



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CEC AU**



JÚLIO CÉSAR CARREIRA CURY

Estudo de Caso: Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Residencial

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2023

JULIO CESAR CARREIRA CURY

Estudo de Caso: Dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Residencial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Agosto/2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlio César Carreira Cury

Estudo de caso: dimensionamento de um sistema fotovoltaico residencial

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 28 de agosto de 2023

Membros da banca

Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador (DECAT - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Examinador (DECAT - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel - Examinador - (DECAT - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)

Paulo Marcos de Barros Monteiro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/08/2023



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Marcos de Barros Monteiro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/08/2023, às 09:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0581421** e o código CRC **A491C95E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar em tantos caminhos. Ao meu falecido pai, espero que esteja orgulhoso. A minha mãe Elisabete por sempre estar ao meu lado. Ao meu orientador Paulo, por toda paciência e por ter me ajudado nessa etapa final da minha graduação. À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino gratuito e de qualidade, e por apoiar o desenvolvimento dos alunos, sem se esquecer de suas tradições. Mais que uma Universidade, uma bolha de realidade e aprendizagem para quem não se encaixa no individualismo que infelizmente atinge parcela da sociedade. À República Boemia e irmãos republicanos por todos os ensinamentos que livro algum me disponibilizaria. Juntos, somos mais fortes. Por fim, a todos os amigos cultivados durante esses anos.

RESUMO

A geração de energia elétrica a partir de fontes limpas e renováveis tem emergido como um setor altamente promissor nos recentes anos, conferindo um impacto benéfico ao panorama da geração energética. Aproximar a produção de energia do consumidor possibilita uma redução nos gastos associados à transmissão e às perdas no sistema. O estudo de caso tem como objetivo a implementação de um sistema fotovoltaico interligado a rede em uma residência na cidade Ouro Preto – MG. Nesse contexto, foram examinados os parâmetros indispensáveis para a implantação eficaz deste sistema, aliados à análise das características do local e à compreensão do padrão de consumo dos residentes. Foi feito um estudo dos componentes que viabilizam o sistema, bem como suas aplicações. Aliado a esses estudos, a viabilidade do projeto foi avaliada através da elaboração de um orçamento para aquisição dos componentes, acompanhado de cálculos que quantificam o retorno do investimento e a lucratividade do sistema em questão.

Palavras chave: Sistemas Fotovoltaicos, Células Solares, Geração de Energia Solar.

ABSTRACT

The generation of electrical energy from clean and renewable sources has emerged as a highly promising sector in recent years, conferring a beneficial impact on the energy generation landscape. Bringing energy production closer to the consumer enables a reduction in costs associated with transmission and losses in the system. The case study aims to implement a grid-connected photovoltaic system in a residence in Ouro Preto - MG city. In this context, the essential parameters for the effective implementation of this system were examined, coupled with an analysis of the site's characteristics and an understanding of the residents' consumption patterns. A study of the components that enable the system, as well as their applications, was conducted. Alongside these studies, the project's feasibility was assessed by preparing a budget for the acquisition of components, accompanied by calculations that quantify the return on investment and the profitability of the system in question.

Keywords: Photovoltaic Systems, Solar Cells, Solar Energy Generation.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1	– Esquema dos Sistemas fotovoltaicos existentes.....	13
Figura 2.2	– Modulo de Silício Monocristalino.....	14
Figura 2.3	– Modulo de silício Policristalino.....	15
Figura 2.4	– Comparação das diferentes células fotovoltaicas.....	16
Figura 2.5	– Sistema Fotovoltaico Autônomo ou Isolado.....	17
Figura 2.6	– Componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede.....	18
Figura 2.7	– Sistema de compensação de energia elétrica.....	19
Figura 2.8	– Movimento de translação da Terra.....	21
Figura 2.9	– Radiação Solar no Brasil.....	23
Figura 2.10	– Evolução dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.....	24
Figura 2.11	– Aplicações de Células Fotovoltaicas no Cotidiano.....	25
Figura 3.12	– Fachada do imóvel localizado em Ouro Preto.....	26
Figura 3.13	– Dados da Irradiação solar em Ouro Preto.....	28
Figura 3.14	– Dados Técnicos do Pannel Canadian Solar.....	29
Figura 3.15	– Area Disponível para Instalação do Projeto.....	31
Figura 3.16	– Inversor FRONIUS.....	32
Figura 3.17	– Diferentes angulações de Módulos Fotovoltaicos.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Histórico de Consumo do Imóvel Estudado

Tabela 3.2 – Escolha do Ângulo de Inclinação

Tabela 4.3 – Orçamento do Sistema Fotovoltaico Anual

Tabela 4.4 – Perdas

Tabela 4.5 – Geração Fotovoltaica Anual

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CIGS	Cobre-Índio-Gálio-Selênio
CIS	Cobre – Índio - Selênio
GD	Geração Distribuída
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos Gerais	11
1.2	Objetivos Específicos	11
1.3	Estrutura do Trabalho	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	Energia solar fotovoltaica	13
2.2	Células Fotovoltaicas	14
2.2.1	Célula de Silício Monocristalino.....	15
2.2.2	Célula de Silício Policristalino	16
2.2.3	Filmes Finos	16
2.3	Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Autônomos.....	17
2.4	Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede	18
2.5	Sistema de Compensação de Energia Elétrica	20
2.6	Radiação Solar	21
2.7	Radiação Solar No Brasil.....	23
2.8	Sistemas Fotovoltaicos e Suas Aplicações.....	24
2.9	Valor Presente Líquido	25
2.10	Taxa Interna de Retorno.....	26
3	METODOLOGIA.....	27
3.1	Dimensionamento Do Sistema Fotovoltaico	28
3.2	Seleção do Módulo	30
3.3	Cálculo da Quantidade de módulos fotovoltaicos.....	30
3.4	Disposição dos Módulos Fotovoltaicos.....	32
3.5	Seleção do Inversor.....	32
3.6	Angulação e Direção dos Módulos Fotovoltaicos	33

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Orçamento.....	35
4.2	Perdas	35
4.3	Geração Anual do Sistema Fotovoltaico.....	36
4.4	Análise da Viabilidade Econômica.....	37
5	CONCLUSÕES.....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Há pouco tempo atrás a energia solar fotovoltaica no Brasil costumava ser aplicada somente em sistemas diminutos e independentes situados em lugares não servidos pela rede elétrica convencional. Isso ocorria em áreas de acesso complicado ou em locais onde a instalação de linhas de transmissão de eletricidade não se mostrava economicamente viável (VILLALVA, 2021).

As energias renováveis representam fontes de energia geradas a partir de processos e recursos naturais que se reabastecem continuamente em um período de tempo compatível com a escala humana; em outras palavras, estão em constante renovação. Dentre as principais alternativas energéticas em desenvolvimento, sobressaem a energia eólica, a energia geotérmica, a energia das marés, a energia hídrica (da água) e, especialmente, a energia solar. Esta última se destaca como uma das mais eficazes, com impacto ambiental praticamente nulo.

De acordo com as análises de (NASCIMENTO,2017), o Brasil ostenta um notável potencial no que concerne à produção de energia elétrica através do aproveitamento da energia solar. A nação brasileira se destaca por apresentar níveis de irradiação solar consideravelmente superiores aos de nações amplamente engajadas em projetos e investimentos no setor solar, a exemplo da Alemanha, Espanha e França.

Nascimento (2017) enfatiza diz que apesar da profunda incidência de radiação solar no território nacional, a exploração dessa fonte para a geração de energia elétrica não atinge o mesmo patamar de relevância observado em outras nações. Isto é válido mesmo quando se realiza uma comparação com outras fontes de energia renovável, como a eólica e a biomassa. Enquanto a energia eólica representa 6,7% e a biomassa representa 9,4% da capacidade de geração instalada no país, a contribuição da energia solar é apenas de 0,05%.

A expansão contínua dos sistemas conectados à rede tem sido grandemente impulsionada pela ratificação da normativa 482/2012 da ANEEL em 17 de abril de 2012. Essa regulamentação, posteriormente alterada pelas Resoluções Normativas ANEEL nº 687/2015 e nº 786/2017, concede aos consumidores a permissão para instalar geradores de pequeno porte em suas unidades consumidoras. Isso lhes possibilita aproveitar o sistema elétrico da Cemig para injetar o excedente de energia gerada, que é então convertido em créditos de energia. Esses créditos permanecem válidos por um período de 60 meses, podendo ser consumidos em momentos em que o sistema de geração não produz energia suficiente para atender às demandas do estabelecimento, como durante a noite ou em dias nublados (ANEEL, 2014)

Frente a essas condições, a aplicação de painéis fotovoltaicos baseada no conceito de geração distribuída (GD) emerge como uma alternativa altamente vantajosa para regiões mais afastadas e distantes dos principais centros urbanos. A instalação de painéis solares nos telhados de residências ou edifícios proporciona acesso a uma fonte de energia solar gratuita e renovável. Entretanto, é crucial reconhecer que o custo inicial da implementação desses painéis permanece substancial, e o período de retorno do investimento pode abranger vários anos.

Nesse cenário, à medida que os investimentos em projetos voltados para esse modelo de geração energética prosseguem em ascensão, somados à imperatividade da preservação ambiental, é possível antecipar uma trajetória de redução nos preços. Esse ajuste, por sua vez, fomentaria um incentivo mais pronunciado para a adoção dessa tecnologia, dada a sua natureza como fonte de geração limpa e descentralizada.

1.1 Objetivos Gerais

Objetiva-se fazer a análise de investimento da instalação de um sistema fotovoltaico em uma residência localizada na cidade de Ouro Preto - MG

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os componentes que compõem um sistema fotovoltaico *on-grid*;
- Analisar o princípio de funcionamento de um sistema fotovoltaico *on-grid*;
- Dimensionar um sistema *on-grid* para o estudo de caso proposto;
- Estudar a viabilidade econômica do sistema em questão;

1.3 Estrutura do Trabalho

Além da introdução já apresentada, este trabalho possui mais quatro capítulos (fora a introdução, com a introdução cinco capítulos), organizados da seguinte forma: Capítulo 2: Neste capítulo apresenta-se a revisão da literatura, onde faz cerne a todas as informações necessárias para a elaboração de um projeto de um sistema fotovoltaico e as principais ferramentas matemáticas que serão primordiais para realizar a análise da viabilidade econômica. Capítulo 3: Neste capítulo realizou-se o estudo de caso onde propõe-se mostrar o dimensionamento do sistema fotovoltaico e a seleção de seus materiais. Capítulo 4: Contém à

análise da viabilidade econômica do estudo de caso. Capítulo 5: Contém a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica corresponde à eletricidade gerada por meio da conversão da luz solar, destacando-se como uma das principais fontes de energia renovável em uso global. Muitos especialistas vislumbram-na como o futuro da geração de eletricidade (RUTH, 2004). A célula fotovoltaica, construída a partir de materiais semicondutores, é o componente central desse processo de transformação (SANTOS, 2016).

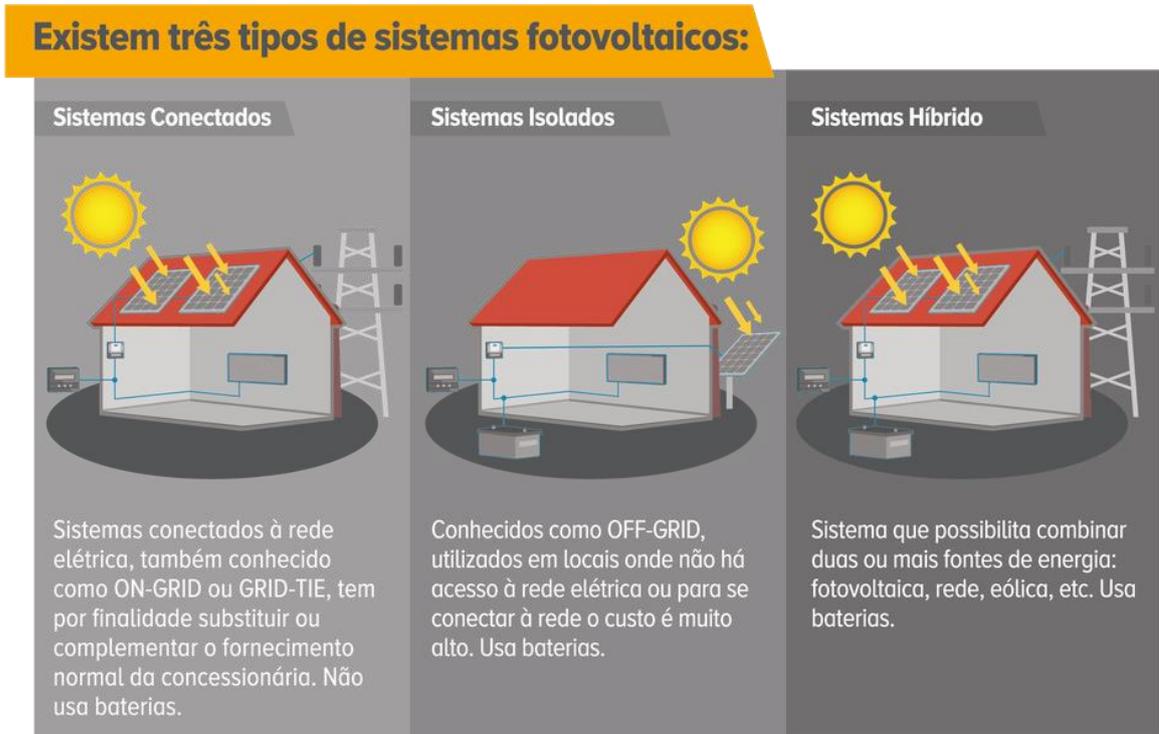
Conforme argumentado por Torres (2012), esse modelo de geração elétrica apresenta diversas vantagens fundamentais:

- Geração estática e silenciosa, resultando em ausência de impactos ambientais durante a operação.
- Caráter integralmente renovável.
- Ótima viabilidade logística, adaptando-se facilmente à microgeração distribuída, o que implica na implantação próxima ao local de consumo. Isso minimiza os custos de distribuição e transmissão de eletricidade.
- Modularidade, permitindo a geração de energia em escalas que variam de miliwatts (mW) a megawatts (MW).
- Instalação rápida, sistemas altamente confiáveis e exigências reduzidas de manutenção.

Desde a aprovação da Resolução nº 482 pela ANEEL em dezembro de 2012, os sistemas fotovoltaicos passaram a ter a capacidade de se conectar à rede elétrica, conferindo uma maior viabilidade aos consumidores finais (MACHADO, MIRANDA, 2014).

A Figura a seguir ilustra os dois tipos de sistemas fotovoltaicos atualmente disponíveis. A primeira seção retrata um sistema conectado à rede elétrica da concessionária, enquanto a segunda descreve sistemas autônomos usados principalmente em áreas remotas ou em embarcações (MACHADO, MIRANDA, 2014).

Figura 2.1 – Esquema dos Sistemas fotovoltaicos existentes



Fonte: MACHADO e MIRANDA (2014).

2.2 Células Fotovoltaicas

A célula solar, também chamada de célula fotovoltaica, desempenha o papel de um dispositivo elétrico que transforma diretamente a energia proveniente da luz solar em energia elétrica, graças ao fenômeno fotovoltaico. Esse processo se concretiza por meio da utilização de materiais semicondutores na composição das células fotovoltaicas, os quais podem variar em termos de natureza.

No processo de construção das placas solares, aquelas que frequentemente são visíveis nos telhados das residências que fazem uso da energia solar, várias células solares são conectadas sequencialmente. Tecnicamente, essas placas são referidas como módulos fotovoltaicos, e a agregação desses módulos é responsável pela criação do que é conhecido como painel solar (PORTAL SOLAR, 2023).

Uma diversidade de tipos de células fotovoltaicas está disponível, classificados de acordo com os materiais empregados e o nível de refinamento. Os tipos primordiais de células

fotovoltaicas são originados a partir do silício cristalino, podendo se dividir entre monocristalino e policristalino. (PORTAL SOLAR, 2023).

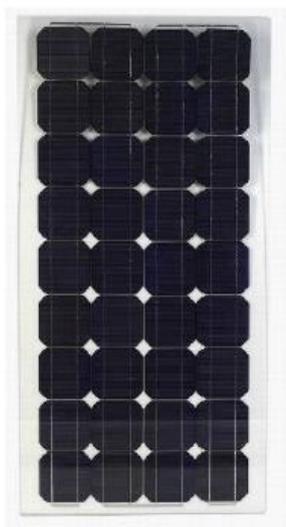
No Brasil, a maioria substancial das grandes usinas fotovoltaicas e dos projetos de geração de energia distribuída, implantados em residências e empresas, adota módulos fotovoltaicos contendo células de silício cristalino, particularmente do tipo policristalino. Recentemente, contudo, os módulos monocristalinos têm vindo à tona como uma tendência, impulsionados pela redução de seus custos, e estão liderando o mercado em termos de volume de vendas.

2.2.1 Célula de Silício Monocristalino

As células de Silício Monocristalino (m – Si) têm sua origem na estrutura cristalina do silício. Estas células destacam-se por sua eficiência superior, embora também ostentem o título de serem as mais dispendiosas entre todas as variedades de células de silício. O monocristal é cultivado a partir de silício fundido de pureza elevada (Si = de 99,99% a 99,9999%) em reatores sujeitos a atmosfera controlada. O crescimento do cristal ocorre a um ritmo muito lento (da ordem de centímetros por hora), e esse procedimento de aumento da estrutura do silício é conhecido como o método Czochralski (MILAGRES, 2016).

A figura seguir ilustra-se uma célula de silício monocristalino:

Figura 2.2 – Módulo de Silício Monocristalino



Fonte: (MILAGRES, 2016)

2.2.2 Célula de Silício Policristalino

As células de silício policristalino (p-Si) dominam o mercado tecnológico, representando aproximadamente 70% da participação total. Estas células são produzidas utilizando o mesmo material presente nas células de silício monocristalino. A distinção entre as tecnologias policristalina e monocristalina está na maneira como elas solidificam: ao invés de formar um único cristal grande, as células policristalinas solidificam-se como um bloco composto por vários cristais pequenos. Essa particularidade acarreta uma leve redução na eficiência das células, mas traz a vantagem de uma redução nos custos de fabricação devido ao menor consumo de energia durante o processo (FRAUNHOFER, 2016)

Atualmente, a eficiência dos módulos p-Si situa-se entre 14% e 16%, embora existam módulos que utilizam essa tecnologia com eficiências superiores a 17% (BÜHLER et al., 2018).

Figura 2.3 – Módulo de silício Policristalino



Fonte: (SANTOS, 2016)

2.2.3 Filmes Finos

Menos empregados em comparação com os mencionados previamente, os módulos de película delgada podem ser compostos por diversos outros tipos de materiais como telureto de cádmio, cobre índio e gálio seleneto (CIS/CIGS), ou mesmo silício em sua forma amorfa. São também identificados como células fotovoltaicas de filme fino (TFPV) e sua eficácia média varia entre aproximadamente 7% e 13%. Em 2015, conseguiram atingir uma taxa de 16% de eficiência, valor semelhante aos painéis de silício policristalino. No mercado, ocupam cerca de 20% da parcela de módulos utilizados (PORTAL SOLAR, 2023).

A figura a seguir ilustra-se uma comparação de todas as células citas anteriormente:

Figura 2.4 – Comparação das diferentes células fotovoltaicas

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos comerciais
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino de filme fino	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício micromorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: Autor, adaptado de (VILLALVA,2021)

2.3 Sistemas Fotovoltaicos Isolados ou Autônomos

Denominados também como sistemas *off-grid*, os sistemas fotovoltaicos isolados são desenvolvidos para situações em que a energia convencional não está disponível. Isso pode ocorrer devido a limitações técnicas, considerações ambientais ou falta de interesse comercial por parte das concessionárias de energia elétrica (BENEDITO, 2009).

O sistema fotovoltaico isolado é composto essencialmente por um conjunto de painéis fotovoltaicos, um inversor, uma caixa contendo dispositivos de proteção, um controlador de carga e um conjunto de baterias (BENEDITO, 2009).

A figura 2 ilustra um exemplo de Sistema Fotovoltaico Residencial (SFR), que se enquadra na categoria dos sistemas fotovoltaicos isolados.

Figura 2.5 – Sistema Fotovoltaico Autônomo ou Isolado



Fonte: Disponível em <https://awsenergiasolar.com.br/servico/sistemas-autonomos-off-grid/>

Essa tecnologia abrange uma ampla variedade de aplicações que vão além dos SFD. Entre essas aplicações, se destacam o uso em iluminação pública, sistemas de telecomunicações, sinalização em ambientes marítimos e rodoviários, sistemas de refrigeração, bombeamento de água, pontos de telefone de emergência, instalações espaciais, entre outras.

Uma das principais vantagens desses sistemas é a sua capacidade de autossuficiência energética, que também implica em uma forma de segurança, uma vez que falhas na rede elétrica da concessionária não afetam esses sistemas, teoricamente. No entanto, uma desvantagem está relacionada às baterias, que apresentam um custo elevado e uma capacidade limitada de armazenamento (BONATTO, 2019).

2.4 Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede

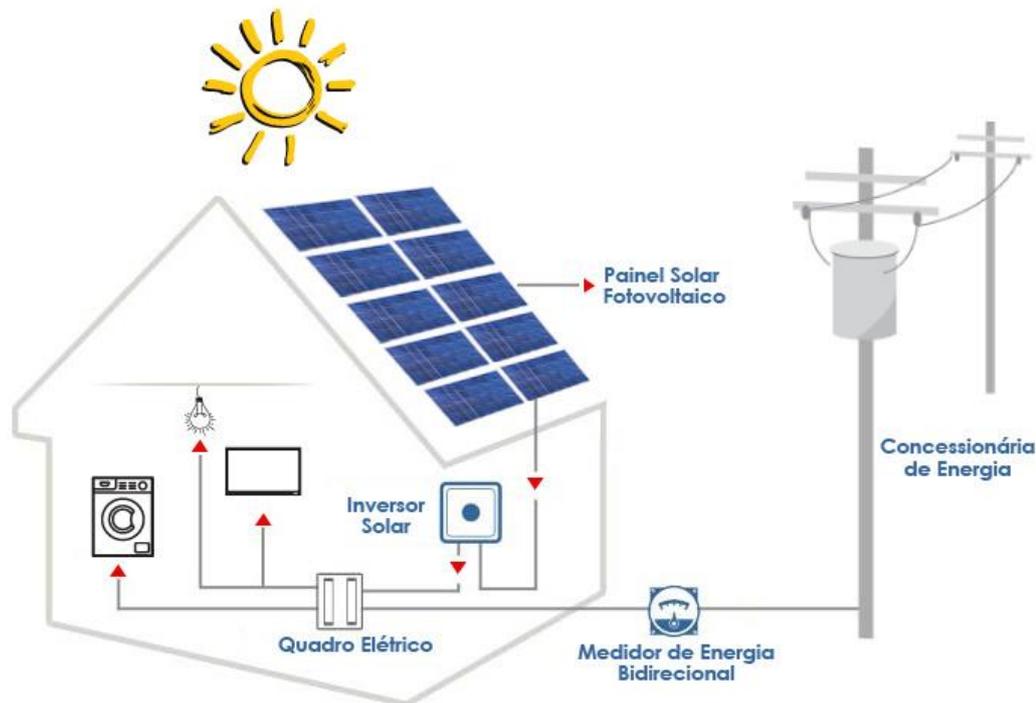
Um sistema fotovoltaico conectado à rede, também conhecido como sistema de energia solar *grid-tied*, é um sistema de geração de energia elétrica a partir da luz do sol que está interligado à rede elétrica convencional. Esse tipo de sistema é projetado para produzir eletricidade por meio de painéis solares e, ao mesmo tempo, permite que o excesso de energia gerada seja injetado na rede elétrica. (ROSA, CSR ENERGIA SOLAR, 2017).

O SFCR é composto essencialmente pelos módulos solares e pelo inversor interativo, internacionalmente conhecido como "*grid-tied interactive inverter*". Além desses componentes

fundamentais, o sistema inclui os elementos de integração (conhecidos internacionalmente como "*balance of system – BOS*"), que consistem em estruturas de suporte para os módulos fotovoltaicos e os componentes elétricos de proteção (ROSA, CSR ENERGIA SOLAR, 2017).

A ilustração abaixo ilustra os diversos componentes que compõem um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR).

Figura 2.6 – Componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Disponível em: www.csrenergiasolar.com.br

O estudo de Rosa (CSR ENERGIA SOLAR, 2017) detalha a operação de um SFCR da seguinte forma: o inversor interativo recebe a energia gerada pelos módulos solares em corrente contínua (CC) e a converte para energia elétrica de corrente alternada (CA) com uma forma de onda correspondente à energia da rede elétrica da concessionária local. Esse inversor interativo injeta toda a energia gerada no sistema geral da unidade consumidora, como uma residência, por exemplo. Conseqüentemente, essa energia é integrada à rede elétrica como um todo. O inversor tem a capacidade de controlar e alternar automaticamente entre a energia solar e a energia elétrica convencional, atendendo à demanda e se ajustando às condições em que a radiação solar é insuficiente, assegurando o fornecimento contínuo e adequado.

A principal vantagem de um SFCR reside na utilização da rede elétrica da concessionária como uma forma de acumulação de energia por meio de créditos energéticos, eliminando a necessidade de baterias. Com essa abordagem, recursos são otimizados,

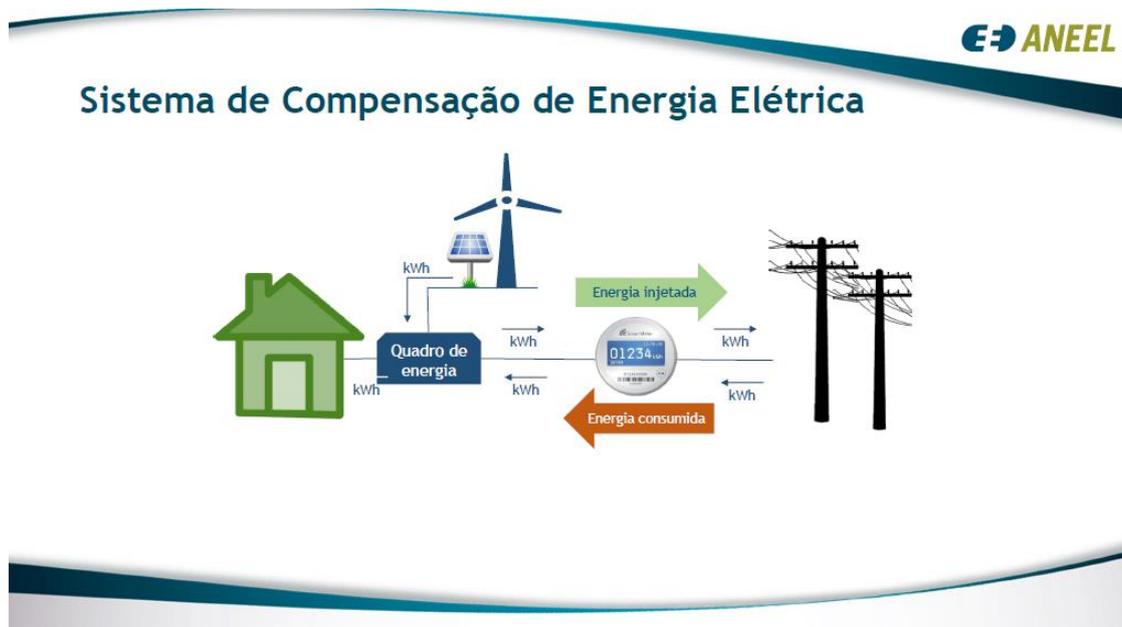
dispensando o investimento em um banco de baterias, que frequentemente compunha de 20% a 60% do investimento total. A principal desvantagem, quando comparada a um sistema fotovoltaico off-grid, é a falta de acumulação de energia através de um banco de baterias. Devido à maneira como os inversores interativos devem se comportar durante falhas de energia na rede (como apagões), o imóvel que depende exclusivamente de um SFCR ficará sem energia.

Essa situação ocorre porque, a fim de evitar riscos para os técnicos das empresas distribuidoras durante as manutenções externas, os inversores são programados para desligar automaticamente (ROSA, CSR ENERGIA SOLAR, 2017).

2.5 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O primeiro artigo da Resolução Normativa (REN) 687/2015 estabelece o conceito de sistema de compensação de energia elétrica como aquele no qual a unidade consumidora que possui microgeração ou minigeração distribuída injeta energia ativa na rede elétrica da distribuidora local. Essa energia é cedida por meio de um empréstimo gratuito e, posteriormente, é compensada com o consumo de energia elétrica ativa (MARTINS, 2018). Detalhes dessa abordagem são apresentados na figura 2.7.

Figura 2.7 – Sistema de compensação de energia elétrica



Fonte: (ANEEL,2016)

Quando a quantidade de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em uma unidade consumidora supera o consumo elétrico dessa unidade ao longo de um mês, o consumidor

acumula um crédito em energia (kWh). Esse crédito permanece válido por 60 meses e pode ser utilizado em outra unidade previamente registrada dentro da mesma área de concessão. O crédito de energia pode ser deduzido do consumo em outra localização com uma tarifa diferente ou aplicado nas faturas dos meses subsequentes para outros consumidores (ANEEL, 2016).

No entanto, mesmo quando há um saldo positivo de créditos, os consumidores conectados à rede em baixa tensão (grupo B) são sujeitos a uma tarifa mínima mensal. Essa tarifa corresponde ao custo de manter a disponibilidade da rede elétrica, sendo 30 kWh para sistemas monofásicos, 50 kWh para sistemas bifásicos e 100 kWh para sistemas trifásicos. Analogamente, consumidores conectados à rede em alta tensão (grupo A) terão a fatura baseada na demanda contratada (ANEEL, 2016).

Segundo a Resolução Normativa nº 687 da ANEEL, a geração compartilhada é definida pela congregação de consumidores dentro da mesma região de concessão ou permissão. Isso ocorre por meio de uma cooperativa ou consórcio composto por indivíduos ou entidades jurídicas que possuem unidades consumidoras de micro ou minigeração distribuída em locais distintos das unidades onde o excesso de energia será compensado (MARTINS, 2018).

É importante destacar que a compensação de energia é inicialmente aplicada à unidade de geração. Se ainda houver um excedente, uma porcentagem dos créditos poderá ser direcionada para abater o consumo em outras unidades selecionadas pelo consumidor. No contexto da geração compartilhada, o excedente de energia se refere à diferença positiva entre a energia injetada na rede e a energia consumida (ANEEL, 2016).

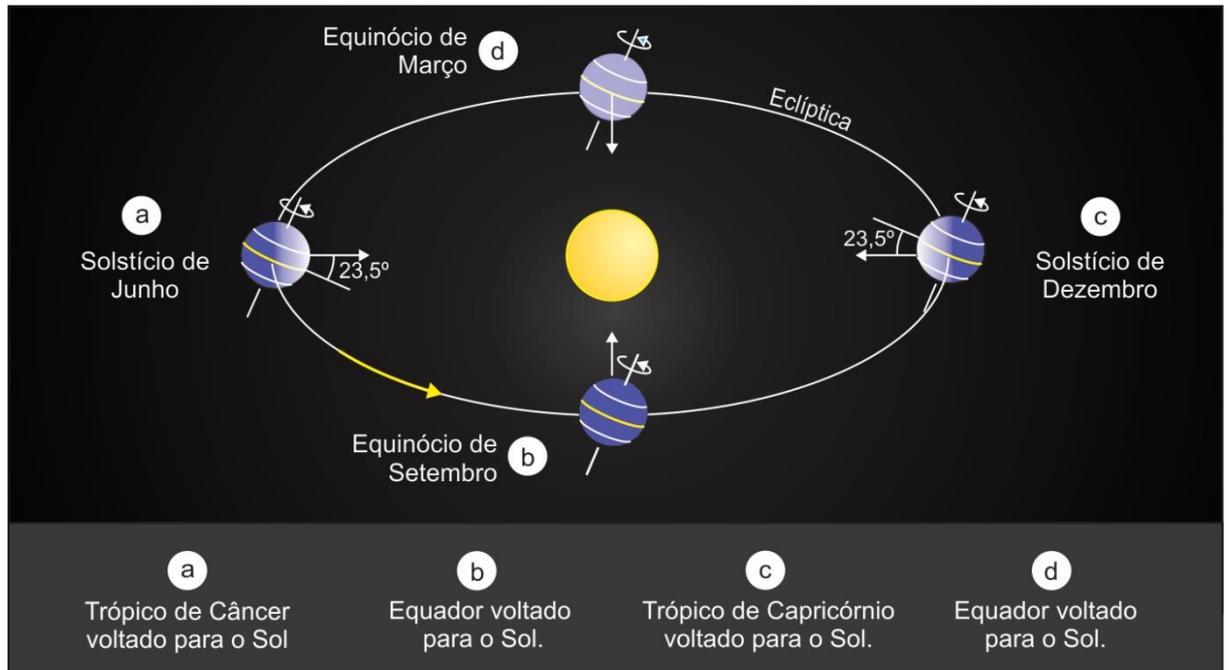
2.6 Radiação Solar

De acordo com a ANEEL (2016), a disponibilidade de radiação solar, também conhecida como energia total incidente na superfície terrestre, é influenciada não apenas pelas condições atmosféricas e climáticas, mas também pela latitude, estações do ano, horário do dia e estado do céu. Esses fatores são delineados da seguinte maneira, de acordo com RIBEIRO (2016):

- **Latitude:** À medida que a latitude aumenta, a área da superfície terrestre atingida pela mesma quantidade de radiação solar aumenta, o que resulta em uma menor intensidade de radiação, conforme ilustrado na Figura 2.8 .

- Estações do ano: O movimento de translação da Terra ao redor do Sol, que causa as estações do ano, ocorre em uma órbita elíptica plana. O eixo de rotação da Terra não coincide com o eixo da elipse, o que resulta em um ângulo de $23,5^\circ$, como mostrado na Figura 2.8. Isso faz com que, em diferentes períodos do ano, um hemisfério da Terra seja mais exposto à luz solar do que o outro.

Figura 2.8 – Movimento de translação da Terra



Fonte: Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>

- Hora do dia: A cada hora do dia, os raios solares atingem uma superfície em ângulos variados.
- Condições do céu: A quantidade de nuvens que cobre o céu afeta a quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre.
- Condições atmosféricas: Dias com neblina, nublados ou poluídos alteram a quantidade de radiação disponível. No entanto, Hudson Markell (1985) sugere que esse fator exerce uma influência limitada, uma vez que a radiação que atinge a superfície terrestre é composta por radiação direta e difusa. Conforme esses autores, em dias claros, cerca de 10% da radiação total que chega à superfície terrestre é difusa. Entretanto, em dias nublados, a radiação difusa frequentemente constitui a maior parte da radiação disponível.

2.7 Radiação Solar No Brasil

De acordo com o Grupo de Trabalho de Energia Solar do CEPEL – CRESESB/RJ, como indicado em sua publicação "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos" (GTES, 2014), a constante solar representa a densidade média anual do fluxo de energia proveniente da radiação solar. Quando medida em um plano perpendicular à direção de propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre, essa constante solar possui o valor de 1.367 W/m².

Considerando o raio médio da Terra como 6.371 km e a irradiância solar de 1.367 W/m², é possível concluir que a potência total emitida pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera, é aproximadamente de 174 mil TW (GTES, 2014). A quantidade anual de energia fornecida pela radiação solar à superfície terrestre é de cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh (CRESESB, 2006).

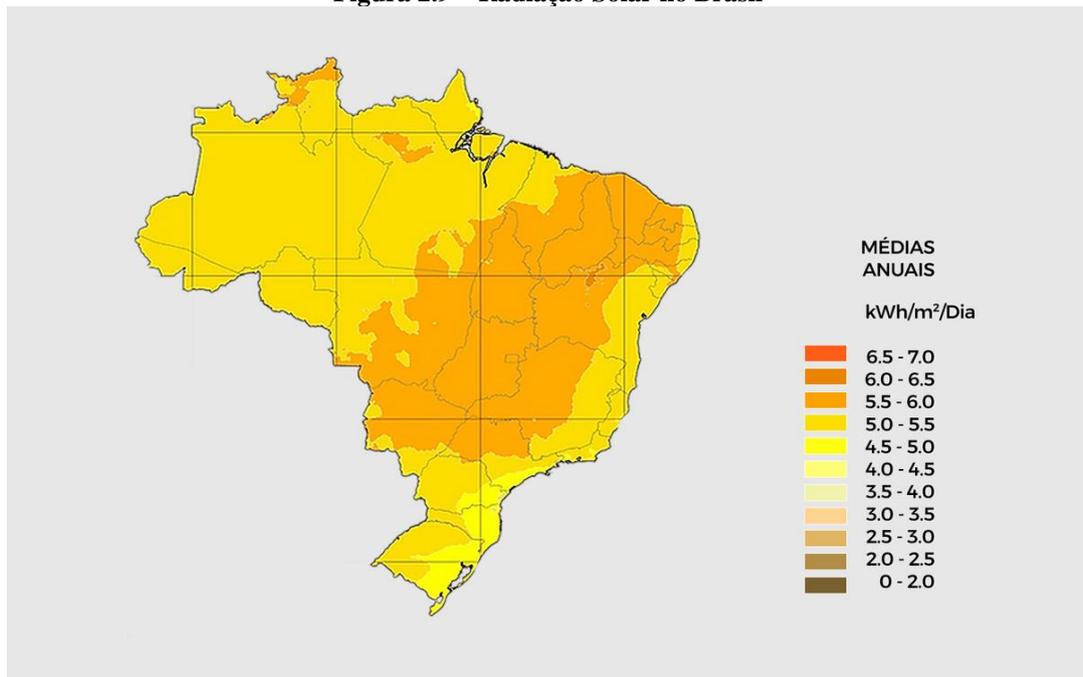
Segundo Trenberth et al., (2009), aproximadamente 54% da irradiância solar que atinge o topo da atmosfera é absorvida, enquanto 7% é refletida e restante são absorvidos ou refletidos pela atmosfera. Isso significa que cerca de 94 mil TW da potência solar total realmente atingem a superfície terrestre.

Como mencionado anteriormente, a radiação solar também é influenciada pelas condições climáticas e atmosféricas. Devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera, apenas uma parte da radiação solar alcança a superfície terrestre. Ainda assim, estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja aproximadamente 10 mil vezes o consumo energético global (CRESESB, 1999).

No Brasil, os níveis mais elevados de radiação solar são encontrados no Nordeste, notadamente no Vale do São Francisco, onde a média anual é cerca de 6 kWh/m². Em contraste, os níveis mais baixos são observados no Litoral Sul-Sudeste e na Amazônia Ocidental, respectivamente. Regiões como o Amapá e o leste do Pará também apresentam índices de radiação abaixo da média nacional (ANEEL, 2002).

Conforme relatado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2002), mesmo nas regiões com os índices mais baixos de radiação solar no Brasil, o potencial para aproveitamento energético é excelente. Na Figura 2.9 ilustra-se o índice médio anual de radiação solar em todo o país

Figura 2.9 – Radiação Solar no Brasil



Fonte: Projeto SWERA (2016).

2.8 Sistemas Fotovoltaicos e Suas Aplicações

O principal problema das células fotovoltaicas, bem como dos outros componentes associados aos sistemas fotovoltaicos, como inversores, baterias e controladores de carga, continua sendo no seu preço substancialmente elevado, quando comparado com as tecnologias convencionais de geração de eletricidade. Não obstante, o âmbito de aplicações continua expandindo-se progressivamente, impulsionado por avanços tecnológicos e pela diminuição dos custos de produção das próprias células. A abundância de luz solar (a matéria-prima essencial) praticamente em todo o mundo e a adaptabilidade modular dos sistemas (que podem ser implantados em diferentes escalas e tamanhos) representam os pontos mais fortes dessa tecnologia. Em grande parte, devido a esses fatores, tem-se observado um crescimento exponencial na produção de células fotovoltaicas, uma tendência que continua a intensificar-se nos dias de hoje (PROENCA, 2007).

Na figura 2.10 mostra-se uma breve evolução dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Figura 2.10 – Evolução dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo.

Data	Aplicação
Finais Século XIX	Fotómetros para Máquinas Fotográficas
1958	Satélites Espaciais
1960-1969	Sistemas de Telecomunicações Remotos, Bóias de Navegação, etc.
1982	Início da massificação: Primeira Grande Central Solar (1 MWp) na Califórnia
1990	Programa dos 100 000 Telhados Solares, na Alemanha
1993	Programa dos 70 000 Telhados Solares, no Japão
2001	Primeiro voo do Helios, um avião a energia solar

Fonte: (PROENÇA, 2007)

Ainda há diversas aplicações das células fotovoltaicas no nosso cotidiano, classificadas de acordo com sua capacidade de produção, conforme mostra-se na figura 2.11:

Figura 2.11 – Aplicações de Células Fotovoltaicas no Cotidiano

Tamanho	Exemplos de Aplicações
Até 10 W	Calculadoras de bolso; Rádios; Sensores wireless remotos; Pequenos carregadores; Cercas eléctricas.
10 W a 100 W	Pequenos sistemas de iluminação; Sinais de trânsito luminosos; Parquímetros; Luzes de navegação; Estações meteorológicas; Caixas de comunicação de auto-estrada.
100 W a 1 kW	Sistemas de bombagem e irrigação; propulsão de pequenos barcos de recreio; Produção de electricidade para pequenos edifícios; Sistemas híbridos pequenos.
1 kW a 10 kW	Sistemas ligados à rede eléctrica ou híbridos de média dimensão; Grandes sistemas não ligados à rede, para edifícios isolados.
10 kW a 100 kW	Grandes sistemas ligados à rede: implantação em edifícios ou no solo
100 kW a 1 MW ou mais	Muito grandes sistemas ligados à rede: Centrais fotovoltaicas.

Fonte: (PROENÇA, 2007)

2.9 Valor Presente Líquido

O Valor Presente Líquido, é uma métrica financeira utilizada para avaliar a rentabilidade de um investimento ou projeto. Ela se baseia no conceito de que o valor do dinheiro muda ao longo do tempo devido a fatores como a inflação e as taxas de juros. O VPL é calculado

subtraindo o custo inicial do investimento (fluxo de caixa inicial) do valor presente dos fluxos de caixa futuros esperados (MIRANDA, 2011)

A fórmula geral para calcular o VPL é a seguinte:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Fct}{(1+r)^t}, \quad (2.1)$$

Onde I indica o valor inicial investido, t o tempo em anos, n a quantidade de anos do fluxo de caixa, Fct é o fluxo de caixa relativo ao valor investido no sistema e r é a taxa interna de retorno

Se o VPL for positivo, significa que o projeto ou investimento pode ser lucrativo, pois os fluxos de caixa futuros têm um valor presente total maior do que o custo inicial do investimento. Um VPL negativo indicaria que o projeto pode não ser viável do ponto de vista financeiro.

2.10 Taxa Interna de Retorno

A taxa interna de retorno (TIR) é um indicador financeiro empregado para analisar a lucratividade de um investimento ou projeto. Essencialmente, a TIR corresponde à taxa de juros na qual o valor presente líquido (VPL) dos fluxos de caixa futuros se iguala a zero. Em termos simples, a TIR equivale à taxa de desconto que iguala o investimento inicial ao valor presente dos fluxos de caixa futuros gerados pelo investimento.

3 METODOLOGIA

O Estudo de caso, analisado neste trabalho, será feito em uma residência localizada na cidade de Ouro Preto – MG. A residência em questão, possui vários moradores, o que ocasiona um alto consumo de energia elétrica.

Figura 3.12 – Fachada do imóvel localizado em Ouro Preto



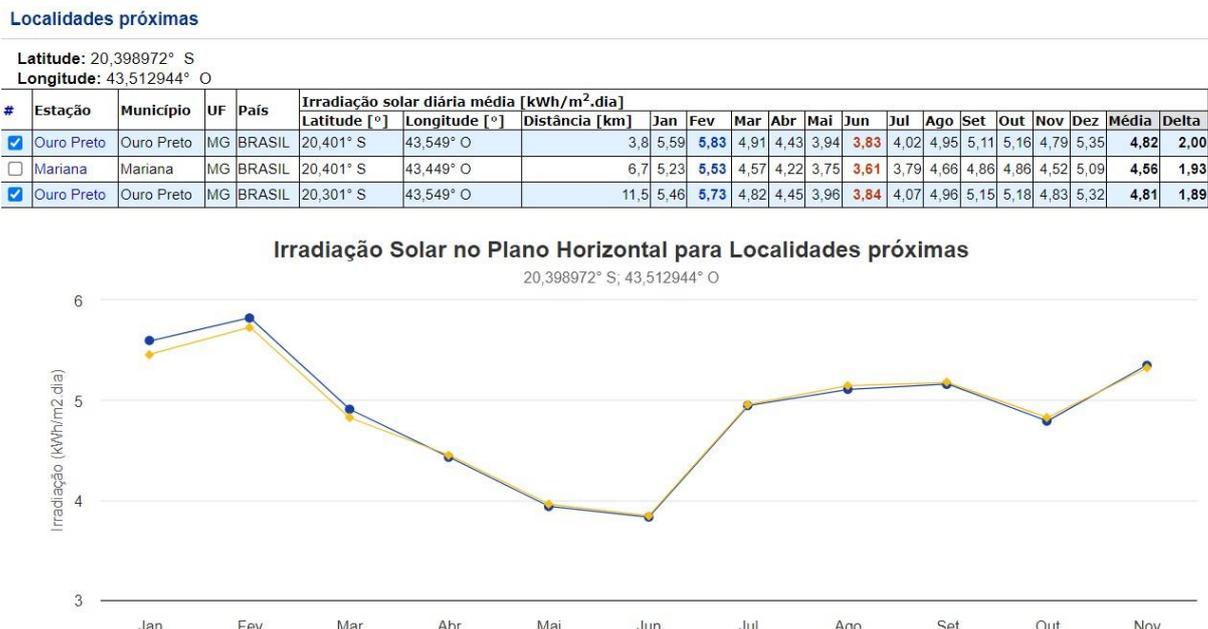
Fonte: Autor

Para posterior dimensionamento do sistema foi feito a coleta dos dados da irradiação solar local, sendo que o imóvel em estudo possui localização geográfica de:

- Latitude: 20,401° S
- Longitude: 43,549 O

Foi utilizado CRESESB, Centro de Referência Solar e Eólica Sérgio Brito, como fonte de dados para consulta no sistema de base de dados SunData. O programa SunData tem como objetivo ser uma ferramenta de consulta para o cálculo da Irradiação solar diária média mensal.

Figura 3.13 – Dados da Irradiação solar em Ouro Preto



Fonte: (CRESESB, 2023)

3.1 Dimensionamento Do Sistema Fotovoltaico

Para dimensionar a unidade geradora fotovoltaica, o primeiro passo consiste-se em calcular o consumo diário anual em quilowatt-hora (kWh/dia). Isso permitirá determinar a potência necessária dos painéis solares que serão conectados à rede elétrica. Esse valor pode ser obtido de duas maneiras: analisando as faturas mensais anteriores ou avaliando as cargas instaladas por meio de um levantamento detalhado (PINHO, GALDINO, 2014).

Sendo assim, opta-se por fazer um apanhado do histórico de consumo do imóvel, que é apresentado na tabela a seguir:

Tabela 3.1 – Histórico de Consumo do Imóvel Estudado

Consumo (kWh)	Mês
432	Abril (2022)
444	Mai (2022)
452	Junho (2022)
398	Julho (2022)
409	Agosto (2022)
405	Setembro (2022)
451	Outubro (2022)
422	Novembro (2022)
413	Dezembro (2022)
290	Janeiro (2023)
388	Fevereiro (2023)
419	Março (2023)

A partir dos dados do histórico de consumo podemos concluir que temos um consumo médio mensal de 410 kWh e consumo diário de 13,7 kWh/dia.

Conforme Villalva (2021) o dimensionamento da potência de pico gerada pelo sistema, utiliza-se a seguinte equação (3.1):

$$P_{Wp} = \frac{E - CD}{Hsp \cdot n \cdot 30,4} , \quad (3.2)$$

E é o consumo médio, CD é taxa de disponibilidade mínima do sistema bifásico em questão, n é a taxa de desempenho e Hsp é a média diária anual de horas de sol pleno. A taxa de desempenho n para sistemas fotovoltaicos residências é considerado em 80% devido as perdas que esse sistema pode ter devido a fatores externos.

Sendo assim, da equação (3.1) temos:

$$P_{Wp} = \frac{410 - 50}{4,81 \cdot 0,8 \cdot 30,4} = 3,08 [kW_p]$$

3.2 Seleção do Módulo

Os módulos fotovoltaicos escolhidos que irão compor os arranjos dos painéis deste projeto foram os da marca Canadian Solar, modelo MAXPOWER CS6U-330P com potência nominal de 330Wp cada e fabricados em silício policristalino. As especificações técnicas mais importantes a serem abordadas neste tópico estão disponíveis na figura 3.14

Figura 3.14 – Dados Técnicos do Painel Canadian Solar

DADOS ELÉTRICOS STC*				
CS6U	315P	320P	325P	330P
Potência nominal máx. (Pmax)	315 W	320 W	325 W	330 W
Tensão operacional opt. (Vmp)	36.6 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V
Corrente operacional opt. (Imp)	8.61 A	8.69 A	8.78 A	8.88 A
Tensão circuito aberto (Voc)	45.1 V	45.3 V	45.5 V	45.6 V
Corrente curto-circuito (Isc)	9.18 A	9.26 A	9.34 A	9.45 A
Eficiência do módulo	16.20%	16.46%	16.72%	16.97%
Temperatura operacional	-40°C ~ +85°C			
Tensão do sistema máx.	1000 V (IEC) ou 1000 V (UL)			
Proteção contra incêndio	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)			
Class. máx. fusíveis em série	15 A			
Classificação da aplicação	Classe A			
Tolerância de potência	0 ~ + 5 W			

Fonte: Datasheet Canadian Solar

Analisou-se outros modelos de módulo, afim de verificar um melhor custo benefício. Os módulos usados foram o Painel Solar BYD BRASIL – 330 Wp – 330P6C-36, que apesar de ter uma maior eficiência, tem um custo mais elevado por ser monocristalino. E ainda foi analisado o painel solar DAH -330w, que possui um custo menor porém com 5 anos a menos de garantia, assim justificando a escolha pelo Canadian Solar

3.3 Cálculo da Quantidade de módulos fotovoltaicos

Para estabelecer a quantidade de módulos a ser instalada, o cálculo envolve a determinação da potência gerada pela diferença entre a energia fornecida e a irradiância anual no local selecionado. Conforme explicado por (FOTAIC, 2017), a quantidade de módulos fotovoltaicos é obtida por meio da seguinte equação (3.4):

$$N_{módulos} = \frac{P_{Wp}}{P_{módulo}}, \quad (3.3)$$

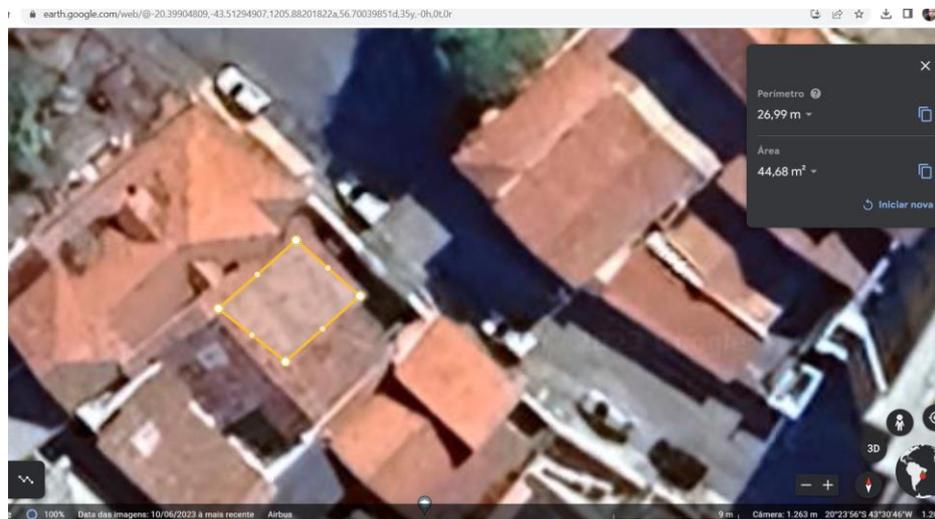
Onde $N_{módulos}$ é o número de módulos procurados para o nosso sistema e $P_{módulo}$ é a potência de pico máximo do nosso modulo escolhido anteriormente. Sendo assim, da equação (3.3) tem-se:

$$N_{módulos} = \frac{P_{Wp}}{P_{módulo}} = \frac{3.08 \text{ kW}_P}{330 \text{ W}_P} = 9,33 \text{ Modulos}$$

Para efeitos de projeto, iremos considerar o sistema com um total de 10 módulos. A área de cada modulo será de $1,95 \text{ m}^2$, de acordo com os dados de largura e comprimento fornecidos pelo fabricante. Pra um total de 10 módulos teremos uma área de aplicação de $19,5 \text{ m}^2$.

A área disponível para instalação do sistema atende perfeitamente a área total dos 10 módulos, conforme apresenta-se na figura a seguir.

Figura 3.15 – Área disponível para Instalação do Projeto



Fonte: Google Earth

3.4 Disposição dos Módulos Fotovoltaicos

As instalações dos módulos fotovoltaicos devem ser em série, paralelo ou série-paralelo. A tensão de saída e a corrente gerada no módulo devem atender os limites máximos permitidos pelo inversor. Com isso, calcula-se a tensão de entrada no inversor e a máxima tensão do sistema ocorre quando o painel está em circuito aberto (V_{oc}). Essa máxima tensão ocorre em estações que temos baixa irradiância (PINHO, GALDINO, 2014). Com isso, o cálculo do número máximo de módulos em série deve levar em conta a tensão de circuito aberto e a tensão de entrada máxima permitida no inversor ($V_{imáx}$)

$$N^{\circ} \text{módulos}_{série} \cdot V_{oc} < V_{imax} \quad (3.4)$$

Para o projeto em questão, considera-se 5 módulos em série. Consultando as especificações dos módulos, tem-se:

$$5 \cdot 45,6 < 1000 \text{ [V]}$$

$$228 < 1000 \text{ [V]}$$

Dessa forma, após a conclusão das diversas análises dos critérios, torna-se viável proceder com a configuração em série de 5 módulos fotovoltaicos, conforme indicado pela equação. O passo subsequente envolve a avaliação da possibilidade de conexão dos módulos já interligados em série em um arranjo paralelo. A fim de assegurar que o limite máximo da corrente na entrada do inversor ($I_{imáx}$) não seja excedido, é imprescindível a satisfação da equação. Neste contexto, onde ISC representa a corrente de curto-circuito, tem-se que:

$$N_{\text{Arranjo série paralelo}} = \frac{I_{max}}{I_{sc}} = \frac{18}{9,45} = 1,9 .$$

O número máximo de ligações em paralelo dos módulos em série, portanto, será igual a 2, atendo as especificações desejadas.

3.5 Seleção do Inversor

O inversor tem a função de transformar a energia proveniente dos painéis, que é em corrente contínua, em corrente alternada, de acordo com os padrões da rede de distribuição pública. É

essencial que o inversor tenha uma capacidade de potência adequada para o sistema, podendo ser igual à potência gerada pelo sistema ou até mesmo superior.

É feita a seleção do inversor baseando-se na potência do sistema fotovoltaico, juntamente com a consideração de outros elementos ambientais e econômicos e (PINHO, GALDINO, 2014). Para este projeto, foi optado pelo inversor da marca FRONIUS, Modelo Primo 4.0-1. O dimensionamento do inversor foi determinado com base na potência de pico do sistema fotovoltaico, a qual é de 3,08 kWp. Sendo assim, foi selecionado um inversor com capacidade nominal de 4000 Wp para atender a essa demanda.

Figura 3.16 – Inversor FRONIUS



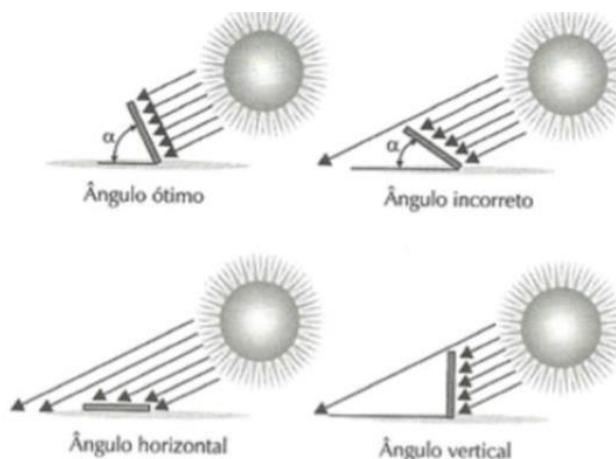
Fonte: (FRONIUS, 2023)

Outro inversor que foi analisado e que atenderia o projeto é o Inversor Solar ABB 3.3KWp UNO DM 3.3 TL PLUS SB, que apesar de possuir uma qualidade superior, tem o custo mais elevado e potência d épico menor que o inversor escolhido

3.6 Angulação e Direção dos Módulos Fotovoltaicos

Para a instalação dos módulos no imóvel em estudo, deve -se ter um parâmetro para orientação e inclinação dos módulos, de modo a atingir a máxima capitação de energia solar. Para (VILLALVA,2021), não é ideal a inclinação menor que 10 graus, devido ao acumulo de sujeira que esse ângulo pode gerar, bem como a perda da eficiência do sistema. Na figura a seguir ilustra-se uma explicação de ângulos dos painéis.

Figura 3.17 – Diferentes Angulações de Módulos Fotovoltaicos



Fonte: (VILLALVA, 2021)

Ainda Segundo Villalva (2021) tem-se ângulo ótimos para a instalação dos painéis fotovoltaicos. A Tabela 3.2 apresenta -se esses ângulos de referência para instalação

Tabela 3.2 – Escolha do ângulo de inclinação do módulo

Latitude Geográfica (°)	Angulo de inclinação recomendado (°)
0 a 10	10
11 a 20	Latitude
21 a 30	Latitude + 5
31 a 40	Latitude + 10
41 ou mais	Latitude + 15

Fonte: Autor, adaptado de (VILLALVA,2021)

Como a Latitude de Ouro Preto é de aproximadamente 20°, tem-se que a instalação dever ser na inclinação da Latitude, de acordo com os dados fornecidos na tabela.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Terminados todos os cálculos e análises imprescindíveis para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, resultou em um projeto com uma capacidade total de 3,08 kWp, o qual é capaz de suprir integralmente a demanda energética dos residentes na habitação onde será implementado. Esse projeto demandou o uso de 10 módulos fotovoltaicos da marca Canadian Solar, organizados em duas linhas paralelas, sendo feito 2 associações em serie com 5 módulos em cada associação. Foi selecionado o inversor Fronius 4.0 para suprir a demanda do projeto

4.1 Orçamento

Para implementar o sistema de geração solar, são indispensáveis os componentes de módulos fotovoltaicos, inversor, cabos, estrutura de suporte para os painéis, bem como dispositivos de proteção elétrica. Nesse sentido, foi conduzida uma análise de mercado e os custos associados à instalação estão detalhados na tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Orçamento do Sistema Fotovoltaico

Orçamento					
Itens	Qtd		Preço Unitário		Preço Total
Modulo Fotovoltaico Canadian Solar	10	R\$	784,00	R\$	7.840,00
Inversor Fronius 4,0 -1	1	R\$	7.640,00	R\$	7.640,00
Projeto e Instalação	1	R\$	2.400,00	R\$	2.400,00
Conectores e Cabeamentos	1	R\$	1.200,00	R\$	1.200,00
Total do Investimento do Projeto				R\$	19.080,00

Fonte: Autor

4.2 Perdas

Para Miranda (2014), existem diversas perdas que devem ser consideradas em um sistema fotovoltaico, como baixa irradiância solar, perdas nos condutores CC – CA, perdas no inversor, perda por poeira e resíduos. Na tabela a seguir, tem-se as perdas já conhecidas pelo fabricante dos materiais selecionados anteriormente, bem como as estudadas por Miranda. Na tabela 4.4 tem-se essas perdas.

Tabela 4.4 - Perdas

Perdas	Valor Considerado
Baixa Irradiância	4%
Temperatura Nominal de Operação	7,2%
Condutores CC	2%
Condutores CA	1%
Inversor	1,9%
Degradação da Incidência Solar	1%
Poeiras nos Módulos	2%
Total	19,10%

Fonte: Autor

4.3 Geração Anual do Sistema Fotovoltaico

Para se ter a geração anual produzida pelo sistema em questão temos que levar consideração a quantidade de energia gerada por cada modulo. Essa quantidade de energia leva-se em consideração a área do modulo, e também sua exposição solar. Geralmente, os módulos fotovoltaicos possuem eficiência situada na faixa de 6% a 20%. O cálculo da capacidade de geração energética pode ser obtido multiplicando esses fatores, conforme mostra -se na equação (3.5)

$$E = A \cdot \eta \cdot H_{sp} \quad (3.5)$$

Considerando A (m²) como a área individual de cada módulo, η (adimensional) como sua eficiência, e H_{sp} (kWh/m². dia) como a insolação média local, utilizando os valores já calculados e determinados anteriormente e obtidos do catálogo de especificações, podemos estimar a energia gerada por cada módulo em um dia como:

$$E = 1,95 \cdot 0,16 \cdot 4,81 = 1,50 \text{ kWh/dia.}$$

Utilizando o resultado obtido na equação anterior, juntamente com o valor de potência nominal de cada módulo, torna-se viável uma estimativa da produção anual do sistema, bem como a potência total instalada. No caso da produção anual, o cálculo é realizado multiplicando o valor E por 365 (representando o número de dias no ano) e pela quantidade de módulos presente.

Para a avaliação da capacidade do sistema, é suficiente multiplicar a potência individual de cada módulo por 10 (equivalente ao número de módulos instalados). Por fim, incorporando o percentual de perdas do sistema previamente calculado, obtém-se os resultados de produção de energia que se aproximam mais da realidade, conforme ilustrado na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Geração Fotovoltaica Anual

	Sem Perdas	Com Perdas
Energia Produzida Por Um Único Modulo(kWh/dia)	1,5	1,21
Potência Instalada(kW)	3,08	2,49
Geração Anual (kWh)	6533,5	4416,5

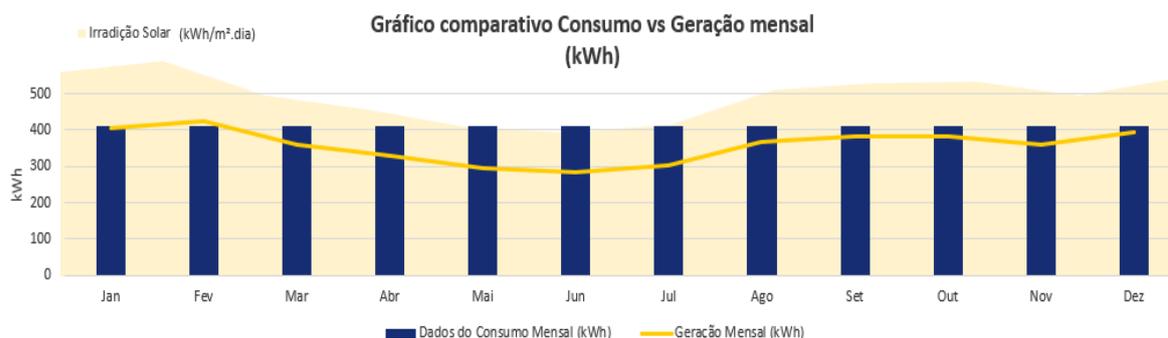
Fonte: Autor

De acordo com a tabela anterior, após as deduções das perdas, tem -se que temos uma geração anual média de 4416,5 kWh

4.4 Análise da Viabilidade Econômica

Na figura abaixo tem-se uma estimativa da geração mensal do sistema fotovoltaico. Tem-se que alguns meses o consumo médio ficara bem superior a energia produzida pelo sistema. Essa análise levou em conta os dados de irradiação fornecidos pelo Cresesb.

Gráfico 4.1 – Energia Consumida e Energia Gerada

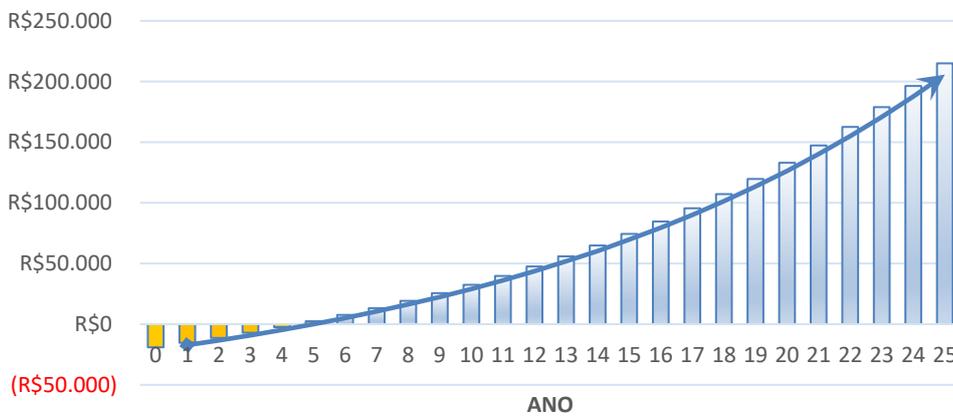


Fonte: Autor

Para análise da viabilidade econômica do sistema e seu tempo de retorno, utilizamos o VPL e TMA.

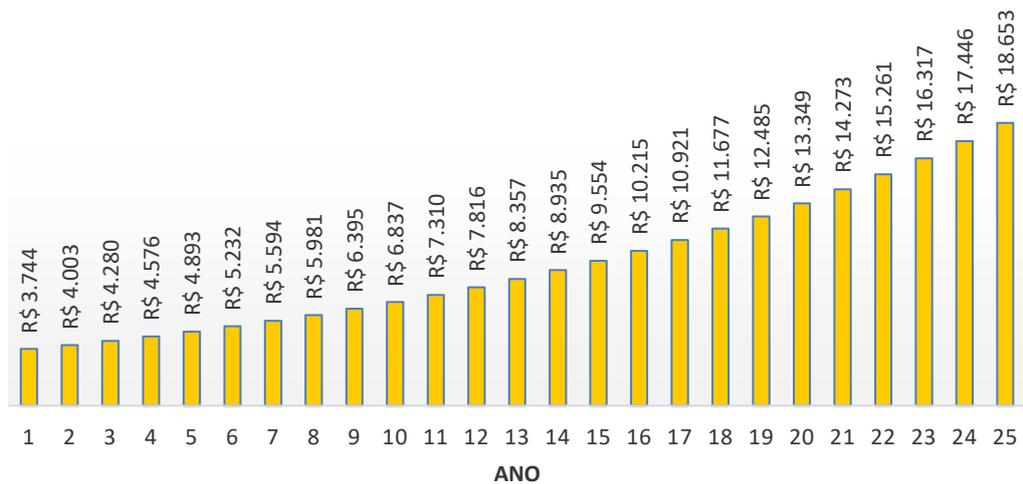
É feita uma análise durante os 25 anos para ver se o projeto tem retorno financeiro. Foi feita uma análise de quanto seria gerado por ano de energia elétrica, já considerando a perda do sistema aos longos dos anos e um aumento de tarifa. Para efeitos de calculo foi utilizada uma tarifa de R\$ 0,90 kWh, e um aumento de 5% ao ano, de acordo com a tarifa atual da Cemig para residências GD. A bandeira tarifaria utilizada foi a vermelha. Nos Gráficos 4.2 e 4.3 tem-se uma projeção do retorno de investimento e a economia de energia ao longo dos anos.

Gráfico 4. 2 - Payback



Fonte: Autor

Gráfico 4.3 – Economia de Energia Elétrica



Fonte: Autor

O presente trabalho mostra que a implementação do projeto é viável. Com um *payback* de 4 anos e 6 meses e uma taxa interna de retorno de 26,23%. Como temos o VPL em R\$ 36.703,83 o sistema é economicamente viável

5 CONCLUSÕES

O objetivo central do trabalho consistiu em fazer um estudo, que fosse economicamente viável e sustentável para resolver o problema das altas contas de energia. O sistema proposto obteve êxito ao desenvolver um sistema fotovoltaico que atendesse às necessidades energéticas de uma residência estudantil. O estudo da implementação do projeto também se mostrou viável do ponto de vista econômico.

Em resumo, a utilização da energia solar fotovoltaica demonstra grande promessa e está preparada para um crescimento substancial na matriz energética nacional nos próximos anos, em consonância com as tendências globais. A redução dos custos de mercado e os contínuos avanços tecnológicos aumentam a eficiência dos componentes solares. Trata-se de uma excelente alternativa para diversificar as fontes de energia no Brasil e deve ser ativamente promovida.

As expectativas são altas de que esse setor continuará sua expansão nos próximos anos, pois energia solar fotovoltaica já é um investimento muito atrativo.

Como trabalhos futuros pode-se fazer um dimensionamento de um sistema *off-grid* ou híbrido e fazer uma análise das diferenças de custos e retorno envolvidas nos três sistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA. (2016) Cadernos Temáticos ANEEL - Micro e Minigeração Distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. Brasília

BENEDITO, R. S. (2009). Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistema fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. São Paulo, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Instituto de Eletrotécnica e Energia e Instituto de Física) para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Universidade de São Paulo – USP.

BONATTO, Thiago de Salles. Dimensionamento e análise de retorno de investimento de uma usina de geração solar. 2019. 42 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

BÜHLER, Alexandre José; DOS SANTOS, Fernando Hoefling; GABE, Ivan Jorge. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

CEPEL; CRESESB; Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Edição Especial PRC-PRODEEM. Rio de Janeiro, 2004.

FOTAIC, Energia Solar. Manual de energia solar. 1 ed. Fortaleza, 2017. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/368330602/Fotaic-O-Manual-Da-Energia-Solar>. Acesso em: 18 Agosto de 2023

FRONIUS PRIMO. (2023). O inversor comunicativo para gestão otimizada de energia. [online] Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/instaladores-e-parceiros/dados-tecnicos/todos-os-produtos/inversor/fronius-primo/fronius-primo-4-0-1> (Acessado em: 20 de jun de 2023).

FRAUNHOFER ISE. Photovoltaics Report. Freiburg: FRAUNHOFER ISE, 17 nov. 2016.

GTES. GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014. 530p

MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S. (2014). Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. Revista Virtual de Química. vol. 7, n° 1, p. 128-129.

MIRANDA, Joseane Borges de. Engenharia Econômica: Livro didático. Palhoça: Unisul Virtual, 2011. 149 p.

MORAES, Alvaro Lucatelli Russi de e BERNARDES, Maurício. Sistemas fotovoltaicos integrados à fachada de edifícios corporativos na cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/2728f893-e189-49fb-bd39-900f614b0f49/AlvaroLucatelliRussideMoraes%20-%20PI.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.

NASCIMENO, R.L (2017). Energia solar no Brasil: Situação e Perspectivas. Câmara dos Deputados. p. 4.

PROENÇA, E. D. R. B. A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal. 2007. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2007.

PINHO, J. T. et GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos, 2014.

ROSA, R.S., CSR ENERGIA SOLAR (2017). Sistema fotovoltaico conectado à rede -SFCR/ ON-GRID. [Online] disponível em: <http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede---sfcron-grid> (Acessado em: 10 de maio de 2023)

RUTHER, R. (2004). Pré-dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de caso do edifício-sede do CREA – SC. In: Conferência Latino-americana de Construção Sustentável, 1.; Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10. São Paulo – SP. I CLACS; X ENTAC, 2009.

SANTOS, M. A. (2016). *Dimensionamento e retorno de investimento de geração de energia solar residencial: um estudo de caso no município de Lagoa Santa – MG*, Curitiba, Trabalho de conclusão do curso de especialização em mudanças climáticas, projetos sustentáveis e

mercado de carbono do programa de educação continuada em ciências agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

TORRES, R. C. (2012). *Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais*. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

VILLALVA, M. G. *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*, 2021.

ANEXOS

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging



FRONIUS PRIMO

The communicative inverter for optimised energy management.



SnapINverter Technology



Integrated data communication



SuperFlex Design



Dynamic Peak Manager



Smart Grid Ready



Zero feed-in

The Fronius Primo in power categories from 3.0 to 8.2 kW perfectly completes the SnapINverter generation. This single-phase, transformerless device is the ideal inverter for private households.

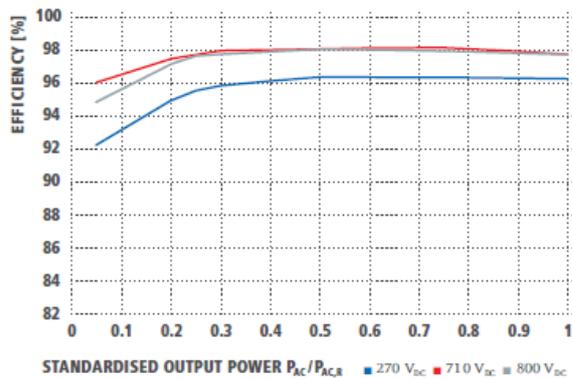
Its innovative SuperFlex Design provides maximum flexibility in system design, while the SnapINverter mounting system makes installation and maintenance easier than ever before. The communication package included as standard, with WLAN, energy management, several interfaces and much more besides, makes the Fronius Primo a communicative inverter for owner-occupiers.

TECHNICAL DATA FRONIUS PRIMO (3.0-1, 3.5-1, 3.6-1, 4.0-1, 4.6-1)

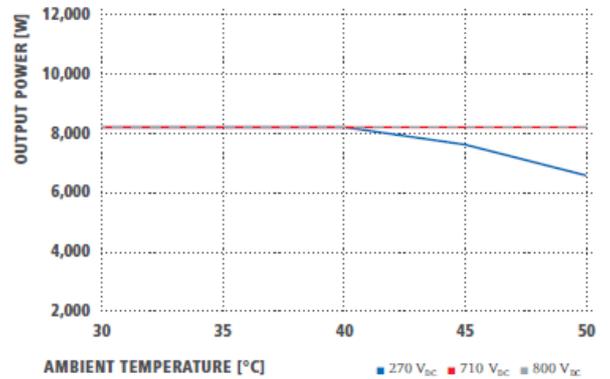
INPUT DATA	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
Number of MPP trackers			2		
Max. input current ($I_{dc,max} 1 / I_{dc,max} 2$)			12.0 A / 12.0 A		
Max. array short circuit current MPP1/MPP2 ($I_{sc,pa}$)*			24.0 A / 24.0 A		
DC input voltage range ($U_{dc,min} - U_{dc,max}$)			80 - 1000 V		
Feed-in start voltage ($U_{dc,start}$)			80 V		
Usable MPP voltage range			80 - 800 V		
Number of DC connections			2 + 2		
Max. PV generator output ($P_{dc,max}$)	4.5 kW _{peak}	5.3 kW _{peak}	5.5 kW _{peak}	6.0 kW _{peak}	6.9 kW _{peak}
OUTPUT DATA	PRIMO 3.0-1	PRIMO 3.5-1	PRIMO 3.6-1	PRIMO 4.0-1	PRIMO 4.6-1
AC nominal output (P_{ac})	3,000 W	3,500 W	3,680 W	4,000 W	4,600 W
Max. output power / rated apparent power	3,000 VA	3,500 VA	3,680 VA	4,000 VA	4,600 VA
AC output current ($I_{ac,max}$)	13.0 A	15.2 A	16.0 A	17.4 A	20.0 A
Grid connection (voltage range)			1 ~ NPE 220 V / 230 V (180 V - 270 V)		
Frequency (frequency range)			50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)		
Total harmonic distortion			< 3 %		
Power factor ($\cos \phi_{ac}$)			0.85 - 1 ind. / cap.		

* $I_{sc,pv} = I_{sc,max} \Rightarrow I_{sc}(STC) \times 1,25$ according to e.g. IEC 60364-7-712, NEC 2020, AS/NZS 5033:2021.

FRONIUS PRIMO 8.2-1 EFFICIENCY CURVE



FRONIUS PRIMO 8.2-1 TEMPERATURE DERATING



TECHNICAL DATA FRONIUS PRIMO (5.0-1, 5.0-1 AUS, 6.0-1, 8.2-1)

INPUT DATA	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
Number of MPP trackers			2	
Max. input current ($I_{dc\ max\ 1} / I_{dc\ max\ 2}$)	12.0 A / 12.0 A		18.0 A / 18.0 A	
Max. array short circuit current MPP1/MPP2 ($I_{sc\ pa}$)*	24.0 A / 24.0 A		36.0 A / 36.0 A	
DC input voltage range ($U_{dc\ min} - U_{dc\ max}$)			80 - 1,000 V	
Feed-in start voltage ($U_{dc\ start}$)			80 V	
Usable MPP voltage range			80 - 800 V	
Number of DC connections			2 + 2	
Max. PV generator output ($P_{dc\ max}$)	7.5 kW _{peak}	7.5 kW _{peak}	9.0 kW _{peak}	12.3 kW _{peak}
OUTPUT DATA	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
AC nominal output ($P_{ac,r}$)	5,000 W	4,600 W	6,000 W	8,200 W
Max. output power / rated apparent power	5,000 VA	5,000 VA / 4,600 VA	6,000 VA	8,200 VA
AC output current ($I_{ac\ nom}$)	21.7 A	21.7 A	26.1 A	35.7 A
Grid connection (voltage range)			1 - NPE 220 V / 230 V (180 V - 270 V)	
Frequency (frequency range)			50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Total harmonic distortion			< 3 %	
Power factor ($\cos\ \phi_{ac,r}$)			0.85 - 1 Ind. / cap.	
GENERAL DATA	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
Dimensions (height x width x depth)			645 x 431 x 204 mm	
Weight			21.5 kg	
Degree of protection			IP 65	
Protection class			1	
Overvoltage category (DC / AC) ¹⁾			2 / 3	
Night time consumption			< 1 W	
Inverter design			Transformerless	
Cooling			Regulated air cooling	
Installation			Indoor and outdoor installation	
Ambient temperature range			-40 - +55 °C	
Permitted humidity			0 - 100 %	
Max. altitude			4,000 m	
DC connection technology			4x DC+ and 4x DC- screw terminals 2.5 - 16 mm ²	
AC connection technology			3-pole AC screw terminals 2.5 - 16 mm ²	
Certificates and compliance with standards			DIN V VDE 0126-1-1/A1, IEC 62109-1/-2, IEC 62116, IEC 61727, AS 4777-2, AS 4777-3, G98, G99, CEI 0-21, VDE AR N 4105 ²⁾	
Country of manufacture			Austria	

¹⁾ According to IEC 62109-1.

²⁾ Fronius Primo 5.0-1, Fronius Primo 6.0-1 and Fronius Primo 8.2-1 are not fully compliant with VDE AR N 4105.

EFFICIENCY	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
Max. efficiency	98.1 %	98.1 %	98.1 %	98.1 %
European efficiency (η _{EU})	97.1 %	97.1 %	97.3 %	97.5 %
MPP adaptation efficiency	> 99.9 %			

PROTECTIVE DEVICES	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
DC insulation measurement			Yes	
Overload behaviour		Operating point shift, power limitation		
DC disconnect			Yes	
Reverse polarity protection			Yes	
RCMU			Yes	

INTERFACES	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1	PRIMO 8.2-1
WLAN / Ethernet LAN		Fronius Solar.web, Modbus TCP SunSpec, Fronius Solar API (JSON)		
6 inputs and 4 digital in/out		Interface to ripple control receiver		
USB (A socket) ¹⁾		Datalogging, inverter update via USB flash drive		
2x RS422 (RJ45 socket) ¹⁾		Fronius Solar Net		
Signalling output ¹⁾		Energy management (potential-free relay output)		
Datalogger and Webserver		Included		
External input ¹⁾		50-Meter Interface / Input for overvoltage protection		
RS485		Modbus RTU SunSpec or meter connection		

¹⁾ Also available in the light version.
Further information and technical data can be found at www.fronius.com.



HiKu
SUPER HIGH POWER POLY PERC MODULE
325 W ~ 350 W
CS3L-325 | 330 | 335 | 340 | 345 | 350P

MORE POWER

-  24 % higher power than conventional modules
-  Up to 4.5 % lower LCOE
Up to 2.7 % lower system cost
-  Low NMOT: 42 ± 3 °C
Low temperature coefficient (Pmax): -0.36 % / °C
-  Better shading tolerance

MORE RELIABLE

-  Lower internal current, lower hot spot temperature
-  Minimizes micro-crack impacts
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 3600 Pa*

*Black frame product can be provided upon request.

25 years linear power output warranty*

12 years enhanced product warranty on materials and workmanship*

*According to the applicable Canadian Solar Limited Warranty Statement.

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
 ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
 OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / INMETRO
 UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)
 UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
 UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1 / Take-e-way



* As there are different certification requirements in different markets, please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific certificates applicable to the products in the region in which the products are to be used.

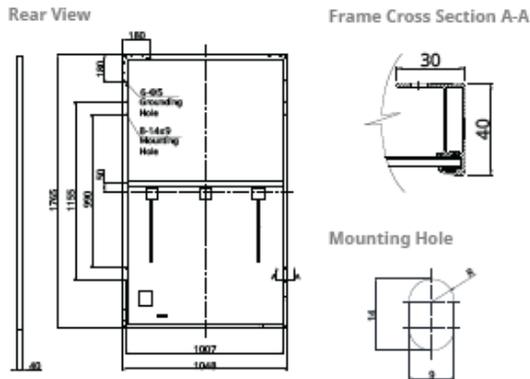
CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in IHS Module Customer Insight Survey. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 40 GW deployed around the world since 2001.

* For detail information, please refer to Installation Manual.

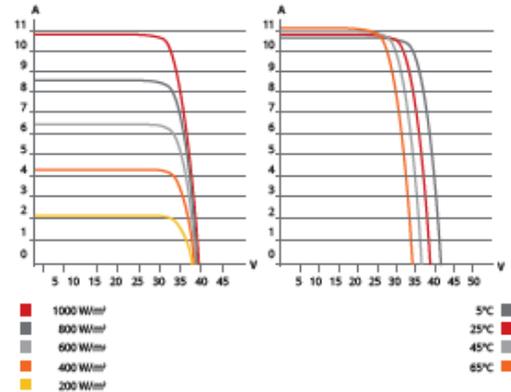
CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS3L-330P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W	340 W	345 W	350 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	32.0 V	32.2 V	32.4 V	32.6 V	32.8 V	33.0 V
Opt. Operating Current (Imp)	10.16 A	10.24 A	10.34 A	10.43 A	10.52 A	10.61 A
Open Circuit Voltage (Voc)	39.0 V	39.2 V	39.4 V	39.6 V	39.8 V	40.2 V
Short Circuit Current (Isc)	10.74 A	10.82 A	10.90 A	10.98 A	11.06 A	11.24 A
Module Efficiency	17.6%	17.8%	18.1%	18.4%	18.7%	18.9%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	20 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS3L	325P	330P	335P	340P	345P	350P
Nominal Max. Power (Pmax)	242 W	246 W	249 W	253 W	257 W	261 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	29.8 V	30.0 V	30.2 V	30.3 V	30.5 V	30.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.13 A	8.20 A	8.27 A	8.35 A	8.42 A	8.49 A
Open Circuit Voltage (Voc)	36.6 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V	37.4 V	37.8 V
Short Circuit Current (Isc)	8.66 A	8.73 A	8.79 A	8.86 A	8.92 A	9.07 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m² spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline
Cell Arrangement	120 [2 X (10 X 6)]
Dimensions	1765 X 1048 X 40 mm (69.5 X 41.3 X 1.57 in)
Weight	21.1 kg (46.5 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy, crossbar enhanced
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 500 mm (19.7 in) (+) / 350 mm (13.8 in) (-); landscape: 1250 mm (49.2 in)*
Connector	T4 series or H4 UTX or MC4-EVO2
Per Pallet	27 pieces
Per Container (40' HQ)	702 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.36 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.28 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature	42 ± 3°C

PARTNER SECTION



* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice. Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

CANADIAN SOLAR INC.
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com