



CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE UM  
PROJETO FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**

Romildo de Assis e Silva Neto

*SÃO JOÃO DEL REI – MINAS GERAIS*

2022

## DEDICATÓRIA

A minha família sem a qual não seria capaz de alcançar o que alcancei ...

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof<sup>a</sup>. Orientadora, braço amigo de todas as etapas deste trabalho.

A minha família, pela confiança e motivação.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração em relação a esta jornada.

Aos professores e colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

Aos profissionais entrevistados, pela concessão de informações valiosas para a realização deste estudo.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

A orientadora do TCC que sempre me incentivou a estudar mais para dar maior qualidade à minha monografia

## EPÍGRAFE

“O temor do Senhor é o princípio da sabedoria,  
e o conhecimento do Santo é prudência”.

Provérbios 9.10

NETO, Romildo, de Assis e Silva. **Estudo de Caso: Desenvolvimento de um projeto fotovoltaico residencial.** Trabalho de Conclusão do curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de São João Del Rei, 2022.

## **RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um projeto de microgeração fotovoltaica conectada à rede de distribuição de energia elétrica para uma residência localizada no município de Conselheiro Lafaiete MG. A princípio fora feita a revisão bibliográfica abordando os principais tópicos do tema. A seguir, são apresentadas as normas estabelecidas pela ANEEL que determinam os requisitos do projeto e os equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico. São analisados os dados de consumo e irradiância no local, obtidos através do software RADIASOL2, que embasaram o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e do inversor de frequência do sistema proposto. A partir do projeto obtiveram-se os dados estimados de energia elétrica gerada em comparação com as estimativas de consumo. Por fim, é calculado o tempo de retorno do investimento do projeto.

**Palavras-chave:** Fotovoltaico; Microgeração; ANEEL.

SÃO JOÃO DEL-REI

2022

ROMILDO DE ASSIS E SILVA NETO

**ESTUDO DE CASO: DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO  
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal de São João Del-Rei como parte dos requisitos para conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica.

SÃO JOÃO DEL-REI

2022

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.....	9
Figura 2 - Total Diário da Irradiação Direta Normal Anual.....	10
Figura 3 - Total Diário da Irradiação Direta Normal Anual.....	11
Figura 4- Topologia de um sistema fotovoltaico Off-Grid.....	16
Figura 5 - Topologia de um sistema fotovoltaico On-Grid. ....	17
Figura 6 - Topologia de um sistema fotovoltaico Híbrido. ....	18
Figura 7 - Célula Monocristalina.....	19
Figura 8 - Célula policristalina .....	20
Figura 9 - Célula filme fino. ....	21
Figura 10 - Inversor Solar SOFAR SOLAR 3K-TL.....	22
Figura 11 - String Box CA .....	24
Figura 12 - Medidor Bilateral de Energia.....	25
Figura 13 – Fatura do Cliente .....	27
Figura 14 - Irradiação Solar - Conselheiro Lafaiete - MG .....	28
Figura 15 - Módulo Fotovoltaico .....	30
Figura 16 - Inversor .....	32
Figura 17 - Dispositivos de proteção do inversor definido. ....	35
Figura 18 - Método de instalação .....	38
Figura 19 - Capacidade de condução de corrente.....	38
Figura 20 - Fator de agrupamento para condutores elétricos .....	39
Figura 21 – String Box CC.....	41
Figura 22 - Correção de temperatura.....	42
Figura 23 - Capacidade de Condução de Corrente CA. ....	42
Figura 24 - String Box CA. ....	44
Figura 25 - Dados Físicos do Pannel.....	46
Figura 26 - Irradiação média corrigida pela inclinação e orientação do telhado.....	47

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 1 - Critérios para determinar a proteção dos módulos e do fluxo de corrente reversa .	35
Tabela 2 - Critérios para determinar o DPS .....	36
Tabela 3 - Critérios para determinar o DPS. ....	43
Tabela 4 - Lista de Materiais do Sistema FV Proposto .....	45



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1 Energia fotovoltaica.....	7
2.2 Efeito fotovoltaico .....	8
2.3 Índice solar no Brasil.....	9
2.4 Resoluções ANEEL .....	11
2.4.1 Principais Pontos da RN N° 482 .....	12
2.4.1.1 Microgeração e minigeração .....	12
2.4.1.2 Sistema de compensação de energia.....	12
2.4.1.3 Dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos.....	13
2.4.1.4 Taxa mínima por grupo de consumidor.....	13
2.4.1.5 Atualizações da NR N° 482 .....	14
2.4.2 Principais pontos da RN N° 687.....	14
2.4.2.1 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras .....	14
2.4.2.2 Geração compartilhada.....	15
2.4.2.3 Autoconsumo remoto .....	15
2.5 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	15
2.5.1 Sistema <i>Off-Grid</i> .....	16
2.5.2 Sistema <i>On-Grid</i> .....	17
2.5.3 Sistema híbrido .....	17
2.6 Componentes do Sistema Fotovoltaico .....	19
2.6.1 Módulo solar.....	19
2.6.1.1 Pannel solar de silício monocristalino.....	19
2.6.1.2 Pannel solar de silício policristalino.....	20
2.6.1.3 Pannel solar de filmes finos.....	20
2.6.2 Inversor solar fotovoltaico.....	21
2.6.2.1 Inversores comutados pela rede.....	22
2.6.2.2 Inversores auto comutados .....	23
2.6.3 <i>String box</i> .....	23
2.6.4 Medidor de energia bidirecional.....	24
<b>3 PROJETO FOTOVOLTAICO .....</b>	<b>26</b>
3.1 Dimensionamento.....	26

3.1.1	Análise da fatura de energia .....	26
3.1.2	Recurso solar do local .....	28
3.1.3	Energia de compensação .....	28
3.1.4	Especificação dos componentes do sistema fotovoltaico do estudo de caso.....	29
3.1.4.1	Módulo fotovoltaico .....	29
3.1.4.2	Inversor.....	31
3.1.4.3	Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção CC.....	34
3.1.4.3.1	Proteção dos módulos do fluxo de corrente reversa, com a <i>string box</i> que deverá conter fusível ou disjuntor CC.....	34
3.1.4.3.2	Critério para determinar a proteção de sobrecorrente e seccionamento do arranjo fotovoltaico.....	35
3.1.4.3.3	Proteção de sobretensão a <i>string box</i> com dispositivos de proteção contra surtos (DPS) .....	36
3.1.4.3.4	Dimensionamento dos condutores CC .....	36
3.1.4.3.5	Seleção da <i>String Box</i> CC.....	39
3.1.5	Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção CA .....	41
3.1.5.1	Dimensionamento dos condutores CA .....	41
3.1.5.2	Escolha da <i>String Box</i> CA .....	43
<b>4</b>	<b>PROPOSTA INICIAL .....</b>	<b>45</b>
4.1	Cenário real: visita técnica .....	46
4.2	Análise econômica.....	48
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é primordial para o desenvolvimento econômico, tecnológico e social, fazendo com que a sua disponibilidade seja ligada diretamente aos principais índices de desenvolvimento dos países. O fornecimento e acesso à esta, de forma segura, limpa e que alcance locais de difícil acesso, também é um forte impulsionador de pesquisas e avanços tecnológicos. Dito isso, é compreensível que empresas de diversos setores, governos e instituições de ensino mobilizem recursos para garantir a demanda crescente de energia.

No Brasil, com o objetivo de incentivar e orientar a geração de energia pelo próprio consumidor, em 17 de abril de 2012 entrou em vigor a resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA, 2012), que estabeleceu as condições para alocar sistemas de micro e minigeração aos sistemas de distribuição, permitindo ao consumidor gerar sua própria energia através de fontes renováveis. E a partir de um sistema de compensação de energia, fornecer o excedente para a rede de distribuição local gerando “créditos” a serem descontados nas tarifas do consumidor, aliando inovação tecnológica, economia financeira, consciência ambiental e autossustentabilidade.

Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles estão o adiamento de investimentos para expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética.

Neste contexto, visando fornecer informações técnicas e financeiras a respeito do uso de energia fotovoltaica, este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso sobre o dimensionamento de um sistema de microgeração fotovoltaico em conformidade com as normas técnicas estabelecidas pelos órgãos governamentais, associações e concessionárias.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia fotovoltaica

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, tanto como fonte de calor quanto de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para o desenvolvimento energético sustentável da sociedade.

A Energia Solar Fotovoltaica é obtida através da conversão direta de fótons de luz em eletricidade. O efeito fotovoltaico, como relatado por Edmond Becquerel em 1839, é a diferença de potencial nos terminais de uma estrutura feita de material semicondutor através da absorção direta de luz solar (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA, 2012).

Inicialmente, a busca pelo desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica deu-se por empresas do setor de telecomunicações, ao buscar fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. Ademais, outro agente impulsionador foi a “corrida espacial”. Assim, a célula solar foi, e continua sendo, o método com o menor custo e peso para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos no espaço. Logo, outro uso espacial que impulsionou o desenvolvimento das células solares foi a necessidade de energia para satélites (CRESESB, 2022).

Cada vez mais, a energia solar fotovoltaica está sendo utilizada em aplicações integradas a rede, onde os módulos fotovoltaicos são empregados tanto em usinas solares de grande porte, como as usinas de Pirapora e Nova Lima, ou quanto incorporados a telhados e fachadas de edifícios e conectados à rede, de forma que se possa direcionar o fluxo de energia excedente da geração para a concessionária.

As estimativas futuras da energia solar variam, estando fortemente atreladas aos incentivos financeiros, políticos e avanços tecnológicos, sendo o principal obstáculo às aplicações dessa tecnologia em conexões com a rede o seu custo elevado, que pode variar de acordo com índice solar da região e dos componentes do conjunto fotovoltaico. Contudo, deve-se considerar, também a intermitência da geração, seja pelo período noturno ou por tempo nublado e chuvoso.

Portanto, diferentes fatores econômicos e de confiabilidade influenciam a utilização de sistemas fotovoltaicos, pois envolve o aperfeiçoamento das tecnologias correntes e, eventualmente, o desenvolvimento de novas técnicas.

## 2.2 Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais de natureza semicondutora que são caracterizados pela existência de uma tensão elétrica em suas bandas de energia, denominadas banda de valência, que possuem presença de elétrons, e a banda de condução identificada pela ausência de elétrons.

O semicondutor mais usado em sistemas fotovoltaicos é o silício, pois seus átomos se caracterizam por possuírem quatro-elétrons que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará livre, estando fracamente ligado ao seu átomo de origem.

Se de forma similar ao se introduzir átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá a falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de silício. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna, e ocorre ao se aplicar uma pequena quantidade de energia térmica, a qual um elétron de um espaço vizinho pode passar para esta posição, fazendo o deslocamento da lacuna.

Portanto, se no silício puro forem introduzidos átomos de boro em uma metade e átomos de fósforo na outra, será formada a junção *pn*. Desta forma, ao se aplicar uma pequena energia térmica, ocorre a junção da passagem de elétrons livres da *n* para a *p*, fazendo com que haja um acúmulo de elétrons em *p*, tornando esta junção negativamente carregada e, com a redução de elétrons em *n*, a junção fica eletricamente positiva.

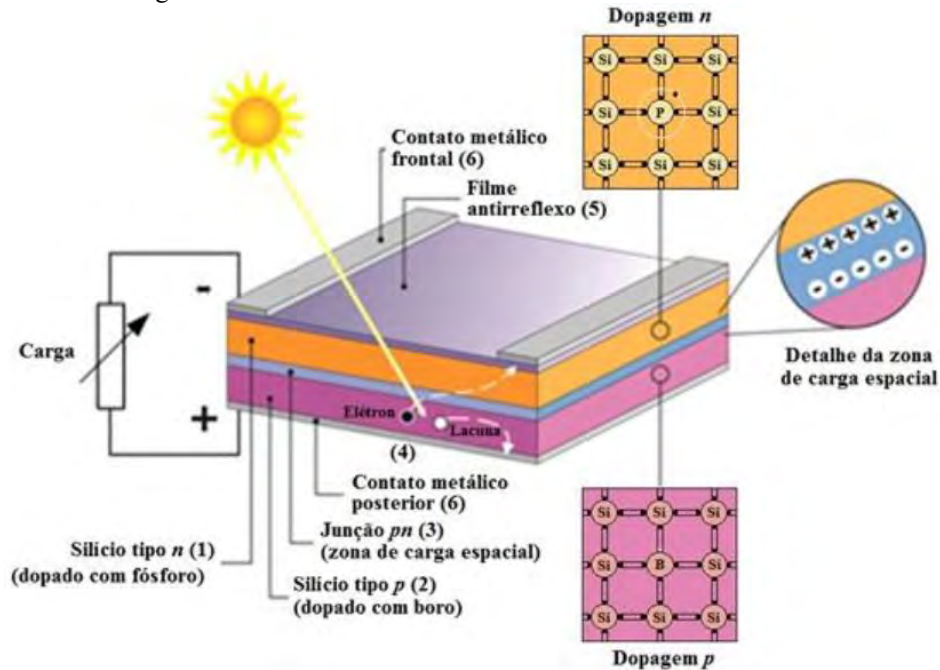
Por conseguinte, essas cargas acumuladas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons da junção *n* para a *p*; e este processo fica em equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de interromper os elétrons livres remanescentes no lado *n*.

Se uma junção *pn* for exposta a fótons com energia maior que o *gap* (espaço que separa as junções *p* e *n*), ocorrerá a geração de pares de elétrons-lacuna na região onde o campo elétrico é diferente de zero, fazendo com que as cargas sejam aceleradas, gerando assim, uma corrente elétrica através da junção. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial chamado Efeito Fotovoltaico e se as duas extremidades da placa de silício forem conectadas por um elemento condutor, haverá a circulação de corrente.

Este é o princípio do funcionamento das células fotovoltaicas que pode ser observado na Figura 1, sendo destacados os seguintes elementos: (1) Região tipo *n*; (2) Região tipo *p*; (3) Zona de carga espacial, onde é formada a junção *pn* e o campo elétrico; (4) Geração de par

elétron-lacuna; (5) Filme antirreflexo; (7) Contatos metálicos.

Figura 1 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.



Fonte: Adaptada de Mochlecke e Zanesco (2005).

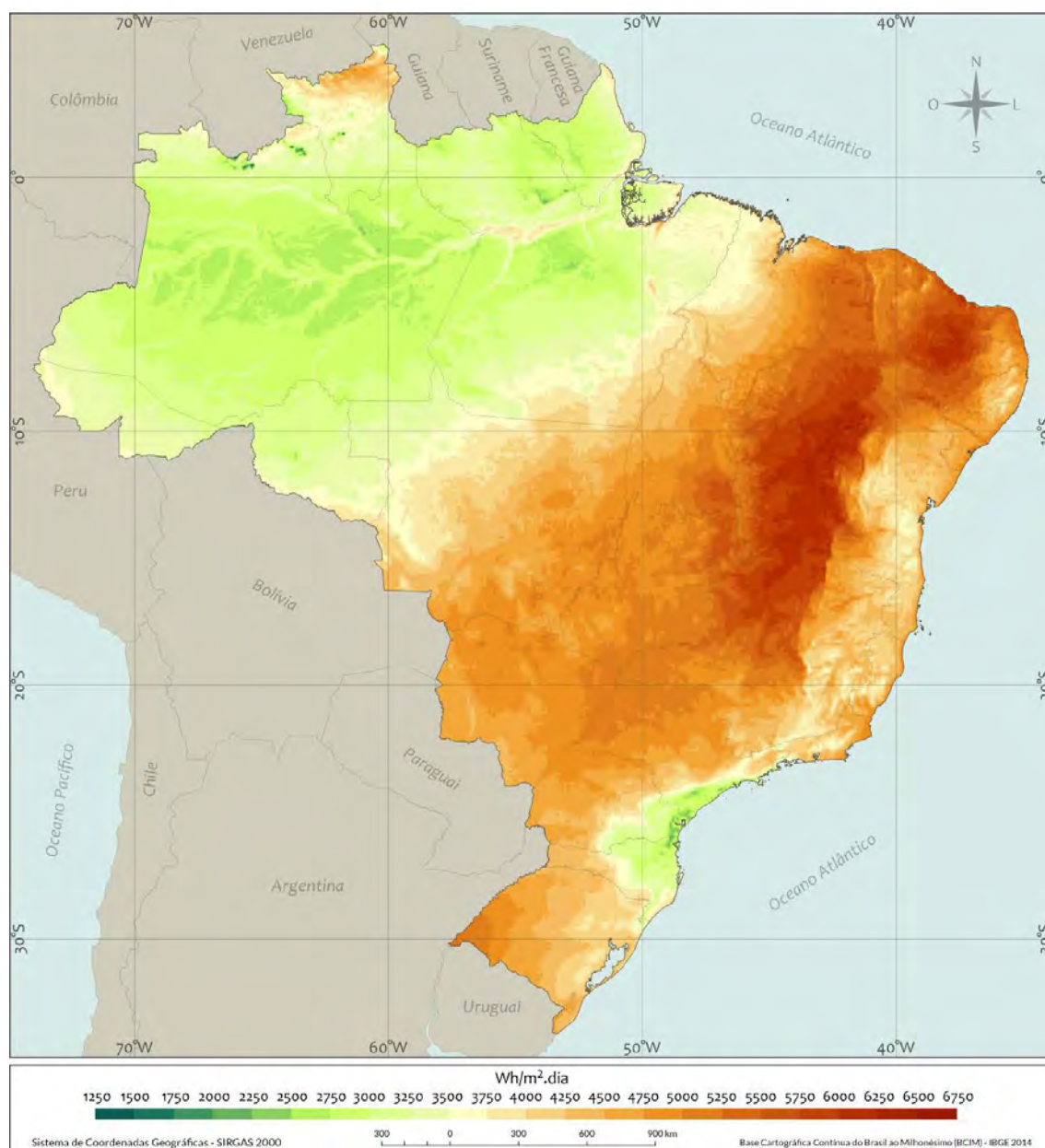
### 2.3 Índice solar no Brasil

Devido a sua localização geográfica, o Brasil é um dos países com melhor potencial mundial de irradiação solar, que por estar posicionado próximo à linha do Equador, recebe uma alta incidência de Sol, com pouca variação ao longo das estações do ano.

Na Figura 2 é apresentada a média anual diária de irradiação direta, sendo possível observar que durante todo o ano, o Brasil recebe uma incidência solar diária que pode variar de 4.500 a 6.300 KWh/m<sup>2</sup> (PEREIRA et al., 2017).

Atualmente, os países que lideram o uso de energia solar fotovoltaica são: 1º China; 2º Japão; 3º EUA; 4º Alemanha; 5º Índia (Energia Solar..., 2022).

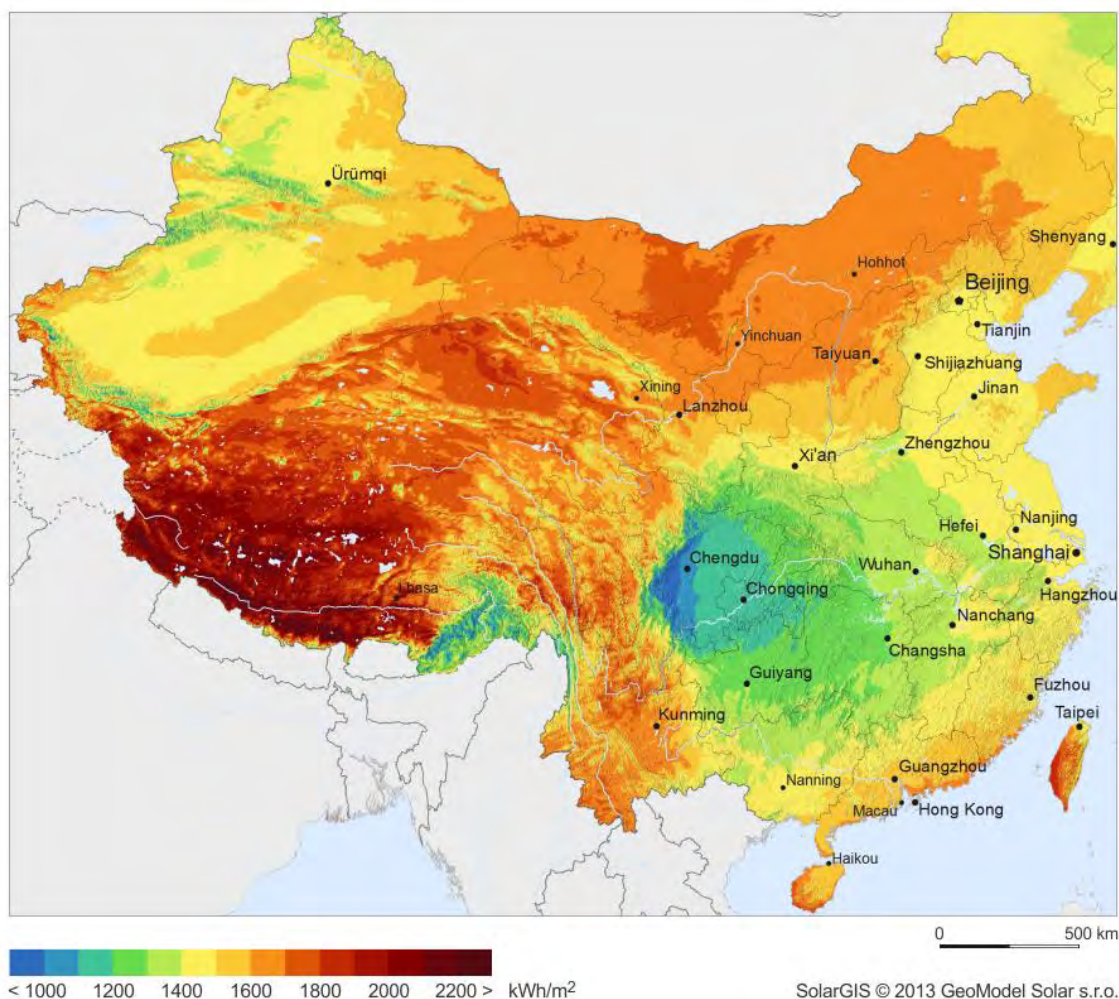
Figura 2 - Total Diário da Irradiação Direta Normal Anual.



Fonte: Pereira et al. (2017).

Analisando as Figuras 2 e 3, e sabendo que a China é o país que mais explora a energia fotovoltaica, esta recebe aproximadamente 40% a 50% menos incidência solar em sua região de maior potencial em comparação com a incidência relativa média no território brasileiro. E, mesmo tendo um potencial elevado a produção de energia fotovoltaica, o Brasil corresponde a pouco mais de 2,53% da nossa matriz energética (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021).

Figura 3 - Total Diário da Irradiação Direta Normal Anual.



Fonte: SolarGIS(2013).

## 2.4 Resoluções ANEEL

Para a instalação de um sistema fotovoltaico há requisitos, normas e garantias para a sua conexão com a rede de distribuição das concessionárias.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) preparou uma Consulta Pública de nº 15/2010 (de 10/09/2010 a 9/11/2010) (CÂMARA, 2021), juntamente com uma Audiência Pública de nº 42/2011 (de 11/08/2011 a 14/10/2011) (CÂMARA, 2021), para debater os meios legais para a conexão de geração distribuída de pequeno porte na rede de distribuição.

Esse processo de consulta e participação pública resultou no desenvolvimento das primeiras normas e padrões a serem adotados pelo setor elétrico, como a Resolução Normativa - REN nº 482, de 17/04/2012 (CÂMARA, 2021), que estabeleceu as condições gerais para o acesso a micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o



sistema de compensação de energia elétrica.

#### **2.4.1 Principais Pontos da RN N° 482**

Do conjunto de artigos, “caputs” e incisos que constituem a RN n° 482 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012) para aquisição de geração de energia solar pelo consumidor, devem ser destacados quatro tópicos que devem ser conhecidos pelos projetistas, instaladores e consumidores de um sistema fotovoltaico.

##### **2.4.1.1 Microgeração e minigeração**

Foi estabelecido o limite de energia gerado por categoria de captação, ou seja, na microgeração e minigeração; sendo: Microgeração: Sistema Fotovoltaico com potência de geração inferior a 75kW; Minigeração: Sistema Fotovoltaico com potência de geração superior a 75kW e menor que 5MW.

##### **2.4.1.2 Sistema de compensação de energia**

Este é o maior propulsor para implementação de sistema fotovoltaico, pois permite que toda energia excedente gerada pelo sistema fotovoltaico do consumidor seja injetada na rede da concessionária como concessão de energia.

Esse empréstimo retorna para o consumidor como créditos energéticos, os quais são utilizados para compensar a energia consumida pelo proprietário em períodos de baixa ou nenhuma geração do sistema, devido aos dias nublados e períodos noturnos.

Os créditos energéticos podem ser utilizados para compensar a energia consumida em outros imóveis, desde que estes estejam sob a mesma titularidade da unidade geradora e na área de concessão da concessionária.

De acordo com a Emenda n° 34, é estabelecido que todo o excedente de unidades consumidoras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), no prazo de 60 meses, poderá ser alocado nas permissionárias localizadas dentro da área de abrangência da concessionária (CÂMARA, 2021).

### 2.4.1.3 Dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos

A ANEEL definiu as potências para o dimensionamento de sistemas de energia solar, como:

- a) Grupo A (alta tensão, indústrias e grandes empresas): a potência do sistema fotovoltaico fica limitada à demanda contratada da unidade consumidora (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).
- b) Grupo B (baixa tensão, casas e pequenos comércios): a potência do sistema fotovoltaico fica limitado à carga instalada da unidade (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

Para a instalação de um sistema com potência superior à definida pela RN N° 482, o consumidor pode solicitar aumento da demanda contratada, no caso da unidade consumidora do grupo A, ou da carga instalada, no caso de consumidor do grupo B.

### 2.4.1.4 Taxa mínima por grupo de consumidor

O consumidor com sistema fotovoltaico deve pagar a taxa mínima de uso e disponibilidade de energia da rede elétrica pública, pois independente da geração própria, o consumidor continua a usufruir dos benefícios da concessionária de energia e, portanto, deve arcar com os custos de manutenção e reparos das linhas.

A taxa mínima para cada grupo é definida a seguir:

- a) Grupo A: a taxa deve ser no mínimo igual ao valor da demanda contratada, pois existe a possibilidade de geração suprir completamente o consumo de energia elétrica, sem cobrança de faturamento excedente. Nos demais casos, o faturamento se dá pelo consumo de energia nos horários de pico e fora de pico, já subtraídos os créditos energéticos do sistema de compensação no horário em que foi gerado.  
E, mesmo após a compensação, quando o crédito energético gerado pela unidade é superior ao consumido da rede elétrica, o excedente pode ser utilizado para compensar o consumo de energia no horário seguinte, devendo ser observada a proporção entre os valores das tarifas de energia (TE) para os diferentes horários tarifários, já que 1 kWh (quilowatt-hora) gerado fora do horário de pico (Bandeira, Verde, Vermelha) possui um valor de TE inferior ao valor de 1 kWh gerado no horário de pico.
- b) Grupo B: a taxa deve ser no mínimo referente ao custo de disponibilidade de acesso à

rede, quando não houver consumo ativo faturado. Nos demais casos, será cobrado o consumo, já subtraído os créditos energéticos. Portanto, um usuário pode receber uma fatura de energia elétrica no valor de R\$ 0,00. Mas, para que a concessionária possa manter seus serviços operacionais, deverá ser cobrado um custo mínimo, chamado de ‘taxa mínima’. Então, mesmo que um usuário gere 100% da energia elétrica necessária para um mês de consumo, na fatura constará o custo de disponibilidade.

#### **2.4.1.5 Atualizações da NR N° 482**

Com a implementação da REN n° 482/2012, e o devido acompanhamento pela ANEEL, foi possível o seu aprimoramento.

Dessa forma, para melhorar o acesso, reduzir os custos e o tempo para a conexão da micro e minigeração, conciliar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) com as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa n° 414/2010), aumentar o público alvo e melhorar as informações na fatura, a ANEEL realizou a Audiência Pública n° 26/2015 (de 7/5/2015 a 22/6/2015) que resultou na publicação da Resolução Normativa - REN n° 687/2015, revisando a REN n° 482/2012 e a seção 3.7 do Módulo 3 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

#### **2.4.2 Principais pontos da RN N° 687**

A RN 687 foi revista e foram estabelecidas novas regras, as quais impactaram fortemente o mercado de geração de micro e minigeradores distribuídos, criando outros nichos de consumidores e possibilidades de negócios.

Todas as modalidades baseiam-se no sistema de compensação de energia elétrica e nos créditos energéticos.

##### **2.4.2.1 Empreendimento com múltiplas unidades consumidoras**

Nesta modalidade, moradores de condomínio residencial ou predial podem fazer um consorcio para a instalação de um sistema fotovoltaico, que irá gerar créditos de energia para cada um dos participantes, como, também, fornecer energia para áreas de uso comum.

Neste caso, o sistema pode ficar sob a responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento. Ao final do mês, os créditos energéticos

gerados serão computados pela distribuidora e utilizados para compensar a energia elétrica consumida por cada um dos participantes do empreendimento.

Para isso, é necessário que as unidades consumidoras beneficiadas sejam localizadas na mesma propriedade ou em propriedades próximas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do sistema.

#### **2.4.2.2 Geração compartilhada**

Em empreendimentos com múltiplas unidades consumidoras, a modalidade de geração compartilhada permite a união de dois ou mais consumidores para a instalação de um sistema gerador de energia elétrica.

Neste caso, os consumidores podem ser tanto pessoa física (CPF) como jurídica (CNPJ), viabilizando a instalação através de cooperativa ou consórcio, não necessitando o consumidor residir no local de instalação do sistema. No entanto, as propriedades que irão utilizar os créditos energéticos e o local onde será instalado o sistema (que pode ser diferente do local onde residem os consumidores) devem estar localizadas na área de jurisdição da distribuidora local.

#### **2.4.2.3 Autoconsumo remoto**

A modalidade de autoconsumo remoto permite ao usuário, seja por CPF ou CNPJ, gerar a sua energia remotamente, fora do local (ou locais) de consumo, desde que a unidade onde será instalado o sistema fotovoltaico, como todas as que entrarão no rateio dos créditos, estejam localizadas na área de concessão da concessionária.

O autoconsumo remoto trouxe vantagens para os consumidores, pois permite unir o consumo de duas ou mais propriedades e pagando menos pela energia empregando o sistema fotovoltaico.

### **2.5 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede**

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em três tipos de configurações:

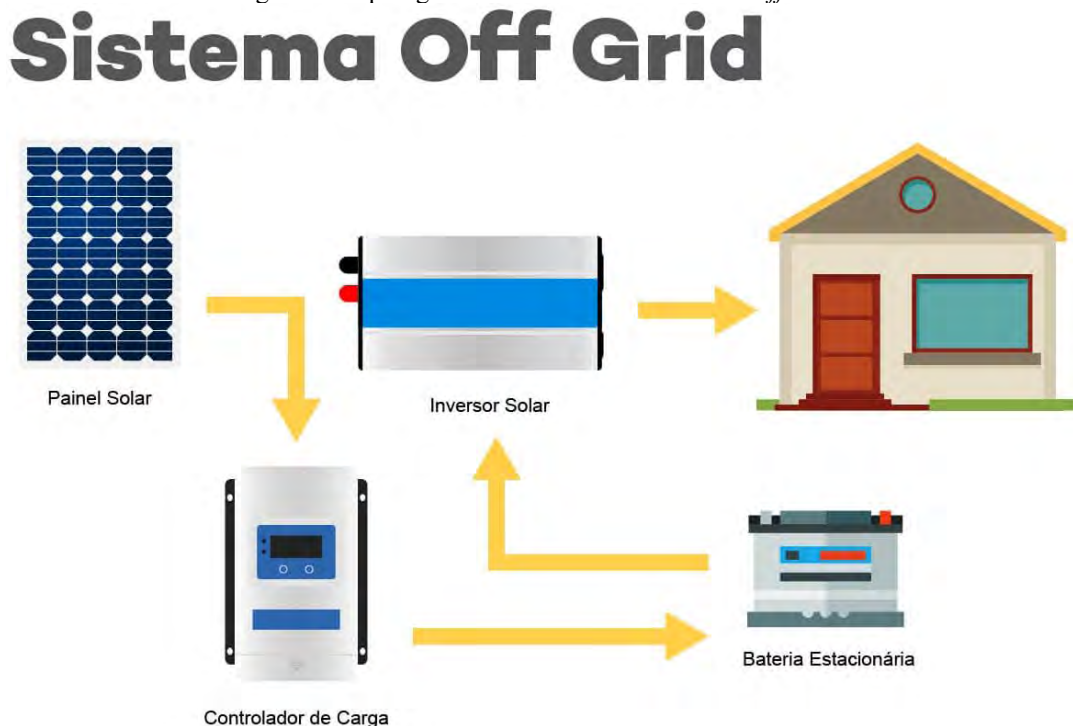
### 2.5.1 Sistema *Off-Grid*

O sistema *Off Grid* também chamado de autônomo ou isolado da rede, não possui qualquer interligação com a rede elétrica da concessionária. É utilizado em regiões de difícil acesso à rede elétrica convencional, seja por implicações geográficas ou econômicas.

A topologia geral de um sistema *Off-Grid* inclui os equipamentos tradicionais de um sistema fotovoltaico, como os painéis solares e o inversor solar. No entanto, em sua composição estão incluídos bancos de baterias para armazenamento de parte da energia produzida que pode ser utilizada em momentos de baixa geração energética, como em períodos noturnos ou dias nublados, e o controlador de carga para gerar uma corrente de alimentação maior que a de consumo do local de instalação do sistema, para preservar o funcionamento da bateria.

Na Figura 4 é representada a topologia de um sistema fotovoltaico *Off-Grid*. O sistema, em particular, é empregado em atividades específicas, não necessariamente relacionados a residências, mas todas ligadas a áreas remotas onde não se têm acesso fácil à energia elétrica. Alguns exemplos desse tipo de utilização são: instrumentação e medidas em áreas remotas, como detectores pluviométricos para medição da incidência de chuva; bombeamento de água; iluminação pública; estações replicadoras de sinal telefônico etc.

Figura 4- Topologia de um sistema fotovoltaico *Off-Grid*.



Fonte: Neosolar (2022).

### 2.5.2 Sistema *On-Grid*

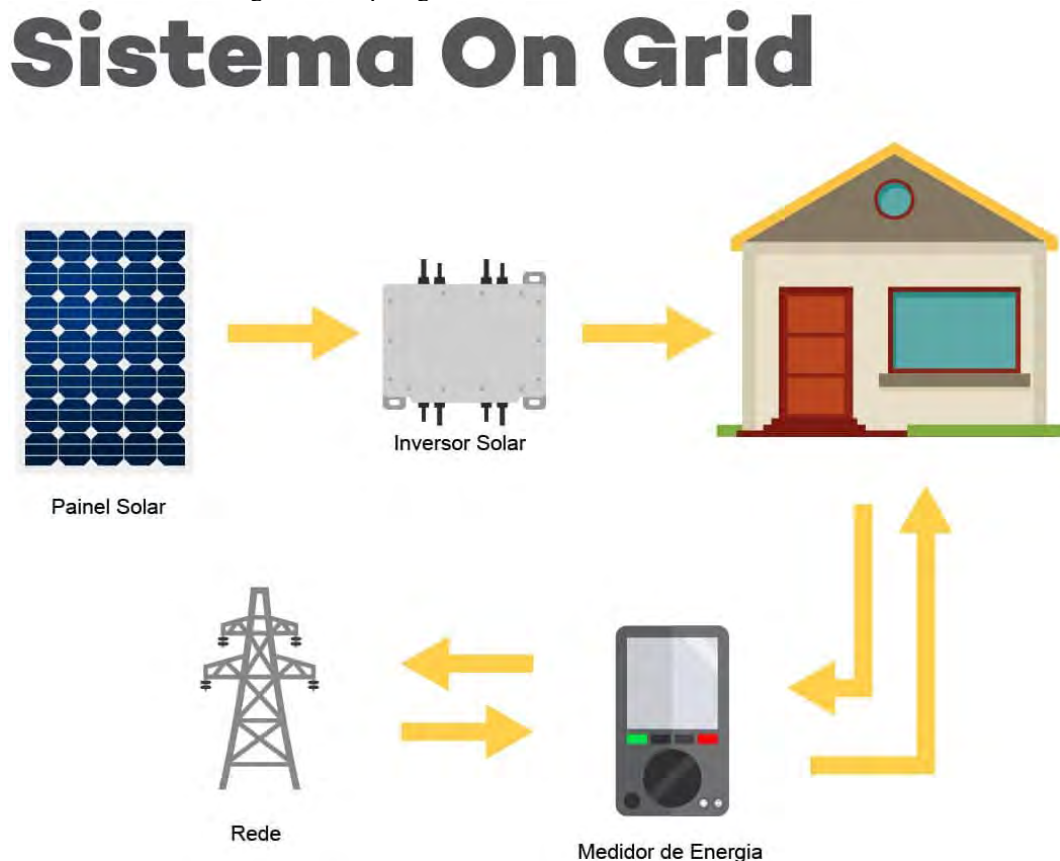
São sistemas fotovoltaicos conectados diretamente a rede elétrica da concessionária, e normalmente, estão localizados próximos ou no mesmo local de consumo.

O objetivo fundamental deste tipo de instalação é reduzir o consumo de energia fornecido pela concessionária e/ou gerar um consumo de energia mais limpa e sustentável, sendo esse o sistema frequentemente utilizado em residências.

A topologia geral de um sistema *On-Grid* inclui os componentes comuns de um sistema fotovoltaico, como os painéis solares e o inversor solar. Porém, é incluído o medidor de energia bilateral, com o qual será registrado os créditos energéticos da instalação, os quais serão posteriormente utilizados pelo consumidor.

Na Figura 5 é representada a topologia de um sistema fotovoltaico *On-Grid*.

Figura 5 - Topologia de um sistema fotovoltaico *On-Grid*.



Fonte: Neosolar (2022).

### 2.5.3 Sistema híbrido

É denominado misto ou híbrido o sistema fotovoltaico com captação de energia através

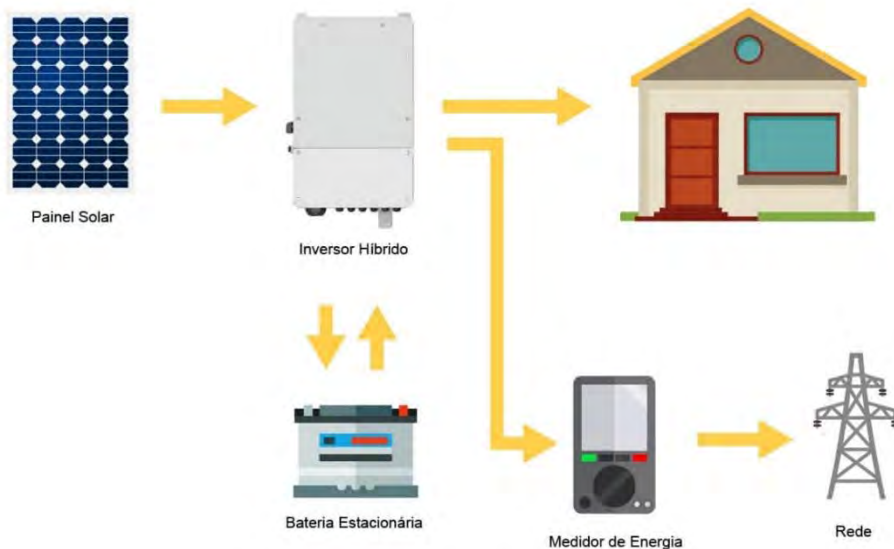
de diferentes meios ou por tecnologias complementares, como energia fotovoltaica e eólica, além da integração dos sistemas *On-Grid* e *Off-Grid*.

Por exemplo, a topologia geral de um sistema híbrido *On-Grid/Off-Grid* emprega os componentes comuns de um sistema fotovoltaico *On-Grid*, como os painéis solares, inversor solar fotovoltaico e medidor de energia bilateral, mais o banco de baterias.

Na Figura 6 é representada a topologia de um sistema fotovoltaico híbrido *On-Grid/Off-Grid*.

Figura 6 - Topologia de um sistema fotovoltaico Híbrido.

## Sistema Fotovoltaico Híbrido



Fonte: Neosolar (2022).

Os sistemas híbridos *On-Grid* e *Off-Grid* são mais comuns em locais onde a rede da concessionária é de fácil acesso, mas no local há ambientes de risco e/ou altamente necessários, de forma que seu funcionamento não pode ser prejudicado por uma eventual falta de energia, como em operadoras de telefonia e *data centers* e serviços de emergência como polícia, bombeiros, hospitais e banco de vacinas.

## 2.6 Componentes do Sistema Fotovoltaico

### 2.6.1 Módulo solar

O módulo solar é um painel composto por células solares fotovoltaicas. Atualmente, existem diversas tecnologias de módulos solares em desenvolvimento, principalmente as relacionadas a redução dos custos de fabricação e aumento da eficiência de conversão de energia. Para esse trabalho serão destacadas três tecnologias já estabelecidas no mercado.

#### 2.6.1.1 Painel solar de silício monocristalino

Este painel possui a tecnologia mais antiga, com eficiência variando entre 15% e 18%. São facilmente reconhecidos por sua cor uniforme azul escuro, denotando um silício de alta pureza e bordas arredondadas.

As células fotovoltaicas são fabricadas a partir de um único cristal de silício, de alta pureza, retirados de lingotes em formato semelhante a um cilindro, conforme mostrado na Figura 7.

As características do painel solar de silício monocristalino são: possuem a melhor eficiência dentre as atuais tecnologias comerciais; necessitam de um espaço menor para converter a mesma quantidade de energia, em comparação a outros painéis; vida útil superior a 30 anos, sendo que a maioria possui garantia de 25 anos contra defeitos de fabricação; possuem uma melhor performance em ambientes de pouca incidência solar; e são os painéis de custo mais elevado.

Figura 7 - Célula Monocristalina



Fonte: Buhler, Santos e Gabe (2018).



### 2.6.1.2 Pannel solar de silício policristalino

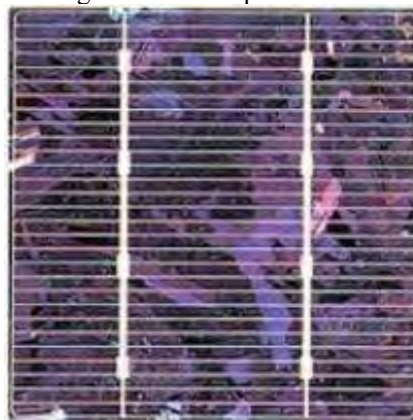
Conhecidos como polisilício (p-Si) e silício multi-cristalino (mc-Si), as células fotovoltaicas são fabricadas a partir de um bloco de cristais fundidos de silício, desta forma, conservando uma formação de múltiplos cristais (policristalino), fazendo com que sua fabricação seja mais barata.

Quando este bloco é usinado, é possível observar em sua superfície os múltiplos cristais, possuindo uma coloração com tons de azul e/ou cinza prateado. São semelhantes às células monocristalinas, diferenciando-se na eficiência, que fica entre 12% e 14%.

As características do pannel solar de silício policristalino são: método de fabricação e usinagem gera menos resíduos, em comparação com o monocristalino; baixo custo em comparação aos painéis monocristalinos; vida útil superior a 30 anos, sendo que a maioria possui garantia de 25 anos contra defeitos de fabricação.

Na Figura 8 é representada uma célula policristalina.

Figura 8 - Célula policristalina



Fonte: Buhler, Santos e Gabe (2018).

### 2.6.1.3 Pannel solar de filmes finos

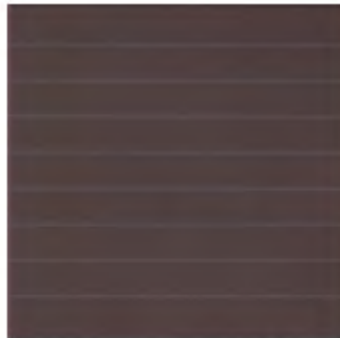
Os filmes finos são elaborados a partir de uma tecnologia que emprega materiais em camadas da ordem de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ), podendo ser fabricados painéis solares muito mais leves e flexíveis.

O processo de fabricação difere bastante das demais tecnologias, sendo de forma geral feita por meio da inserção de várias camadas finas de diferentes materiais semicondutores, tais como o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), e o telureto de cádmio (CdTe).

A inserção pode ser feita por diversos processos, tais como, pulverização catódica, eletrodeposição, deposição por banho químico (CBD), sublimação em espaço reduzido (CSS) e deposição química a vapor em baixas pressões (LPCVD).

Sua eficiência é devida, principalmente, ao material utilizado em sua composição e o método de fabricação, em testes laboratoriais a eficiência varia entre 7% e 13% (SILVA, 2010). Na Figura 9 é representada uma célula solar filme fino.

Figura 9 - Célula filme fino.



Fonte: Buhler, Santos e Gabe (2018).

As características do painel solar de filme fino são apresentadas a seguir: o método de fabricação flexibiliza a produção em larga escala, tornando o painel mais barato; sua aparência homogênea é esteticamente agradável; a possibilidade de ser fabricado em superfícies flexíveis, abrange uma série de aplicações; as variações por altas temperaturas, sombreamento e outras obstruções têm menor impacto sobre o desempenho; ocupam um espaço maior; menor eficiência por  $m^2$ ; tendem a degradar mais rapidamente e, portanto, possuem uma garantia mais curta.

### **2.6.2 Inversor solar fotovoltaico**

Em sistemas fotovoltaicos o inversor é um equipamento eletroeletrônico que através da associação de chaves eletrônicas controláveis e elementos semicondutores, converte a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos fornecida em corrente contínua (C.C.) para corrente alternada (C.A.), com a mesma amplitude e frequência da concessionária. Na Figura 10 é apresentado um inversor solar fotovoltaico.

Figura 10 - Inversor Solar SOFAR SOLAR 3K-TL



Fonte: Sofarsolar (2022).

Há uma enorme gama de modelos de inversores, mas no que tange aos utilizados em sistemas fotovoltaicos, os mesmos podem ser divididos em duas categorias que, apesar de compartilharem as mesmas características gerais de operação, possuem especificações particulares para atender aplicações específicas de segurança e qualidade de energia. São esses os inversores auto comutados (SFI) e os comutados pela rede (SFCR).

### 2.6.2.1 Inversores comutados pela rede

Os inversores controlados pela rede receberam essa denominação por utilizarem a frequência e tensão da concessionária para chavear os elementos semicondutores que compõem a ponte de tiristores (SCR, TRIAC), que são capazes de suportar elevadas tensões e correntes.

Por sua dependência energética da concessionária, caso haja a interrupção de fornecimento de energia, o inversor sai imediatamente de operação, não possuindo modo de operação autônomo.

O princípio de funcionamento do inversor comutado pela rede ocorre com a geração de pulsos de corrente em onda quadrada, os quais são formados quando a ponte de tiristores em condução, interrompe a corrente em pontos específicos condizentes com a frequência da concessionária. No entanto, sendo a frequência da concessionária uma onda senoidal, essa diferença gera elevadas distorções harmônicas na tensão de saída do inversor e um maior consumo de potência reativa, sendo necessário a implementação de filtros que elevam o custo do equipamento. Em contrapartida, por serem componentes muito resistentes e de operação simples, são largamente utilizados em instalações de elevada potência.

### 2.6.2.2 Inversores auto comutados

Nos inversores auto comutados, é comum a utilização de IGBT's ou MOSFET's, como elementos de chaveamento, sendo estes, IGBT's ou MOSFET's, componentes semicondutores com capacidade de serem colocados em estado de condução ou de corte durante qualquer período de operação por meio de um sistema de controle.

A associação dos elementos de chaveamento permite o controle de modulação por largura de pulso (PWM), o qual possibilita um controle da forma de onda e do valor da tensão de saída e do fator de potência, possuindo boa estabilidade diante de perturbações na rede. No entanto, a alta frequência de chaveamento nestes inversores geram interferências em alta frequência, demandando providências para a conformidade eletromagnética (EMC) por meio do uso de circuitos de proteção e blindagem.

Estes inversores podem ter um ou dois estágios, tendo os de um único estágio robustez e alta eficiência, devido principalmente ao reduzido número de componentes. E, são, principalmente, indicados para sistemas fotovoltaicos autônomos. Caso sejam conectados à rede, a frequência da potência injetada deve ser sincronizada com a da rede, gerando os pulsos de chaveamento de acordo com essa frequência.

### 2.6.3 *String box*

Conforme a NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) e a NBR16690 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), toda e qualquer instalação elétrica deve possuir sistemas básicos de proteção, incluindo os sistemas fotovoltaicos.

As características de proteção básicas são: sistema de proteção contra choques elétricos, defeitos térmicos e incêndios, sobrecorrente, sobretensão e sistema de seccionamento/bloqueio de energia. Para tanto, é empregada a *String Box*, com as proteções instaladas, impedindo o risco de propagação de acidentes como curtos-circuitos e os surtos elétricos.

Sabendo que alguns inversores fotovoltaicos, principalmente os de grande porte, já têm integrados os componentes de proteção na sua instalação, faz com que não seja necessária a instalação da *string box* CC e/ou CA.

A *string box* é instalada entre os módulos fotovoltaicos e o inversor solar fotovoltaico, dos quais seus elementos mais comuns são: invólucro - local onde serão instalados os componentes de proteção, seccionamento e conexões elétricas do circuito; DPS - Dispositivo

de Proteção contra Sobretensão; Disjuntor - dispositivo de proteção contra sobrecorrente; e a Chave Seccionadora - dispositivo de manobra que tem a função do bloqueio do circuito sob carga.

Na Figura 11 é apresentada uma *string box*.

Figura 11 - *String Box CA*



Fonte: Buhler, Santos e Gabe (2018).

#### 2.6.4 Medidor de energia bidirecional

O medidor de energia bidirecional é o componente do sistema fotovoltaico responsável por medir o consumo de energia fornecido pela concessionária, também chamada de “Direta”, e a energia gerada pelo sistema fotovoltaico, também chamada de “Reversa”. É através desse registro que a concessionária faz a dedução da geração e consumo, e contabiliza os créditos energéticos.

Então, mensalmente o agente da concessionária faz a leitura da energia consumida e da injetada, sendo cada uma identificada no medidor bilateral e no inversor solar fotovoltaico. A energia consumida é normalmente identificada pelo código 003 e a injetada pelo código 103. O proprietário do sistema fotovoltaico pode conferir se os valores indicados na conta são os mesmos informados pelo medidor e pelo inversor solar fotovoltaico.

A medida registrada pelo inversor solar fotovoltaico é referente a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, enquanto a registrada pelo medidor bilateral é a energia injetada na rede. Essa diferença é comum, pois parte da energia produzida já é consumida no imóvel da instalação fotovoltaica e somente o excedente da energia gerada é injetada na rede da concessionária e, portanto, registrada pelo medidor bilateral. Conseqüentemente, não se deve confundir a energia produzida pelo sistema fotovoltaico com a energia injetada na rede da concessionária.

Na Figura 12 é apresentado um medidor bilateral de energia.

Figura 12 - Medidor Bilateral de Energia.



Fonte: Buhler, Santos e Gabe (2018).

### **3 PROJETO FOTOVOLTAICO**

O desenvolvimento do projeto fotovoltaico define os componentes para o seu funcionamento e instalação, levando em consideração diversos fatores, tais como: recurso solar, orientação dos módulos, disponibilidade da área, demanda etc.

#### **3.1 Dimensionamento**

A premissa fundamental na elaboração de um sistema fotovoltaico é que o sistema instalado deve gerar mais energia do que a demanda estabelecida a ser atendida. Logo, uma boa análise do sistema a ser instalado influencia diretamente na eficiência e segurança do sistema. As normas e métodos de instalação exigidos pela concessionária determinam os critérios para o dimensionamento referentes tanto para o lado CC quanto para o lado CA, e são necessárias para garantir as características básicas de proteção contra choque elétrico, efeitos térmicos que podem ocasionar incêndios, proteção contra sobrecorrente e sobretensão, e a capacidade de seccionamento do sistema de forma segura.

A seguir, serão apresentadas as etapas para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

##### **3.1.1 Análise da fatura de energia**

Os diversos dados adquiridos ao se analisar a fatura de energia são de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto fotovoltaico, tais como:

- a) qual a concessionária responsável pelo fornecimento de energia;
- b) localização da residência;
- c) consumo de energia elétrica;
- d) valor da tarifa cobrada pela concessionária;
- e) tipo de ligação da residência;
- f) demanda disponível.

Portanto, ao se analisar a fatura de energia apresentada na figura 13, é possível extrair as seguintes informações: a concessionária é a Cemig, a residência está na cidade de Conselheiro Lafaiete – MG, o consumo médio mensal de energia é de 325kWh, o valor da tarifa

é de R\$1,13267861, o tipo de fornecimento é bifásico, e a demanda disponível é de 50kWh.

Figura 13 – Fatura do Cliente

CONSELHEIRO LAFAIETE - MG		<b>Nº DO CLIENTE:</b> [REDACTED]		
		Nº da Instalação [REDACTED]	Subclasse RESIDENCIAL	Regime de Bifásico
[REDACTED]		Datas de Leitura		Modalidade Tarifária
		Anterior [REDACTED]	Atual [REDACTED]	Próxima [REDACTED]
Informações Técnicas				
Tipo de Medição	Leitura Anterior	Leitura Atual	Constante de Medição	Consumo kWh
Energia Elétrica	60254	60574	1	320
VALORES FATURADOS				
Descrição	Quantidade	Preço	Valor (R\$)	
Energia Elétrica kWh	320	1,13267861	362,43	
ENCARGOS/COBRANÇAS				
Descrição				Valor R\$
Contrib.Custeio Ilum. Pública	TARIFAS APLICADAS(Sem Impostos)			53,01
Energia Elétrica kWh	0,76005000			
ADICIONAL BANDEIRAS (Já incluído no Valor a Pagar)				
BANDEIRA ESCASSEZ HÍDRICA				67,71
BANDEIRA ESCASSEZ HÍDRICA				67,71
Meta de Redução Mensal: 2846 kWh Redução Mensal Apurada: 2.80487804878041E+15 kWh Meta de redução alcançada, bônus na próxima fatura.				
Pág 1 de 1				
7015.00A1.7DD8.0999.CB86.3D8E.A46D.5DC8				
RESERVADO AO FISCO				
REFERENTE A		VENCIMENTO		VALOR A PAGAR
[REDACTED]		[REDACTED]		[REDACTED]
Base de Cálculo (R\$):		Alíquota:		R\$ 108,73
ICMS	253,70	0,74	R\$ 1,87	
PASEP	253,70	3,40	R\$ 8,62	
COFINS				
Mês/Ano	Consumo do Cliente kWh	Mediano kWh/dia	Dias de Faturam.	REAVISO DE CONTAS VENCIDAS / DÉBITOS ANTERIORES
NOV/2021	362	11,31	32	[REDACTED]
OUT/2021	313	10,43	30	
SET/2021	377	11,42	33	
AGO/2021	335	10,80	31	
JUL/2021	305	10,51	29	
JUN/2021	364	11,37	32	
MAI/2021	294	10,50	28	
ABR/2021	330	10,64	31	
MAR/2021	301	10,03	30	
FEV/2021	298	9,93	30	
JAN/2021	316	10,19	31	
DEZ/2020	300	9,67	31	
Band. Esc. Hidrica - [REDACTED] Band. Esc. Hidrica - [REDACTED]				
Tarifa vigente conforme Res Aneel nº 2.877, de 25/05/2021.				
O pagamento desta conta não quita débitos anteriores. Para estes, estão sujeitas penalidades legais vigentes (multas) e/ou atualização financeira (juros) baseadas no vencimento das mesmas.				
É dever do consumidor manter os dados cadastrais sempre atualizados e informar alterações da atividade exercida no local.				
Faça sua adesão para recebimento da conta de energia por e-mail acessando <a href="http://www.cemig.com.br">www.cemig.com.br</a>				
Leitura realizada conf. calendário de faturamento.				
RECEBA SUA FATURA DE ENERGIA POR E-MAIL DE FORMA FÁCIL, RÁPIDA E SEGURA.				
ACESSE AGORA <a href="http://www.cemig.com.br">www.cemig.com.br</a>				
CÓDIGO DE DÉBITO		VENCIMENTO		TOTAL A PAGAR
[REDACTED]		[REDACTED]		R\$ 415,44

Fonte: Do autor (2022).



### 3.1.2 Recurso solar do local

Para definir a incidência solar da localidade onde será instalado o projeto fotovoltaico (FV), neste estudo serão adotados os dados do SunData (2018). Sabendo que a irradiância solar não varia muito de um local a outro em uma cidade, basta pesquisar “coordenadas geográficas decimais” (SunData, 2018) da cidade em questão, neste caso Conselheiro Lafaiete – MG, obtendo o ponto de referência com as seguintes coordenadas: Latitude -20.6597; Longitude -43.7855 (2021).

Na Figura 14, é apresentado o resultado da pesquisa para o ponto de latitude 20.791 e longitude 43.749, como sendo as coordenadas mais próximas do local desejado, separados por uma distância de 6 km. Dos valores da Figura 14, é utilizado o menor valor entre as médias, neste caso 4,85 kWh/m<sup>2</sup>dia. A utilização do menor valor se dá por não se saber ainda as condições do telhado, inclinação, orientação e se ocorrerá sombreamento, portanto, para um pré-dimensionamento será adotado o pior caso possível e, após a visita técnica, é possível estabelecer as reais condições para o dimensionamento.

Figura 14 - Irradiação Solar - Conselheiro Lafaiete - MG

Estação: Conselheiro Lafaiete  
 Município: Conselheiro Lafaiete, MG - BRASIL  
 Latitude: 20,701° S  
 Longitude: 43,749° O  
 Distância do ponto de ref. ( 20,6597° S; 43,7855° O ): 6,0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,51	5,91	4,94	4,52	3,91	3,73	3,88	4,89	5,08	5,26	5,00	5,56	4,85	2,18
✓	Ângulo igual a latitude	21° N	5,01	5,63	5,04	5,03	4,71	4,71	4,81	5,70	5,37	5,13	4,61	4,99	5,06	1,09
✓	Maior média anual	20° N	5,04	5,66	5,04	5,02	4,68	4,67	4,77	5,68	5,37	5,15	4,64	5,02	5,06	1,04
✓	Maior mínimo mensal	20° N	5,04	5,66	5,04	5,02	4,68	4,67	4,77	5,68	5,37	5,15	4,64	5,02	5,06	1,04



Fonte: Resultado adaptado do Site SunData (2022).

### 3.1.3 Energia de compensação

Para determinar a potência do sistema é necessário obter a potência de pico ideal (Pger) calculada por (1) (FAM, 2022):

$$P_{ger} = \frac{E_c}{HSP \cdot E_f \cdot DP} \quad (1)$$

Sendo:  $E_c$  = Energia de Compensação; HSP = Horas de Sol Pleno (Referente a quantidade de horas em que a irradiação solar seria de  $1000W/m^2$ );  $E_f$  = eficiência global do sistema ou *Performance Ratio* (São as perdas envolvidas em um sistema fotovoltaico, podendo variar conforme os equipamentos, condições ambientais e/ou climáticas, modo de operação, tipo de instalação, etc); DP = dias de operação (Será considerado operação ininterrupta durante todos os dias do mês).

Fora constatado, ao analisar a fatura na figura 13, que o cliente pertence ao grupo B de consumo (residencial, rural, etc), o que é uma modalidade de compensação feita na proporção de 1kWh para cada 1kWh. Desta forma, o valor de  $E_c$  será dado pela soma do consumo mensal e a taxa mínima de disponibilidade da concessionária, ou seja,  $E_c = 325kWh + 50kWh = 375kWh$ .

Como é possível observar na Figura 14, o HSP referente a quantidade de horas em que a irradiação solar seria constante a  $1000W/m^2$  será de  $4,85 KWh/m^2$  dia. Considerando que as perdas em um sistema fotovoltaico podem variar conforme a escolha dos equipamentos, condições ambientais, climáticas, modo de operação e tipo de instalação, podendo variar entre 75% e 80% de eficiência, para esse pré-dimensionamento iremos utilizar o pior caso possível, sendo  $E_f = 75\%$  de eficiência do sistema. Como padrão, o sistema instalado terá operação constante, ou seja, DP = 30 dias mensais de operação.

Portanto:

$$P_{ger} = \frac{375}{4,85 * 0,75 * 30} = 3,436KWp \text{ ou } 3,45KWp \quad (2)$$

### 3.1.4 Especificação dos componentes do sistema fotovoltaico do estudo de caso

#### 3.1.4.1 Módulo fotovoltaico

Existe uma enorme variedade de painéis fotovoltaicos que podem ser escolhidos para o projeto. A relação custo x benefício deve observada com cuidado, pois outros fatores como a

disponibilidade para troca, tempo de entrega, garantias etc., podem afetar a instalação do sistema.

Após avaliado com fornecedores locais e lojas especializadas quais os modelos disponíveis para compra, o tempo de entrega, facilidade de reposição em caso de danos, garantias e a relação custo x benefício, fora escolhido o módulo de 440W da Canadian Solar cujas principais características elétricas podem ser observadas na figura 15.

Figura 15 - Módulo Fotovoltaico

### DADOS ELÉTRICOS | STC\*

CS3W	440MS
Máx. Potência Nominal (Pmax)	440 W
Opt. Tensão de Operação (Vmp)	40,7 V
Opt. Corrente de Operação (Imp)	10,82 A
Tensão de Circuito Aberto (Voc)	48,7 V
Corrente de Curto-Circuito (Isc)	11,48 A
Eficiência de Módulo	19,9%
Temperatura de Operação	-40°C ~ +85°C
Máx. Tensão de Sistema	1500V (IEC/UL) ou 1000V (IEC/UL)
Desempenho antichamas do módulo	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)
Máx. valor nominal do fusível de série	20 A
Classe da aplicação	Classe A
Tolerância de potência	0 ~ + 10 W

\* Sob condições de teste padrão (STC) de irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, espectro AM 1.5 e temperatura de célula de 25°C.

Fonte: Canadian Solar (2022).

O número de módulos é definido por (3) (FAM, 2022):

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{P_{ger}}{P_{m\acute{a}x}} \quad (3)$$

Portanto, para o estudo em questão:

$$N^{\circ} \text{ de módulos} = \frac{3450}{440} = 7,84 = 8 \quad (4)$$

### 3.1.4.2 Inversor

Para a especificação do inversor, é necessário estar atento aos três critérios de operação: Potência, Corrente e Tensão.

Sabe-se que a maioria dos inversores *On-Grid* suportam entre 25% e 50% de sobrecarga, cujo valor pode ser verificado no *datasheet* do produto ou com o fabricante (FAM, 2022). Ademais, os inversores *Off-Grid* não suportam sobrecarga, por conseguinte, sua máxima potência de operação não deve ultrapassar a máxima potência do arranjo dos painéis fotovoltaicos (FAM, 2022).

2.1 Critério de Potência: A potência total gerada pelos módulos fotovoltaicos deve ser preferencialmente inferior a 10% e até 30% superior a potência do inversor, tal que:  $0,9P_{inv} < P_{ger} < 1,3P_{inv}$  [13].

Portando, para o estudo de caso em questão:

$$P_{inv}(máx) \leq \frac{P_{ger}}{0,9} = \frac{3,45 \times 0,41}{0,9} = 1,57KW \quad (5)$$

$$P_{inv}(mín) \geq \frac{P_{ger}}{1,3} = \frac{3,45 \times 0,41}{1,3} = 1,1KW \quad (6)$$

O inversor que atende essa demanda será da marca Growatt cujos dados são apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Inversor

Ficha de dados		MIC 1500TL-X
<b>Dados de entrada</b>		
Máxima potência fotovoltaica recomendada (para módulo STC)		2100W
Máxima tensão CC		500V
Tensão de partida		50V
Faixa de tensão MPPT/Tensão nominal		50V-500V /250V
Máxima corrente de entrada por trackers MPP		13A
Máxima corrente curto-circuito por trackers MPP		16A
Número de MPPT / strings por MPPT		1/1
<b>Saída (CA)</b>		
Potência nominal de saída		1500W
Potência aparente máxima de CA		1500VA
Máxima corrente de saída		7.1A
Tensão nominal de saída(Faixa)		230V(180Vac-280Vac)
Frequência da rede CA(Faixa)		50Hz/60Hz ±5Hz
Fator de potência ajustável		0.8l-0.8c
THDI		<3%
Conexão CA		Fase única



Fonte: Growatt (2022).

2.2 Critério de Tensão: A tensão nas *strings* do inversor deve estar na faixa de operação da MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), para garantir que os módulos fotovoltaicos sempre operem no ponto de máxima potência e não ultrapassem a máxima tensão de entrada, sendo recomendado uma correção de 10% na tensão de operação, devido as perdas por temperatura, tal que sejam verificadas de acordo com as equações (7), (8), (9) e (10) (FAM, 2022).

$$1,1xV_{mppt_{start}} \leq V_{mpString} \leq V_{mppt_{máx}} \quad (7)$$

$$V_{ocString} \leq V_{max_{inv}} \quad (8)$$

$$V_{mpString} = (N^{\circ} \text{ de módulos em série})xV_{mp_{módulo}} \quad (9)$$

$$V_{ocString} = (N^{\circ} \text{ de módulos em série})xV_{oc_{módulo}} \quad (10)$$

Sendo,  $V_{mpptStart}$  = tensão de partida por mppt;  $V_{mpString}$  = tensão de máxima potência de cada string;  $V_{mpptMáx}$  = máxima faixa de tensão por mppt;  $V_{ocString}$  = tensão de

circuito aberto do inversor; e  $V_{\text{máxInv}}$  = máxima tensão suportada pelo inversor.

Portanto (FAM, 2022):

$$N^{\circ} \text{ mín de módulos em série} \geq \frac{1,1xV_{mppt_{start}}}{V_{mp_{módulo}}} \quad (11)$$

$$N^{\circ} \text{ máx de módulos em série} \leq \frac{V_{mppt_{máx}}}{V_{mp_{módulo}}} \quad (12)$$

$$N^{\circ} \text{ máx de módulos em série} \leq \frac{V_{máx_{inv}}}{V_{OC_{módulo}}} \quad (13)$$

Sendo assim, para o estudo de caso em questão, e com os dados das Figuras 15 e 16, tem-se:

$$N^{\circ} \text{ mín de módulos em série} \geq \frac{1,1x50}{40,7} = 1,3 \text{ ou } 2 \quad (14)$$

$$N^{\circ} \text{ máx de módulos em série} \leq \frac{500}{40,7} = 12,20 \text{ ou } 12 \quad (15)$$

$$N^{\circ} \text{ máx de módulos em série} \leq \frac{500}{48,7} = 10,26 \text{ ou } 10 \quad (16)$$

Desta forma:

$$2 \leq N^{\circ} \text{ de módulos por String} \leq 10 \quad (17)$$

2.3 Critério da corrente: A corrente do sistema deve ser inferior à corrente de entrada do inversor por MPPT. Para inversores desbalanceados, com diferentes níveis de corrente por entrada MPPT, o cálculo a seguir deve ser feito para cada MPPT (FAM, 2022).

$$N^{\circ} \text{ de Strings em paralelo} \leq \frac{I_{mppt}}{I_{sc}} \quad (18)$$

Sendo:  $I_{mppt}$  = máxima corrente por mppt;  $I_{sc}$  = corrente de curto circuito do painel.

Sendo assim, analisando os dados das Figuras 15 e 16:

$$N^{\circ} \text{ de Strings em paralelo} \leq \frac{13}{11,48} = 1,13 \text{ ou } 1 \quad (19)$$

### 3.1.4.3 Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção CC

O dimensionamento dos condutores e proteções de qualquer sistema elétrico é de fundamental importância, não apenas para a aprovação do projeto junto a concessionária, mas para seu correto funcionamento, evitando acidentes e falhas, além de preservar os componentes do sistema.

Desta forma, são especificadas as seguintes proteções.

#### 3.1.4.3.1 Proteção dos módulos do fluxo de corrente reversa, com a *string* box que deverá conter fusível ou disjuntor CC

Para o estudo de caso em questão, as proteções integradas ao inversor escolhido são apresentadas na Figura 17, onde são listadas a proteção de polaridade reserva, pois o circuito CC possui terminal positivo e terminal negativo, tendo seus devidos pontos de ligação e o interruptor CC para seccionamento dos módulos fotovoltaicos, sendo necessário a instalação dos dispositivos de proteção contra surto (Disjuntor, DPS, etc) e o dispositivo de seccionamento para interromper a alimentação vinda dos módulos fotovoltaicos.

No entanto, para fins de estudo e complemento deste trabalho, esses dispositivos serão dimensionados e apresentados na Tabela 1.

Figura 17 - Dispositivos de proteção do inversor definido.

Dispositivos de proteção	
Proteção de polaridade reversa de CC	Sim
Interruptor CC	Sim
Varistor para proteção de surtos CC	Sim
Monitoramento de resistência de Isolação	Sim
Varistor para proteção de surtos CA	Sim
Monitoramento de falha de terra	Sim
Monitoramento de rede	Sim
Proteção anti-ilhamento	Sim
Unidade de monitoramento de corrente residual	Sim

Fonte: Growatt (2022).

Tabela 1 - Critérios para determinar a proteção dos módulos e do fluxo de corrente reversa

$$Tensão\ máx \geq Tensão\ máx\ CC\ do\ Inversor$$

$$1,5 \times I_{sc\ módulo} < I_n < 2,4 \times I_{sc\ módulo}$$

$$I_n \leq Máx\ corrente\ suportada\ pelo\ módulo$$

Fonte: Notas de aula do Curso de Projetos Fotovoltaicos da FAM (2022).

Portanto, analisando as Figuras 15 e 16, para o estudo de caso em questão, tem-se:

$$Tensão\ máx \geq 500V$$

$$17,22 < I_n < 28,70$$

$$I_n \leq 25A$$

### 3.1.4.3.2 Critério para determinar a proteção de sobrecorrente e seccionamento do arranjo fotovoltaico

$$Tensão\ máx \geq Tensão\ máx\ CC\ do\ inverso \quad (20)$$

Deve ser considerada a corrente de curto-circuito das *strings* em paralelo, tal que:

$$1,25 \times I_{sc\ sub-arranjo} < I_{chave} < 2,5 \times I_{sc\ sub-arranjo} \quad (21)$$

Sendo:  $I_{sc\ sub-arranjo}$  = corrente de curto circuito do sub-arranjo;  $I_{n\ proteção}$  = corrente



nominal para proteção;  $I_{n_{sub-arranjo}}$  = corrente nominal do sub-arranjo;  $V_{oc_{sub-arranjo}}$  = tensão de circuito aberto do sub-arranjo.

Caso o sistema comporte apenas uma *string*, a corrente do dispositivo de proteção deve ser igual a corrente nominal do arranjo, tal que:

$$I_{n_{proteção}} = I_{n_{sub-arranjo}} \quad (22)$$

Portanto, analisando as Figuras 15 e 16, para o estudo de caso em questão, contendo uma única *string* com 8 módulos, tem-se:

$$V_{oc_{sub-arranjo}} = 8 \times 50 = 400V \quad (23)$$

$$1,25 \times I_{sc_{sub-arranjo}} < I_{chave} < 2,5 \times I_{sc_{sub-arranjo}} \quad (24)$$

$$I_{n_{sub-arranjo}} = 16A \quad (25)$$

### 3.1.4.3.3 Proteção de sobretensão a *string box* com dispositivos de proteção contra surtos (DPS)

Na Tabela 2 são apresentados os critérios para a especificação dos DPS's CC.

Tabela 2 - Critérios para determinar o DPS

---

*Tensão  $\geq$  Tensão máx de operação do sistema*

*Tipo 2 ou tipo 1 + 2 próprios para efeitos indutivos de descarga atmosférica.*

*Próprio para aplicações fotovoltaicas*

---

Fonte: Notas de aula do Curso de Projetos Fotovoltaicos da FAM (2022).

### 3.1.4.3.4 Dimensionamento dos condutores CC

Para o dimensionamento dos condutores CC do sistema fotovoltaico, será utilizado a NBR 16612 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), sendo essa a norma específica com os requisitos para a implementação do cabeamento CC para sistemas fotovoltaicos, cujas principais características são:

- a) serem próprios para corrente contínua;

- b) tensão de isolamento maior ou igual à tensão máxima do arranjo;
- c) se expostos ao tempo, devem ter proteção contra radiação UV;
- d) ser retardante de chamas;
- e) possuir dupla isolamento;
- f) se expostos a ambiente salino, devem ser de cobre estanhado.

Os condutores do arranjo fotovoltaico estão expostos à radiação solar e/ou temperaturas elevadas devido sua proximidade aos módulos fotovoltaicos e proximidade dos demais condutores das series fotovoltaicas. Portanto, sua capacidade de condução de corrente é especificada pela Tabela 5 da NBR16690 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) e a Tabela C.2 até a C.5 da NBR 16612 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017), e para dois condutores carregados como obtido da NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), assim como demais condutores do arranjo fotovoltaico.

De acordo com a Tabela 5 da NBR16690 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019) para um arranjo fotovoltaico com apenas uma série de painéis fotovoltaicos, a corrente mínima a qual a área transversal dos condutores e dada por:

$$I_z = 1,5 * I_{sc} \quad (26)$$

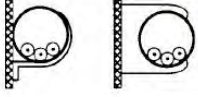
ou

$$I_z = 1,5 * 11,48 = 17,22A \quad (27)$$

Portanto, segundo a Figura 19, para dois condutores e com base em uma temperatura ambiente de 50°C com dois condutores em paralelo, resulta o cabo de 1,5mm<sup>2</sup>, no entanto pela NBR 5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008), todo condutor de força deve ter uma dimensão mínima de 2,5mm<sup>2</sup>.

De acordo com Tabela C.2 até a C.5 da NBR 16612 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) adotando que os condutores serão acomodados em eletroduto aparente de acordo com a NBR5410 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008) o método de instalação é o de número 3, cuja referência é dada pelo método B1 como apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Método de instalação

3		Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B1
---	---	---	----

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Sabendo que os sistemas fotovoltaicos podem atingir elevadas temperaturas, principalmente próximos ao arranjo fotovoltaico, e tendo em vista que dependendo da região onde o sistema seja instalado essas temperaturas podem ser ainda mais elevadas, será tomado como base uma temperatura ambiente de 50°C, para garantir a segurança e evitar o surgimento de pontos de aquecimento, e desta forma serão utilizadas as informações da Figura 19.

Figura 19 - Capacidade de condução de corrente

**Tabela C.4 – Capacidade de condução de corrente para cabos instalados em temperatura ambiente de 50 °C e temperatura no condutor em regime permanente de 90 °C (continua)**

Seção mm <sup>2</sup>	Instalação ao ar livre protegida do sol				Instalação ao ar livre exposta ao sol			
	Modo de instalação				Modo de instalação			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1,5	21	20	23	20	16	16	20	16
2,5	28	27	32	28	22	21	27	21
4	37	36	42	37	28	27	35	28
6	47	46	53	47	36	35	44	36
10	65	64	74	66	49	48	61	50
16	86	86	98	88	63	63	80	67
25	114	115	130	118	82	83	105	88

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017).

Para o agrupamento dos cabos será considerado os dados da Figura 20 e, tendo como referência o agrupamento de dois condutores embutidos em conduto fechado, o fator de correção por agrupamento será de 0,8.

Figura 20 - Fator de agrupamento para condutores elétricos  
**Tabela 42 — Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única**

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70				36 e 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 e 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019).

Tomando como referência o cabo de  $4mm^2$ .

$$I_z = I_c * F_{ag} = 27 * 0,8 = 28,8A \quad (28)$$

$$I_z \geq I_{sc} = 11,48 \quad (29)$$

O cabo de  $4mm^2$  possui uma capacidade de carga muito próxima da corrente nominal de 25<sup>a</sup> do dispositivo de proteção, ocasionando um risco a instalação, já que o cabo pode ser danificado ao longo do tempo e por não possibilitar a expansão do sistema sem a mudança do cabeamento, logo será descartado o uso do cabo de  $4mm^2$ .

Tomando como referência os cabos de  $6mm^2$ .

$$I_z = I_c * F_{ag} = 46 * 0,8 = 36,8A \quad (30)$$

$$I_z \geq I_{sc} = 11,48 \quad (31)$$

O cabo  $6mm^2$  de possui uma capacidade de carga maior que a corrente nominal de 25A, garantindo que a proteção atue antes do cabo ser danificado pela corrente e possui uma margem que possibilita a adição de novos painéis caso necessário, logo será utilizado o cabo de  $6mm^2$ .

De acordo com as equações 27, 29 e 31 é possível verificar que o cabo de  $6mm^2$  é adequado para essa instalação podendo suportar uma corrente de 36,8A.

### 3.1.4.3.5 Seleção da *String Box* CC

Como apresentado anteriormente na seleção do inversor escolhido, ele possui sua própria entrada de alimentação e chave de seccionamento, não sendo necessário a implementação de uma *String Box CC*, no entanto para uma questão de exemplo neste trabalho será mostrada a sua especificação.

A principal utilidade da *String Box* é acomodar de maneira segura os dispositivos de proteção e suas respectivas conexões, isolando a energia do sistema em caso de necessidade e/ou surto elétrico, proporcionando segurança e longevidade ao sistema instalado.

Os componentes que integram a *String Box*, após serem especificados podem ser adquiridos individualmente e montados pelo técnico responsável ou obtida pronta através de um fornecedor. Foi optado pela aquisição desta já montada e as vantagens que justificam essa escolha são apresentadas a seguir:

- a) ganho de tempo na aquisição dos componentes;
- b) ganho no emprego da mão de obra para montagem;
- c) em geral a *String Box* já montada tem um preço de aquisição menor, em comparação com adquirir os componentes separadamente;
- d) garantia de fábrica de que todos os componentes respeitem as regra e normas vigentes.

Analisando os dados apresentados nas Figuras 16 e 17, as equações 21, 23, e 25, fora pesquisado entre os modelos de *String Box CC* disponíveis no mercado, considerando os modelos disponíveis, tempo de entrega, facilidade de reposição em caso de danos, garantias e a relação custo x benefício foi escolhida a *String Box CC* da fabricante SERRANA SOLAR, modelo RS-3K-S1, cujas principais características são listadas na Figura 21.

Figura 21 – String Box CC

	R5-3K-S1	R5-4K-S2	R5-6K-S2	R5-8K-S2	R5-12K-T2	R5-17K-T2	Suntrio Plus 25 kVA	Suntrio Plus 30 kVA, 40 kVA e 50 kVA	Suntrio Plus 60 kVA	
<b>DPS CC</b>										
Número de DPS	1	2				3				
Norma Técnica	IEC 61643-1:2007									
Número de Polos	3									
Corrente Nominal de Descarga (In)	20 kA									
Corrente Máxima de Descarga (Imax)	45 kA									
Tensão de Operação	1000 V									
Tempo de Resposta - T A	< 25 ns									
Indicador de Operação	Verde (operação) / Vermelho (fora de operação)									
<b>FUSÍVEL CC</b>										
Corrente Nominal	20 A									
Tensão Nominal	1000 V									
<b>PORTA FUSÍVEL</b>										
Corrente Nominal	32 A									
Tensão Nominal	1000 V									
<b>CABOS DA STRING</b>										
Positivo • Negativo • Terra	6 mm <sup>2</sup>									
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>										
Grau de Proteção	IP 40									
Fixação	Montagem na Parede									
Peso	1,5 kg	2 kg	3 kg	2 kg	3 kg	4 kg	5 kg	3 kg e 4 kg		
Dimensão da Caixa (P x L x A)	100 x 256 x 226 mm	107 x 328 x 235 mm			108 x 328 x 385 mm	108 x 328 x 536 mm	108 x 328 x 768 mm	108 x 328 x 536 mm e 108 x 328 x 385 mm		

Fonte: Serrana Solar (2022).

### 3.1.5 Dimensionamento de condutores e dispositivos de proteção CA

Para o dimensionamento das proteções contra sobrecorrente e para o seccionamento do circuito CA, serão empregados os seguintes métodos.

#### 3.1.5.1 Dimensionamento dos condutores CA

Para o dimensionamento dos condutores CA, será empregada como referência para a corrente de projeto, a máxima corrente de saída do inversor, corrigida pelos devidos fatores de temperatura, agrupamento, modo de instalação etc. Logo, a capacidade de condução de corrente, se necessário correção, deve ser maior ou igual a corrente de projeto e o método de instalação será em eletroduto aparente, portanto B1.

Para a correção de temperatura utilizaremos 50°C como temperatura de referência, sendo o fator de correção igual a 0,71, conforme a Figura 22 e admitindo a isolação PVC do cabo.

Figura 22 - Correção de temperatura.

**Tabela 40 — Fatores de correção para temperaturas ambientes diferentes de 30°C para linhas não-subterrâneas e de 20°C (temperatura do solo) para linhas subterrâneas**

Temperatura °C	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
Ambiente		
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

Como a saída do inversor é monofásica não haverá ajuste por agrupamento, tendo a mínima corrente admissível para o condutor dada pela equação (32).

$$I_z \geq \frac{I_b}{F_{TA}} = \frac{7,1}{0,71} = 10A \quad (32)$$

Analisando a Figura 23 que apresenta a capacidade de condução de corrente, e sabendo que o método de instalação é o B1, o condutor será de 0,75mm<sup>2</sup>.

Figura 23 - Capacidade de Condução de Corrente CA.

**Tabela 36 — Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D**

Condutores: cobre e alumínio  
 Isolação: PVC  
 Temperatura no condutor: 70°C  
 Temperaturas de referência do ambiente: 30°C (ar), 20°C (solo)

Seções nominais mm <sup>2</sup>	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

No entanto, o método da seção mínima apresentado na Figura 23, determina o condutor de  $2,5\text{mm}^2$  como a menor seção para cabos de força, tendo assim uma capacidade de condução de corrente de 25A, tal que:

$$I_z = 25A \quad (33)$$

O disjuntor deve ter uma corrente de atuação maior que a corrente de saída do inversor e menor que a corrente suportada pelo cabo do sistema, tal que:

$$7,1 < I_{dj} < 25 \quad (34)$$

ou

$$I_{dj} = 20 \quad (35)$$

Na Tabela 4 são apresentados os critérios para a especificação dos DPS's CA.

Tabela 3 - Critérios para determinar o DPS.

---

*Tensão de operação 1,1x a tensão de operação de saída do inversor.*

*Tipo2 ou tipo1 +2 classificados para operação CA.*

---

Fonte: Notas de aula do Curso de Projetos Fotovoltaicos da FAM (2022).

No barramento será ligado um DPS para cada fase e um para o neutro. No caso de mais de um inversor, após os DPS deverá ser adicionado um disjuntor geral ou fusíveis para proteção dos cabos contra curto-circuito e sobrecorrente (FAM, 2022).

### 3.1.5.2 Escolha da *String Box* CA

As mesmas vantagens consideradas para a *string box* CC, podem ser associados ao modelo CA.

Com base nos resultados obtidos nas equações 19, 35 e a Tabela 4, foi definida a *string box* CA do fabricante SERRANA SOLAR, modelo RS-3K-S1-15, cujas principais características são listadas na Figura 24.



Figura 24 - String Box CA.

	RS-3K-S1-15	RS-4K-S2-15	RS-6K-S2-15	RS-8K-S2-15	RS-10K-T2-15 RS-12K-T2-15	RS-15K-T2-32 RS-17K-T2-32	RS-20K-T2-32-LV RS-25K-T2-32	RS-30K-T3-32	RS-40K-T3-32-LV RS-40K-T4-32	RS-50K-T4-32-LV RS-50K-T4-32	CS-50K-T6-LV CS-75K-T6	CS-60K-T9-LV CS-100K-T9	
<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS</b>													
Tensão de Operação	220 VAC				380 / 220 VAC ou 220 / 127 VAC para os Inversores LV								
Frequência da Rede	60 Hz												
Conexão dos Cabos de Entrada	Diretamente no Disjuntor												
<b>DISJUNTOR CA</b>													
Corrente Nominal (In)	20 A	25 A	32 A	50 A	25 A	32 A	40 A	50 A	63 A	80 A	100 A	150 A	200 A
Tensão Nominal de Isolamento	500 VAC				415 VAC				500 VAC		690 VAC		
Número de Polos	2 (F/N ou F/F)				3 (F/F/F)								
Norma Aplicável	NBR 60898				NBR 60898								
<b>DPS CA</b>													
Número de Polos	2				4								
Classe de Proteção	Varistor de Óxido Metálico (MOV)				Varistor de Óxido Metálico (MOV)								
Nível de Proteção (Up)	1,2 kV												
Tensão Máxima de Operação Contínua (Uc)	275 VAC												
Indicador de Operação	Verde (serviço) / Vermelho (defeito)												
Corrente Nominal de Descarga (In)	10 kA												
Corrente Máxima de Descarga (Imax)	20 kA												
Tempo de Resposta Típico	< 25 ns												
Norma Aplicável	Norma aplicável - IEC 61643-11 / UL 1449 / ABNT NBR 5410												
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS</b>													
Grau de Proteção	IP 65												
Fixação	Montagem na Parede												
Peso	1,6 kg				3,5 kg				3,2 kg		3,9 kg		
Dimensão da Caixa (P x L x A)	113 x 308 x 253 mm				140 x 410 x 285 mm				148 x 437 x 311 mm		250 x 400 x 400 mm		

Fonte: Serrana Solar (2022).

#### 4 PROPOSTA INICIAL

Com base nos dados estabelecidos no projeto proposto, foram definidos na Tabela 5 os materiais e componentes do sistema, com uma proposta inicial ao cliente. Vale ressaltar que, será possível afirmar o custo da instalação após a visita técnica, mas esse primeiro contato já permite ao cliente saber se o projeto está de acordo com o seu orçamento. Mas, antes da escolha dos componentes do sistema, é necessário verificar alguns requisitos, tais como: os componentes devem ter o selo do INMETRO; a disponibilidade dos materiais e o melhor custo-benefício.

Tabela 4 - Lista de Materiais do Sistema FV Proposto

<b>PRODUTO</b>	<b>CUSTO</b>	<b>QTDE</b>	<b>SUBTOTAL</b>
PROJETO/INSTALAÇÃO	1500,00	1	1.500,00
MÓDULO SOLAR 440W	985,24	8	7.881,92
GROMWATT 1.5KTLM-G3 - 220V	3.719,02	1	3.719,02
STRINGBOX SOLAR	517,37	1	517,37
KIT SUPORTAÇÃO PARA TELHADO METALICO	18,27	5	274,05
PERFIL AL TUB NAT COD CIS004 3,40	77,68	6	466,08
KIT DE EMENDAS E PARAFUSOS INOX 8X12	5,50	6	33,00
CABO SOLAR 6MM <sup>2</sup> - 1800V PRETO	5,87	20	117,40
CABO SOLAR 6MM <sup>2</sup> - 1800V VERMELHO	5,87	20	117,40
CABO SINGELO PP 2,5MM <sup>2</sup> - PRETO	2,98	20	59,60
CABO SINGELO PP 2,5MM <sup>2</sup> - BRANCO	2,98	20	59,60
CABO SINGELO PP 2,5MM <sup>2</sup> - VERDE	2,98	20	59,60
PAR CONECTOR MACHO / FEMEA - MC4	10,09	3	30,27
KIT TERMINAL FINAL - (F: 30MM)	6,25	4	25,00
KIT TERMINAL INTERMEDIARIO 39/44MM – PAR	8,78	0	87,80
PLACA DE ADVERTÊNCIA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	30,23	1	30,23
PROJETO, INSTALAÇÃO E INSUMOS	1000,00	1	1000,00
<b>TOTAL</b>			<b>15.978,34</b>

Fonte: Do autor (2022).

O valor total do sistema não corresponde exatamente ao valor da proposta, pois ainda é preciso adicionar os valores de comissão, impostos e margem de lucro, os quais devem ser definidos segundo as necessidades da empresa e seguindo as demandas de mercado.

Se o cliente aceitar a proposta inicial, a próxima etapa é agendar uma visita ao local de instalação do sistema FV para a avaliação das condições *in loco* para instalação do sistema.

#### 4.1 Cenário real: visita técnica

É importante fazer a correção de orientação do sol, sombreamento, inclinação, distância dos cabos etc., pois esses fatores podem influenciar na especificação do sistema FV.

Para a proposta inicial foi determinado que a área do telhado é de 12m por 32m, totalizando uma área de  $384m^2$ , com uma estrutura de sustentação em metal e concreto, não sendo detectado nenhum sombreamento significativo que possa prejudicar o sistema. Analisando os dados físicos do módulo fotovoltaico, apresentado na Figura 25, constatamos que cada módulo tendo uma área total de  $2,209m^2$ , e um peso de 24,9Kg, como fora definido 8 módulos a área total que o sistema irá ocupar será de  $17,673m^2$ , com um peso distribuído de 199,2Kg.

Figura 25 - Dados Físicos do Painel.

##### DADOS MECÂNICOS

Especificação	Dados
Tipo de célula	Monocristalina
Arranjo de células	144 [2 X (12 X 6) ]
Dimensões	2108 X 1048 X 40 mm (83,0 X 41,3 X 1,57 pol.)
Peso	24,9 kg (54,9 lbs)
Capa dianteira	Vidro temperado de 3,2 mm
Quadro	Liga de Alumínio Anodizado, com barra transversal
Caixa J	IP68, 3 díodos de bypass
Cabo	4 mm <sup>2</sup> (IEC), 12 AWG (UL)
Comprimento do cabo (Incluindo conector)	Retrato: 500 mm (19,7 pol.) (+) / 350 mm (13,8 pol.) (-); paisagem: 1400 mm (55,1 pol.); conexão leapfrog: 1670 mm (65,7 pol.)*
Conector	Série T4 ou H4 UTX ou MC4-EVO2
Por palete	27 peças
Por contêiner (40' HQ)	594 peças

\* Para informações detalhadas, contate seu Representante de Vendas ou Representante Técnico local.

Fonte: Canadian Solar (2022).

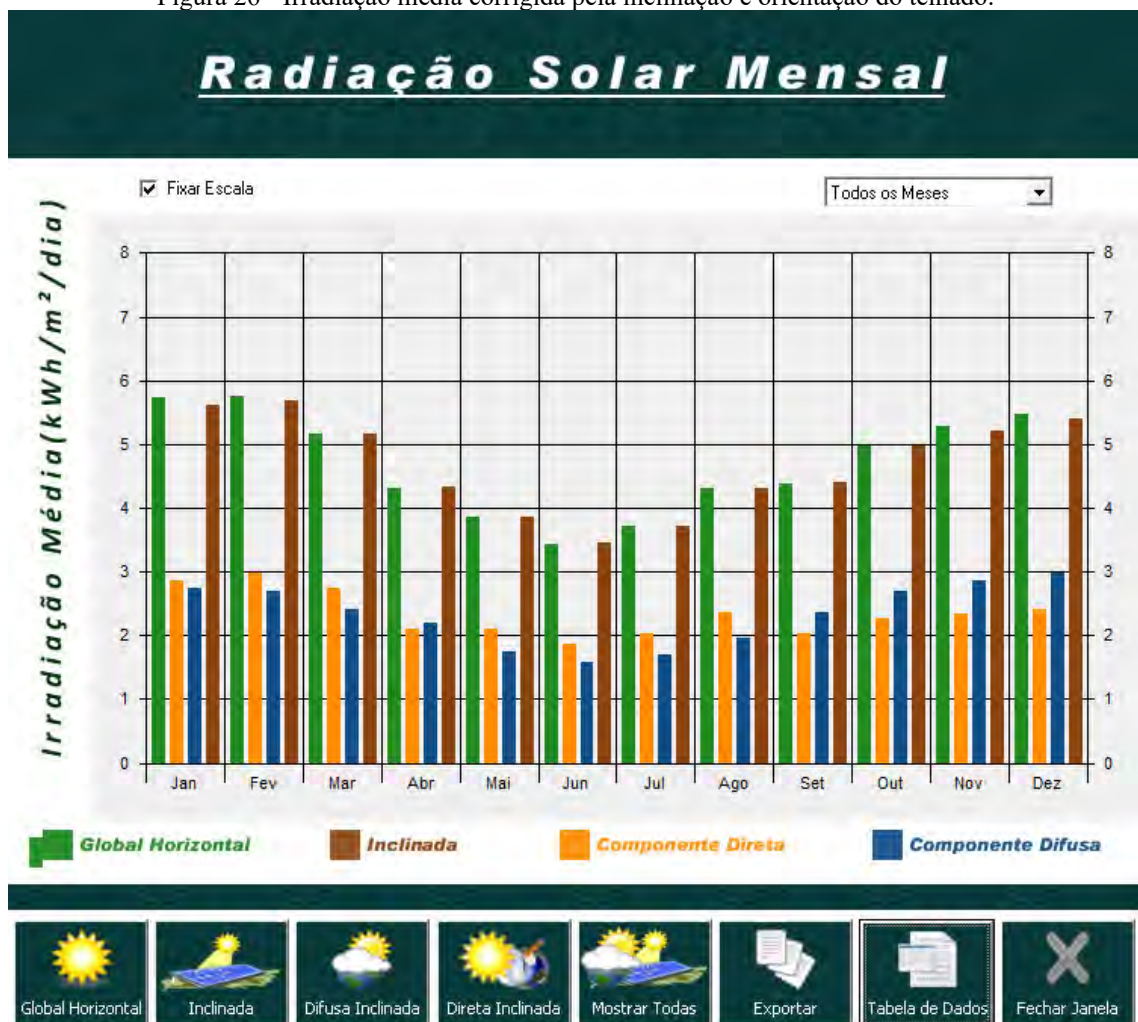
O local possui uma orientação do telhado de 82° Nordeste, mas a inclinação real do telhado é de 16° e, apesar disso, não foi detectado nenhuma forma de sombreamento significativo sobre o telhado. São disponibilizados *softwares* para a correção dos desvios

originados pela orientação e inclinação do telhado.

Para esse estudo será utilizado o RadiaSol (2022), desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Com a simulação, onde foram inseridos os dados de orientação e inclinação, é obtido o gráfico de correção apresentado na Figura 26. É importante observar com atenção o trajeto que o cabeamento deverá fazer para que esteja de acordo com a quantidade estipulada na Tabela 5.

Analisando a Figura 26 é possível verificar que há pouca variação no valor da irradiância global horizontal com a corrigida pelo valor inclinado, não sendo necessário alterar os valores fornecidos.

Figura 26 - Irradiação média corrigida pela inclinação e orientação do telhado.



Fonte: Software RadiaSol (2022).

Uma vez concluída a visita técnica, é possível avaliar com melhor precisão as mudanças necessárias em relação ao projeto, tais como quantidade de materiais, ferramental específico e onde os componentes estarão melhor abrigados. É um processo fundamental na elaboração do

projeto, evitando divergências na instalação e o bom funcionamento do projeto.

## 4.2 Análise econômica

O projeto de sistema fotovoltaico deve ser acompanhado da análise da viabilidade econômica do investimento, apresentando o retorno do investimento para o cliente

O cálculo que permite avaliar o tempo de retorno de um investimento é o *payback*, que é o período para que o custo da instalação se pague e a partir de qual período passa a gerar retorno financeiro.

A princípio será determinado o custo do watt-pico do sistema, dado por (36):

$$C = \frac{I}{P_t} \quad (36)$$

Sendo: C = custo do sistema (R\$/Wp); I = investimento no sistema (R\$); P<sub>t</sub> = Potência do sistema (Wp).

Portanto:

$$C = \frac{15.978,34}{3450} = 4,63 \text{ R\$/Wp} \quad (37)$$

O montante durante 12 meses é determinado por (38).

$$A = G_m * trf * 12 \quad (38)$$

Sendo: G<sub>m</sub> = Geração mensal (kWh); Trf = preço da tarifa da concessionária (R\$).

Desta forma, tem-se:

$$A = 325 * 1,13267861 * 12 = \text{R\$ } 4.417,45 \quad (39)$$

Os critérios admitidos para avaliação serão o Valor Presente Líquido (VLP) e Tempo de Retorno de Investimento (TRI). Para ambos os casos, será utilizado como Taxa Mínima de Atratividade o mesmo valor da taxa SELIC do ano em questão, neste caso 9,25% anual. Para a vida útil do sistema fotovoltaico foi considerado 25 anos que é o tempo de vida útil dos módulos.

O VPL será calculado de acordo com (40).

$$VPL = A * FVP_{(i,n)} - I \quad (40)$$

O FVP será calculado por (41).

$$FVP_{(i,n)} = \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n} \quad (41)$$

Sendo: A = Benefício auferido anualmente (R\$ 4.417,45, dado pela equação 23); I = Investimento (R\$ 15.978,34, dado pela tabela 5); i = Taxa Mínima de Atratividade Anual (9,25% - Taxa SELIC do ano de 2022); n = Vida útil do equipamento em anos (25 anos).

Se o valor de VPL for positivo, o investimento é considerado economicamente viável. Portanto:

$$FVP_{(i,n)} = \frac{(1 + 0,0925)^{25} - 1}{0,0925 * (1 + 0,0925)^{25}} = 9,62689144 \quad (42)$$

$$VPL = 4.417,45 * 9,62689144 - 15.978,34 = 26.547,97 \quad (43)$$

O tempo de retorno do investimento é calculado por (44).

$$TRI = - \frac{\ln(1 - \frac{I}{A} * i)}{\ln(1 + i)} \quad (44)$$

O resultado do TRI expressa o período em que o valor líquido do empreendimento será pago e a partir desse período o sistema passa a ser lucrativo ao cliente.

$$TRI = - \frac{\ln\left(1 - \frac{15.978,34}{4.417,45} * 0,0925\right)}{\ln(1 + 0,0925)} \quad (45)$$

$$= 4,60 \text{ ou } 4 \text{ anos e } 8 \text{ meses}$$

Conforme demonstrado, o valor do investimento inicial de R\$15.978,34 através da análise do *payback* e do tempo de retorno de investimento (TRI), se iguala ao consumido pelo

projeto em um período de 4 anos e 8 meses. Durante esse período não há ganhos, mas a partir deste ponto, todo valor adquirido é visto como ganho sobre o investimento inicial.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho em questão propôs desenvolver um estudo de caso para a implementação de um sistema fotovoltaico residencial, baseando-se em uma revisão teórica dos componentes e suas principais características.

A energia solar apresenta diversas vantagens, como não poluir durante o seu uso, não degradar grandes áreas e, principalmente, por ser uma forma de energia renovável. Em um país de forte incidência solar a implementação de projetos fotovoltaicos é uma prática viável em quase todo o território, com utilização possível em áreas remotas ou de difícil acesso das linhas de transmissão.

O dimensionamento foi obtido considerando as características geográficas e a energia que a residência consumiria do sistema proposto, não havendo a necessidade de crédito de energia pela concessionária. Dentre as características da residência, foi necessário mensurar a área do telhado e identificar a orientação do mesmo em relação ao norte. Com esses dados, foi possível determinar a potência total da unidade fotovoltaica e escolher os componentes.

Com base nestes, foram realizadas cotações com empresas que fornecem material para sistemas fotovoltaicos, a fim de se obter a melhor relação de custo benefício da instalação. Com o custo, valores e tarifas, foi possível estabelecer o custo do investimento, a viabilidade econômica e o tempo de retorno do investimento.

Como sugestão para trabalhos futuros, está a implementação de sistemas fotovoltaicos para diferentes grupos de consumidores e localidades isoladas, onde a energia elétrica fornecida pela rede é de difícil acesso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. 2022. Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasil: ANEEL, 2012. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução N° 1000, de 07 de dezembro de 2012**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasil: ANEEL, 2012. Disponível em: < <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasil: ANEEL, 2015. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cadernos Temáticos ANEEL: micro e minigeração distribuída, sistemas de compensação de energia elétrica**. 2 Ed. Brasília: ANEEL, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Brasil, p. 1. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16612: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos não halogenados isolados com cobertura**. Brasil. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos: Requisitos de Projeto**. Brasil. 2019.

BUHLER, A. J.; SANTOS, F. H.; GABE, I. L. Uma Revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 17 a 20 de abril de 2018, Gramado, Rio Grande do Sul. **Anais [...]** Gramado, 2018.

CÂMARA, S. Parecer N° 356, de 2021. De PLENÁRIO, em substituição às Comissões, sobre o Projeto de Lei nº 5829, de 2019, do Deputado Silas Câmara, que institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Relator: Marcos Rogério. **Lex: Senado Federal**. Brasília, DF. p. 1-20.

CanadianSolar. 2022. Disponível em: < <https://www.csisolar.com/br/downloads/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

CRESESB. 2022. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.



Energia solar: qual é a posição do Brasil no ranking mundial?. **HCC Energia Solar**, 2022. Disponível em: < <https://hccenergiasolar.com.br/energia-solar-qual-e-a-posicao-do-brasil-no-ranking-mundial/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

FAM. 2022. Disponível em: < <https://engfam.com.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

LABSOL. **UFRGS**, 2022. Disponível em: < <https://www.ufrgs.br/labsol/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasil termina 2021 com maior acréscimo em potência instalada desde 2016. **Gov**, 2021. Disponível em: < [https://www.gov.br/aneelsala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-termina-2021-com-maior-acrescimento-em-potencia-instalada-desde-2016/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_XGPXSqdMFHrE%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn-2%26p\\_p\\_col\\_count%3D3](https://www.gov.br/aneelsala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-termina-2021-com-maior-acrescimento-em-potencia-instalada-desde-2016/656877?inheritRedirect=false&redirect=https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_XGPXSqdMFHrE%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_count%3D3) >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Município de Conselheiro Lafaiete. **Cidade-Brasil**, 2021. Disponível em: < <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-conselheiro-lafaiete.html#:~:text=Situado%20a%201%20000%20metros,%C2%B0%2047%208%20Oeste> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Neosolar. 2022. Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Parâmetro técnico. **Growatt**, 2022. Disponível em: < <https://www.ginverter.pt/show-40-640.html> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2 Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

Portal Solar. 2022. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Potencial Solar – SunData. **CRESESB**, 2018. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Serrana Solar. 2022. Disponível em: < <https://www.serranasolar.com.br/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

SILVA, M. V. S. Estudo de filmes finos de  $\text{CuInSe}_2$  para aplicação em células fotovoltaicas. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 3., 2010, Belém, Pará. **Anais** [...] Belém, 2010.

Sofarsolar. 2022. Disponível em: < <https://www.sofarsolar.com/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

Solargis. 2022. Disponível em: < <https://solargis.com/> >. Acesso em: 01 de Agosto de 2022.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). **Energia renovável:** hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.