

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

LEONARDO HIRATA FERREIRA

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDÊNCIAIS
DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA SOLAR**

Sorocaba

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS SOROCABA
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
CURSO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS
DE MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, para obtenção do título/grau de bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Bragagnolo

Sorocaba

2023

Hirata Ferreira, Leonardo

Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais de microgeração distribuída de energia solar. / Leonardo Hirata Ferreira -- 2023. 52f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador (a): Cassiano Bragagnolo

Banca Examinadora: Anielia Fagundes Carrara, Mariusa Momenti Pitelli

Bibliografia

1. Energia Solar. 2. Viabilidade Econômica. I. Hirata Ferreira, Leonardo. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979

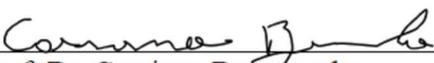
LEONARDO HIRATA FERREIRA

VIABILIDADE ECONÔMICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDÊNCIAIS DE
MICROGERAÇÃO DISTRIBUIDA DE ENERGIA SOLAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da
Universidade Federal de São Carlos, *campus*
Sorocaba, para obtenção do título/grau de
bacharel em Ciências Econômicas.
Universidade Federal de São Carlos.

Sorocaba, 27 de julho de 2023

Orientador


Prof. Dr. Cassiano Bragagnolo

Examinador


Profa. Dra. Anieli Fagundes Carrara

Examinador


Profa. Dra. Mariusa Momenti Pitelli

RESUMO

Este trabalho discute a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico residencial de microgeração distribuída, sua importância como fonte sustentável e os seus possíveis impactos nos dispêndios familiares. Apresenta-se o contexto atual da energia solar com um enfoque no passado recente da geração distribuída. Além disso, são apresentados e discutidos neste trabalho o mercado de energia solar e as perspectivas futuras, levando em consideração a implementação do Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) por meio da Lei 14.300/2022. Adicionalmente, este trabalho compreende um estudo sobre a atratividade financeira da instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, levando em consideração diversos fatores relevantes. Foram considerados a incidência solar local, os custos dos equipamentos e instalação, bem como o custo da energia fornecida pelas concessionárias de distribuição. Além disso, foram utilizados indicadores financeiros amplamente reconhecidos, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o período de retorno do investimento (Payback) e o custo nivelado da eletricidade (LCOE). Os resultados obtidos nesta pesquisa ressaltam a importância dos sistemas fotovoltaicos residenciais de microgeração distribuída na redução dos dispêndios familiares com energia elétrica, bem como na promoção de fontes limpas e sustentáveis de energia.

Palavras-chave: viabilidade econômica, energia solar, indicadores financeiros.

ABSTRACT

This paper discusses the economic viability of a residential photovoltaic system for distributed microgeneration, its importance as a sustainable energy source, and its potential impact on household expenses. The current context of solar energy is presented with a focus on recent developments in distributed generation. Additionally, this paper presents and discusses the solar energy market and prospects, considering the implementation of the Legal Framework for Micro and Minigeneration (LFMM) through Law 14,300/2022. Furthermore, this study encompasses an analysis of the financial attractiveness of installing grid-connected photovoltaic systems, considering various relevant factors such as local solar incidence, equipment, and installation costs, as well as the cost of energy supplied by distribution companies. Widely recognized financial indicators, including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period, and Levelized Cost of Electricity (LCOE), were used. The findings emphasize the significance of residential photovoltaic systems in reducing household energy expenses and promoting clean and sustainable energy sources.

Keywords: economic viability, solar energy, financial indicators.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 DISPENDIO COM ENERGIA ELÉTRICA.....	13
2.2 FUNCIONAMENTO DA TECNOLOGIA.....	15
2.3 MERCADO NO BRASIL.....	16
2.4 MARCO LEGAL DA MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUIDA.....	22
3. METODOLOGIA.....	25
3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	26
3.2 CUSTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	27
3.3 GERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICA.....	28
3.4 INDICADORES DE VIABILIDADE ECONOMICA FINANCEIRA.....	29
3.4.1 Custo nivelado de energia (LCOE).....	29
3.4.2 Valor presente líquido (VPL).....	30
3.4.3 Taxa interna de retorno (TIR).....	31
3.4.4 <i>Payback</i>	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
4.1 ANÁLISE DO INVESTIMENTO INICIAL E GERAÇÃO DE ENERGIA.....	33
4.2 ANÁLISE DOS INDICADORES FINANCEIROS.....	38
4.2.1 Custo nivelado de energia (LCOE).....	40
4.2.2 <i>Vpl</i> , <i>Tir</i> e <i>Payback</i>	42
5. CONCLUSÃO.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética tem sido impulsionado pelo aumento do crescimento econômico global e pela expansão da população mundial nas últimas décadas. Conforme mencionado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2020), a média mundial de demanda energética apresentou um crescimento anual de aproximadamente 1,9% na década de 2010.

No contexto global, os combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, ocupam uma posição dominante, representando aproximadamente 84% da matriz energética global, conforme estudos realizados pela Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2020). No entanto, no Brasil, na contramão da tendência global, a partir da década de 1970 investiu-se de forma mais acentuada em energias renováveis por meio de programas nacionais como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) que contribuíram para a expansão dos investimentos em energia renovável. Parte disso se deu à crise do petróleo da década de 1970, que impôs como prioridade a busca de estratégias alternativas para o suprimento de energia com aumento de políticas de eficiência energética e acima de tudo em alternativas energéticas substitutas, com destaque para ao gás natural e a energia nuclear. Todavia, de maneira progressiva e fundamentada na preocupação social, mais recentemente têm sido realizados investimentos mais significativos em energia eólica e solar. Essas duas fontes têm ganhado destaque tanto em âmbito global quanto nacional ao longo do século XXI, uma vez que possibilitam a garantia da segurança energética por meio da descarbonização.

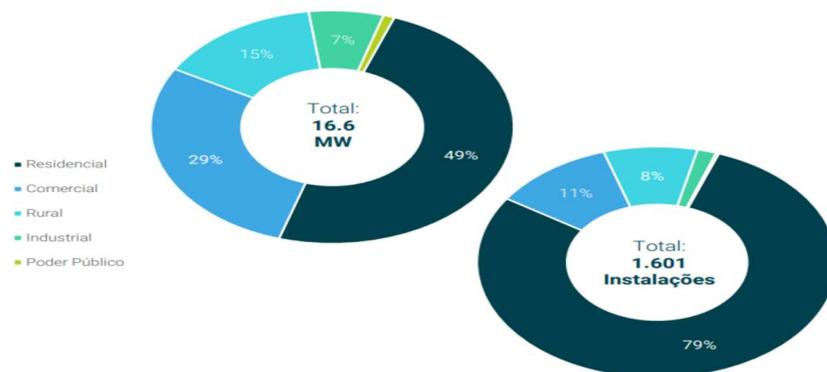
No Brasil, no final da década de 1970, foram desenvolvidos os primeiros sistemas solares térmicos para o aquecimento de água em residências. Esses sistemas eram simples e acessíveis e ficaram bastante populares na época na região Nordeste, devido ao fato que a região apresenta um clima quente de temperaturas elevadas. No entanto, de acordo com o Portal G1 (2011) somente em 2011 foi inaugurada a primeira usina solar de grande porte, na cidade de Tauá, no estado do Ceará. Essa iniciativa foi realizada pela empresa de energia MPX, pertencente ao grupo EBX de Eike Batista, e contava com uma capacidade de geração de 1 megawatt de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas.

No contexto residencial, a utilização da energia solar passou a se popularizar com a regulamentação da Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na qual foram estabelecidas normativas para a geração de energia elétrica a partir de energias renováveis. Esse marco permitiu uma notória mudança no mercado de fotovoltaicos à medida que possibilitou que os consumidores pudessem gerar a sua própria energia elétrica e utilizar o excedente para abater o consumo da rede elétrica convencional.

Dessa forma, impulsionada pelos avanços tecnológicos no setor fotovoltaico que resultaram na redução dos custos e no aumento da eficiência dos sistemas, juntamente com a melhoria significativa da acessibilidade e viabilidade econômica, a implementação da energia solar foi adotada e popularizada no Brasil, tanto no contexto comercial, quanto residencial ou industrial. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), em conjunto com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023), a energia solar fotovoltaica representa uma capacidade instalada de 25.009 MW, o que corresponde a 11,6% da Matriz Elétrica Brasileira.

Em relação a participação por classes de consumo de acordo com a pesquisa da (ANEEL, 2023) disponibilizada no Estudo Estratégico de Geração Distribuída (GREENER, 2023) a partir da Figura 1 constata-se que no ano de 2022 a classe residencial representou 49% da potência instalada o que representa quase a metade da potência adicionada no ano de 2022, desta forma, a classe residencial apresenta forte relevância no cenário nacional. Na geração distribuída a potência residencial acumulada passou de 43% de representatividade em 2021 para 49% em 2022, e no ano de 2022 representou aproximadamente 79% das instalações. A pesquisa da Greener (2023) ainda aponta que cerca de 90% do número acumulado de instalações pertencem a pessoa física e os 10% restantes a pessoa jurídica.

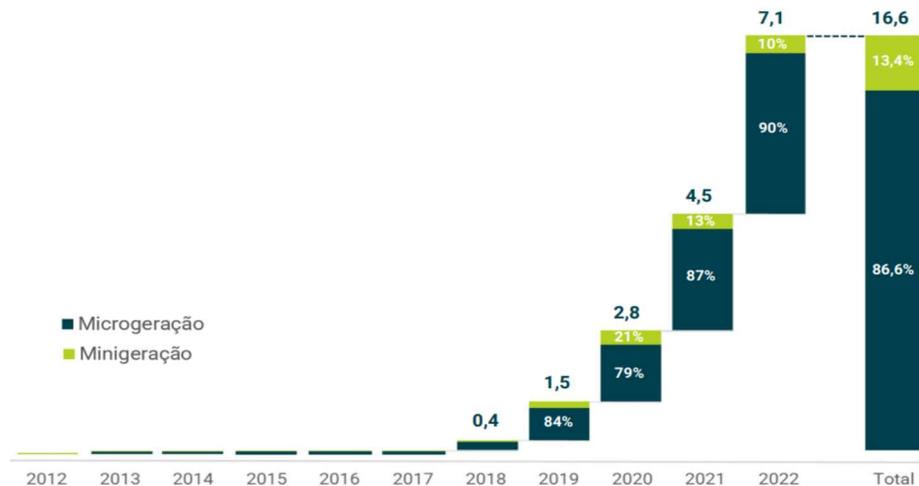
Figura 1 – Participação por classe no volume acumulado de consumo no Brasil em 2022



Fonte: ANEEL (2023).

Do ponto de vista histórico, ao analisar a série temporal de 2012 a 2022 a partir da Figura 2, constata-se que a partir de 2019, de acordo com Greener (2023) houve um perceptível aumento na potência instalada na geração distribuída que corresponde tanto a microgeração distribuída que apresentam potência instalada menor ou igual a 75 kW como a minigeração distribuída que corresponde a sistemas maiores que 75kW e menores ou igual a 5MW. No ano final da série, 2022, a capacidade instalada de 7,1 GW correspondeu a aproximadamente 43% da capacidade instalada desde 2012, representando um crescimento de aproximadamente 75% em relação a 2021, quando foram instalados 4,5 GW de potência. Por fim, a Figura 2 indica que a Microgeração e Minigeração de acordo com a ANEEL (2023) são responsáveis por 16,6GW de volume conectado a rede ao final da série histórica, em que 86,6% correspondem a microgeração distribuída e 13,4% a minigeração distribuída.

Figura 2 - Volume adicionado e acumulado conectado à rede em GW na Microgeração e Minigeração de – 2012 a 2022



Fonte: ANEEL (2023).

Portanto, diante dos pontos supracitados pode-se avaliar um forte crescimento da energia solar sobretudo nas instalações em residências. Esse significativo crescimento é resultado dos diversos benefícios econômicos associados à instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica. Quando instalados e dimensionados corretamente, tais sistemas apresentam vantagens como baixos custos de manutenção. Além disso, promovem estabilidade de preços na economia familiar, uma vez que a energia solar não está sujeita a flutuações do mercado global de energia, tornando os preços mais estáveis e previsíveis (HCC Energia solar, 2023).

Outro ponto a ser observado é o impacto da conta de energia no orçamento familiar sobretudo da população de baixa renda que compromete relativamente uma parte da renda maior para a quitação deste dispêndio e como a energia solar no longo prazo pode reduzir a restrição orçamentária familiar.

Os dispêndios em energia elétrica têm um impacto contínuo no orçamento familiar dado que é indispensável na sociedade moderna para o funcionamento de diversas atividades diárias sendo de extrema importância na qualidade de vida no âmbito familiar. Desse modo, o consumo de energia elétrica é uma despesa necessária e por consequência os aumentos nos custos da energia podem afetar diretamente as finanças familiares. Para minimizar esses impactos financeiros no orçamento familiar, além das medidas de conscientização sobre o consumo e a adoção de práticas de eficiência o uso da energia solar pode vir a apresentar uma redução a longo prazo nos custos de energia.

Portanto, o objetivo dessa monografia consiste em realizar a viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico residencial de microgeração distribuída por meio de uma simulação de implementação do sistema em uma residência localizada no estado de São Paulo, mais especificamente no município de Sorocaba. Essa implementação leva em consideração para os cálculos de dimensionamento uma instalação realizada no mês de janeiro de 2023 e um consumo médio mensal da família em torno de 1000 kWh. Assim, foram utilizados indicadores financeiros amplamente reconhecidos, como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o período de retorno do investimento (*Payback*) e o custo nivelado da eletricidade (LCOE) com o intuito de identificar a hipótese de viabilidade. Ademais, o estudo busca identificar a importância da energia solar como fonte sustentável e entender o mercado de energia solar no âmbito nacional.

Este estudo está organizado da seguinte maneira. Na primeira seção, faz-se uma breve introdução sobre o tema, fornecendo um contexto inicial sobre o estudo. Na segunda seção é apresentada a revisão bibliográfica em que são exploradas as teorias relacionadas ao assunto, enquanto na terceira apresenta-se a metodologia adotada. Na quarta seção apresentam-se os resultados e a discussão dos resultados. Por fim, na quinta e última seção, apresentam-se as conclusões acerca dos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

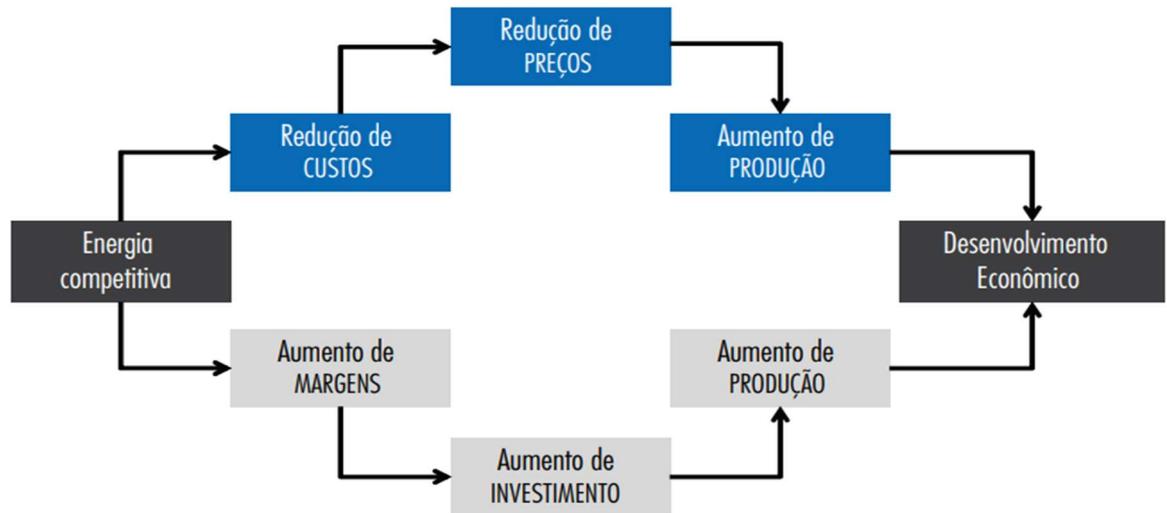
2.1 DISPÊNDIO COM ENERGIA ELÉTRICA

A energia elétrica utilizada no contexto residencial destina-se a diversas finalidades, tais como a cocção de alimentos, a iluminação, o funcionamento de eletrodomésticos e eletrônicos, a segurança e ao suprimento básico de eletricidade. Os eletrodomésticos de maior consumo domiciliar de energia elétrica são, em ordem decrescente de consumo médio mensal, o ar-condicionado e o aquecedor, a churrasqueira elétrica e a torneira elétrica. Ao considerar os itens mais frequentes o chuveiro elétrico, a geladeira e o ar-condicionado são altos consumidores (REZENDE, 2010).

Os gastos com energia exercem uma influência direta na formação dos preços na economia, impactando a inflação, o consumo e a produção. Esses efeitos vão além do âmbito familiar, pois as empresas repassam esses custos para os produtos, afetando seus preços finais. Como toda atividade econômica moderna requer energia, o nível de preços e a inflação energética é um mecanismo crítico na determinação dos custos e dos preços das mercadorias e, neste sentido, quando a fonte de energia pode ser substituída é possível reduzir os custos por meio da busca de fontes alternativas de energia, como a da energia solar.

Por meio da Figura 3, é possível identificar algumas expectativas econômicas relacionadas ao uso de uma fonte de energia competitiva, além de fazer uma simples analogia com a utilização da energia solar no âmbito residencial. Ademais, é fundamental destacar que a implementação da energia solar residencial oferece benefícios significativos tanto do ponto de vista ambiental quanto financeiro. Essa prática não apenas contribui para a preservação do meio ambiente, mas também proporciona economias substanciais nos gastos familiares com energia. Conseqüentemente, após o período de retorno do investimento (*payback*), a família verá uma redução na restrição orçamentária, permitindo-lhe usufruir de maior bem-estar econômico e financeiro (FREITAS, 2022).

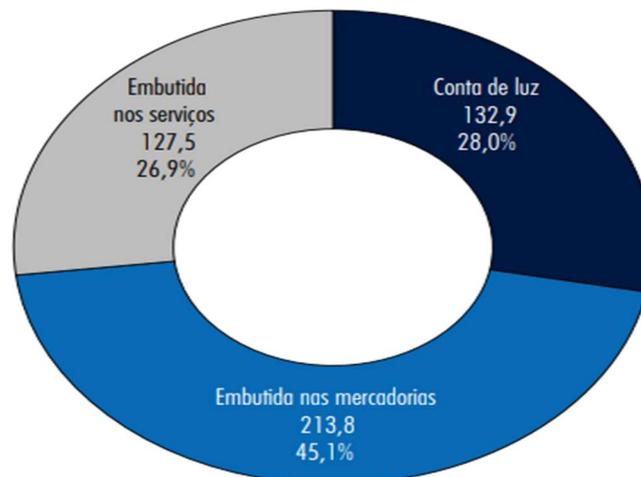
Figura 3 – Energia competitiva e suas ampliações



Fonte: Freitas (2022).

No que tange os efeitos indiretos do encarecimento da energia sobre a economia de acordo com Freitas (2022) em parceria com a Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres – ABRACE – que representa os grandes consumidores de energia, entre 2000 e 2019 a tarifa residencial de energia elétrica acumulou uma variação em termos nominais de 276,7% enquanto os rendimentos das famílias elevaram-se em 534,1%. Apesar do aumento dos rendimentos das familiar ser praticamente o dobro da variação da tarifa no período analisado, ainda assim, aconteceu uma perda de bem-estar por parte das famílias dado que a energia está embutida nos bens e serviços conforme apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Consumo de energia elétrica das famílias, em Gwh no Brasil, no ano de 2016



Fonte: Freitas (2022).

A partir da Figura 4 fica evidente que o consumo de energia elétricas das famílias tem uma representatividade maior na parte embutida nas mercadorias, o que representa, aproximadamente 45,1% do consumo de energia total seja este direto pela conta de luz ou indiretamente embutida nos serviços e nas mercadorias. Deste modo, conforme Freitas (2022) a consequência imediata da elevação das tarifas de energia elétricas das empresas é repassada via custos para preços e por fim acaba onerando as famílias. Deste modo, a energia solar não só no âmbito residencial resulta em ganhos de bem-estar da família, a utilização destas tecnologias nas indústrias contribui de forma significativa para a redução da restrição orçamentária da família.

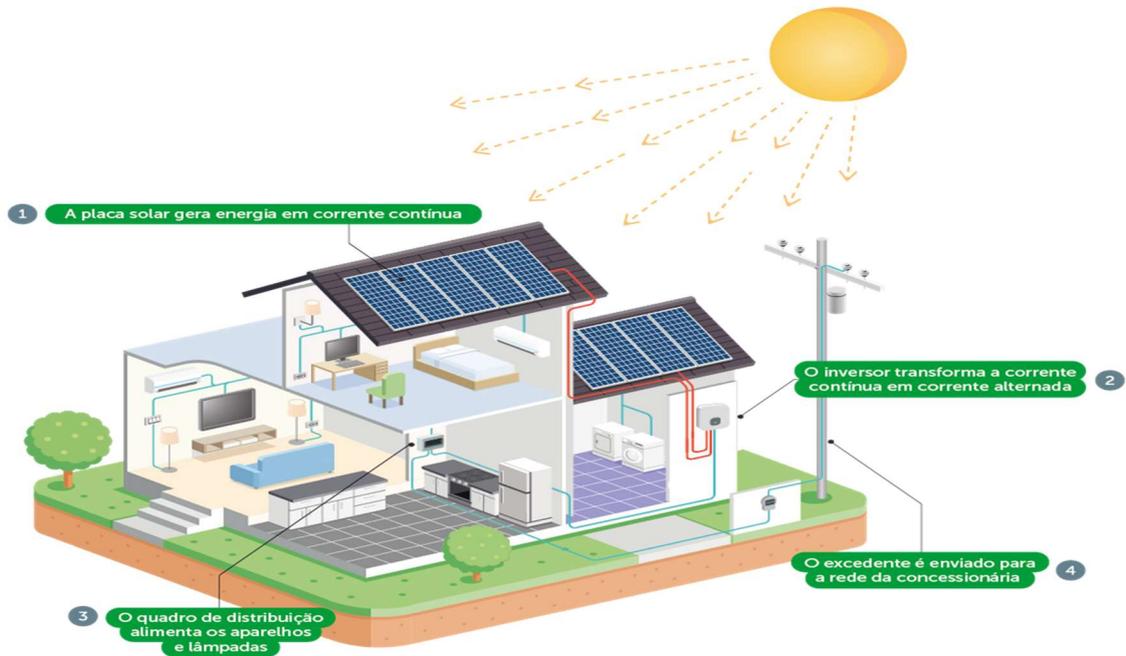
2.2 FUNCIONAMENTO DA TECNOLOGIA

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como placas solares, são responsáveis pela conversão direta da irradiação solar em energia elétrica, de acordo com Intelbras (2023). Por meio do efeito fotovoltaico, ocorre a geração de uma diferença de potencial no painel fotovoltaico, uma vez que parte de sua composição consiste em materiais semicondutores. Assim, o módulo é capaz de gerar energia elétrica em corrente contínua quando exposto à irradiação solar.

Conforme apresentado na Figura 5 a partir da Intelbras (2023) a energia gerada pelo painel solar é direcionada para o inversor, um equipamento responsável por transformar a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), a fim de torná-la compatível com a corrente utilizada na residência. Dessa forma, a energia é ajustada de acordo com a frequência de 60 Hz. A energia de saída do inversor é então conectada à rede elétrica da residência, geralmente por

meio do quadro de distribuição. Por fim, o excedente de energia gerada pode ser enviado de volta à rede da concessionária.

Figura 5 – Detalhamento do processo de produção da energia solar



Fonte: Intelbras (2023).

Outro ponto, de acordo com Intelbras (2023) a geração de energia solar pode ser classificada como *On Grid* e *Off Grid*. A primeira classificação ocorre quando o sistema de energia solar está conectado com a rede elétrica da concessionária de energia, estes sistemas são mais utilizados em áreas urbanas. Já o sistema *off grid* é completamente autônomo a medida que não está conectada a rede da concessionária e desta forma a energia produzida é armazenada em bancos de bateria. Portanto para residências em áreas rurais onde não existe infraestrutura de rede elétrica é utilizado esse sistema *off grid*.

2.3 MERCADO NO BRASIL

Segundo Sauer (2006), o mercado de energia solar no Brasil teve início na década de 1980 por meio do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL) criado pelo Governo Federal como resposta à crise do petróleo dado a necessidade de encontrar fontes de energia alternativas ao petróleo, uma vez que cerca de 80% do petróleo consumido no Brasil era importado. O programa tinha como objetivo incentivar a produção de álcool combustível a partir da cana de

açúcar como alternativa para dependência dos derivados do petróleo com intuito de evitar também o aumento da dependência externa.

Nesse contexto, conforme Fedrizzi (2002), foram instalados os primeiros sistemas de geração de energia solar com intuito de alimentar as bombas de água nas plantações sobretudo em regiões remotas e com pouca infraestrutura elétrica, onde o bombeamento de água era uma necessidade importante para a agricultura e outras atividades.

A partir de 2002 mais incentivos pontuais às energias renováveis foram implementadas como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que previa a instalação, conforme Ministério de Minas e Energia (2004), de 3.300 MW de capacidade de geração de energia elétrica renovável até 2011 com foco em grandes usinas. A partir de 2012 com a criação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), de fato permitiu-se que os consumidores gerassem a sua própria energia solar em suas residências (ENEEL, 2012).

Ao longo dos anos, tem ocorrido um notável progresso na adoção da energia solar no Brasil. Apesar dos desafios iniciais, como altos custos e escassez de tecnologia, os avanços tecnológicos e os incentivos governamentais e regulatórios têm desempenhado um papel fundamental na democratização do acesso à energia solar no país.

Especificamente, de acordo com Diamandis (2014) a redução dos preços dos sistemas solares tem sido um elemento crucial nesse processo. Os avanços nas áreas de semicondutores, vide Figura 6, e o aumento da produção de células solares têm possibilitado uma significativa diminuição nos custos dos painéis solares de silício. Essa tendência de declínio tem sido exponencialmente negativa, o que significa que os preços das células de silício têm caído consideravelmente ao longo do tempo o que impacta de forma direta nos custos de produção dos módulos fotovoltaicos dado que esses módulos são compostos por células solares de silício.

Assim, conforme Greener (2023) os módulos fotovoltaicos apresentam em torno de 38% a 50% do preço final do sistema fotovoltaico e desta forma é um componente importante a ser analisado na precificação. Outro ponto a ser analisado é que os módulos fotovoltaicos têm como principal insumo o silício metálico que representa cerca de 60% da estrutura dos custos de insumos do módulo fotovoltaico e portanto, vide Diamandis (2014), a redução de preço desse insumo impacta diretamente o preços dos módulos fotovoltaicos e por consequência contribui para a redução do preço do sistema de energia solar.

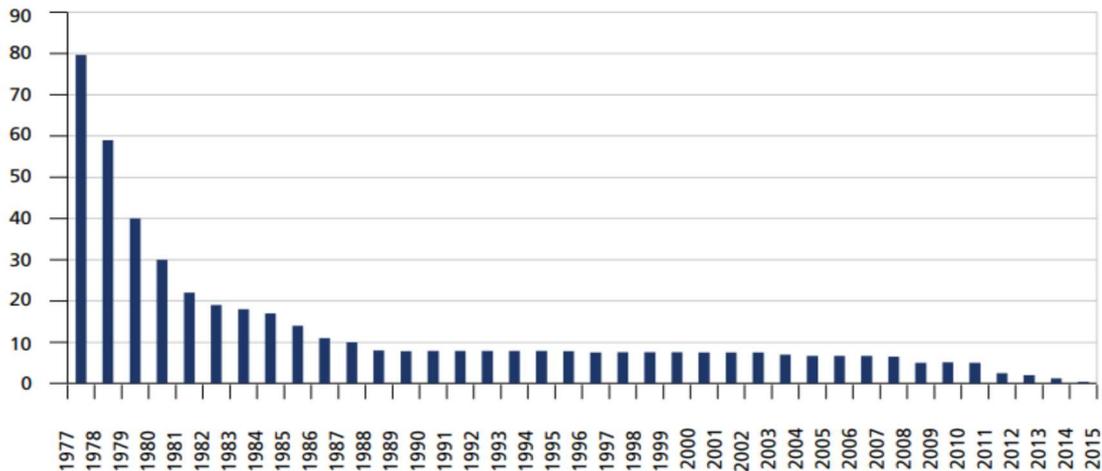
Essa redução nos preços tem viabilizado a instalação de sistemas solares em residências, empresas e outros empreendimentos, tornando a energia solar uma opção cada vez mais acessível e atrativa. Além disso, conforme Silva (2015) a existência de linhas de financiamento e políticas de incentivo tem estimulado ainda mais o crescimento do setor solar no Brasil. Dentre os incentivos podem-se destacar:

- O Convênio Número 101, de 1997, do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ), isenta do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) os equipamentos destinados à geração de energia elétrica por meio de sistemas eólicos e solares. No entanto, não abrange todos os componentes do sistema solar, como medidores e inversores.
- Regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na Resolução Normativa número 482, datada de 17 de abril de 2012, foi estabelecido o Sistema de Compensação para Mini e Microgeração Distribuídas. Nesse sistema, os consumidores que geram sua própria energia elétrica poderão injetar o excedente na rede pública e, dessa forma, somente pagarão a diferença entre o que foi injetado e o que foi consumido. É importante ressaltar que os empreendimentos de minigeração distribuída estão limitados a uma potência máxima de 1 MW.
- Isenção de PIS/PASEP e COFINS na geração distribuída: A geração distribuída de energia solar também pode se beneficiar da isenção do Programa de Integração Social (PIS) e da Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) sobre a energia produzida.
- Linhas de financiamento e incentivos bancários: Existem linhas de financiamento especiais, com taxas de juros mais baixas e prazos mais longos para a instalação da energia solar.

Portanto, os incentivos, avanços tecnológicos e a redução dos custos dos sistemas solares têm sido fatores determinantes na expansão da energia solar no país, possibilitando que

um número cada vez maior de pessoas e empresas possam se beneficiar dessa fonte de energia limpa e renovável.

Figura 6 – Histórico do preço de células de silício no Brasil – 1977 a 2015 em (U\$\$/W)



Fonte: Diamandis (2014).

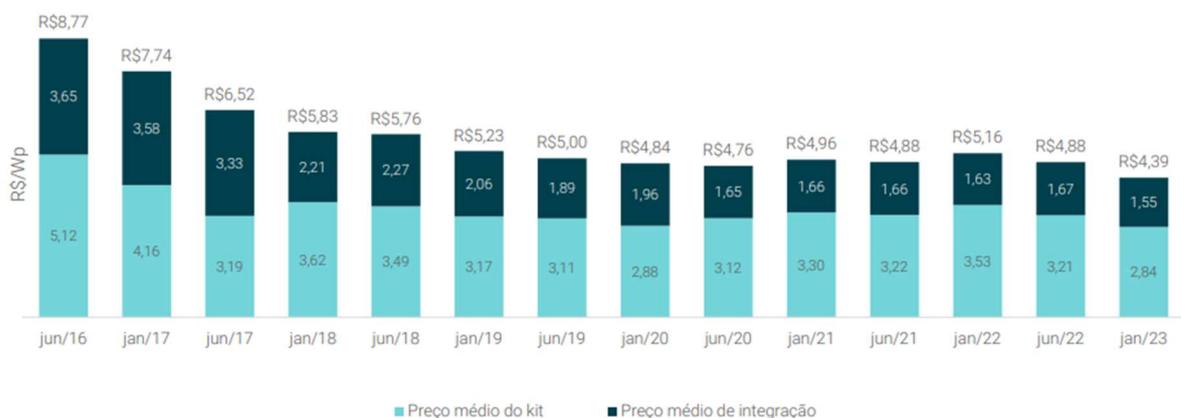
Com base nos dados apresentados na Figura 6, é possível observar uma notável redução no preço em dólar por watt da energia solar. Ao longo do período analisado, o valor por watt diminuiu significativamente, passando de aproximadamente 80 U\$\$/w para apenas 0,36 U\$\$/w (DIAMANDIS, 2014).

Outro fator importante reside no fato do aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos que permitem que os módulos gerem mais energia a partir da mesma área da superfície. Atualmente, de acordo com o Casarin (2021) existem módulos fotovoltaicos que apresentam uma eficiência em torno de 25% deste modo o painel solar converte cerca de 25% da energia que incide sobre o painel por metro quadrado.

Desse modo pode-se perceber um padrão no aumento da demanda por energia solar residencial à medida que ocorre a diminuição dos custos do investimento em energia solar, que pode ser observado a partir da Figura 7 baseado no preço de um sistema de 4 quilowatt-pico (kWp), a unidade de medida kWp, de acordo com o Portal Solar, é utilizada para indicar a capacidade máxima de geração de energia elétrica de um sistema de painéis solares sob condições ideais de irradiação. Em relação ao aumento da demanda, este pode ser observado a partir da Figura 2, apresentada na introdução deste trabalho, que indica que o volume adicionado e acumulado na rede obteve um aumento expressivo de crescimento a partir do ano de 2018 caracterizado por um movimento exponencial do volume.

Por parte dos custos, vide Figura 7, o sistema residencial acumula uma redução de 50% desde 2016. Em relação aos custos de instalação para o mesmo período acumula uma redução de 42% enquanto o preço médio dos *kits*, que de acordo com a Greener (2023) são compostos por: módulos fotovoltaico, inversor, sistema de montagem, sistema de cabeamento e sistema de proteção, apresentaram uma redução de 55%, o que valida os argumentos supracitados sobre ganhos de produtividade e os avanços tecnológicos do setor fotovoltaico.

Figura 7 – Histórico da evolução dos preços de sistemas fotovoltaicos no Brasil de janeiro 2016 a janeiro de 2023 (R\$/Wp)



Fonte: Greener (2023).

Ademais, conforme GT SOLAR (2018) apenas em 2015 a produção nacional de módulos fotovoltaicos atingiu uma escala significativa. Um dos fatores que dificultam a produção nacional destes equipamentos pode ser explicado por meio da redução dos preços internacional dos módulos. Somado a isso, a isenção de impostos para a importação desses equipamentos contribui para o processo de importação. Esse cenário contribui para que o mercado nacional seja composto por equipamentos importados, sobretudo, os equipamentos eletrônicos que compõem o *kit* fotovoltaico. De acordo com HCC Energia Solar (2022) os principais componentes do *kit* fotovoltaico que são os módulos e inversores são importados da China e por consequência a taxa de câmbio influencia no preço do produto. Ademais, a logística internacional vide preço do frete também contribui para as oscilações de preço no mercado nacional, conforme a HCC Energia Solar (2022) momentos de incertezas como a pandemia contribuem para o aumento do valor do frete e do tempo médio de entrega dos equipamentos somado a isso nesta época ocorreu uma depreciação do real frente ao dólar o que resultou em um aumento do preço médio do *kit* fotovoltaico em 2022, vide Figura 7.

Assim, o mercado nacional de energia solar está relacionado por meio das distribuidoras de equipamentos fotovoltaicos que são empresas que atuam por meio de importações de equipamentos e por consequência realizam a intermediação na cadeia de suprimentos nacional da indústria fotovoltaica. Desse modo, as distribuidoras atuam na intermediação direta entre os fabricantes internacionais de equipamentos e instaladores que atuam no âmbito nacional.

Do ponto de vista regional, o Brasil é privilegiado com um vasto potencial de energia solar devido à alta incidência de luz solar em todo o seu território. Em termos regionais, a região sul-sudeste se destaca na capacidade instalada de geração distribuída em 2022, sendo a região sudeste a líder em investimentos nesse setor. No ano de 2022, foram direcionados mais de 10 bilhões de reais para projetos solares nessa região, representando aproximadamente 34% de toda a capacidade adicionada no país nesse período (GREENER, 2023).

Esses investimentos expressivos demonstram o reconhecimento do potencial energético do Brasil e o compromisso em expandir a utilização da energia solar como uma fonte limpa e sustentável. Conforme pode-se observar na Tabela 1, a região sudeste tem se destacado como um centro de desenvolvimento nesse setor, impulsionando a economia local, gerando empregos e diversificando a matriz energética.

Tabela 1 – Dez maiores estados por potência adicionada em (MW) e investimentos (R\$ Bilhões) em energia solar entre janeiro e dezembro de 2022

UF	Potência Adicionada em (MW)	Investimentos (R\$ Bilhões)
SP	1074	4,8
MG	839	3,8
RS	806	3,6
PR	746	3,4
MT	352	1,6
BA	323	1,5
SC	294	1,3
RJ	282	1,3
GO	273	1,2
PE	255	1,1

Fonte: ANEEL (2023).

Diante dos dados supracitados a energia solar apresenta, dado os avanços, um futuro promissor à medida que globalmente vem tendo ganhos de produtividade por meio do aumento

da demanda e da produção global, este último atrelado principalmente aos avanços tecnológicos do setor. Outro ponto que contribui para o crescimento do setor está relacionado a questões ambientais que hoje são pautas relevantes nas agendas globais. A agenda global estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU) tem como um dos objetivos promover o desenvolvimento sustentável em todo o mundo por meio de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que abrangem uma gama de questões como o meio ambiente (ONU, 2023).

Deste modo a energia solar e sua implementação contribuem para o alcance de vários objetivos globais, incluindo (ONU, 2023):

- ODS7 - Energia limpa e acessível: a energia solar atende essa demanda à medida que promove e contribui para suprir a demanda de energia limpa em consequência contribui para a redução da dependência dos combustíveis fósseis.
- ODS9 – Indústria, inovação e infraestrutura: a energia solar tem a capacidade de impulsionar o desenvolvimento de novas indústrias e contribui para o setor de infraestrutura, criação de emprego e oportunidades econômicas.
- ODS13 - Ação contra a mudança global do clima: a energia solar não emite gases do efeito estufa o que contribui para atenuar os impactos das mudanças climáticas.

2.4 MARCO LEGAL DA MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamentou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) por meio da Micro e Minigeração Distribuída. No entanto, diversos debates recentes envolvendo consultas públicas e diferentes segmentos da sociedade identificaram a necessidade da revisão. Como consequência identificou-se a necessidade de assegurar o mercado de energia solar via Lei Federal por meio do Projeto de Lei 5.802/2019 com objetivo de criar o Marco Legal para Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) no Brasil.

No dia 05 de janeiro de 2022 o Presidente da República sancionou o projeto de Lei 5.829/2019 que institui o Marco Legal da MMGD por meio da Lei 14.300/2022. Deste modo, a partir da criação da referida Lei e após o seu período de transição ficou estabelecido que a partir de 2029 as novas regras tarifárias serão definidas conforme o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a valoração dos benefícios da geração distribuída (GD) de acordo com a regulamentação da ANEEL. (GREENER, 2023).

A principal mudança a partir da criação do Marco Legal reside no sistema de compensação. De acordo com o estudo estratégico de geração distribuída da Greener (2023) a nova regra a partir da Lei 14.300/2022, vide Figura 8, reduz o valor da energia elétrica compensada. Deste modo, a nova regra conforme a figura abaixo reduz o valor da energia elétrica a ser compensada. Assim após a Lei 14.300/2022 ocorre o pagamento da componente TUSD fio B que se refere aos dispêndios vinculados ao uso da infraestrutura de distribuição da concessionária, iniciando em 15% em 2023 até 90% em 2028. A partir de 2029 de acordo com Greener (2023) a regra de compensação vai depender de um estudo realizado pela Aneel e não necessariamente manterá a cobrança de 100% do Fio B.

Figura 8 – Comparação entre o antigo sistema de compensação REN 482/2021 com o atual a partir da Lei 14.300/2022



Fonte: Greener (2023).

Desse modo, a partir da Figura 8 observa-se a diferença no sistema de compensação antes e depois da Lei 14.300/2022. Enquanto antes o valor injetado era igual ao compensado após a Lei a compensação será menor e ela depende do peso da componente tarifária da concessionária de energia elétrica referente a TUSD fio B.

Portanto, a transição para a nova regra dependerá de dois principais fatores. Solicitações de conexão anteriores a data de início da regra 06/01/2023 permanecerá com o direito adquirido até 2045, ou seja, o sistema de compensação será de 100%. O sistema residencial na qual solicitou orçamento de conexão depois do início deverá entrar na regra de transição conforme a Figura 9 (GREENER, 2023).

Figura 9 – Síntese da regra de transição do Marco Legal



Fonte: Greener (2023).

Assim, conforme a pesquisa da Greener (2023) a regra de transição estabelece um pagamento gradual da TUSD fio B para os consumidores que solicitarem acesso a conexão depois de 06/01/2023. Durante esse período de transição ocorrerá um aumento gradativo do percentual das componentes tarifárias relativas a TUSD fio B. Esse percentual inicia em 15% em 2023 e cresce até 90% em 2028. A partir de 2029 as regras de compensação vão depender de um estudo a ser realizado pela ANEEL.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de projetar as principais métricas envolvidas em uma análise econômico-financeira do investimento em energia solar residencial, realizou-se uma simulação para uma residência localizada no município de Sorocaba no estado de São Paulo. A residência em questão apresenta um consumo médio hipotético mensal estipulado para fins de cálculo de aproximadamente 1000 kWh nos últimos 12 meses.

De modo a demonstrar os fatores e métricas que envolvem a viabilidade econômica do projeto de energia solar residencial, serão apresentados nesta seção conceitos amplamente utilizados em projetos de viabilidade econômica – financeira de investimentos:

- Valor presente: é o valor de uma operação financeira na data presente. É um valor intermediário entre o montante e o capital (PUCCINIP, 2011).
- Valor futuro: é o valor de uma operação financeira em qualquer data compreendida entre a data atual e o vencimento da operação (PUCCINIP, 2011).
- Fluxo de caixa: é o conjunto de entradas e saídas de capital por um determinado período (CARVALHO NETO, 2013).
- Taxa Mínima de Atratividade (TMA): é a taxa mínima que um investidor se propõe a pagar ou receber pelo montante investido ou aplicado em determinado bem (PILÃO, 2003).
- Taxa Interna de Retorno: é a taxa de remuneração que se obtém sobre determinado fluxo de caixa (REIS, 2019).
- *Payback* Descontado: corresponde ao período ao qual deverá ser esperado para que se obtenha retorno do investimento (REIS, 2019).

Na análise financeira esses indicadores apresentam um papel fundamental para a tomada de decisão sobre a implementação do sistema de energia solar de modo a contribuir para o processo de tomada correta de decisão, bem como analisar e compreender os riscos e incertezas que envolvem o investimento e por fim na alocação eficiente dos recursos.

Ao avaliar os indicadores financeiros, é possível analisar a rentabilidade do projeto, estimar o período de retorno do investimento, calcular o valor presente líquido e a taxa interna de retorno, entre outros aspectos relevantes. Essas métricas fornecem uma visão clara da

viabilidade econômica do sistema de energia solar, considerando os custos de instalação, a economia de energia ao longo do tempo e outros fatores financeiros relevantes.

O sistema de energia solar instalado e homologado na residência segue as regras anteriores à Lei 14.300/2022, garantindo direito adquirido até o ano de 2045. Para a análise dos componentes do sistema fotovoltaico, considerou-se uma irradiação diária de 6 kWh por metro quadrado para os cálculos vide a Figura 10. Com base nas informações mencionadas acima, será realizado o dimensionamento de um sistema fotovoltaico equivalente capaz de suprir a demanda energética da residência simulada neste estudo.

Além disso, serão avaliados os indicadores de viabilidade financeira e os impactos no dispêndio familiar decorrentes da implementação a longo prazo do sistema fotovoltaico conectado à rede.

3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

No presente estudo, será realizado o dimensionamento do sistema de energia para uma residência localizada em Sorocaba, interior de São Paulo, com um consumo médio mensal de 1000 kWh. O cálculo do tamanho do sistema real (TS), conforme Da Silva (2022), será realizado por meio da expressão (1). Essa expressão consiste em dividir o consumo médio diário pelo índice de Hora de Sol Pleno (HSP). O índice HSP é determinado com base na localização geográfica da residência e, neste caso específico no presente estudo, para o estado de São Paulo, foi adotado o valor de 6 kWh/m². Ademais, é importante considerar as perdas no sistema. Para este estudo será adotado um valor de perdas de 20% que, conforme Solfácil (2023), são atribuídos para painéis solares instalados voltado ao leste ou oeste.

$$TS(real) = \left(\frac{\text{Consumo}}{HSP} \right) * (1 + Perdas) \quad (1)$$

A partir do tamanho do sistema, é possível calcular a quantidade de painéis fotovoltaicos. A quantidade de painéis é calculada por meio da expressão (2) que representa a divisão entre o tamanho do sistema pela potência da placa solar utilizada no projeto.

$$Quantidade\ de\ paineis = \frac{TS(real)*1000}{Potência\ do\ painel} \quad (2)$$

Em relação ao dimensionamento das estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos, leva-se em consideração o tipo de telhado da residência, que para realizar o orçamento na

distribuidora foi considerado o de fibrocimento. No projeto, optou-se por utilizar três arranjos de cinco módulos cada, totalizando 15 módulos fotovoltaicos no total. Quanto ao inversor, foi selecionado um inversor SAJ com capacidade de 8 kW que é adequado à potência do sistema.

3.2 CUSTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para realizar uma avaliação abrangente da viabilidade da implementação de um sistema solar residencial, é de suma importância obter informações detalhadas sobre os custos dos equipamentos necessários, da instalação e da manutenção. Além disso, é imprescindível realizar uma análise prévia do tamanho do sistema, das marcas e modelos dos equipamentos selecionados, da qualidade da mão de obra envolvida e da localização geográfica onde o serviço será executado. Esses fatores desempenham um papel crucial na determinação da atratividade e da eficácia do sistema solar residencial proposto.

O investimento inicial no sistema solar residencial é essencialmente constituído pelos custos dos equipamentos e serviços relacionados à instalação. De forma resumida, os principais equipamentos necessários para a instalação compreendem os painéis fotovoltaicos (FV), o inversor de frequência, as estruturas de fixação, o sistema de cabeamento e o sistema de proteção. Esses componentes desempenham papéis fundamentais no funcionamento adequado e seguro do sistema solar residencial (HCC Energia Solar, 2022).

De acordo com Greener (2022) definição dos preços dos sistemas fotovoltaicos é estabelecida com base em duas principais componentes. O valor final desses sistemas é determinado considerando os custos totais do serviço de instalação e dos equipamentos necessários para a implementação da energia solar na residência, os quais são incluídos nos valores, conforme demonstrado na expressão (3).

$$\text{Preço do sistema FV} = \text{Preço do serviço} + \text{Preço do kit fotovoltaico} \quad (3)$$

Para avaliar o custo do *kit* fotovoltaico, procedeu-se com a cotação de um sistema de 8 Kwp, conforme o dimensionamento prévio realizado. A cotação foi realizada por meio da plataforma digital de uma distribuidora de energia solar, empresa especializada na distribuição de equipamentos de energia solar em nível nacional.

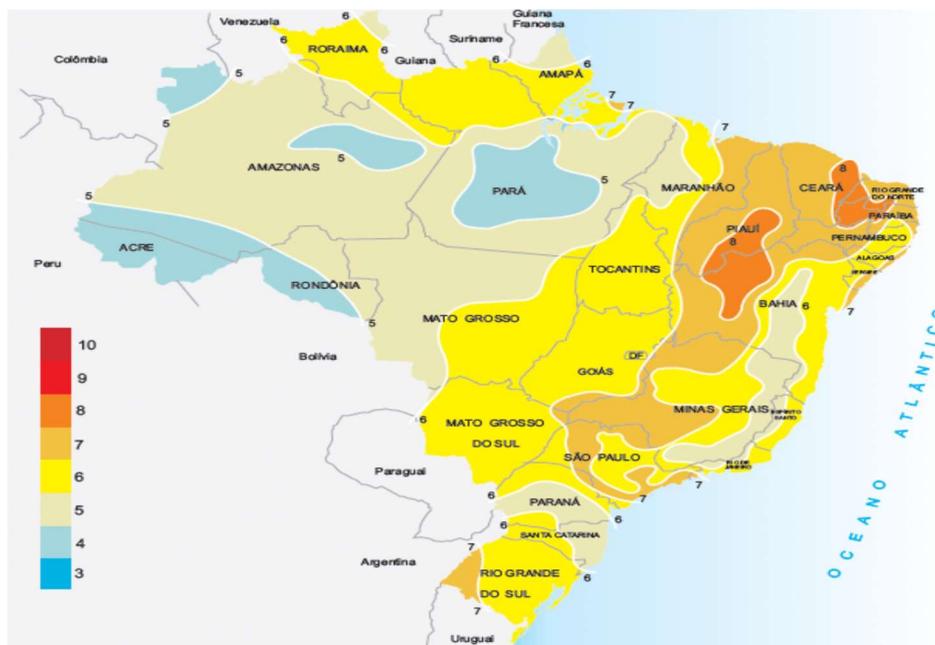
Além disso, é realizado um cálculo para estimar o custo do serviço de instalação do sistema de energia solar, considerando a diferença entre o preço total final do projeto e o custo

dos equipamentos necessários para implementar o sistema de energia solar residencial. O preço final do sistema, engloba tanto os equipamentos quanto a instalação, é determinado com base na média de mercado para a implementação de um sistema de 8 kWp que vide Figura 12 fica em torno de 3,92 R\$/Wp, conforme demonstrado nos estudos de caso apresentados no Estudo Estratégico de Geração Distribuída (GREENER, 2023). Dessa forma, o custo do serviço de instalação é estimado utilizando a expressão (3), que corresponde à diferença entre o preço total do sistema e o valor do *kit* fotovoltaico.

3.3 GERAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Outro aspecto analisado é o valor estimado da geração de energia solar e seu impacto financeiro correspondente resultantes da instalação dos painéis fotovoltaicos na residência localizada no estado de São Paulo. Para realizar essa avaliação, é necessário consultar o Atlas Solarimétrico, conforme apresentado na Figura 10, a fim de determinar a média anual de horas diárias de exposição dos painéis fotovoltaicos da residência à radiação solar. Essa informação desempenha um papel fundamental nos cálculos de viabilidade financeira.

Figura 10 – Atlas Solarimétrico do Brasil com a média anual da irradiação diária



Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

De acordo com as informações fornecidas pelo mapa solarimétrico, a localização de São Paulo possui uma média anual de aproximadamente 6 horas diárias de irradiação solar. É

relevante destacar que, para evitar distorções, utiliza-se a média ao longo do ano, considerando a variação sazonal da irradiação solar, com maior intensidade no verão em comparação ao inverno. Dessa forma, considerando as 6 horas diárias de irradiação solar para São Paulo, a potência do módulo do projeto e as perdas de 20%, é possível realizar a estimativa da geração diária de energia por placa em kWh, conforme apresentado, vide Dantas (2018), na expressão (4).

$$\text{Geração} = \text{Pot do módulo} * \text{Qtde de horas de sol por dia} * (1 - \text{perdas}) \quad (4)$$

Um aspecto adicional a ser analisado é que a geração de energia, expressão (4), não segue uma produção linear ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema, devido ao fator de decaimento das placas fotovoltaicas ao longo do tempo.

Conforme as especificações técnicas, as placas solares apresentam um fator de decaimento anual, no primeiro ano, não superior a 2%, e, nos anos subsequentes, um fator não superior a 0,55%. Esses dados são relevantes para estimar a geração de energia ao longo do tempo e considerar o desempenho das placas fotovoltaicas ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema (CANADIAN, 2023).

Ademais, na primeira etapa de análise, é essencial determinar o período do fluxo de caixa. O tempo de vida útil garantido é de cerca de 25 anos. Com base nessas informações, pode-se estabelecer que o sistema fotovoltaico residencial terá uma vida útil média de 25 anos, com a substituição dos módulos fotovoltaicos necessária após esse período.

Para estimar as receitas do fluxo de caixa, é necessário calcular a quantidade de energia produzida ao longo dos 25 anos e seu valor financeiro correspondente. A partir do desenvolvimento da expressão (4), é possível estimar a geração mensal de energia solar do sistema residencial. Essa estimativa será utilizada para calcular as receitas ao longo do tempo e avaliar a viabilidade financeira do projeto.

3.4 INDICADORES DE VIABILIDADE ECONOMICA FINANCEIRA

3.4.1 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

De acordo com Kimumoto 2020, o método do Custo Nivelado de Energia (LCOE, na sigla em inglês) é utilizado para comparar o custo da eletricidade produzida em usinas de

diferentes capacidades de geração e comparar diversas fontes energéticas de modo a identificar a mais competitiva dado que é uma métrica que informa o valor monetário na mesma base de diversas fontes de energia. Esse método pode ser calculado de forma simplificada por meio da expressão (5) definida pela divisão do capital investido (CAPEX) somado aos custos operacionais (OPEX) menos o residual pela energia gerada ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema.

$$LCOE \text{ simples} = \frac{Capex+Opex-Residual}{EP} \quad (5)$$

Outra forma de verificar o Custo Nivelado de Energia (LCOE), segundo Dantas (2018) é por meio da inclusão da taxa de desconto. Neste caso, o Custo Nivelado de Energia considera o Valor Presente Líquido (VPL) em que as os investimentos, fluxos de ganhos e despesas durante a vida útil do projeto são calculados a valor presente. Nessa expressão a geração de eletricidade ao longo dos 25 anos é levada ao valor presente vide que é considerado que a eletricidade gerada implicitamente corresponde a ganhos em decorrência da venda dessa eletricidade, então são consequências de transformações matemáticas. Assim, a partir da expressão (6), os fluxos de investimento e custos de manutenção bem como a geração de energia considerando as perdas de eficiência são calculados a valor presente.

$$LCOE = \frac{i_0 + \sum_{n=1}^N (Inv \ i + CO\&M \ i) * (1 + tax \)^{-i}}{\sum_{n=1}^N (G.ene \ anual \ i) * (1 + taxa)^{-i}} \quad (6)$$

Na expressão (6) são considerados diversos parâmetros, tais como o investimento inicial (i_0), que pode ser calculado por meio da expressão (3), o investimento no ano i ($Inv \ i$), os custos de operações e manutenções do ano i ($CO\&M$), a energia produzida anualmente ($G.ene \ anual$) levando em conta o fator de decaimento anual da eficiência da placa e a taxa de desconto anual.

3.4.2 Valor Presente Líquido (VPL)

De acordo com Reis (2017), o método do Valor Presente Líquido (VPL) visa analisar a viabilidade do projeto de energia solar residencial de modo a constatar se o projeto é viável ou não. O método do (VPL) é uma métrica importante pois considera o valor do dinheiro no tempo por meio da diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuro gerado ao longo dos (N) anos de vida útil do sistema de energia solar descontado pela taxa mínima de atratividade (TMA) e o investimento inicial necessário para realizá-lo.

$$VPL = FCo + \sum_{n=1}^N \frac{FCi}{(1+TMA)^n} \quad (7)$$

Na expressão (7) o (FCi) é o fluxo de caixa livre gerado no período i ; (TMA) é a taxa mínima de atratividade; (t) é o período considerado. O cálculo do VPL pode ser mais bem especificado por meio da divisão em 3 etapas. A primeira etapa consiste em estimar os fluxos de caixa que o sistema de energia solar irá gerar ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema. Nessa etapa é considerado a receita proveniente da multiplicação da alíquota da energia solar em R\$/kWh pela energia produzida no ano vigente em kWh considerando as perdas de geração do painel fotovoltaico ao longo da vida útil do sistema e a inflação energética estimada, que para este estudo é de 6,51% a.a. Para calcular o saldo no ano é realizado a diferença entre as receitas e as despesas em cada ano.

Para o cálculo do valor presente dos fluxos de caixa futuro é considera uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que corresponde a uma taxa de desconto que reflete o custo de oportunidade dos recursos investidos no projeto. A TMA escolhida foi de 12% a.a. em termos nominais estimada por meio da taxa fornecida pelo título IPCA+ 2045 que é, de acordo com o tesouro direto (2023), IPCA + 6,51% de modo a considerar uma estimativa de inflação implícita média de 5,49%.

Por fim, na última etapa ocorre a comparação do valor presente do fluxo de caixa com o valor inicial. O VPL vide expressão (7) é resultado da diferença do somatório entre o valor presente dos fluxos de caixa do período de $n = 1$ a $n = 25$ e o investimento inicial necessário para iniciar o projeto. Deste modo caso o VPL seja maior que zero implica que o projeto apresenta um retorno maior que o custo de oportunidade dos recursos investidos no título IPCA + e deste modo é viável a partir do indicador do VPL.

3.4.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

O cálculo da taxa interna de retorno (TIR) permite analisar a taxa de retorno esperada do projeto de energia solar residencial. A expressão da TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL do fluxo de caixa futuro de um projeto a zero (REIS, 2019).

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{FCi}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (8)$$

Essa métrica financeira é utilizada para avaliar a viabilidade financeira do projeto. A TIR permite além de contribuir para o processo de decisão de alocação dos recursos também possibilita a comparação de diferentes oportunidades de investimentos e determinar qual dessas oportunidades oferece o maior potencial de retorno.

Embora a TIR seja uma métrica valiosa na análise da viabilidade do sistema de energia solar essa métrica apresenta algumas limitações a serem consideradas, como a exemplo do pressuposto de reinvestimento dado que a TIR assume que os fluxos de caixa gerado são reinvestidos a taxa interna de retorno. Essa métrica pode não se alinhar com a realidade principalmente em ambientes econômicos mais voláteis.

3.4.4 *Payback*

De acordo com Reis (2019), o *Payback* é um método simples e direto de análise de investimentos aplicado para identificar o tempo necessário para que o investimento retorne o capital investido. Para o cálculo do *Payback* é necessário somar os fluxos de caixa de cada período até que o valor acumulado do somatório seja igual ao investimento inicial. Portanto para o cálculo do indicador leva-se em consideração as receitas e despesas do projeto, o investimento inicial dado pela expressão (3) e o fluxo de caixa de cada período até que o total acumulado seja igual ou superior ao investimento inicial.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DO INVESTIMENTO INICIAL E GERAÇÃO DE ENERGIA

A partir das expressões (1) e (2), presentes no capítulo anterior, é possível realizar o dimensionamento do sistema de energia solar fotovoltaico para a demanda média mensal de 1000 kWh de uma residência localizada em Sorocaba – no estado de São Paulo. A partir da expressão (1) resultados apontam que é necessário um sistema de aproximadamente 6,7kWp. Logo, será considerado uma potência do sistema levemente superior de 8 kWp a fim de atender a demanda específica do objeto de estudo e possíveis ampliações do consumo, além de proteger a geração caso ocorra perdas de geração acima de 20%, bem como, perdas de eficiência de geração dos módulos fotovoltaicos.

$$TS(real) = \left(\frac{\text{Consumo}}{\frac{30}{HSP}} \right) * (1 + Perdas)$$

$$TS(real) = \left(\frac{\left(\frac{1000}{30} \right)}{6} \right) * \left(1 + \frac{20}{100} \right) = 6,7 \text{ kWp} , \text{ considerado } 8 \text{ kWp}.$$

Conforme a expressão (2) a quantidade de painéis necessária para suprir a demanda da residência, a partir da escolha do painel solar de 545 V.P. da Canadian disponível na plataforma de orçamentos da distribuidora, são de 15 placas fotovoltaicas.

$$Quantidade \ de \ paineis = \frac{TS(real)*1000}{Potência \ do \ painel}$$

$$Quantidade \ de \ paineis = \left(\frac{8*1000}{545} \right) = 15 \text{ painéis}.$$

Com base nas expressões (1) e (2), é possível realizar uma pesquisa de mercado para obter informações sobre os preços dos componentes necessários para a implementação do sistema de energia solar residencial. O preço do conjunto de componentes fotovoltaicos é estabelecido com base no preço de venda da plataforma da distribuidora de energia solar. A distribuidora é uma das principais empresas de distribuição e importação no setor solar, e de acordo com a pesquisa realizada pela GREENER (2023), é reconhecida como uma das

empresas mais lembradas pelos instaladores de energia solar. O valor total dos equipamentos é de R\$ 19.813,25 e está detalhado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Componentes do *kit* fotovoltaico utilizado na implementação do sistema de energia solar residencial de 8Kwp

Produto	Quantidade	Item
Painel 545Wp Canadian	15	Painel Solar
Inversor SAJ 8KW	1	Inversor
Presilha Superior com Parafusos	24	Estrutura de Fixação
Presilha Lateral com Parafusos	12	
Emendas Perfil	6	
Presilha de Aterramento	3	
Parafuso Fibrocimento	24	
Perfil de Alumínio 3,6m	6	
Perfil de Alumínio 3,6m	6	
Conector Solar MC6	3	
Cabo Preto 4mm	45	
Cabo Vermelho 4mm	45	

Fonte: Plataforma da distribuidora (2023).

Outro aspecto a ser considerado é a comparação entre os preços dos conjuntos fotovoltaicos oferecidos pela distribuidora escolhida para a cotação do material em relação a média de preços praticados no mercado nacional. Através da Figura 11, baseada na pesquisa de mercado conduzida pela Greener (2023), é possível visualizar os preços dos *kits* fotovoltaicos por meio da comparação dos preços praticados pelas distribuidoras nacionais de conjuntos fotovoltaicos residenciais, expressos em reais por watt-pico (R\$/Wp).

Figura 11 – Comparativo dos preços dos *kits* fotovoltaicos residenciais em (R\$/Wp)



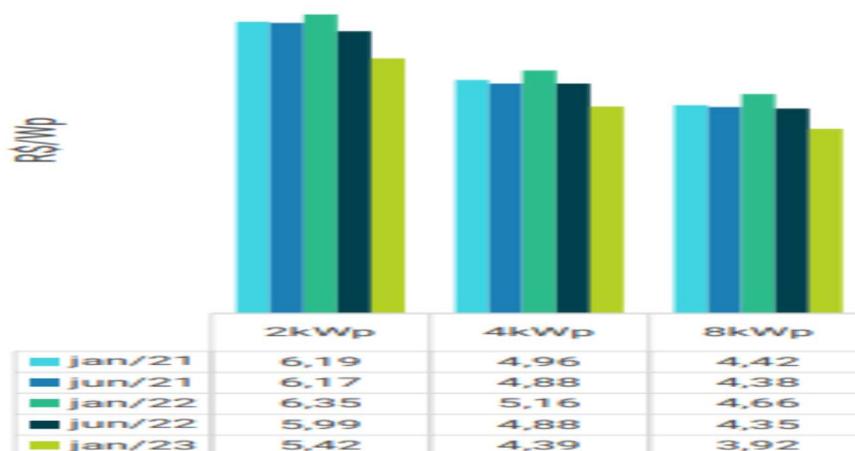
Fonte: Greener (2023).

Assim, é possível realizar uma comparação entre o preço estabelecido com base na plataforma de orçamentos da distribuidora, utilizado no estudo de caso, e a média de preços praticada no mercado nacional. Em relação à média do mercado, onde um sistema de 8 kWp custa, em janeiro de 2023, R\$ 2,66 por watt-pico (R\$/Wp), o sistema desenvolvido através da distribuidora possui um custo de R\$ 2,47 por watt-pico (R\$/Wp). Portanto, dado a magnitude da distribuidora escolhida na cotação o preço do conjunto fotovoltaico para o projeto em questão apresenta uma redução de 7,2% em relação à média nacional. Essa redução pode ser explicada pelo poder de negociação diferenciado da distribuidora junto aos fabricantes vide altos volumes de importação de equipamentos.

De acordo com a pesquisa realizada pela Greener (2023), uma renomada consultoria comercial especializada em estudos e pesquisas do setor de energias renováveis, o preço médio dos sistemas fotovoltaicos, conforme apresentado na Figura 12, é obtido a partir da média dos preços fornecidos por milhares de integradores de todo o Brasil que participaram da pesquisa de geração distribuída conduzida pela Greener (2023).

O preço do sistema de 8 kWp em janeiro de 2023 é de 3,92 R\$/Wp e, portanto, para este sistema de 8.000 Wp o custo total do investimento de acordo com a média do mercado nacional será realizado por meio da multiplicação na mesma base da potência do sistema com o preço do Wp, o que resulta no valor de R\$ 31.360,00.

Figura 12 – Comparativo de preços dos sistemas fotovoltaicos residenciais para o cliente final em (R\$/Wp)



Fonte: Greener (2023).

Na Figura 12 são apresentadas as médias de preços dos sistemas fotovoltaicos, o sistema engloba os custos com equipamentos e com a instalação, comercializados no mercado para o cliente final nos meses de janeiro e junho dos anos 2021, 2022 e 2023. Constatou-se que, para o mês de janeiro, a média em termos nominais do preço por kWp foi de 4,33 (R\$/Wp). Ao analisar os sistemas de 8 kWp no ano de 2023, verificou-se que o preço aplicado foi inferior à média em 10,45%. Além disso, ao comparar o mês de janeiro de 2023 com o mesmo período do ano anterior, observou-se uma redução ainda mais significativa, com os preços em 2023 aproximadamente 15,8% mais baixos em relação a 2022.

Em 2023, observou-se uma expressiva redução nos preços, resultado da interação de vários elementos. Um dos principais, de acordo com Casarin (2023) foi a ampla disponibilidade de equipamentos fotovoltaicos no mercado o que caracteriza um excesso de oferta, combinada a uma demanda inicialmente baixa durante o mesmo período. Outrossim, vide Greener (2023) merece destaque a alteração nas regulamentações relacionadas à geração distribuída, em conformidade com a transição estabelecida pelo marco legal baseado na Lei 14.300/22. Além disso, o aumento gradual da taxa Selic entre 2021 e 2023, que se manteve em 13,75% ao ano, teve um impacto negativo ao desencorajar investimentos em energia solar, especialmente no setor residencial. Por fim, conforme Hein (2023) houve um maior controle na oferta de financiamentos bancários em 2023, resultando em uma redução na quantidade de financiamentos disponíveis e no acesso à capitalização por parte dos consumidores finais. De acordo com o mercado, vide pesquisa da Greener (2023) esse acontecimento é considerado um dos principais gargalos que tem restringido as vendas do setor neste início de ano. Outro ponto, vide HCC Energia Solar (2022), que contribuiu para a redução dos preços refere-se à normalização do frete internacional e estabilização do dólar pós o período de pandemia.

Portanto para verificar o custo de aquisição do sistema fotovoltaico do estudo de viabilidade o preço do serviço de instalação considerado será o da média do mercado que para um sistema de 8kWp será verificado por meio da expressão (3). Também por meio da expressão (3), dado o preço do serviço é possível encontrar o preço total do sistema de energia solar vide que o valor dos equipamentos, de acordo com a plataforma da distribuidora dos equipamentos de energia solar totalizam R\$ 19.813,25.

$$\text{Preço do serviço} = 8000 * (3,92 - 2,66) = \text{R\$ } 10.080$$

$$\text{Preço do sistema FV} = 10.080 + 19.813,25 = \text{R\$ } 29.893,25$$

Para a análise de viabilidade econômica, será considerado o investimento total de R\$ 29.893,25 para um sistema de 8 kWp. Esse montante equivale a 95,32% do valor médio do sistema no Brasil em 2023, ou seja, representa um desconto de 4,67% em relação à média nacional. Do valor total do sistema fotovoltaico, o serviço corresponde a R\$ 10.080,00, enquanto os equipamentos totalizam R\$ 19.813,25. Esses valores representam, respectivamente, 33,71% e 66,28% do custo total do sistema de energia solar.

A geração do sistema dimensionado a partir dos pontos supracitados é indicado de acordo com a expressão (4) que relaciona a geração em kWh do sistema de energia solar residencial. Desse modo, a partir do desenvolvimento da expressão é possível estimar a geração anual do sistema de 8 kWp.

$$\text{Geração} = \text{Pot do módulo} * \text{Qtde de horas de sol por dia} * (1 - \text{perdas})$$

$$\text{Geração por placa/dia} = 550 * 6 * (1 - 0,2) = 2.640 \text{ W}$$

$$\text{Geração por placa/dia} = 2,64 \text{ kWh/dia}$$

$$\text{Geração mensal estimada} = 2,64 * 30 * 15 = 1.188 \text{ kWh/ mês}$$

Para estabelecer uma estimativa mais conservadora da geração de energia, considera-se um total de 360 dias de geração anual. Portanto, a geração anual de energia em kWh é obtida multiplicando-se a estimativa mensal de geração por doze meses. Essa abordagem conservadora leva em conta eventuais variações sazonais e dias não produtivos ao longo do ano.

$$\text{Geração anual estimada} = 1.188 * 12 = 14.256 \text{ kWh/ano}$$

A geração mensal estimada pode ser convertida para resultado financeiro à medida que é cobrado um valor mensal por kWh consumido. Desse modo a partir da multiplicação da geração anual estimada pelo valor do kWh do ano encontra-se o equivalente financeiro referente ao ano base da geração de energia. Outro fator considerado no fluxo de caixa é que a geração anual estimada não apresenta um comportamento linear à medida que, vide o fabricante dos módulos, o painel solar Canadian 550 Wp apresenta um fator de decaimento anual no primeiro ano não superior a 2% e nos anos seguintes um fator não superior a 0,55% e, portanto, a nível de cálculos da geração é estipulado um decaimento de 1% no primeiro ano e 0,55% nos demais anos.

No que diz respeito às despesas, é necessário considerar a estimativa dos gastos anuais, levando em conta a vida útil dos equipamentos. Segundo Neris (2021), durante os 25 anos de

operação do sistema de energia solar, o único componente que teoricamente precisa ser substituído é o inversor, geralmente aos 15 anos de uso. Portanto, os custos associados ao sistema de energia solar são relacionados à manutenção, reparos, limpeza e inspeções regulares que possivelmente possam ocorrer ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema. No 15º ano, espera-se um custo de substituição do inversor de frequência, com uma média de R\$ 5.771,18, ajustado pela inflação estimada acumulada de 6% a.a., estimada ao considerar o regime de metas para a inflação adotado no Brasil, até o 15º ano, totalizando um valor de R\$ 13.830,97 para o custo do inversor nesse ano. Além disso, estima-se um custo anual de manutenção equivalente a 5% do valor do investimento inicial, também ajustado pela inflação estimada para o período. Os demais componentes e equipamentos do sistema fotovoltaico, como cabos de acordo com Garcia (2021), e estruturas de fixação de componentes em alumínio e inox vide características dos componentes de constituição, têm vida útil que acompanham ou até mesmo ultrapassam a vida útil dos painéis solares.

4.2 ANÁLISE DOS INDICADORES FINANCEIROS

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, é possível verificar a geração total de energia do sistema de 8 kWp ao longo de cada ano e, por fim, realizar a soma desses valores ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema. É importante ressaltar que, embora a demanda energética da residência seja constante durante toda a vida útil, a geração do sistema de energia solar é decrescente devido à perda de eficiência dos módulos solares. Na Tabela 1, os investimentos são representados por Inv, a porcentagem de geração em relação à geração de energia anual do ano zero é indicada como Geração, a demanda de energia anual em kWh necessária para suprir as necessidades da residência é apresentada como D.Ene anual, a geração anual em kWh do sistema de energia solar fotovoltaica é representada por G.Ene anual e, por fim, os custos de operação e manutenção anuais do sistema de energia solar, estimados em 5% do investimento inicial e reajustados anualmente em 5% dado por meio de uma inflação estimada, são indicados como COeM.

Os custos de manutenção estimados em 5% do valor do investimento inicial são calculados levando em consideração um cenário extremamente pessimista, uma vez que os investimentos em energia solar apresentam custos de manutenção significativamente reduzidos em comparação a outras tecnologias. Os principais custos de manutenção, de acordo com o Portal Solar (2023) envolvem possíveis reparos e substituições dos equipamentos, geralmente

cobertos pela garantia fornecida pelo fabricante. Ademais, a limpeza dos módulos é necessária para remover detritos e poeira acumulados nas placas solares.

Tabela 3 – Comparativo ao longo de 25 anos do decaimento da eficiência do painel fotovoltaico e a geração de energia a partir desse decaimento

Ano	Inv.	Geração	D.Ene anual	G.Ene anual	COeM
0	R\$ 29.893,25	100,000%	12.000	14.256	R\$ 0,00
1	R\$ 0,00	99,000%	12.000	14.113	R\$ 1.494,66
2	R\$ 0,00	98,450%	12.000	14.035	R\$ 1.569,40
3	R\$ 0,00	97,900%	12.000	13.957	R\$ 1.647,87
4	R\$ 0,00	97,350%	12.000	13.878	R\$ 1.730,26
5	R\$ 0,00	96,800%	12.000	13.800	R\$ 1.816,77
6	R\$ 0,00	96,250%	12.000	13.721	R\$ 1.907,61
7	R\$ 0,00	95,700%	12.000	13.643	R\$ 2.002,99
8	R\$ 0,00	95,150%	12.000	13.565	R\$ 2.103,14
9	R\$ 0,00	94,600%	12.000	13.486	R\$ 2.208,30
10	R\$ 0,00	94,050%	12.000	13.408	R\$ 2.318,71
11	R\$ 0,00	93,500%	12.000	13.329	R\$ 2.434,65
12	R\$ 0,00	92,950%	12.000	13.251	R\$ 2.556,38
13	R\$ 0,00	92,400%	12.000	13.173	R\$ 2.684,20
14	R\$ 0,00	91,850%	12.000	13.094	R\$ 2.818,41
15	R\$ 13.830,97	91,300%	12.000	13.016	R\$ 2.959,33
16	R\$ 0,00	90,750%	12.000	12.937	R\$ 3.107,30
17	R\$ 0,00	90,200%	12.000	12.859	R\$ 3.262,66
18	R\$ 0,00	89,650%	12.000	12.781	R\$ 3.425,79
19	R\$ 0,00	89,100%	12.000	12.702	R\$ 3.597,08
20	R\$ 0,00	88,550%	12.000	12.624	R\$ 3.776,94
21	R\$ 0,00	88,000%	12.000	12.545	R\$ 3.965,78
22	R\$ 0,00	87,450%	12.000	12.467	R\$ 4.164,07
23	R\$ 0,00	86,900%	12.000	12.388	R\$ 4.372,28
24	R\$ 0,00	86,350%	12.000	12.310	R\$ 4.590,89
25	R\$ 0,00	85,800%	12.000	12.232	R\$ 4.820,44
Σ	R\$ 43.724,22		312.000	343.570	R\$ 71.335,90

Fonte: resultados da pesquisa.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, é possível observar que o fator de decaimento da capacidade de geração do módulo fotovoltaico indica que, no primeiro ano, o módulo apresenta um decaimento mais significativo de 1%, em comparação aos anos subsequentes. A partir do segundo ano até o vigésimo quinto ano, considera-se um decaimento estimado de 0,55% ao ano, representando o pior cenário conforme especificado na ficha técnica

do módulo. É importante ressaltar que, mesmo com o decaimento, a energia produzida ao final dos 25 anos ainda é superior à demanda da residência dado que a demanda ao longo dos anos mantenha-se constante.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, pode-se constatar que a energia total produzida pelo sistema ao longo dos 25 anos de vida útil será de 343.570 kWh. Levando em consideração a exclusão da inflação energética de 6% a.a. durante esse período e adotando um preço fixo de R\$ 0,81 por kWh, é possível obter uma economia de R\$ 206.955,8, após a dedução dos custos de operação e manutenção.

4.2.1 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA

A partir do custo nivelado de energia é possível realizar comparações entre diversas fontes de energia à medida que fornece o custo médio da geração de energia ao longo da vida útil do projeto. A partir da expressão (5) é possível calcular o LCOE simples do sistema de energia residencial.

Para o cálculo do LCOE simples o *Capex* e o *Opex* são atribuídos respectivamente por meio da somatória do *Inv.* e do *COeM* do período 0 ao 25, enquanto o *Ep* é o somatório no mesmo período da *G.Ene* anual do sistema. O residual neste caso é considerado zero à medida que os equipamentos não possuem mais valor financeiro ao final dos 25 anos. Deste modo o LCOE simples retorna um valor em R\$/kWh o que torna uma métrica mais palpável à medida que é de fácil comparação com o valor indicado na conta de energia da residência.

$$LCOE \text{ simples} = \frac{(43.724,22 + 71.335,90)}{343.570} = 0,33 \text{ R\$/kWh}$$

O LCOE simples para o sistema de energia solar residencial apresenta um custo de 0,33 R\$/kWh. Apesar de fornecer uma visão clara dos custos associados a geração de energia o LCOE apresenta algumas limitações à medida que considera apenas os custos internos do projeto o que não leva em consideração os impactos sociais associados a geração de energia.

Outra maneira de calcular o LCOE é por meio da expressão (6) na qual diferentemente do LCOE simples conforme a expressão (5), é atribuído um fator de nivelamento que considera uma taxa de desconto para trazer os fluxos a valor presente. A Tabela 2 apresenta o cálculo do LCOE com a taxa de desconto.

Tabela 4 – Base de dados para o cálculo do LCOE com taxa de desconto

t	Inv.	COeM	CT	G.Ene anual	$(1+tx)^t$	CT VPL	G.Ene anual VPL
10	R\$ 29.893,25	R\$ 0,00	R\$ 29.893,25	14.256	1	R\$ 29.893,25	14.256
1	R\$ 0,00	R\$ 1.494,66	R\$ 1.494,66	14.113	1,0651	R\$ 1.403,31	13250,8
2	R\$ 0,00	R\$ 1.569,40	R\$ 1.569,40	14.035	1,13443801	R\$ 1.383,41	12371,8
3	R\$ 0,00	R\$ 1.647,87	R\$ 1.647,87	13.957	1,208289924	R\$ 1.363,80	11550,7
4	R\$ 0,00	R\$ 1.730,26	R\$ 1.730,26	13.878	1,286949599	R\$ 1.344,46	10783,8
5	R\$ 0,00	R\$ 1.816,77	R\$ 1.816,77	13.800	1,370730017	R\$ 1.325,40	10067,5
6	R\$ 0,00	R\$ 1.907,61	R\$ 1.907,61	13.721	1,459964542	R\$ 1.306,61	9398,4
7	R\$ 0,00	R\$ 2.002,99	R\$ 2.002,99	13.643	1,555008233	R\$ 1.288,09	8773,6
8	R\$ 0,00	R\$ 2.103,14	R\$ 2.103,14	13.565	1,656239269	R\$ 1.269,83	8190,0
9	R\$ 0,00	R\$ 2.208,30	R\$ 2.208,30	13.486	1,764060446	R\$ 1.251,83	7645,0
10	R\$ 0,00	R\$ 2.318,71	R\$ 2.318,71	13.408	1,878900781	R\$ 1.234,08	7136,0
11	R\$ 0,00	R\$ 2.434,65	R\$ 2.434,65	13.329	2,001217221	R\$ 1.216,58	6660,6
12	R\$ 0,00	R\$ 2.556,38	R\$ 2.556,38	13.251	2,131496463	R\$ 1.199,34	6216,7
13	R\$ 0,00	R\$ 2.684,20	R\$ 2.684,20	13.173	2,270256882	R\$ 1.182,33	5802,2
14	R\$ 0,00	R\$ 2.818,41	R\$ 2.818,41	13.094	2,418050605	R\$ 1.165,57	5415,2
15	R\$ 13.830,97	R\$ 2.959,33	R\$ 16.790,30	13.016	2,5754657	R\$ 6.519,33	5053,7
16	R\$ 0,00	R\$ 3.107,30	R\$ 3.107,30	12.937	2,743128517	R\$ 1.132,76	4716,3
17	R\$ 0,00	R\$ 3.262,66	R\$ 3.262,66	12.859	2,921706183	R\$ 1.116,70	4401,2
18	R\$ 0,00	R\$ 3.425,79	R\$ 3.425,79	12.781	3,111909256	R\$ 1.100,87	4107,0
19	R\$ 0,00	R\$ 3.597,08	R\$ 3.597,08	12.702	3,314494548	R\$ 1.085,26	3832,3
20	R\$ 0,00	R\$ 3.776,94	R\$ 3.776,94	12.624	3,530268143	R\$ 1.069,87	3575,8
21	R\$ 0,00	R\$ 3.965,78	R\$ 3.965,78	12.545	3,760088599	R\$ 1.054,71	3336,4
22	R\$ 0,00	R\$ 4.164,07	R\$ 4.164,07	12.467	4,004870367	R\$ 1.039,75	3112,9
23	R\$ 0,00	R\$ 4.372,28	R\$ 4.372,28	12.388	4,265587428	R\$ 1.025,01	2904,3
24	R\$ 0,00	R\$ 4.590,89	R\$ 4.590,89	12.310	4,54327717	R\$ 1.010,48	2709,5
25	R\$ 0,00	R\$ 4.820,44	R\$ 4.820,44	12.232	4,839044514	R\$ 996,15	2527,7
Σ	R\$ 43.724,22	R\$ 71.335,90	R\$ 115.060,12	343.570		R\$ 64.978,78	177795,4

Fonte: resultados da pesquisa.

Na expressão (6) a geração de eletricidade ao longo dos 25 anos é descontada pois é considerado que a eletricidade gerada implicitamente corresponde a ganhos em decorrência da venda dessa eletricidade gerada. Assim é necessário identificar uma taxa de desconto que para efeito do cálculo foi utilizado 6,51% dado que esse valor representa o rendimento real do título de dívida pública tesouro IPCA + 2045.

A partir da Tabela 4 é possível calcular o LCOE dado que a coluna CT VPL tem o valor presente líquido dos custos totais de cada ano e G.Ene anual VPL tem o valor presente líquido da geração anual de energia elétrica já considerado o fator de decaimento da placa. A partir da

Tabela 2 o CT VPL total e o G.Ene anual VPL são as somas do ano 1 ao ano 25 respectivamente da penúltima e última coluna da Tabela 2.

$$LCOE = \frac{64.978,78}{177.795,4} = 0,36 \text{ R\$/ kWh}$$

4.2.2 VPL, TIR E PAYBACK

O uso do método do Valor Presente Líquido (VPL) visa analisar a viabilidade do projeto de energia solar residencial de modo a constatar se o projeto é viável ou não. O método do VPL é uma métrica importante pois considera o valor do dinheiro no tempo por meio da diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa futuro gerado ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema de energia solar e o investimento inicial necessário para realizá-lo.

$$VPL = FCo + \sum_{i=1}^n \frac{FCi}{(1 + TMA)^i}$$

Para o cálculo do valor presente dos fluxos de caixa futuro é considerada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) que corresponde a uma taxa de desconto que reflete o custo de oportunidade dos recursos investidos no projeto. A TMA escolhida foi de 12% a.a. em termos nominais estimada por meio da taxa fornecida pelo título IPCA+ 2045 que é IPCA + 6,51% de modo a considerar uma estimativa de inflação implícita média de 5,49%.

Na última etapa ocorre a comparação do valor presente do fluxo de caixa com o valor inicial. O VPL, dado pela expressão (8) é resultado da diferença do somatório entre o valor presente dos fluxos de caixa do período de $n = 1$ a $n = 25$ e o investimento inicial necessário para iniciar o projeto. Deste modo caso o VPL seja maior que zero implica que o projeto apresenta um retorno maior que o custo de oportunidade dos recursos investidos no título IPCA + e deste modo é viável.

Tabela 5 – Base de dados para o cálculo da VPL, TIR e Payback

Ano	Inv	Tarifa	G.ene anual	Receita	Despesa	Resultado	Saldo	Vp	Fcd
0	-R\$ 29.893,25		14.256			-R\$ 29.893,25	-R\$ 29.893,25	-R\$ 29.893,25	-R\$ 29.893,25
1	R\$ 0,00	0,81	14.113	R\$ 11.431,89	R\$ 1.494,66	R\$ 9.937,23	-R\$ 19.956,02	R\$ 8.872,52	-R\$ 21.020,73
2	R\$ 0,00	0,86	14.036	R\$ 12.051,15	R\$ 1.569,39	R\$ 10.481,76	-R\$ 9.474,26	R\$ 8.355,99	-R\$ 12.664,73

3	R\$ 0,00	0,91	13.959	R\$ 12.703,96	R\$ 1.647,86	R\$ 11.056,10	R\$ 1.581,84	R\$ 7.869,51	-R\$ 4.795,22
4	R\$ 0,00	0,96	13.882	R\$ 13.392,14	R\$ 1.730,26	R\$ 11.661,88	R\$ 13.243,72	R\$ 7.411,34	R\$ 2.616,12
5	R\$ 0,00	1,02	13.805	R\$ 14.117,59	R\$ 1.816,77	R\$ 12.300,82	R\$ 25.544,54	R\$ 6.979,82	R\$ 9.595,93
6	R\$ 0,00	1,08	13.730	R\$ 14.882,34	R\$ 1.907,61	R\$ 12.974,73	R\$ 38.519,27	R\$ 6.573,40	R\$ 16.169,33
7	R\$ 0,00	1,15	13.654	R\$ 15.688,51	R\$ 2.002,99	R\$ 13.685,53	R\$ 52.204,79	R\$ 6.190,64	R\$ 22.359,97
8	R\$ 0,00	1,22	13.579	R\$ 16.538,36	R\$ 2.103,14	R\$ 14.435,22	R\$ 66.640,02	R\$ 5.830,15	R\$ 28.190,12
9	R\$ 0,00	1,29	13.504	R\$ 17.434,24	R\$ 2.208,29	R\$ 15.225,95	R\$ 81.865,97	R\$ 5.490,63	R\$ 33.680,75
10	R\$ 0,00	1,37	13.430	R\$ 18.378,66	R\$ 2.318,71	R\$ 16.059,95	R\$ 97.925,92	R\$ 5.170,87	R\$ 38.851,62
11	R\$ 0,00	1,45	13.356	R\$ 19.374,23	R\$ 2.434,64	R\$ 16.939,59	R\$ 114.865,50	R\$ 4.869,73	R\$ 43.721,35
12	R\$ 0,00	1,54	13.283	R\$ 20.423,73	R\$ 2.556,38	R\$ 17.867,36	R\$ 132.732,86	R\$ 4.586,11	R\$ 48.307,45
13	R\$ 0,00	1,63	13.210	R\$ 21.530,08	R\$ 2.684,19	R\$ 18.845,89	R\$ 151.578,75	R\$ 4.318,99	R\$ 52.626,44
14	R\$ 0,00	1,73	13.137	R\$ 22.696,37	R\$ 2.818,40	R\$ 19.877,96	R\$ 171.456,71	R\$ 4.067,43	R\$ 56.693,87
15	-R\$ 13.830,97	1,83	13.065	R\$ 23.925,83	R\$ 13.830,97	R\$ 10.094,86	R\$ 181.551,57	R\$ 1.844,29	R\$ 58.538,16
16	R\$ 0,00	1,94	12.993	R\$ 25.221,89	R\$ 3.107,29	R\$ 22.114,60	R\$ 203.666,18	R\$ 3.607,37	R\$ 62.145,53
17	R\$ 0,00	2,06	12.921	R\$ 26.588,16	R\$ 3.262,66	R\$ 23.325,51	R\$ 226.991,68	R\$ 3.397,23	R\$ 65.542,76
18	R\$ 0,00	2,18	12.850	R\$ 28.028,44	R\$ 3.425,79	R\$ 24.602,66	R\$ 251.594,34	R\$ 3.199,32	R\$ 68.742,08
19	R\$ 0,00	2,31	12.780	R\$ 29.546,75	R\$ 3.597,08	R\$ 25.949,67	R\$ 277.544,01	R\$ 3.012,93	R\$ 71.755,01
20	R\$ 0,00	2,45	12.709	R\$ 31.147,29	R\$ 3.776,93	R\$ 27.370,36	R\$ 304.914,37	R\$ 2.837,40	R\$ 74.592,41
21	R\$ 0,00	2,60	12.639	R\$ 32.834,54	R\$ 3.965,78	R\$ 28.868,76	R\$ 333.783,13	R\$ 2.672,08	R\$ 77.264,49
22	R\$ 0,00	2,75	12.570	R\$ 34.613,19	R\$ 4.164,07	R\$ 30.449,12	R\$ 364.232,25	R\$ 2.516,39	R\$ 79.780,88
23	R\$ 0,00	2,92	12.501	R\$ 36.488,18	R\$ 4.372,27	R\$ 32.115,91	R\$ 396.348,17	R\$ 2.369,77	R\$ 82.150,65
24	R\$ 0,00	3,09	12.432	R\$ 38.464,75	R\$ 4.590,88	R\$ 33.873,87	R\$ 430.222,04	R\$ 2.231,68	R\$ 84.382,33
25	R\$ 0,00	3,28	12.364	R\$ 40.548,39	R\$ 4.820,43	R\$ 35.727,96	R\$ 465.949,99	R\$ 2.101,64	R\$ 86.483,97

Fonte: resultado da pesquisa

Portanto a partir da expressão (8) o VPL do projeto é o somatório do ano 0 ao ano 25 da coluna do V_p da Tabela 5. O VPL neste caso para o projeto é de R\$ 86.483,97 e deste modo maior que 0 o que é implica que o projeto de energia solar residencial é capaz de gerar um fluxo de caixa positivo e que as receitas ao longo dos 25 anos de vida útil são superiores aos custos de implementação e manutenção do sistema.

O cálculo da taxa interna de retorno (TIR) tem como objetivo analisar a taxa de retorno esperada do projeto de energia solar residencial. A TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL do fluxo de caixa futuro de um projeto a zero, ou seja, é um indicador que quando aplicado ao fluxo de caixa torna os valores de retornos iguais as despesas trazidas a valor presente. Matematicamente a TIR pode ser calculado por meio da expressão (9), onde FC_i é o fluxo de caixa no período i ; t é o período em anos na qual ocorre o fluxo de caixa; n é o número de períodos analisado e a TIR é a taxa interna de retorno variável a ser calculada.

$$\sum_{i=0}^n \frac{FC_i}{(1 + TIR)^i} = 0$$

Do ponto de vista de viabilidade financeira a TIR deve ser comparada com a TMA, se a TIR for superior ao custo de oportunidade do capital o investimento em energia solar se torna mais atrativo que o custo de oportunidade e, portanto, do ponto de vista de retorno do capital investido o projeto torna-se viável. Ao considerar a partir da Tabela 3 os fluxos de caixa estimado por meio da receita gerada pela geração da energia solar e os custos de operação e manutenção é possível calcular a TIR do projeto por meio de um software.

A TIR calculada a partir da expressão (9) para o projeto de energia solar residencial é de 39% a.a. sendo deste modo superior aos 12% a.a. da TMA. É importante ressaltar que a TIR do projeto pode variar de acordo com as premissas estimadas e por isso é uma medida de rentabilidade relativa e deve ser analisada em conjunto com outras métricas financeiras.

Em relação ao *Payback* em 2023 com a redução dos custos dos equipamentos necessários a implementação da energia solar vide aos avanços tecnológicos do setor e o excesso de oferta de material, queda do frete internacional, estabilização do câmbio, diminuição do acesso ao crédito e a implementação da Lei 14.300/2022 foram eventos que contribuíram para que ocorra uma pressão desinflacionaria nos preços dos equipamentos o que contribuiu para que o *Payback* apresenta uma redução. Para o sistema de energia solar do estudo à medida que os recursos de investimento inicial não foram de origem de financiamentos e comprado diretamente com o distribuidor de energia solar o *Payback* ficou em aproximadamente 3 anos.

5. CONCLUSÃO

Os sistemas fotovoltaicos residenciais apresentam um potencial significativo para a geração de energia limpa e renovável, sendo uma alternativa promissora para suprir as necessidades energéticas globais da sociedade e sobretudo uma possibilidade a longo prazo de gerar economia à medida que reduz de forma significativa o dispêndio familiar com os gastos em eletricidade e paralelamente contribui em promover benefícios econômicos diretos e indiretos. Do ponto de vista das famílias, a energia solar permite que seja evitada significativa parcela das flutuações nos preços da alíquota da energia e gera maior previsibilidade no orçamento familiar. Ademais, o estudo de viabilidade econômica revelou que diante das reduções dos custos dos equipamentos atrelado aos avanços tecnológicos, o tempo de retorno do investimento tem se mostrado mais atrativo.

Com base nos indicadores calculados, pode-se concluir que o sistema de energia solar analisado demonstra viabilidade econômica, validando a premissa de ser um investimento com retorno superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Os cálculos realizados indicam que, para um sistema de 8Kwp, levando em consideração que o investimento seja realizado com 100% de recursos próprios, os recursos iniciais necessários são viáveis e apresentam um potencial de retorno favorável com fortes ganhos econômicos de longo prazo.

Ao analisar os indicadores econômicos, como o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR), constata-se que o sistema de energia solar em questão apresenta resultados positivos em ambos os indicadores. O VPL positivo indica que o fluxo de caixa estimado ao longo da vida útil do sistema é superior ao investimento inicial, demonstrando que o investimento é viável. Além disso, a TIR evidencia que a taxa de retorno do investimento é maior do que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) considerada como parâmetro, reforçando deste modo a viabilidade do investimento em energia solar. No que diz respeito ao *payback*, o sistema de energia solar apresenta uma métrica altamente atrativa, com um período reduzido de apenas 3 anos. Essa rápida recuperação do investimento inicial foi influenciada principalmente pelo custo-benefício dos equipamentos, instalação e manutenções, bem como pela ausência de financiamento, o que contribui para a redução do tempo necessário para atingir o *payback*.

Outro ponto importante reflete-se na comparação entre o LCOE da energia solar e a alíquota do kWh que reforça ainda mais a viabilidade econômica do projeto tanto nos cálculos do LCOE simples como no descontado. Quando o LCOE é inferior à alíquota do kWh, significa

que o custo médio da energia solar é menor do que o valor cobrado por cada unidade de energia consumida da rede elétrica convencional. Essa diferença favorável entre o LCOE da energia solar e a alíquota do kWh resulta em economias significativas para os consumidores a longo prazo.

Adicionalmente, é relevante destacar que o estudo de viabilidade econômica da energia solar residencial possui diversas ramificações que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Além disso, é importante ressaltar que os parâmetros utilizados no estudo podem e devem ser adaptados de acordo com as condições específicas do objeto de estudo. Essa flexibilidade permite uma análise mais precisa e abrangente, levando assim em consideração as particularidades e variáveis relevantes para cada contexto. Portanto, há um vasto campo de possibilidades para pesquisas futuras que podem expandir e aprofundar o conhecimento sobre a viabilidade econômica da energia solar residencial.

Nesse sentido pesquisas futuras sobre a viabilidade da energia solar podem abordar os comparativos das variações de viabilidade conforme as particularidades de cada região ao considerar o preço da tarifa de energia, o horário de consumo e a média de exposição do sistema a irradiação solar de modo a abordar de forma ampla as particularidades regionais e impacto das políticas públicas regionais.

Em relação aos impactos ambientais o uso da energia solar contribui de forma significativa para a redução da dependência de recursos não renováveis como o petróleo, carvão mineral e gás natural. No âmbito residencial a adoção da energia solar contribui para a preservação dos recursos finitos e para a redução das emissões de CO₂ durante o processo de geração de eletricidade. Desse modo, além dos benefícios ambientais diretos da adoção da energia solar o uso da fonte solar contribui para a conscientização e educação ambiental de modo a demonstrar seja no âmbito residencial, comercial ou industrial um compromisso com as pautas ambientais atuais de sustentabilidade

Em síntese, este estudo reforça que o sistema de energia solar residencial é viável economicamente e exerce um impacto positivo no longo prazo na economia familiar representando como uma alternativa sustentável para suprir as necessidades energéticas. Seu potencial para gerar economia, preservar o meio ambiente e promover o desenvolvimento social é inegável sobretudo diante dos desafios energéticos e ambientais que se enfrentam atualmente, é imprescindível que medidas sejam tomadas para acelerar a transição para uma matriz

energética mais limpa e renovável, e o sistema de energia solar desempenha um papel protagonista e fundamental nesse processo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA - ABSOLAR. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: 15 jan. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 abr. 2012. Seção 1, p. 43-48.

ASSAF NETO, Alexandre. Matemática financeira e suas aplicações. São Paulo: Atlas. Acesso em: 31 mai. 2023.

BRASIL. Relatório final do GT Solar Fotovoltaico. Disponível em <http://www.mdic.gov.br/images/REPOSITARIO/sdci/2018-Relatorio-GTFotovoltaicoCamex.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2023.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 5.829, de 2019. Disponível em: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=1829917&filename=PL%205829/2019 . Acesso em: 27 jan. 2023.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 de janeiro de 2022 Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm Acesso em: Acesso em: 27 jan. 2023.

CANADIAN SOLAR INC. Pannel 545Wp Canadian: PV Module Product Datasheet V1.1_EN. Guelph, Ontario, Canadá: Canadian Solar Inc., julho de 2020. Disponível em: www.canadiansolar.com. Acesso em: 25 jan. 2023.

CARVALHO NETO, Osvaldo Fernandes. Matemática Comercial e Financeira. Coordenação Cassandra Ribeiro Joye. Fortaleza: UAB/IFCE, 2013. 74 p.

DA SILVA JÚNIOR, Oséas Caetano; STEINER, Max Gabriel. Estudo técnico e econômico para instalação de painéis fotovoltaicos no Centro de Convivência da UniSATC. Centro Universitário UniSATC, 2022.

DANTAS, Stefano Giacomazzi; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2018. Texto para Discussão.

DIAMANDIS, Peter. Solar energy revolution: a massive opportunity. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/peterdiamandis/2014/09/02/solar-energy-revolution-a-massive-opportunity/#56994e866c90>. Acesso em: 15 mar. 2023.

FRANCISCO, Eduardo de Rezende. Indicadores de renda baseados em consumo de energia elétrica: abordagens domiciliar e regional na perspectiva da estatística espacial. 2010. Tese (Doutorado em Administração de Empresas) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

FREITAS, Fernando Garcia de; BANDEIRA, Andrea Camara; MAGNABOSCO, Ana Leila. Os impactos dos preços da energia elétrica e do gás natural no crescimento e desenvolvimento econômico. Ex ante Consultoria Econômica, julho 2022.

FEDRIZZI, Maria Cristina; SAUER, Ildo Luis. Bombeamento solar fotovoltaico, histórico, características e projetos. Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural. 2002.

GUIMARÃES, Leonam dos Santos. O Custo Nivelado da Eletricidade e seu Impacto na Transição Energética. Rio de Janeiro: FGV Energia, jun. 2019.

GARCIA, Marcelo Ribeiro. Características dos cabos para instalações fotovoltaicas. 2021. Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/portal-potencia/instalacoes-eletricas/caracteristicas-dos-cabos-para-instalacoes-fotovoltaicas/>. Acesso em: 12 fev. 2023.

GREENER. Estudo Estratégico de Geração Distribuída do Mercado Fotovoltaico. Fevereiro 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/>. Acesso em: 10 jan. 2023.

Guia de Habilitação Eólica. Ministério de Minas e Energia. Ano 2004. Disponível em: https://q.eletrabras.com/pt/AreasdeAtuacao/programas/proinfa/guia_eolica_final.pdf. Acesso em: 15 mar. 2023.

HEIN, Henrique. Gargalo: financiamento para energia solar deve destravar no 2º semestre. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/gargalo-financiamento-para-energia-solar-deve-destravar-no-2o-semester/>. Acesso em: 2 jun. 2023.

HCC ENERGIA SOLAR. 5 desafios do mercado de energia solar e como superá-los. 2022. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/5-desafios-do-mercado-de-energia-solar-e-como-supera-los/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

HCC ENERGIA SOLAR. Quais são os custos envolvidos para implantar a energia solar? 2022. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/quais-sao-os-custos-envolvidos-para-implantar-a-energia-solar/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

HCC ENERGIA SOLAR. Conheça os benefícios econômicos da energia solar. 2023. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/beneficios-economicos-da-energia-solar>. Acesso em: 10 fev. 2023

INTELBRAS. Tudo o que você precisa saber sobre energia solar em residências. Intelbras Blog, 2019. Atualizado em 07 jul. 2022. Disponível em em: <https://blog.intelbras.com.br/como-funciona-a-energia-solar-em-residencias/>. Acesso em: 12 jan. 2023.

KIKUMOTO, Bruno. O que é o LCOE e como utilizar nos projetos fotovoltaicos?. Publicado no Canal Solar, 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/o-que-e-o-lcoe-e-como-utilizar-nos-projetos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 25 mar. 2023.

LOSEKANN, Luciano; TAVARES, Amanda. Transição energética e potencial de cooperação nos BRICS em energias renováveis e gás natural. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2020. 1ª ed. Texto para Discussão.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 fev. 2023.

NERIS, Alessandra. Quanto duram os inversores residenciais. Aldo Blog, 2021. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/quanto-duram-os-inversores-residenciais/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

CASARIN, Ricardo. Portal Solar. Longi Solar atinge marca de 25,09% de eficiência em célula solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/equipamentos-fv/longi-solar-atinge-marca-de-25-09-de-eficiencia-em-celula-solar>. 2021. Acesso em: 22 jan. 2023.

CASARIN, Ricardo. Com excesso de oferta, preço do silício policristalino entra em colapso. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias>. Acesso em: 24 jun. 2023.

PORTAL G1. Ceará ganha primeira usina comercial de energia solar do Brasil. 2011. Disponível em: <https://g1.globo.com/ceara/noticia/2011/08/ceara-ganha-primeira-usina-comercial-de-energia-solar-do-brasil.html>. Acesso em: 10 jan. 2023.

PORTAL SOLAR. Como converter kWp em kWh?. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-converter-kwp-em-kwh>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2023.

PORTAL SOLAR. Tudo Sobre a Manutenção do Painel Solar e do Sistema Fotovoltaico. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tudo-sobre-a-manutencao-do-painel-solar#ancora5>. Acesso em: 20 mar. 2023.

PILÃO, Nivaldo Elias; HUMMEL, Paulo Roberto Vampré. Matemática financeira e engenharia econômica: a teoria e a prática da análise de projetos de investimentos. São Paulo: Cengage Learning, 2003. 273 p.

PUCCINI, Ernesto Coutinho. Matemática financeira e análise de investimentos. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração / UFSC; [Brasília]: CAPES: UAB, 2011. 204 p. il.

REIS, Tiago. Payback: entenda como calcular o prazo de retorno de um investimento. 2019. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/payback/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

REIS, Tiago Valor Presente Líquido: entenda como calcular e usar o VPL. 2017. Disponível em: <https://www.suno.com.br/artigos/valor-presente-liquido/>. Acesso em: 15 fev. 2023.

RAMPINELLI, Giuliano Arns (Org.); MACHADO, Solange (Org.). Manual de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída: teoria e prática. 1. ed. Curitiba: Brazil Publishing, 2021. 181-200 p.

SAUER, Ildo Luís et al. Energias renováveis: ações e perspectivas na Petrobras. Bahia Análise & Dados, Salvador, v. 16, n. 1, p. 9-22, jun. 2006.

SOLFÁCIL. Como calcular as perdas do sistema fotovoltaico? Disponível em: <<https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/como-calculas-perdas-do-sistema-fotovoltaico/>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

SILVA, Rutelly Marques. Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios. 2015. Disponível em: <http://www12.senado.gov.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>. Acesso em: 24 abr. 2023.

TIBA, Chigueru et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. il., tab., mapas.

TOLEDO, Thiago; CARNEIRO, Priscila. Matriz Energética Brasileira (BP Estatísticas Review 2020). Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/dados-matriz-energetica> . Acesso em: 10 jan. 2023.