realidade, os valores amostrados na Figura 9 comprovam isso, apresentando também a diferença energética entre o que se esperava gerar e o que de fato foi gerado pelo sistema de energia aplicado e estudado nesta pesquisa.

Analisando a variação de geração, é possível notar a diferença do potencial energético em relação as estações do ano. O mês de junho apresentou a menor – geração em 12 meses, enquanto o mês de dezembro indicou a maior geração, desempenho que pode ser associado a inclinação do sol em relação aos módulos fotovoltaicos, a período de insolação diária menor durante o inverno do que o verão, sendo esse indicativo importante para ressaltar que o melhor período de geração é durante o verão, como relatado por Souza e Santos (2022).

4.3 ECONOMIA DA ENERGIA

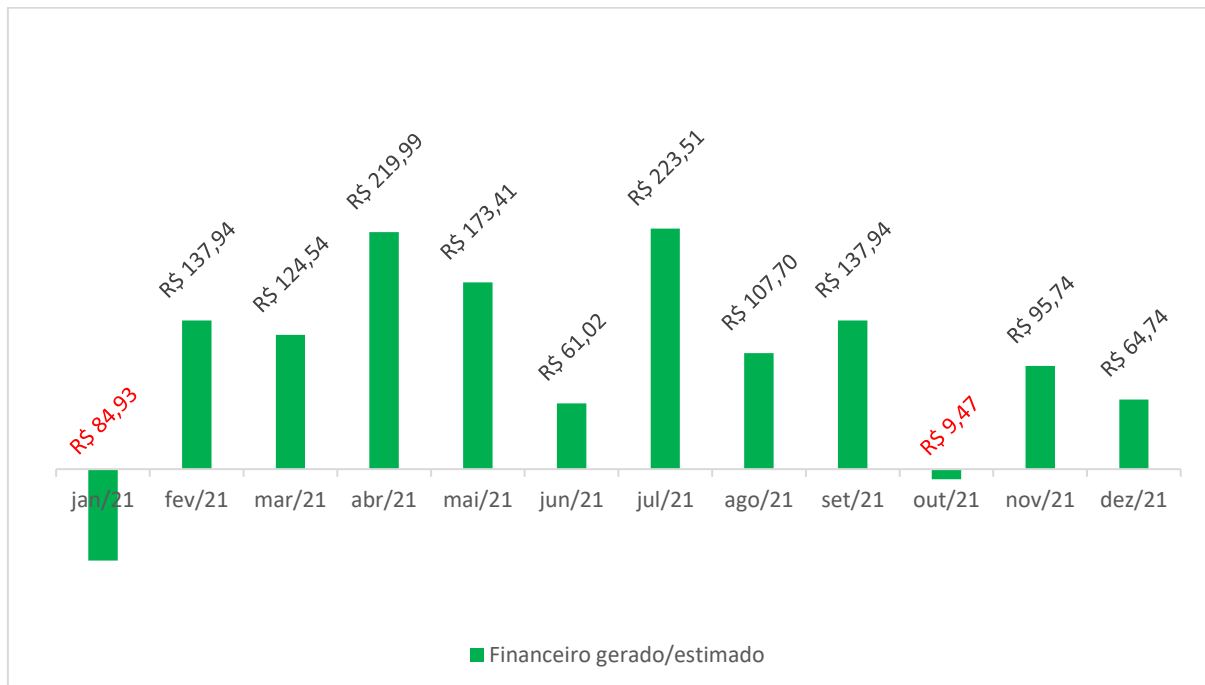
Ao que concerne a diferença financeira nos custos de energia elétrica por intermédio de sistema de geração convencional para o fotovoltaico, nota-se que, houve economia financeira significativa. A Tabela 10 apresenta a correlação de custo financeiro estimado e real, através da geração de energia, adotando 0,92 R\$/kWh como preço unitário cobrado pela concessionária de energia elétrica, esses custos não são os valores a ser pago, são valores referentes a energia elétrica gerada em kWh convertidas em R\$, e a Figura 11 apresenta as diferenças de valores de janeiro de 2021 a dezembro de 2021 que são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Preço em R\$ de energia estimada x energia gerada

MÊS	ESTIMADO	REAL
JAN/21	760,63	675,70
FEV/21	678,92	816,86
MAR/21	690,19	814,73
ABR/21	571,27	791,27
MAI/21	478,91	652,32
JUN/21	423,81	484,83
JUL/21	454,58	678,10
AGO/21	577,51	685,21
SET/21	589,86	727,80
OUT/21	694,03	684,57
NOV/21	742,28	838,02
DEZ/21	825,93	890,67
	7.487,94	8.740,08

Fonte: Elaboração própria (2022)

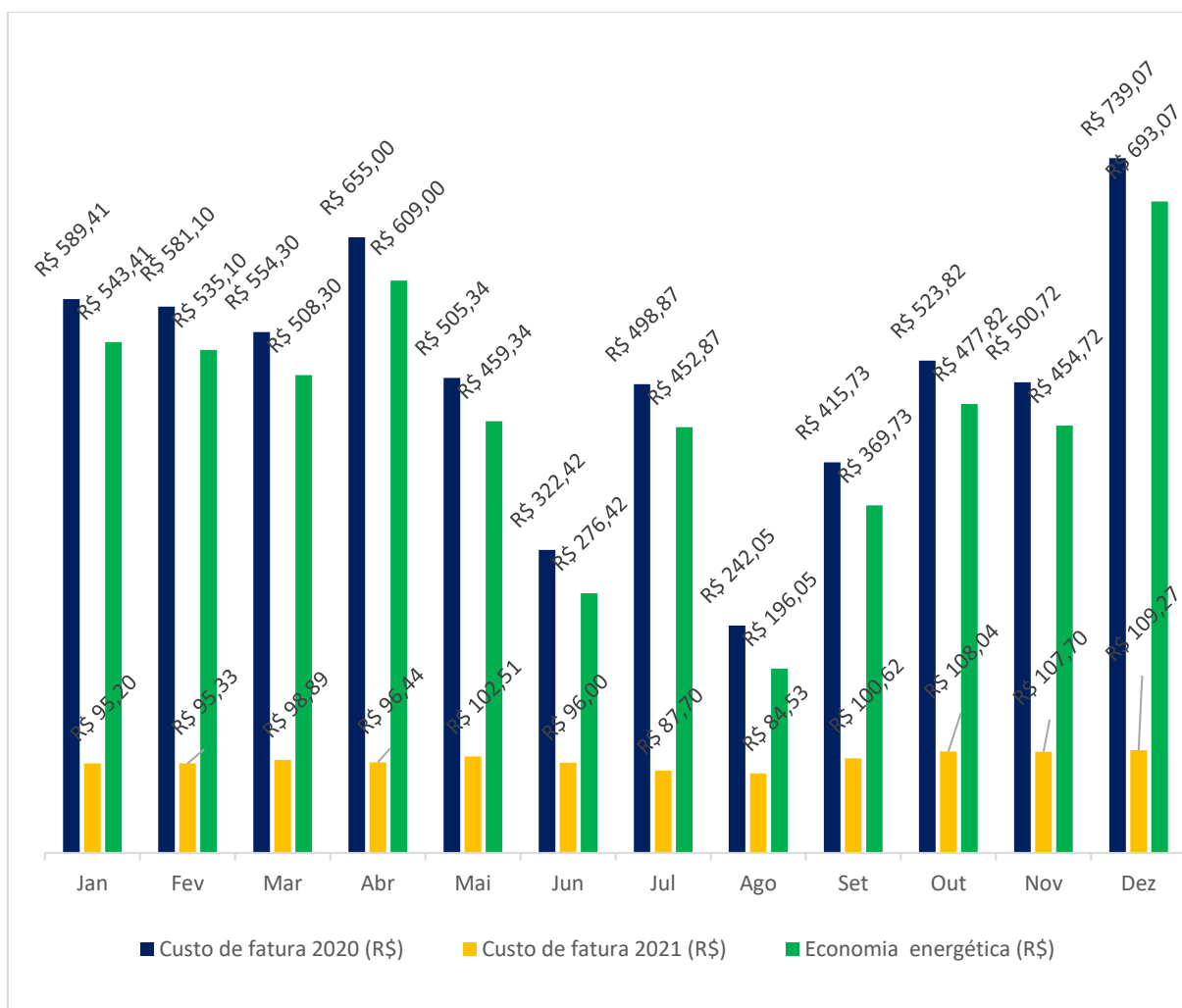
Figura 11: Diferença financeira entre a economia estimada de geração e a economia de energia gerada, janeiro 2021 a dezembro de 2021, em R\$.



Fonte: Elaboração própria (2022)

Nota-se que, o mês em que houve a maior diferença positiva foi em julho de 2021. Contudo, apesar dos expressivos números de julho, nota-se que, a maioria dos meses apresentou diferença acima de R\$ 100,00. Exceto janeiro e outubro de 2021, ao qual apresenta uma diferença negativa, houve diferença positiva em 10 dos 12 meses do ano. Vale ressaltar que, os valores relativos à diferença de consumo foram significativos.

Com o intuito de demonstrar de forma explícita a diferença no custo final de fatura de energia elétrica, a Figura 12 apresenta a ilustração da diferença do custo das faturas de 2020 comparada a 2021, dados retirados da Tabela 7, no início do tópico resultados.

Figura 12: Custo das faturas de energia antes x após geração própria, em R\$.

Fonte: Elaboração própria (2022)

Assim como apresentado anteriormente, nota-se pela apresentação gráfica que houve uma significativa redução de valores gastos com energia elétrica, quando comparada com a obtida por meio de geração de energia fotovoltaica. O mês que apresentou a maior diferença foi em dezembro de 2021, sendo esse mês de maior demanda de energia registrada.

Exceto nos meses de junho e agosto de 2021, que apresentaram os menores valores de economia mensal, todos os meses apresentaram diferença acima de R\$ 300,00. Os meses que apresentaram maior destaque, foram dezembro e abril de 2021. Esses resultados foram realizados sem levar em conta o valor do financiamento, correspondente a R\$ 440,00 mensais, valor esse que será considerado nos próximos resultados demonstrados na Tabela 11, é apresentado o custo mensal da energia, em

reais, em que o valor da parcela do financiamento foi somado ao valor mínimo cobrado na fatura de energia.

Ao apresentar o valor em reais (R\$) gerado e consumido pelo proprietário do sistema, é possível notar não apenas a vantagem financeira obtida, mas também o conforto adquirido no fato em que o usuário pode ter um consumo maior e pagar um valor menor ao final do mês quando comparado a um menor consumo sem a utilização do sistema fotovoltaico. Em um ano de análise de dados é possível notar que o sistema supre a demanda energética e gera excedentes para ampliações futuras.

Tabela 11: Relação custo x economia no ano de 2021, em reais.

MÊS	CUSTO FINANCIAMENTO	CUSTO DA FATURA	CUSTO TOTAL	ENERGIA GERADA	ENERGIA CONSUMIDA
JAN	432,00	96,20	528,17	840,88	761,52
FEV	432,00	95,33	527,33	813,28	580,17
MAR	432,00	98,89	530,89	814,73	713,20
ABR	432,00	96,44	528,44	791,27	676,25
MAI	432,00	102,51	534,51	652,32	508,11
JUN	432,00	96,00	528,00	484,83	456,38
JUL	432,00	87,70	519,70	678,10	325,19
AGO	432,00	84,53	516,53	685,21	353,83
SET	432,00	100,62	532,62	727,80	484,09
OUT	432,00	108,04	540,04	751,25	531,21
NOV	432,00	107,70	539,70	803,47	612,51
DEZ	432,00	109,27	541,27	894,02	729,00
TOTAL	5.184,00	1.183,20	6.367,20	8.937,16	6.731,46

Fonte – Elaboração Própria (2022)

Ao analisar o custo total junto com a energia consumida na residência, temos uma diferença que comprova a rentabilidade energética. O valor total pago no ano de 2020 foi de R\$ 6.128,83 (Tabela 7), enquanto o custo da energia gerada através do sistema fotovoltaico durante o período analisado (2021), também de um ano, foi de R\$ 6.367,2 resultando em R\$ 238,17 em 12 meses.

A composição da tarifa mínima, valor cobrado pela concessionária de energia elétrica, referente a taxas de manutenções de rede, iluminação pública, cobranças de adicionais de bandeira tarifaria e obrigatoriamente a compra de 50kWh para consumo, é o valor referente ao custo das tarifas. É importante lembrar que o consumo elétrico aumentou. Ao analisar o histórico do ano de 2020, mostrado na Tabela 8, foi consumido um total de 6.633,0 kWh em 12 meses, enquanto no período analisado de

1 ano com geração própria, foi consumido 7.286,0 kWh em 12 meses, o que resulta em uma diferença de 653 kWh consumidos a mais no mesmo período.

Desta forma, é possível concluir que foi pago R\$ 238,17 em 653 kWh, resultando em R\$ 0,36 cada kWh consumido. Para efeito de comparação, no ano em que foi desenvolvido o projeto e instalado o sistema, o custo adotado da unidade do kWh foi de R\$ 0,92, valor cobrado pela empresa da concessionária de energia.

Mesmo não sendo um algo utilizado para apresentações de viabilidade financeira, é possível calcular quanto o beneficiado pelo sistema arcaria ao consumir os mesmos 7.286 kWh se eles fossem adquiridos diretamente da concessionária (sem geração própria), pelo valor de R\$ 0,92 por kWh. Esse custo seria de R\$ 6.704,96 anual, o que representa um valor R\$ 602,6 maior do que o beneficiado pagou após a geração própria. Lembrando que, a eficiência do sistema ao todo naturalmente decai ao longo dos anos.

Tendo em vista o resultado dessa análise, é fácil concluirmos que apesar do alto investimento, ele gera retorno e o conforto adquirido por um consumo elétrico expandido precisa ser levado em consideração.

Deste modo, a Tabela 12 apresenta o balanço financeiro do ano de 2021, incluindo custos de financiamento, custo de fatura e a economia gerada em comparação ao ano em que houve geração solar em relação ao que não houve.

Tabela 12: Balanço financeiro 2021 (R\$)

Economia 2021	5.575,83
Financiamento 2021	5.184,00
Fatura 2021	1.183,23
Gastos 2021	6.367,20

Fonte: Elaboração própria (2022)

Na Tabela 12, a economia 2021 representa a diferença de custo da fatura antes e depois da instalação do sistema (descontando em sua composição o custo referente aos 50kWh comprados de modo obrigatório), financiamento 2021 é a soma do valor fixado, fatura 2021 é a soma do custo de fatura após a instalação e o gasto 2021 representa a somatória do financiamento e fatura. Desta forma temos o balanço financeiro anual de R\$ -791,40.

A Tabela 13 demonstra a composição da tarifa mínima, onde é obrigatoriamente feita a compra de 50 kWh, utilizando como base de preço 0,92 kWh/R\$, resultando no custo energético. O custo tarifário representa custo por transmissão de energia, tributos ao estado, cobranças adicionais de bandeiras, iluminação pública.

Tabela 13: Composição tarifa mínima

MÊS	CUSTO DA FATURA	CUSTO ENERGÉTICO	CUSTO TARIFÁRIOS
JAN	96,20	46,00	50,20
FEV	95,33	46,00	49,33
MAR	98,89	46,00	52,89
ABR	96,44	46,00	50,44
MAI	102,51	46,00	56,51
JUN	96,00	46,00	50,00
JUL	87,70	46,00	41,70
AGO	84,53	46,00	38,53
SET	100,62	46,00	54,62
OUT	108,04	46,00	62,04
NOV	107,70	46,00	61,70
DEZ	109,27	46,00	63,27
TOTAL	1.183,20	552,00	631,23

Fonte: Elaboração própria (2022)

4.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para realizar os cálculos da viabilidade econômica do empreendimento utilizado neste estudo de caso, assumiu-se que durante 60 meses o pagamento do financiamento ocorreria através de parcelas fixas. Foram utilizadas a ferramenta TIR (Taxa interna de Retorno) e VPL (Valor Presente Líquido) como ferramentas de análise para identificar se o investimento é viável e o tempo de retorno do investimento.

O valor total do sistema como citado anteriormente, foi de R\$ 19.990,00, valor esse que foi financiado em 60 parcelas com juros de 0,95% ao mês, o que resulta em parcelas de R\$432,00. A taxa de juros adotada no ano da aquisição do sistema era de 2,75% (ano 2020, a atual taxa no ano de 2023 é de 13,75).

Na Tabela 14 são apresentados os resultados referentes aos cálculos desenvolvidos no EXCEL, em que foram utilizadas as ferramentas matemáticas de análise financeira: Valor Presente Líquido (VPL).

Tabela 14: Análise de viabilidade financeira do investimento

Ano	Benefício Líquido	Fluxo de Caixa Acumulado	VP	VPA
0	-		R\$ -	R\$ -
1	-R\$ 839,80	-R\$ 839,80	-R\$ 817,32	-R\$ 817,32
2	-R\$ 839,80	-R\$ 1.679,59	-R\$ 795,44	-R\$ 1.612,76
3	-R\$ 839,80	-R\$ 2.519,39	-R\$ 774,16	-R\$ 2.386,92
4	-R\$ 839,80	-R\$ 3.359,18	-R\$ 753,44	-R\$ 3.140,35
5	-R\$ 839,80	-R\$ 4.198,98	-R\$ 733,27	-R\$ 3.873,62
6	R\$ 4.776,20	R\$ 577,23	R\$ 4.058,75	R\$ 185,12
7	R\$ 4.776,20	R\$ 5.353,43	R\$ 3.950,12	R\$ 4.135,24
8	R\$ 4.776,20	R\$ 10.129,64	R\$ 3.844,40	R\$ 7.979,64
9	R\$ 4.776,20	R\$ 14.905,84	R\$ 3.741,51	R\$ 11.721,14
10	R\$ 4.776,20	R\$ 19.682,05	R\$ 3.641,37	R\$ 15.362,51
11	R\$ 4.776,20	R\$ 24.458,25	R\$ 3.543,91	R\$ 18.906,42
12	R\$ 4.776,20	R\$ 29.234,46	R\$ 3.449,06	R\$ 22.355,49
13	R\$ 4.776,20	R\$ 34.010,66	R\$ 3.356,75	R\$ 25.712,24
14	R\$ 4.776,20	R\$ 38.786,87	R\$ 3.266,91	R\$ 28.979,15
15	-R\$ 2.223,80	R\$ 36.563,07	-R\$ 321,98	R\$ 28.657,17
16	R\$ 4.776,20	R\$ 41.339,28	R\$ 607,94	R\$ 29.265,11
17	R\$ 4.776,20	R\$ 46.115,48	R\$ 534,45	R\$ 29.799,56
18	R\$ 4.776,20	R\$ 50.891,68	R\$ 469,85	R\$ 30.269,41
19	R\$ 4.776,20	R\$ 55.667,89	R\$ 413,05	R\$ 30.682,47
20	R\$ 4.776,20	R\$ 60.444,09	R\$ 363,12	R\$ 31.045,59
21	R\$ 4.776,20	R\$ 65.220,30	R\$ 319,23	R\$ 31.364,82
22	R\$ 4.776,20	R\$ 69.996,50	R\$ 280,64	R\$ 31.645,46
23	R\$ 4.776,20	R\$ 74.772,71	R\$ 246,72	R\$ 31.892,18
24	R\$ 4.776,20	R\$ 79.548,91	R\$ 216,89	R\$ 32.109,07
25	R\$ 4.776,20	R\$ 84.325,12	R\$ 190,68	R\$ 32.299,75

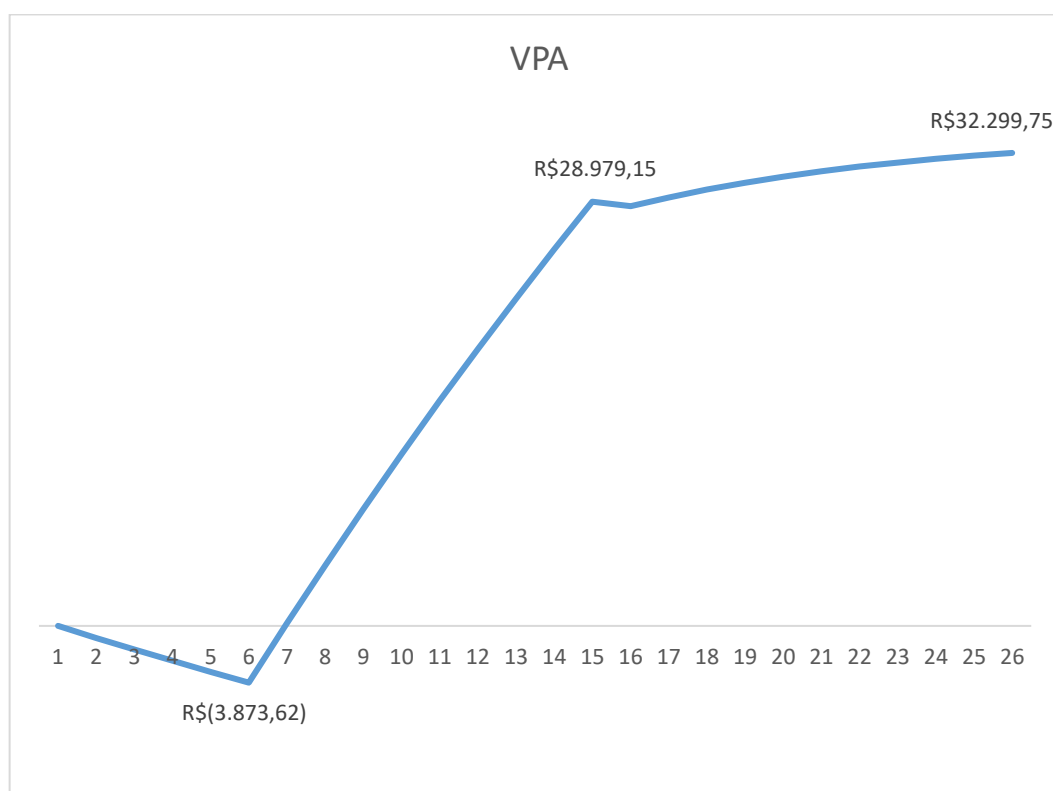
Fonte: Elaboração própria (2022)

Verifica-se na tabela 14 que até o quinto ano, o acumulativo do fluxo de caixa é negativo. A partir do sexto ano, o fluxo de caixa entra no positivo, indicando que o sistema já se pagou, devido a geração de energia do sistema fotovoltaico implantado. Ao analisar a coluna VPA, temos o acumulado financeiro, e em 2032 é possível refazer o investimento inicial, pois foi acumulado positivamente R\$ 22.355,49. Em 2035 é recomendado fazer a troca dos componentes de inversão de corrente, sendo necessário reinvestir R\$ 7000,00 (valor esse adotado em relação ao preço do mesmo inversor no ano de 2022, considerando a taxa Selic do ano de 2023, 13,75%). Através

do ganho obtido através dos anos de economia financeira, é possível não apenas investir na manutenção, como também fazer um novo investimento de mesmo valor ou até maior do inicial. Desta forma, a instalação do sistema de geração própria de energia elétrica, comprovou a viabilidade financeira do sistema, assim como Carvalho (2014).

A Figura 13 demonstra a tendencia de ascensão da curva do valor presente acumulado (VPA), no 6º ano é possível notar que a curva tocou o eixo horizontal, representando que o investimento foi retornado, a partir deste período é o dinheiro é acumulado, no 16º ano é possível ver a oscilação negativa devido ao investimento na troca dos componentes de geração própria.

Figura 13: Valor presente acumulado.



Fonte: Elaboração Própria (2022)

Através da análise dos dados, chegamos à conclusão de que pela perspectiva econômica o sistema é absolutamente rentável.

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que, o desempenho energético foi além do estimado, suprindo as necessidades de consumo energético. Ademais, também foi notória a economia obtida dos custos da fatura de energia obtidos por meio desse sistema, como demonstrado no cálculo de viabilidade econômica, a partir do sexto ano o investimento se paga, comprovando sua viabilidade. Sendo assim, nota-se que, o desempenho do sistema de energia fotovoltaica se apresenta como uma fonte de energia viável para o consumo doméstico, tendo em vista a amostra desta pesquisa e seu universo.

A ferramenta TIR se mostrou eficiente, detalhando o cenário de estudo e mostrando o tempo exato para o retorno do investimento. Como demonstrado, os cálculos de investimento se provaram viáveis onde o tempo de retorno ocorre a partir do 6º ano, lembrando que a vida útil do sistema é de aproximadamente 25 anos. Vale salientar, que esse tempo de retorno pode variar em alguns casos, pois é necessário levar em consideração o consumo de energia pode variar, assim como a irradiação solar no local estudado.

Para pesquisas futuras, sugere-se a busca para a compreensão de estudos que tenham um maior lapso temporal de dados obtidos. Este estudo analisou o período de um ano, sendo assim, sugere-se ampliar esse prazo para compreender o desempenho e economia em períodos maiores do que o estabelecido neste estudo. Importante também de ser analisado é o comportamento dos tributos em tarifas de energia elétrica, fazendo a comparação com a tarifa cobrada em sistema de geração própria, deste modo conhecendo exatamente a aplicação dos tributos federais e estaduais na composição final da cobrança mensal.

Outra sugestão é analisar as metodologias aplicadas para estimativas de geração de energia, onde a metodologia teórica adotada no presente trabalho, apresentou subdimensionamento de 16,3% em relação a dados coletados durante a operação do sistema.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. L. C. N. **Proposta De Uma Metodologia Para Obtenção De Um Gerador Síncrono Com Rotor De Ímãs Permanentes Inclinados Axialmente Para Microcentrais Elétricas a partir De Motor De Indução**. 2012. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2012.

ALVES, S. S. **Tipificação dos instrumentos de políticas de apoio à eficiência energética: a experiência mundial e o cenário nacional**. 2017, 187 p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ANEEL. Geração Distribuída. 2015. Disponível em <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>> Acesso em 24 de janeiro de 2023.

ANEEL. Bandeiras Tarifárias. S/D. Disponível em <<https://www.gov.br/aneelbandeiras-tarifarias>> Acesso em 23 de janeiro de 2023.

BIANCHINI, H. M. **Avaliação comparativa de sistemas de energia solar térmica**. 2013. 60f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BARBOSA, Tatiane Machado. **CONSTRUÇÃO, AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM ESTACIONAMENTO FOTOVOLTAICO DE 4,24 KWP NO CAMPUS II DA UFGD**. 2017. 144 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Faen, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017.

BORBA, E. N. **Energia hidrelétrica e seus principais riscos hoje no Brasil: o caso das PCH's**. 2015. 82 f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CAHAN, D. The awarding of the copley medal and the 'Discovery' of the law of conservation of energy: Joule, Mayer and Helmholtz revisited. **Notes and Records of the Royal Society**, 66, 125–139, 2012.

CANAL SOLAR. Energia solar cresce para ser a segunda maior fonte do Brasil. Disponível em <<https://canalsolar.com.br/energia-solar-cresce-para-ser-a-segunda-maior-fonte-do-brasil/>> Acesso em 25 de janeiro de 2022.

CARDOSO, M.; LIBERATO, T. V. **Sistemas Fotovoltaicos Conectador à rede: Dimensionamento e análise da viabilidade técnica e financeira**. 2017. 94 f. TCC (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2017.

CARVALHO C. M. P. **Manuel. Geração de Energia Elétrica: Fundamentos**. 1. Ed. São Paulo: Editora Érica, 2012.

CARVALHO, Francisco Ivanhoel Aguiar de. Uma avaliação financeira no uso da energia solar fotovoltaica apoiada pela resolução ANEEL 482/2012 sobre geração distribuída no setor elétrico do Brasil. 2014. 109 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Do Ceará, Faculdade de Economia. Administração. Atuária e Contabilidade, Mestrado Profissional em Administração e Controladoria, Fortaleza-CE. 2014

CRESESB. Potencial Solar – SunData v 3.0. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>> Acesso em 10 de abril de 2021.

HARRER, B. W. On the origin of energy: Metaphors and manifestations as resources for conceptualizing and measuring the invisible, imponderable. **American Journal of Physics**, 85, 454–460, 2017.

HCC ENERGIA SOLAR. O que diz a legislação de Energia Solar no Brasil? Confira 5 pontos! Disponível em <<https://hccenergiasolar.com.br/o-que-diz-a-legislacao-de-energia-solar-no-brasil-confira-5-pontos/>> Acesso em 23 de janeiro de 2022.

INEE. O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp> Acesso em 18 de agosto de 2022.

KABIR, Ehsanul; KUMAR, Pawan; KUMAR, Sandeep; ADELODUN, Adedeji A.; KIM, Ki-hyun. Solar energy : Potential and future prospects. [S. l.], v. 82, n. September 2016, p. 894–900, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.094.

KIPNIS, N. Thermodynamics and mechanical equivalent of heat. **Science & Education**, n. 23, p. 2007–2044, 2014.

KRAMER, W. et al. ‘**Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems**, Part 1: Systems and Topologies’. NREL Technical Report NREL/TP-581-42672, 2018.

MELO, N. R. **Dimensionamento e simulação de uma microrrede em um condomínio residencial utilizando geração eólica e solar**. 2016. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, Formiga - Mg, 2016.

MME. Ministério de Minas e Energia. 2008. Soluções Energéticas para Amazônia: Sistemas Híbridos. Brasília. 1 edição.

MME. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2022. 2022.

MOREIRA, C. C. Leal. **Identification and development of microgrids emergency control procedures**. 2018. 279 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica,

Department Of Electrical And Computer Engineering, University Of Porto, Porto - Portugal, 2018.

MOREIRA, H. L.; BASTOS, A. M.; SANTOS, R. B. Análise Comparativa da Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos e Eólicos para Microgeração de Energia Elétrica. **Anais...** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. 2018.

NEOSOLAR. Energia Solar no Mundo: os países campeões da Copa Fotovoltaica. 2022. Disponível em <<https://www.neosolar.com.br/blog/energia-solar-mundo-paises-campeoes/>> Acesso em 30 de janeiro de 2023.

NGSOLAR. Como funciona Energia Solar Fotovoltaica. 2022. Disponível em <<https://www.ngsolar.com.br/como-funciona-energia-solar>> Acesso em 30 de janeiro de 2023.

PASSOS, R. S. **Estudo de caso do impacto da microgeração na tensão e nas perdas de um sistema de distribuição**. 2014. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PORTAL SOLAR. Célula fotovoltaica: tudo o que você precisa saber. 2022a Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>> Acesso em 24 de janeiro de 2023.

PORTAL SOLAR. Como Funciona a Energia Solar. 2022b. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>> Acesso em 24 de janeiro de 2023.

PORTAL SOLAR. Dados do mercado de energia solar no Brasil. 2022c. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/mercado-de-energia-solar-no-brasil.html>> Acesso em 24 de janeiro de 2022.

PORTAL SOLAR. Geração distribuída de energia (GD). 2022d. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/geracao-distribuida-de-energia.html>> Acesso em 22 de janeiro de 2023.

PORTALSOLAR. Pannel solar é o item mais desejado por moradores de casas e apartamentos do Brasil. 2022e. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/consumidor/panel-solar-e-o-item-mais-desejado-por-moradores-de-casas-e-apartamentos-do-brasil>> Acesso em 24 de janeiro de 2023.

RIBEIRO, Z. B. **Parâmetros para análise de projetos de eficiência energética em eletricidade**. 2015. 144 f. Dissertação (Mestrado) — Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, 2015.

SANTOS, Raphael de Sousa; SOUZA, Lucas Barbosa e. **ORIENTAÇÃO SOLAR E GANHO TÉRMICO DAS FACHADAS EM DIFERENTES TIPOS DE TEMPO NA CIDADE DE PALMAS - TO: EPISÓDIOS DE VERÃO E DE INVERNO.** **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, [s. l], v. 11, n. 3, p. 3-23, set. 2022.

SILVA, F. E. F. **Determinação do nível de eficiência energética da envoltória do prédio da central de aulas – UEPB.** 2014. Monografia (Pós-Graduação) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

SOBRINHO, L. C. O. **DESENVOLVIMENTOS E PESQUISAS NA TERCEIRA GERAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.** 2016. 80 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

TONIM, G. **A gestão da Energia Elétrica na Indústria – Seu Suprimento e Uso Eficiente.** 2019. 112f. Dissertação de Mestrado – Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

VANNI, S. R. **Estudo da viabilidade econômica de fontes alternativas de energia de uma comunidade típica da região nordeste do Brasil.** 2018. 167f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Civil). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2018.