

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

BRYAN RIBEIRO MACIEL

**ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA ENTRE PAINEL
E TELHA FOTOVOLTAICOS**

VITÓRIA
2021

BRYAN RIBEIRO MACIEL

**ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA ENTRE PAINEL E TELHA
FOTOVOLTAICOS**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Bryan Ribeiro Maciel**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz

VITÓRIA
2021

BRYAN RIBEIRO MACIEL

ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA ENTRE PAINEL E TELHA FOTVOLTAICOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Bryan Ribeiro Maciel**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 08 de julho de 2021.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Ao meu pai Glaucimar, à minha mãe Alessandra e aos meus avós Amaro e Maria Lúcia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e saúde, assim como da minha família.

Agradeço aos meus pais por sempre buscarem o melhor ensino para mim e por terem me dado todo acesso à educação possível e por me permitirem estudar de forma integral.

Agradeço aos meus irmãos e avós que sempre me apoiaram na escolha do curso de Engenharia Elétrica e por acreditarem no meu potencial.

Agradeço à minha noiva, Izabella Gorini, por me incentivar e ajudar em todos os momentos.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo José Mello Menegáz pela paciência, atenção e orientação durante esse período.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo por oferecer um ensino público de excelência e aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

Neste trabalho, são apresentadas duas propostas que tem como objetivo diminuir o valor pago pelo consumo de energia elétrica de uma residência. As propostas em questão tratam de dimensionar dois sistemas que utilizam energia solar, sendo o primeiro com painéis solares e o segundo com telhas solares. Diante dessas duas tecnologias, alguns fatores os diferenciam, sendo interessante analisá-los e compará-los, como, por exemplo, o formato dos painéis e das telhas, quantidade de energia fornecida por cada tecnologia e o tempo de retorno financeiro. Com base no consumo anual do ano de 2019 do cliente, foram dimensionados os dois sistemas, de modo que eles durem 25 anos, sendo este a vida útil dos sistemas mensurados. Com valores de mercado para os projetos e os gastos com manutenção, foi possível calcular se os mesmos são capazes de oferecer vantagem econômica pela sua aquisição e qual deles é o ideal para a residência. Por meio do cálculo realizado foi feita uma análise financeira, com dois métodos distintos, sendo eles o valor presente líquido (VPL) e o custo de energia nivelado (LCOE, do inglês *Levelized Cost of Energy*) e, dessa forma, inferiu-se a relevância dos sistemas fotovoltaicos e seus impactos financeiro a cada ano até o fim de sua vida útil. O projeto e suas análises mostraram que é viável investir nesses sistemas, pois os dois oferecem uma vantagem financeira e, dentre eles, o projeto constituído por painéis solares fornece o maior retorno para o cliente.

Palavras-chave: Energia solar. Paineis solar. Telha solar.

ABSTRACT

In this work, two proposals are presented that aim to reduce the amount paid for the consumption of electricity in a home. The proposals in question deal with dimensioning two systems that use solar energy, the first with solar panels and the second with solar tiles. Faced with these two technologies, some factors differentiate them, and it is interesting to analyze and compare them, such as, for example, the format of the panels and tiles, the amount of energy supplied by each technology and the financial payback time. Based on the customer's annual consumption for the year 2019, the two systems were dimensioned so that they last 25 years, this being the useful life of the measured systems. With market values for the projects and maintenance expenses, it was possible to calculate if they can offer economic advantage for their acquisition and which one is ideal for the residence. Through the calculation performed, a financial analysis was performed, with two different methods, namely the net present value (NPV) and the levelized cost of energy (LCOE) and, thus, it was inferred the relevance of photovoltaic systems and their financial impacts every year until the end of their useful life. The project and its analysis showed that it is feasible to invest in these systems, as both offer a financial advantage and, among them, the project consisting of solar panels provides the greatest return for the customer.

Keywords: Solar energy. Solar panel. Solar tile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema fotovoltaico com painéis solares.....	17
Figura 2 – Sistema FV com telhas solares.....	18
Figura 3 – Efeito fotovoltaico na célula solar.....	22
Figura 4 - Modelo de célula fotovoltaica.....	24
Figura 5 - Célula monocristalina	25
Figura 6 – Célula policristalina.....	26
Figura 7 – Associação em paralelo de módulos solares	27
Figura 8 – Associação em série de módulos solares.....	27
Figura 9 – Diodo <i>by-pass</i> utilizado com (a) célula solar e com (b) módulo solar, respectivamente	28
Figura 10 – Diodo de bloqueio em série com o módulo solar.....	29
Figura 11 – Curva típica de potência versus tensão	30
Figura 12 – Curva característica IxV mostrando a corrente	30
Figura 13 – Parâmetros de potência máxima.....	31
Figura 14 – Curva IxV com variação da irradiância “G”	32
Figura 15 – Curva IxV com variação da temperatura.....	32
Figura 16 – Componentes de um sistema fotovoltaico.....	33
Figura 17 – Sistema fotovoltaico isolado	33
Figura 18 – Sistema fotovoltaico híbrido	34
Figura 19 – Sistema fotovoltaico conectado à rede	35
Figura 20 – Proteção do sistema fotovoltaico.....	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Irradiação média em Vila Velha, ES [kWh/m ² /dia]	40
Quadro 2 – Modelos de painéis para sistema fotovoltaicos	40
Quadro 3 – Modelos de telhas para o sistema fotovoltaico	40
Quadro 4 – Quantidade de painéis necessários e o valor total	42
Quadro 5 – Quantidades de telhas necessárias e o valor total	43
Quadro 6 – Modelos de inversores e suas características	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo da unidade em 2019.....	39
Tabela 2 – Parâmetros do painel RSM72-6-335p e suas correções.....	41
Tabela 3 – Parâmetros da telha SN24M-2 e suas correções	41
Tabela 4 – Determinação da quantidade de inversores e módulos em série e paralelo.....	47
Tabela 5 – Determinação da quantidade de inversores e telhas em série e paralelo	47
Tabela 6 – Quantidade de suportes para fixação dos painéis	48
Tabela 7 – Quantidade de condutores e conectores necessários para a ligação dos painéis ..	50
Tabela 8 – Quantidade de condutores e conectores necessários para a ligação das telhas.....	50
Tabela 9 – Quantidade de dispositivos de proteção.....	51
Tabela 10 – Componentes do sistema fotovoltaico com painéis e o valor total do investimento	52
Tabela 11 – Componentes do sistema fotovoltaico com telhas e o valor total do investimento	52
Tabela 12 – Resultado do cálculo pelo método do VPL para o sistema com painéis solares	54
Tabela 13 – Resultado do cálculo pelo método VPL para o sistema com telhas solares	55
Tabela 14 – Resultado do cálculo pelo método LCOE para o sistema com painéis	56
Tabela 15 – Resultado do cálculo pelo método LCOE para o sistema com telha	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surto
FC	Fluxo de Caixa
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
FV	Fotovoltaico
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma Brasileira
STC	<i>Standardized Test Conditions</i>
VPL	Valor Presente Líquido
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
Cd	Consumo médio diário (kWh/dia)
Com	Custo anual de operação e manutenção do sistema (R\$)
d	Taxa de decaimento de eficiência dos módulos
E	Energia gerada (kW)
e%	Máximo percentual permitido de queda de tensão
E _p	Energia produzida pelo módulo fotovoltaico (kwh/dia)
E _t	Energia gerada no ano t (kW)
F	Frequência (Hz)
F _c	Fator de correção (%)
γ	Coefficiente de temperatura (%)
I	Corrente do circuito (A)
I'	Corrente corrigida (A)
I _d	Corrente no diodo <i>by-pass</i> (A)
I _{imáx}	Corrente CC máxima na entrada do inversor (A)
I _{máx}	Corrente de saída do inversor (A)
I _{mp}	Corrente de potência máxima (A)
I _n	Corrente nominal (A)
I ₀	Investimento inicial (R\$)
IR	Irradiação média (kWh/m ² /dia)
I _{sc}	Corrente de curto-circuito (A)
I _z	Corrente no diodo de bloqueio (A)
K1	Fator de correção de agrupamento
K2	Fator de correção de temperatura
L	Comprimento do circuito (km)
N _{ms}	Número de módulos em série conectados ao inversor
N _p	Número de módulos em paralelo
P _{fv}	Potência do gerador fotovoltaico (W)
P _{in}	Potência de entrada no inversor (W)
P _m	Potência máxima (W)
P _{máx}	Potência máxima na entrada do inversor (W)

P_{nCA}	Potência nominal CA do inversor (W)
P_{out}	Potência de saída do inversor (W)
T_d	Taxa de desconto (%)
T_{nocT}	Temperatura em condições nominais de operação (°C)
T_{SCT}	Temperatura em condições padrão de teste (°C)
V	Tensão (V)
$V_{imáx}$	Tensão máxima de entrada no inversor (V)
$V_{máx}$	Tensão máxima CC do inversor (V)
V_{min}	Tensão mínima de operação (V)
V_{mp}	Tensão de potência máxima (V)
V_n	Tensão nominal (V)
V_{oc}	Tensão de circuito aberto (V)
$V_{oc,Tmin}$	Tensão de circuito aberto do módulo, operando com temperatura mínima
Δv	Queda de tensão (V)
η	Rendimento do módulo fotovoltaico
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Energias Renováveis	15
1.2	Energia Solar e seu Crescimento no Mercado	15
1.3	Painéis Solares	16
1.4	Telhas Solares	17
2	JUSTIFICATIVAS	19
3	OBJETIVOS	20
3.1	Objetivo Geral	20
3.2	Objetivos Específicos	20
4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
5.1	Efeito Fotovoltaico	22
5.2	Célula Fotovoltaica	23
5.3	Célula Solar Monocristalina	24
5.4	Célula Solar Policristalina	25
5.5	Módulos Fotovoltaicos	26
5.6	Características Elétricas dos Módulos	29
5.7	Configurações e Componentes Básicos	32
5.8	Análise de Viabilidade Financeira	36
5.8.1	Valor Presente Líquido	37
5.8.2	Custo Nivelado de Energia	37
6	ESTUDO DE CASO	39
6.1	Dimensionamento dos Painéis e das Telhas	39
6.2	Dimensionamento do Inversor	43
6.2.1	Tensão de Entrada	44
6.2.2	Faixa de Operação do MPPT	44
6.2.3	Corrente Máxima no Inversor	45
6.2.4	Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)	46
6.2.5	Determinação da Quantidade de Inversores e Módulos	46
6.3	Dimensionamento de Cabos e Outros Acessórios da Instalação	47
6.3.1	Dimensionamento do Kit de Fixação	48

6.3.2 Dimensionamento dos Cabos	48
6.3.3 Dimensionamento da Proteção do Sistema	50
6.4 Investimento do Sistema Fotovoltaico	52
7 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	53
7.1 Valor Presente Líquido	53
7.2 Custo Nivelado de Energia.....	53
8 CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Energias Renováveis

Entende-se por energia renovável todo e qualquer tipo de energia que possui fonte primária proveniente da natureza e que é naturalmente reabastecida, como a luz solar, o vento, as ondas das marés e oceanos, água dos rios, resíduos orgânicos e o calor que existe abaixo da crosta terrestre. Existem outros tipos de energias naturais, mas que não são renováveis, como é o caso do urânio, do carvão e do petróleo. Esses materiais são retirados da natureza, porém são limitados. Portanto, a energia proveniente dessas fontes não é considerada energia renovável (COELHO, 2016).

De acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as energias renováveis no Brasil representam, aproximadamente, 83% da matriz total da capacidade instalada de geração de energia elétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2020).

Essa expressiva porcentagem se dá por conta do grande potencial e uso das usinas hidrelétricas. Entretanto, outras fontes de energias renováveis vêm ganhando cada vez mais espaço no cenário energético, tais como solar e eólica. Com o surgimento de tecnologias capazes de converter essas fontes primárias em energia elétrica, de forma eficiente e acessível ao consumidor, ao longo dos próximos anos será possível ver uma mudança significativa na matriz energética do Brasil (PORTAL SOLAR, 2019b).

1.2 Energia Solar e seu Crescimento no Mercado

A energia solar é a energia proveniente do sol, tendo diversas aplicações, dentre elas, ser utilizada diretamente para o aquecimento do ambiente, aquecimento da água e para a produção de eletricidade, possibilitando reduzir o valor que se pagaria à concessionária pelo consumo de energia elétrica (PORTAL SOLAR, 2014).

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável, obtida através da conversão direta da luz em eletricidade, denominada efeito fotovoltaico. Esse efeito foi relatado pelo físico

francês Edmond Becquerel, em 1839, como sendo o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção de luz solar, isto é, no momento da interação da radiação solar com o material semicondutor, ocorre a liberação e movimentação de elétrons por esse material, gerando assim a diferença de potencial (SILVA; CARMO, 2017).

Diante das vantagens que esse tipo de energia pode fornecer, o governo brasileiro criou alguns incentivos para intensificar a utilização da geração fotovoltaica na matriz energética no país. Mesmo com os incentivos, a geração fotovoltaica encontra algumas barreiras, sendo o custo de investimento inicial uma das principais (SILVA; CARMO, 2017).

1.3 Painéis Solares

O conjunto de painéis fotovoltaicos é um dos principais componentes dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, tecnologia que vem ganhando seu espaço no mercado de geração de energia elétrica. Com o dimensionamento correto, é possível suprir o consumo elétrico de uma residência, uma empresa ou até mesmo uma indústria (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2018b).

Um dos problemas encontrados no uso dos painéis fotovoltaicos é seu peso e seu formato, abrindo espaço para o surgimento de novas tecnologias capazes de gerar o mesmo resultado e possibilitando ao cliente um *design* visualmente mais agradável e com menor peso. Dentre elas, encontra-se a telha solar, que mesmo sendo pouco conhecida, já é comercializada (CASA DA SUSTENTABILIDADE, 2015).

Na Figura 1 é possível observar um arranjo de painéis solares sobre o telhado de uma residência. Também se observa os suportes utilizados para sua fixação no telhado.

Figura 1 – Sistema fotovoltaico com painéis solares



Fonte: NAZARENO (2019).

1.4 Telhas Solares

A telha solar é uma tecnologia pouco comum, entretanto, já é vista em alguns imóveis comerciais e industriais. Esse material é tido como a tecnologia do futuro para quem quer investir em energia solar para residências. Um dos fatores que permite a telha solar sair na frente, se comparada com o painel solar, é sua fácil instalação, pois é similar a uma telha comum de cerâmica, logo não precisa de suporte, como no caso dos painéis fotovoltaicos (PORTAL SOLAR, 2020).

Um fator positivo e relevante é que, se uma telha sofrer algum dano, apenas ela é trocada, no caso do painel solar, a placa toda deve ser substituída, representando um custo maior. Por sua praticidade e seu retorno energético, vêm sendo desenvolvidas e comercializadas por grandes empresas da Itália, como a *Area Industrie Ceramiche e REM*. (CASA DA SUSTENTABILIDADE, 2015). Na Holanda, a empresa Zep Solar também está comercializando essa tecnologia. No Brasil, a marca Eternit está produzindo a primeira telha solar com tecnologia brasileira, a qual já foi aprovada pelo Inmetro e em breve passará a ser comercializada no país (PORTAL SOLAR, 2019a).

Na Figura 2 é possível ver um tipo de telha solar e como fica o telhado após a sua instalação. Percebe-se que a telha solar é visualmente mais agradável que o painel solar sobre o telhado, um fator interessante se o cliente estiver pensando em obter um *design* mais discreto.

Figura 2 – Sistema FV com telhas solares



Fonte: Ciclivivo (2019).

2 JUSTIFICATIVAS

Diante do mercado energético, tratando-se de geração de energia por intermédio dos painéis ou telhas FV, faz-se necessário um projeto que mostre qual tecnologia é mais viável para o consumidor e, se possível, um valor de consumo em que cada tecnologia seja melhor aplicada, trazendo para o consumidor um maior retorno financeiro.

A análise feita leva em consideração a atual situação das tecnologias no Brasil, pois o país ainda não fabrica suas próprias telhas e painéis solares, entretanto, a empresa Eternit lançará no segundo semestre de 2021 a telha solar, que é elaborada com tecnologia brasileira (PORTAL SOLAR, 2019a).

Vale ressaltar que a comparação, visando à viabilidade financeira, será feita entre os sistemas FV com painéis e telhas solares, o que significa que todo componente que for comum aos sistemas e puder ser aplicado, será efetuado, de modo a deixar a comparação mais justa possível entre os painéis e telhas FV.

Outro fator de grande relevância para esse projeto é que, com a crescente procura por tecnologias capazes de gerar energia elétrica por meio da energia solar, faz-se necessário um correto dimensionamento do sistema FV, de modo a trazer um retorno financeiro aceitável para o consumidor, fazendo assim, o investimento nessa tecnologia (PORTAL SOLAR, 2019a).

Um projeto com o dimensionamento correto e com o emprego da melhor tecnologia FV para o cenário atual, vai além do preço dos componentes. São levadas em consideração também a vida útil dos elementos do sistema, sua eficiência, e todos os fatores que podem influenciar no rendimento das tecnologias citadas, a fim de obter o melhor custo/benefício para o consumidor.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal desse trabalho é avaliar a viabilidade financeira de duas propostas de sistemas de micro ou minigeração fotovoltaica conectada à rede, visando à redução no valor pago à concessionária pelo consumo de energia elétrica numa residência.

Pretende-se mostrar, de forma didática e de fácil interpretação, como é viável adquirir o sistema FV e o quanto rápido um consumidor pode obter um retorno do investimento feito. Mesmo que, para se ter essa tecnologia seja inicialmente caro, com as devidas análises, é mostrado que a médio/longo prazo é vantajoso investir nesse tipo de sistema.

3.2 Objetivos Específicos

Para a realização do objetivo geral, será necessário concluir alguns outros objetivos, que somados levam ao ponto principal deste trabalho, sendo eles:

- Realizar um estudo bibliográfico sobre a aplicação e o dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede em residências utilizando placas solares e telhas solares;
- Definir quais metodologias de análise financeira serão utilizadas na comparação de viabilidade dos sistemas fotovoltaicos utilizando cada uma dessas tecnologias;
- A partir da aplicação dessas metodologias, definir qual dos dois sistemas apresenta o melhor retorno de investimento.

4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em 8 seções, cujos assuntos são mostrados a seguir.

Na seção 1 foi apresentada a energia solar, os painéis e telhas solares, tal como a situação desses itens citados no país.

Na seção 2 foi apresentada a justificativa desse projeto e sua relevância para a sociedade.

Na seção 3, inicialmente foi descrito o principal objetivo desse trabalho e, posteriormente, os objetivos específicos para alcançar o objetivo geral.

Nesta seção, é explicado de forma sucinta e objetiva o que cada seção pretende expor, de modo a orientar o leitor sobre o que irá encontrar em cada seção.

Na seção 5 é mostrada a fundamentação teórica utilizada para a elaboração desse projeto, as pesquisas feitas e os detalhes relevantes para o correto dimensionamento do projeto.

A seção 6 aborda o estudo de caso desse trabalho. Nela, são mostradas as equações utilizadas e a quantidade necessária de componentes, de modo a se ter um projeto que cumpra seu objetivo com o melhor custo/benefício.

Na seção 7 é realizada uma análise de viabilidade financeira, utilizando dois métodos confiáveis e que possibilitem uma tomada de decisão quanto ao investimento ou não para a aquisição desse projeto.

Na última seção é apresentada a conclusão do trabalho, versando sobre a validade dos modelos utilizados e sua eficácia na determinação de escolha para se investir nos sistemas solares.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

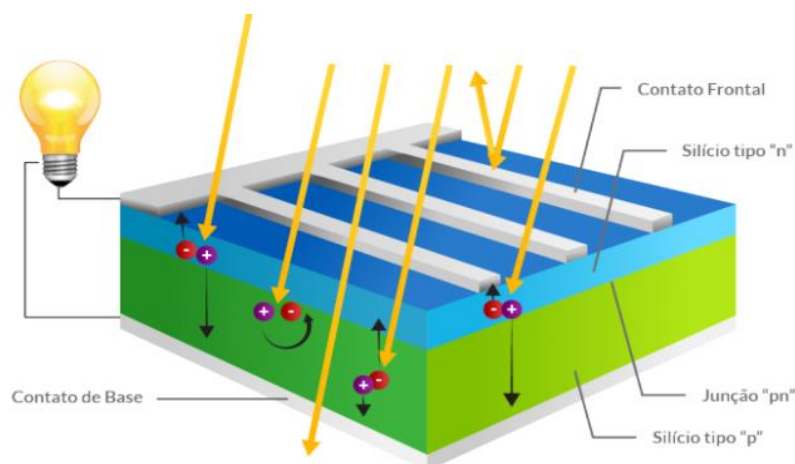
5.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico consiste no surgimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor, quando este é exposto à luz visível. Para se compreender esse efeito, é necessário o conhecimento básico da teoria da banda de energia, admitindo-se que os materiais semicondutores possuem três bandas de energia, sendo elas a banda de valência, banda de condução e banda proibida ou “gap” (BLUESOLAR ENERGIA SOLAR, 2018a).

Ao contrário dos metais, os semicondutores têm uma banda de valência completa e uma banda de condução vazia com o gap de 1eV (elétron Volt). Quando os elétrons da banda de valência recebem energia suficiente do fóton para pular a banda proibida e passar para a banda de condução, surge uma voltagem. Por isso, a energia recebida do fóton deve ser maior ou igual a energia do gap, que é a diferença entre a energia mínima da banda de condução e o valor máximo da banda de valência. Ou seja, os elétrons precisam de energia para superar a banda proibida. Sendo a energia do fóton incidente maior que o “gap”, esse excesso será convertido em calor, aquecendo o material, efeito chamado de termalização (BLUESOLAR ENERGIA SOLAR, 2018a).

Na Figura 3 observa-se uma célula fotovoltaica com a representação do efeito fotovoltaico.

Figura 3 – Efeito fotovoltaico na célula solar



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (2008).

5.2 Célula Fotovoltaica

As células solares, também conhecidas como células fotovoltaicas, são a unidade básica da tecnologia solar fotovoltaica e são responsáveis por converter a luz solar em energia elétrica. O conjunto dessas células conectadas em série formam os painéis solares. Essa unidade básica também pode ser definida como um dispositivo que recebe a luz do sol e a converte em energia elétrica (BLUESOLAR ENERGIA SOLAR, 2020).

Nos últimos anos, várias tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas e, atualmente, essas unidades básicas, feitas de lâminas de silício cristalino (monocristalino e policristalino), dominam o mercado mundial (PINHO e GALDINO, 2014).

Cada célula fotovoltaica é basicamente constituída por duas partes de material semicondutor (geralmente de silício). Durante o processo de fabricação, o silício é dopado de forma intencional, adicionando-se impurezas ao material semicondutor para alterar suas propriedades elétricas, dando para cada parte uma carga negativa ou positiva. A diferença nas cargas de polaridades diferentes gera um campo elétrico, que é fundamental para o funcionamento das células fotovoltaicas (SHAREENERGY, 2017).

Sendo mais específico, a parte superior da célula é dopada com fósforo (P), que adiciona elétrons extras ao material para tomar essa camada carregada negativamente, que é chamada de “tipo N”. A parte inferior da célula é dopada com boro (B), que resulta em menos elétrons, deixando essa parte com carga positiva e sendo chamada de “tipo P”. Essa diferença de polaridade cria um campo elétrico na junção da camada de silício (SHAREENERGY, 2017).

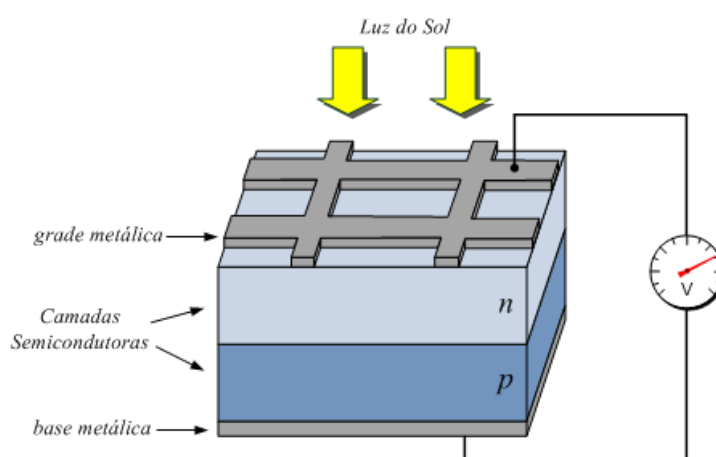
Esse processo cria duas camadas opostas do semicondutor, uma positiva (tipo P, com falta de elétrons) e uma negativa (tipo N, com excesso de elétrons). Essas camadas são colocadas juntas dentro da célula e quando os fótons a atingem, eles reagem com os átomos de silício dopado e fazem com que os elétrons do lado negativo se desprendam. Esses elétrons não conseguem passar diretamente para o lado positivo, e vice-versa, devido ao campo elétrico criado na área da junção. Dessa forma, o único caminho para eles é através da fina grade que une as camadas.

Vale ressaltar que, o funcionamento da célula fotovoltaica está diretamente ligado a quantidade de luz que chega até ela, mas nem toda luz incidente é transformada em energia. Isso acontece porque os fótons possuem diferentes cargas de energia e apenas aqueles com cargas adequadas conseguem liberar os elétrons do semicondutor, como já foi dito anteriormente.

Fótons com cargas diferentes representam mais de 50% da luz que incide sobre uma célula fotovoltaica. Somando-se a outras perdas, como as provocadas por sombreamento dos contatos frontais e resistência em série, o percentual de luz aproveitando por uma célula solar é de aproximadamente 13% de toda radiação solar que recebe (BLUESOL ENERGIA SOLAR, 2020).

Na Figura 4 é possível ver um modelo que representa a célula fotovoltaica.

Figura 4 - Modelo de célula fotovoltaica



Fonte: MACHADO (2011).

5.3 Célula Solar Monocristalina

O método de produção de células de silício monocristalino é chamado de Czochralski. Este processo consiste em derreter blocos de silício ultrapuro para formar um lingote de silício monocristalino. Este lingote é constituído de uma estrutura cristalina única com organização molecular homogênea, posteriormente cortada em fatias finas de aproximadamente 300 μm . A eficiência dos módulos produzidos com essas células é de aproximadamente 17% e a vida útil, considerando 80% da eficiência inicial, de 25 anos. Pesquisadores japoneses da *Kaneda Corp*

recentemente alcançaram a eficiência de 26,3% em laboratórios, sendo esse valor um avanço enorme para esse mercado, visto que o limite teórico é de 29% (SHAREENERGY, 2017).

A Figura 5 ilustra uma célula monocristalina e uma diferença comum dessas células para as policristalinas são os chanfrados que possuem, sendo essa característica importante para reduzir a perda de material na sua confecção.

Figura 5 - Célula monocristalina



Fonte: Portal Solar (2020).

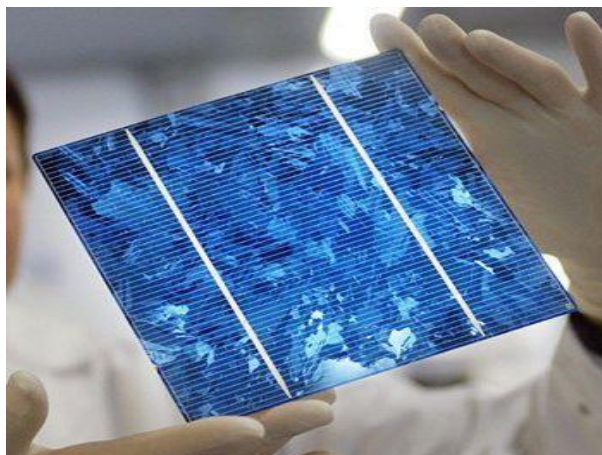
5.4 Célula Solar Policristalina

As células de silício policristalino são mais baratas do que as células de silício monocristalino porque requerem processos menos rigorosos de preparação. O lingote de silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais não uniformes. Este lingote também é cortado de forma a se ter fatias finas que irão formar as células fotovoltaicas. Por ter sua formação baseado num aglomerado de pequenos cristais, a célula possui uma aparência heterogênea.

Essa tecnologia apresenta uma menor eficiência se comparada com os módulos monocristalinos (em torno de 15%), menor preço e a mesma expectativa de vida, 25 anos (SHAREENERGY, 2017).

Na Figura 6 é mostrada uma célula policristalina e, diferente da célula monocristalina exibida na Figura 5, as extremidades formam um ângulo de 90°.

Figura 6 – Célula policristalina



Fonte: Archiexpo (2020).

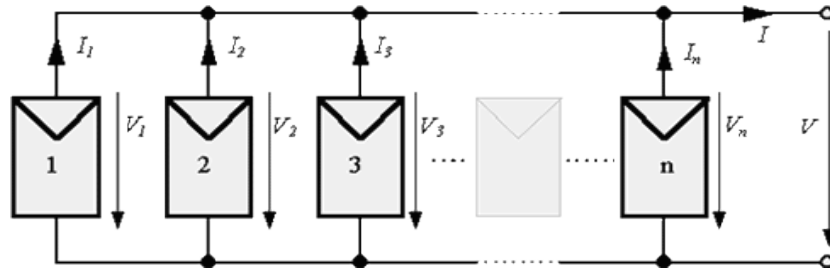
5.5 Módulos Fotovoltaicos

A célula solar possui uma densidade de potência de aproximadamente 86 W/m^2 , mas devido à baixa tensão e corrente que cada célula produz, na ordem de $0,7 \text{ V}$ e 3 A , respectivamente, várias células são combinadas para se obter níveis de tensão e corrente expressivos. Esse conjunto é chamado de módulo e pode ser obtido por conexões em série ou paralelo, dependendo do que se deseja (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

Quando as células são conectadas em paralelo, a corrente é obtida pela soma das correntes de cada módulo e a tensão é a mesma de cada célula. A corrente produzida pelo efeito fotovoltaico é contínua. Devido às características típicas (corrente máxima de aproximadamente 3 A e tensão muito baixa, cerca de $0,7 \text{ V}$), esta configuração não é usada, a menos que sob condições muito especiais (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

A Figura 7 representa esquematicamente a associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos.

Figura 7 – Associação em paralelo de módulos solares



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

No caso mostrado na Figura 7, é possível escrever as equações (1) e (2).

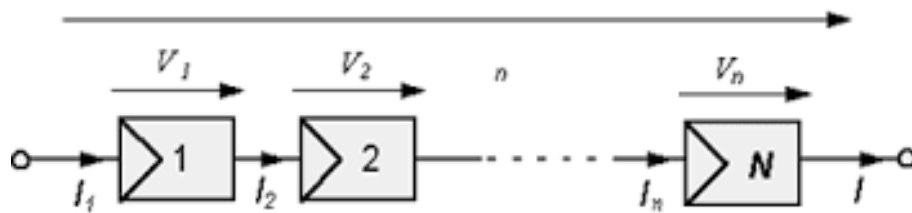
$$I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1)$$

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (2)$$

A conexão mais comum de células fotovoltaicas em um módulo é a conexão em série. Neste agrupamento soma-se a tensão de cada célula, obtendo assim o valor total da tensão do conjunto. O ideal é que esse valor seja de 12 V, o que possibilita a carga de acumuladores (baterias), que também funcionam na faixa de 12 V (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

Na Figura 8 observa-se como se dispõe o arranjo conectado em série.

Figura 8 – Associação em série de módulos solares



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

Para o caso da Figura 9, chega-se às equações (3) e (4).

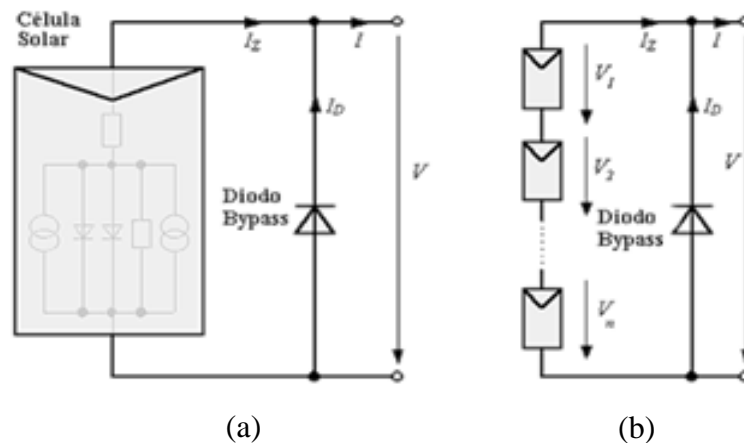
$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (4)$$

Quando se tem o agrupamento em série, observa-se dois problemas, sendo o primeiro sombreamento e o segundo a corrente negativa. O primeiro problema citado surge quando, por qualquer motivo, se tem uma célula encoberta, a potência de saída do módulo será reduzida drasticamente, o que comprometerá todo o funcionamento das demais células do módulo. Para que toda a corrente do módulo não seja limitada por causa de uma ou algumas células de pior desempenho (por estar encoberta), utiliza-se um diodo de passo ou mais conhecido como *by-pass*. Esse diodo tem a função de servir como um caminho diferente do convencional para a corrente e ainda possui a responsabilidade de dissipar o calor na célula defeituosa. O diodo *by-pass* é usualmente utilizado em grandes agrupamentos de células, o que torna muito mais barato se for comparado com cada célula possuindo um diodo desse tipo (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

Na Figura 9 são esquematizadas as duas maneiras de se utilizar o diodo *by-pass*, conforme descrito no parágrafo anterior.

Figura 9 – Diodo *by-pass* utilizado com (a) célula solar e com (b) módulo solar, respectivamente

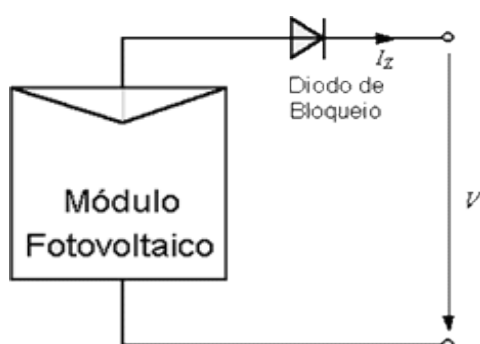


Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

O segundo problema citado, a corrente negativa, ocorre quando o módulo passa a receber muito mais do que gera, logo começa a fluir pelas células uma corrente com o sentido contrário ao sentido desejado, o que pode ocasionar uma diminuição na eficiência do módulo. Para se evitar esse problema, se faz uso de um diodo de bloqueio em série com o módulo (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

Na Figura 10 observa-se o esquema do módulo com o diodo de bloqueio.

Figura 10 – Diodo de bloqueio em série com o módulo solar



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

5.6 Características Elétricas dos Módulos

Geralmente, a potência dos módulos é determinada pela potência de pico. Tão importante quanto esse primeiro parâmetro, existem outras características elétricas que melhor caracterizam a funcionalidade do módulo. As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são:

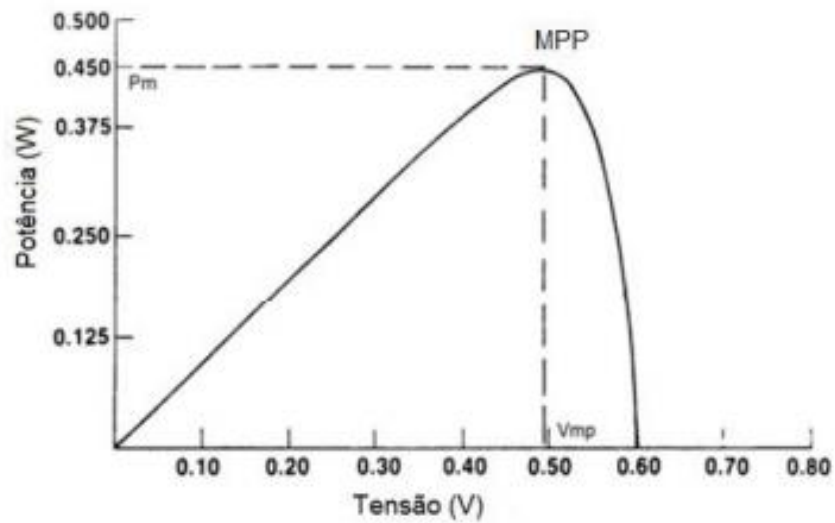
- Voltagem de circuito aberto (V_{oc});
- Corrente de curto-circuito (I_{sc});
- Potência máxima (P_m);
- Voltagem de potência máxima (V_{mp});
- Corrente de potência máxima (I_{mp}).

Os parâmetros acima citados, são obtidos a partir da condição padrão e nessa condição ainda se obtém as curvas características dos módulos. Ela é definida para radiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$

(radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio-dia) e temperatura de 25°C na célula.

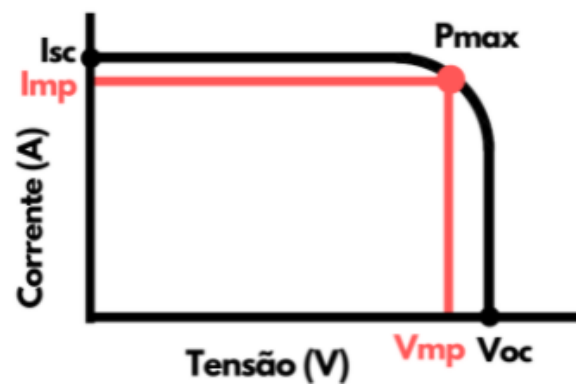
As Figuras 11, 12 e 13 apresentam as curvas características utilizadas para análise e dimensionamento dos sistemas contendo os módulos fotovoltaicos.

Figura 11 – Curva típica de potência versus tensão



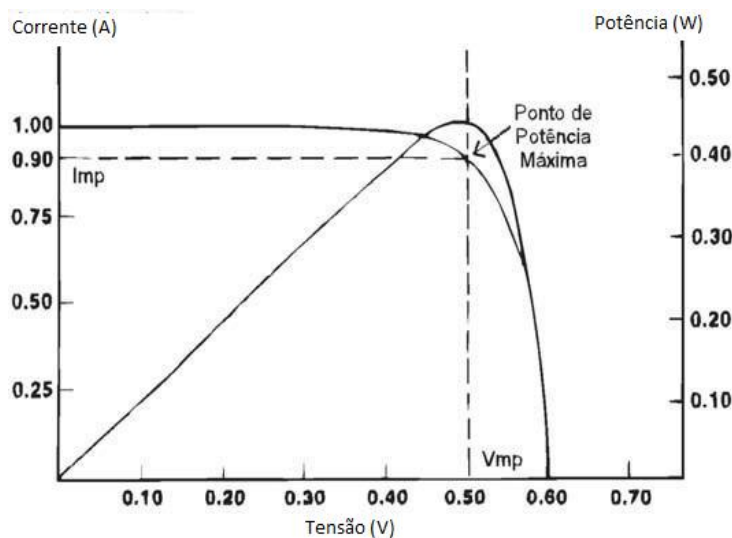
Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

Figura 12 – Curva característica IxV mostrando a corrente I_{sc} e a tensão V_{oc}



Fonte: Energês Energia Solar (2020).

Figura 13 – Parâmetros de potência máxima



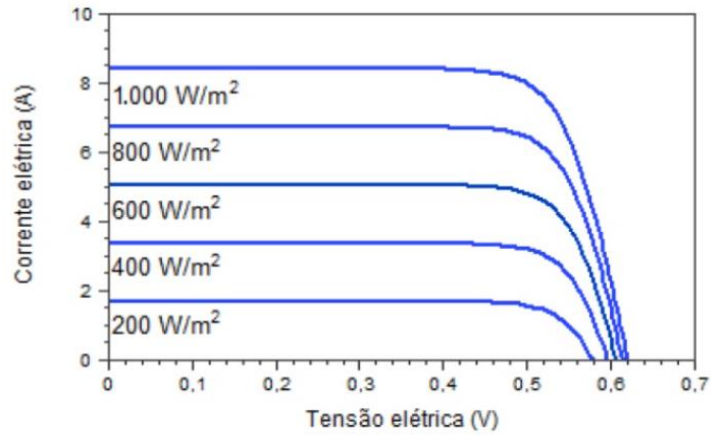
Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (2008).

Ao se falar das características elétricas, não se deve esquecer dos fatores capazes de modificá-las, sendo eles a irradiação solar e a temperatura das células. Com dados obtidos em laboratório e com as devidas curvas que serão mostradas posteriormente, observa-se que a corrente elétrica gerada pela célula fotovoltaica tem uma relação diretamente proporcional à irradiação solar incidente e, ao mesmo tempo, a tensão possui uma relação logarítmica com a irradiação.

Entretanto, com o aumento expressivo da irradiação solar sobre o painel, a temperatura da célula é elevada, o que promove uma redução da eficiência. Esse fato é ocasionado porque a tensão sofre uma diminuição significativa com o aumento da temperatura.

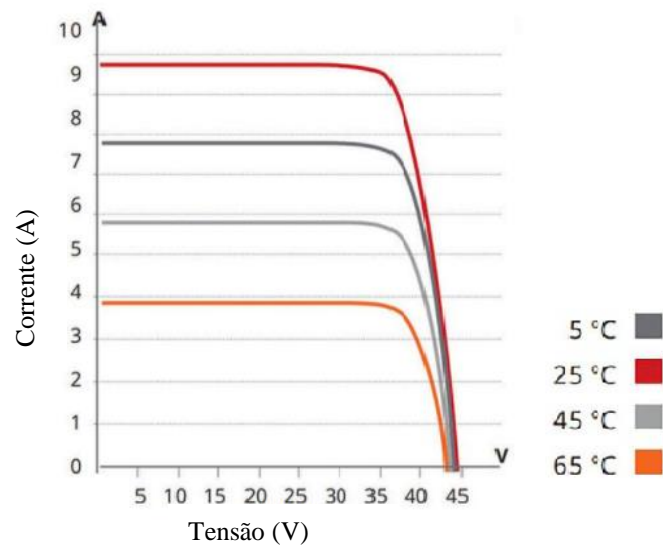
Esses fatores, que influenciam nas características elétricas do módulo, são mostrados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Curva IxV com variação da irradiância “G”



Fonte: Solar Helios Energia (2020).

Figura 15 – Curva IxV com variação da temperatura

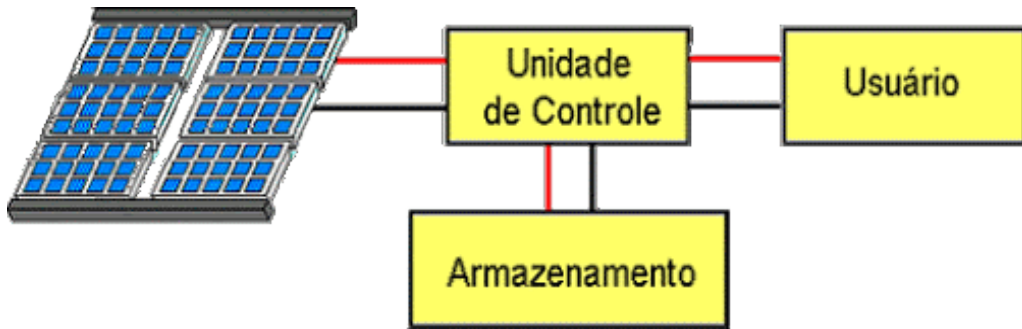


Fonte: Engehall (2018).

5.7 Configurações e Componentes Básicos

Um sistema fotovoltaico pode ser projetado de três formas diferentes: isolado, híbrido e conectado à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, contendo uma unidade de controle de potência e uma unidade de armazenamento de energia; onde este último depende do tipo da configuração. Na Figura 16 é esquematizado um sistema que ilustra essa configuração básica.

Figura 16 – Componentes de um sistema fotovoltaico



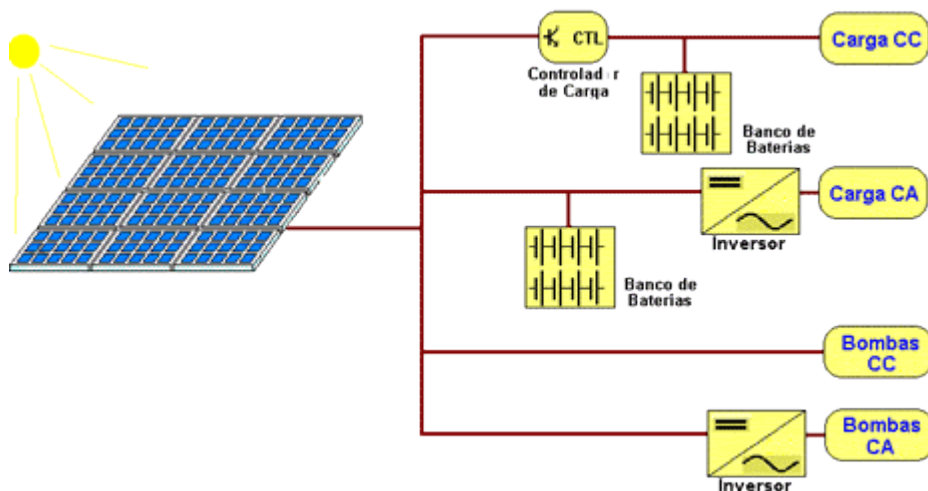
Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (2008).

Serão abordadas, de forma simples, as três configurações, dando uma maior atenção à configuração do sistema conectado à rede, pois este será o tipo de sistema adotado no projeto.

Nos sistemas isolados, geralmente, é utilizada alguma forma de armazenamento de energia, sendo este papel desempenhado pelas baterias. Em alguns casos não é necessário fazer esse armazenamento, pois a energia gerada alimenta diretamente a carga (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

A configuração do sistema isolado pode ser vista na Figura 17, onde se tem cargas que utilizam os armazenadores de energia e outras que os dispensam.

Figura 17 – Sistema fotovoltaico isolado



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (2008).

Os sistemas híbridos são caracterizados, em alguns casos, por estarem desconectados da rede convencional e possuírem várias fontes de geração de energia, como por exemplo: turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, geradores a diesel, entre outros. É possível ainda encontrar casos em que há a interação do sistema com a rede convencional. Pela quantidade de fontes, o gerenciamento e a otimização do uso das energias se tornam complexos, sendo necessário realizar um controle das mesmas, para que haja a máxima eficiência na entrega de energia para o usuário (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2008).

Na Figura 18 é mostrado o esquema de um sistema híbrido, com alguns exemplos de fontes e sem a rede convencional.

Figura 18 – Sistema fotovoltaico híbrido



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito (2008).

No sistema fotovoltaico com a configuração conectado à rede utiliza-se uma grande quantidade de módulos fotovoltaicos, e não é necessário ter um armazenamento de energia, pois toda a geração passa pelo medidor bidirecional, onde, o que não for consumido pela carga, será entregue à rede. Atualmente, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa N° 482, regulamenta a implementação de micro e minigeração fotovoltaica conectada à rede de distribuição (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2018).

Observa-se na Figura 19 uma ilustração de como seria um sistema básico com a configuração conectado à rede.

Figura 19 – Sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Ecomais (2021).

Neste tipo de configuração, alguns componentes são indispensáveis, tais como os módulos fotovoltaicos e o inversor. A seguir será abordado o inversor, pois as informações pertinentes ao módulo já foram explanadas na seção correspondente.

A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é fornecida em tensão e corrente (CC) contínuas e como a maioria dos equipamentos utilizados no dia a dia pelas pessoas, tais como eletrodomésticos, motores e iluminação são alimentados em corrente alternada (CA), faz-se necessário um componente capaz de fazer essa conversão. Para realizar essa conversão utiliza-se o inversor que converte a corrente contínua gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente alternada em 60 Hz, conforme solicitado pela rede de distribuição (SHAREENERGY, 2017).

Existem diversos tipos de inversores e cada um deles possui uma funcionalidade diferente, podendo ser *off grid*, *grid tie*, central ou micro. Para este trabalho será utilizado o inversor *grid tie*, pois ele é próprio para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Este inversor fornece corrente elétrica em sua saída e nunca tensão. O inversor *grid tie* opera sincronizado com a rede elétrica, de tal forma que segue o mesmo valor de tensão e frequência da rede. Um ponto importante desse é que ele possui a função de anti-ilhamento, que funciona da seguinte forma: quando existe uma interrupção no fornecimento de energia elétrica na rede em que o inversor está conectado, ele se desconecta da rede, evitando assim receber corrente elétrica vinda do sistema fotovoltaico. Essa função é obrigatória, pois por meio dela evita-se acidentes e garante a segurança de pessoas, técnicos de manutenção, equipamentos e instalações na falta de energia da rede elétrica pública (SHAREENERGY, 2017).

5.8 Análise de Viabilidade Financeira

Para se tomar a decisão de instalar um sistema fotovoltaico nas residências, empresas ou até mesmo nas indústrias, não pode faltar a análise financeira, pois por meio dela se tem uma real noção se o investimento é viável ou não. Vale salientar que esse tipo de investimento sempre é visando o médio/longo prazo.

Dentre várias ferramentas utilizadas para se fazer essa análise, as mais usadas são o valor presente líquido (VPL) e o custo nivelado de energia (LCOE). Para utilizar esses métodos é necessário obter o fluxo de caixa (FC) do sistema fotovoltaico e a taxa de desconto (TD), pois as fórmulas que serão apresentadas posteriormente necessitam desses dados.

O fluxo de caixa é o movimento de entradas e saídas de dinheiro de um respectivo caixa. Para se ter uma garantia dos seus valores, é importante fazer registros de ganhos e gastos de uma forma diária, semanal ou mensal (CONTA AZUL, 2020). Diante da breve explicação do que é fluxo de caixa, seu resultado é o saldo disponível apurado pela diferença das entradas e das saídas num determinado período (SEBRAE, 2021).

Para esse projeto o fluxo de caixa terá no seu ano inicial o investimento para a aquisição do sistema fotovoltaico como saída e nos demais anos a saída será a taxa mínima a se pagar para a concessionária, custos de manutenção e operação. A entrada será a economia no valor pago à concessionária pela aquisição do sistema fotovoltaico.

A taxa de desconto é um indicador utilizado para comparar o retorno de um determinado investimento. Ela se refere ao valor de antecipação de uma quantia que será investida. Em outras palavras, é uma forma de ver se o valor projetado é viável se comparado com o cenário presente. A taxa de desconto pode ser calculada de várias formas diferentes, entretanto uma das formas mais utilizadas é a conhecida como custo médio ponderado de capital (WACC). Essa média nada mais é que o nível de atratividade mínima do investimento, ou seja, se ela vai dar o mesmo retorno que outros investimentos considerados mais seguros (TREASY, 2018).

Diante da definição da taxa de desconto, o valor adotado será a taxa Selic em que sua média no ano de 2020 está em 2,56% a.a. (BANCO DO BRASIL, 2021).

5.8.1 Valor Presente Líquido

O valor presente líquido (VPL) é uma das ferramentas mais utilizadas para validar um investimento, principalmente no mercado de sistemas fotovoltaicos. Esse método é um cálculo que retorna um valor que pode ser positivo, zero ou negativo. No caso de VPL positivo, o investimento é viável, no segundo caso, é indiferente; e no terceiro caso, significa que é inviável (BIGSUN, 2020).

O cálculo do VPL é realizado pegando-se o fluxo de caixa e atualizando ele para o valor de hoje, com o auxílio da taxa de desconto (BIGSUN, 2020). Por meio da equação (5) calcula-se o VPL.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TD)^j} - I_0 \quad (5)$$

Onde:

- VPL valor presente líquido, em R\$;
- n quantidade de anos analisados;
- j ano analisado;
- FC fluxo de caixa do ano em questão;
- TD taxa de desconto;
- I₀ investimento inicial, em R\$.

5.8.2 Custo Nivelado de Energia

O custo nivelado de energia é uma medida muito utilizada para avaliar e comparar métodos alternativos de produção de energia, no caso desse trabalho, o sistema fotovoltaico. Pode ser considerado como o custo total médio de construção e operação do sistema adotado, por unidade de energia gerada ao longo de sua vida útil presumida. Também pode ser considerada como um preço mínimo médio a ser pago por quilowatt (R\$/kW). Seu cálculo é importante para definir a validade de se implementar um sistema fotovoltaico diante do serviço prestado pela concessionária, ou seja, o LCOE permite comparar o valor pago por quilowatt do sistema implantado com o valor pago por quilowatt da concessionária (CORPORATE FINANCE INSTITUTE, 2021).

Vale ressaltar que para cada ano há um reajuste na energia gerada pelo sistema, visto que ao longo dos anos sua eficiência decai, chegando a 80% do valor da eficiência inicial em 25 anos. Esse decaimento pode ser calculado pela equação (6) e será utilizado na equação (7). A taxa de decaimento é fornecida pelo fabricante, assim como sua eficiência no final da vida útil dos módulos solares.

O LCOE pode ser calculado por meio da equação (7) e o investimento neste projeto será viável financeiramente se o resultado apresentar um valor menor que a tarifa de energia elétrica cobrada pela concessionária.

$$E_t = E \cdot (1 - d)^t \quad (6)$$

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^V \frac{Com}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^V \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (7)$$

Onde:

E_t energia gerada no ano t, em kW;

d taxa de decaimento da eficiência dos módulos;

LCOE custo nivelado de energia, em R\$/kW;

I_0 investimento inicial, em R\$;

V vida útil do sistema, em anos;

Com custo anual de operação e manutenção do sistema, em R\$.

6 ESTUDO DE CASO

O dimensionamento de cada sistema fotovoltaico será realizado para atender a residência do autor deste trabalho. A unidade consumidora pertence ao subgrupo B1 (Classe residencial – trifásico), sendo alimentada com tensão de fase de 127V e atendida na modalidade tarifária convencional. A residência se encontra em Vila Velha, ES, no bairro de Araçás. Para realizar o correto dimensionamento, obteve-se o consumo médio de cada mês do ano de 2019, dados encontrados na fatura de energia elétrica.

Na Tabela 1 é possível ver quatro tipos de consumo, sendo eles o consumo mensal, anual, médio mensal e médio diário.

Tabela 1 – Consumo da unidade em 2019

Mês	Consumo [kWh]	Consumo mínimo [kWh]	Consumo real [kWh]	Custo
01/2019	472	100	372	R\$ 388,40
02/2019	419	100	319	R\$ 374,93
03/2019	458	100	358	R\$ 408,40
04/2019	439	100	339	R\$ 374,58
05/2019	499	100	399	R\$ 423,40
06/2019	390	100	290	R\$ 341,02
07/2019	373	100	273	R\$ 333,33
08/2019	405	100	305	R\$ 343,01
09/2019	389	100	289	R\$ 323,64
10/2019	395	100	295	R\$ 334,71
11/2019	478	100	378	R\$ 415,54
12/2019	500	100	400	R\$ 398,14
Total anual	5217		4017	R\$ 4.459,10
Média mensal	434,75		334,75	-
Média diária	14,49		11,16	-

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

A residência possui um consumo médio diário de 14,49 kWh, entretanto ao se descontar o consumo mínimo gerado pela disponibilidade da rede elétrica, o consumo real para se calcular é de 11,16 kWh, como mostrado na Tabela 1. O sistema fotovoltaico será projetado para atender esse consumo real.

6.1 Dimensionamento dos Painéis e das Telhas

Para dimensionar corretamente a quantidade de painéis e telhas solares é necessário obter dados referente à irradiação solar da região onde será instalado o sistema fotovoltaico. Esses dados

foram obtidos por meio do programa SunData do CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO e são apresentados no Quadro 1. Nesse mesmo quadro, o menor valor de irradiação mensal no plano inclinado é de 4,56 kWh/m²/dia. Vale ressaltar que a inclinação de 20° é importante para se ter um melhor aproveitamento da irradiação solar e para facilitar a limpeza dos painéis e telhas solares.

Quadro 1 – Irradiação média em Vila Velha, ES [kWh/m²/dia]

Inclinação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
20° N	5,69	6,30	5,57	5,17	4,74	4,56	4,56	5,19	5,23	5,01	4,82	5,43

Fonte: SUNDATA (2020).

Para escolher o painel e telha solar foram feitas pesquisas de mercado e analisadas as características técnicas e o preço de 5 modelos de painéis solares, cada um com uma marca diferente e 3 modelos de telha solar, sendo esses modelos da mesma marca. As características analisadas e o preço dos modelos dos painéis e telhas solares são mostrados respectivamente nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Modelos de painéis para sistema fotovoltaicos

Marca	Risen solar	Astronergy	Ulica	Osda	Upsolar
Modelo	RSM72-6-335p	CHSM6612P	UL-395M-144	ODA380-36-M	UP-M285P
Tipo	Policristalino	Policristalino	Monocristalino	Monocristalino	Policristalino
Potência [Wp]	335	340	395	380	285
Potência corrigida [Wp]	308,87	313,48	364,19	350,36	262,77
Eficiência [%]	17,30	17,60	19,91	19,26	17,50
Área do painel [m ²]	1,94	1,93	1,98	1,97	1,63
Preço unitário [R\$]	659,37	677,97	879,00	849,00	679,00

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Quadro 3 – Modelos de telhas para o sistema fotovoltaico

Marca	Sunny	Sunny	Sunny
Modelo	SN8M-2	SN20M-2	SN24M-2
Tipo	Monocristalino	Monocristalino	Monocristalino
Potência [Wp]	8	20	24
Potência corrigida [Wp]	7,38	18,44	22,13
Eficiência [%]	18,00	17,00	17,75
Área da telha [m ²]	0,049	0,125	0,146
Preço unitário [R\$]	68,49	85,61	102,73

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Observando os quadros anteriores, é possível notar que o valor de potência de cada equipamento foi corrigido. Isto se deve ao fato de os valores de potência fornecidos pelos fabricantes serem determinados em condições padrão de teste (STC), as quais consideram a temperatura do painel ou telha igual a 25° C. Como sua temperatura de operação é bastante diferente do valor padrão de teste, é necessário obter o valor da potência que realmente será produzida por cada painel ou telha, para o correto dimensionamento de cada sistema.

Neste caso, se utiliza o valor de temperatura nominal de operação (NOCT) junto com os coeficientes de temperatura de potência, tensão e corrente destes equipamentos, também fornecidos pelos fabricantes, para corrigir a potência gerada por eles. A equação (8) mostra como se calcula o fator de correção dessas grandezas:

$$F_c = \gamma \cdot (T_{Noct} - T_{STC}) \quad (8)$$

Onde:

- F_c fator de correção, em %;
 γ coeficiente de temperatura, em %;
 T_{Noct} temperatura em condições nominais de operação, em °C;
 T_{STC} temperatura em condições padrão de teste, em °C.

A título de ilustração, as Tabelas 2 e 3 apresentam os fatores de correção obtidos a partir da equação (8), bem como os valores das grandezas corrigidas para o painel RSM72-6-335p e para a telha SN24M-2, respectivamente, considerando a NOCT de 45° C.

Tabela 2 – Parâmetros do painel RSM72-6-335p e suas correções

Grandeza	Valor nominal	Coefficiente de temperatura	Fator de correção	Valor corrigido
$P_{m\acute{a}x}$	335 W	-0,39%	-7,8%	308,87 W
V_{oc}	45,9 V	-0,32%	-6,4%	42,96 V
I_{sc}	9,4 A	0,05%	1,0%	9,49 A

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Tabela 3 – Parâmetros da telha SN24M-2 e suas correções

Grandeza	Valor nominal	Coefficiente de temperatura	Fator de correção	Valor corrigido
$P_{m\acute{a}x}$	24 W	-0,39%	-7,8%	22,13 W
V_{oc}	45,9 V	-0,32%	-6,4%	42,96 V
I_{sc}	9,4 A	0,05%	1,0%	9,49 A

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Para se calcular a quantidade necessária de painéis e telhas solares, utilizou-se o valor médio de irradiação solar no plano inclinado, valor calculado a partir dos dados do Quadro 1 (4,87 kWh/m²/dia) e, a partir das equações (9) e (10), foi possível encontrar a quantidade necessária de painéis e telhas.

$$E_p = IR \cdot A \cdot \eta \quad (9)$$

$$N = \frac{C_d}{E_p} \quad (10)$$

Onde:

- E_p energia produzida pelo módulo fotovoltaico, em kWh/dia;
 IR irradiação média no plano inclinado na região da instalação em, kWh/m²/dia;
 η rendimento do módulo fotovoltaico;
 A área do módulo, em m².
 N número de módulos necessários;
 C_d consumo médio diário do cliente, em kWh/dia;
 E_p energia produzida pelo módulo fotovoltaico, em kWh/dia.

Os resultados dos cálculos são mostrados nos Quadros 4 e 5, sendo possível ver a quantidade total de painéis e telhas, respectivamente, que serão necessários, assim como o preço para a aquisição.

Quadro 4 – Quantidade de painéis necessários e o valor total

Marca	Risen solar	Astronergy	Ulica	Osdá	Upsolar
Modelo	RSM72-6-335P	CHSM6612P	UL-395M-144	ODA380-36-M	UP-M285P
Energia produzida [kwh/painel/dia]	1,633	1,653	1,919	1,847	1,388
Nº de painéis calculados	6,831	6,750	5,816	6,043	8,037
Nº de painéis utilizados	7	7	6	7	9
Preço [R\$]	4.615,59	4.745,79	5.274,00	5.943,00	6.111,00

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Com os dados do Quadro 4, foi escolhido o painel da marca Risen Solar, sendo necessários 7 painéis para gerar a energia a fim de atender a unidade consumidora.

Quadro 5 – Quantidades de telhas necessárias e o valor total

Marca	Sunny	Sunny	Sunny
Modelo	SN8M-2	SN20M-2	SN24M-2
Energia produzida [kwh/telha/dia]	0,043	0,103	0,126
Nº de telhas calculadas	261,7	107,9	88,5
Nº de telhas utilizadas	262	108	89
Preço [R\$]	14.355,50	7.396,70	7.314,38

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Com os dados do Quadro 5, foi escolhida a telha do modelo SN24M-2, sendo necessárias 89 telhas para gerar a energia a fim de atender a unidade consumidora.

6.2 Dimensionamento do Inversor

O inversor é um componente muito importante para o sistema, como já foi dito em seções anteriores, e deve ser dimensionado levando em consideração às características do sistema ao qual está conectado e ao tipo de instalação escolhida. Como a unidade consumidora é uma residência, os problemas envolvendo sobrecorrente não são significativos, pois não há motores exigindo grandes correntes em sua partida.

Para a escolha dos inversores, foram analisados três inversores de duas marcas diferentes, de forma a escolher o que atende à instalação e com a melhor viabilidade econômica. Os dados dos inversores são mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 – Modelos de inversores e suas características

Marca	Fronius	Growatt	Fronius
Modelo	Primo 3.0	Aldo Solar Min3000tl-x	Primo
P_{in} [W]	3000	3000	3000
V_{máx} [V_{cc}]	1000	500	1000
V_{mín} [V_{cc}]	80	70	80
V_{mínMPPT} [V_{cc}]	200	360	200
P_{out} [W]	3000	3000	3000
P_{máx} [W]	3000	3000	4000
I_{máx} [A]	12	13,6	12
V [V_{ca}]	180-270	160-300	180-270
F [Hz]	50/60	50/60	50/60
Eficiência [%]	97,6	98,2	97,6
Preço unitário [R\$]	8.834,07	4.383,31	6.980,00

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Para determinar o inversor de forma a atender ao sistema, algumas etapas são necessárias, tais como a análise da tensão de entrada, a quantidade mínima de painéis conectados a ele, a faixa de operação do MPPT, a corrente máxima de entrada e por fim o FDI (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO, 2014).

6.2.1 Tensão de Entrada

Para se obter a tensão de entrada no inversor, deve-se somar as tensões dos módulos que estão conectados no inversor e em série entre si. Sabendo que a tensão dos módulos varia de acordo com a temperatura, faz-se necessário realizar um ajuste nas tensões, conforme a temperatura média do local, para então realizar a soma de tensões. No ano de 2020, para a região de Vila Velha/ES, a temperatura mínima e máxima média registrada respectivamente foi de 18,7°C e 29°C (CLIMATE-DATA, 2020).

Por meio da equação (11), obtém-se os valores necessários para determinar a quantidade necessária de módulos em série, conectados ao inversor.

$$N_{Ms} \cdot V_{oc,TMin} = V_{iMáx} \quad (11)$$

Onde:

- N_{Ms} número de módulos em série conectados ao inversor;
- $V_{oc,TMin}$ tensão de circuito aberto do módulo, operando com temperatura mínima;
- $V_{iMáx}$ tensão máxima de entrada do inversor.

6.2.2 Faixa de Operação do MPPT

A faixa de operação do MPPT é outro fator importante para dimensionar o inversor. Com essa análise será determinada a quantidade mínima e máxima de módulos em série, conectados ao inversor. Para tal determinação, utiliza-se a equação (12), onde é necessário ter dados do fabricante, tal como a tensão de máxima potência e esse valor será corrigido, tanto para a temperatura mínima média quanto para a máxima média. Essas correções são feitas a partir da equação (10).

$$\frac{V_{MPPT,min}}{V_{m,Tmáx}} < N_{ms} < \frac{V_{MPPT,máx}}{V_{m,Tmin}} \quad (12)$$

Onde:

- $V_{MPPT,min}$ tensão mínima de operação do MPPT do inversor;
 $V_{m,Tmáx}$ tensão do módulo no ponto de máxima potência, operando na temperatura máxima;
 N_{ms} número de módulos em série conectados ao inversor;
 $V_{MPPT,máx}$ tensão máxima de operação do MPPT do inversor;
 $V_{m,Tmin}$ tensão do módulo no ponto de máxima potência, operando na temperatura mínima.

6.2.3 Corrente Máxima no Inversor

Uma das limitações do inversor é sua corrente de entrada e para que esse limite não seja ultrapassado, é calculada a quantidade máxima de módulos em paralelo, de tal modo que a corrente não ultrapasse o limite do inversor, protegendo assim o equipamento. Para tal cálculo, são utilizados os dados fornecidos pelo fabricante e a equação (13).

$$N_p = \frac{I_{imáx}}{I_{sc}} \quad (13)$$

Onde:

- N_p número máximo de módulos em paralelo;
 $I_{imáx}$ corrente CC máxima na entrada do inversor;
 I_{sc} corrente de curto-circuito do módulo.

Vale ressaltar que, para encontrar o $I_{imáx}$, utiliza-se a equação (14).

$$I_{imáx} = \frac{P_{máx}}{V_{min}} \quad (14)$$

Onde:

- $I_{imáx}$ corrente CC máxima na entrada do inversor;

$P_{\text{máx}}$ potência máxima na entrada do inversor;
 V_{min} tensão mínima de operação.

6.2.4 Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI)

A última etapa a ser analisada é o fator de dimensionamento do inversor (FDI). Esse fator auxilia na escolha do inversor de modo que ele não opere por muito tempo abaixo dos valores nominais ou com cargas além do seu limite.

Esse fator é calculado pela equação (15) e os fabricantes recomendam que este valor esteja entre 0,75 e 1,05.

$$FDI = \frac{P_{n,CA}}{P_{FV}} \quad (15)$$

Onde:

FDI fator de dimensionamento do inversor;
 $P_{n,CA}$ potência nominal CA do inversor;
 P_{FV} potência do gerador FV.

Para esse projeto, o P_{FV} do sistema com painéis e telhas solares é respectivamente 2162,09 W e 1969,57 W.

6.2.5 Determinação da Quantidade de Inversores e Módulos

Com a apresentação dos fatores que impactam na escolha do inversor, observa-se na Tabela 4 o resultado dos cálculos, mostrando qual o inversor que melhor atende ao sistema composto por painéis solares, oferecendo o menor custo. Da mesma forma, a Tabela 5 traz os resultados para o sistema composto por telhas solares.

Tabela 4 – Determinação da quantidade de inversores e módulos em série e paralelo

Marca	Fronius	Growatt	Fronius
Modelo	Primo 3.0	Aldo Solar 3000	Primo
$N_{smáx}^*$	21,36	10,68	21,36
$N_{smín}^{**}$	5,38	1,88	5,38
$N_{smáx}^{**}$	20,83	11,72	20,83
$N_{pmáx}^{***}$	3,99	4,56	3,99
N_s	10	10	10
N_p	1	1	1
FDI	0,90	0,90	0,90
Nº de inversores	1	1	1
Preço total (R\$)	8.834,07	4.383,31	6.980,00

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

* Determinado no item 6.2.1

** Determinado no item 6.2.2

*** Determinado no item 6.2.3

Tabela 5 – Determinação da quantidade de inversores e telhas em série e paralelo

Marca	Fronius	Growatt	Fronius
Modelo	Primo 3.0	Aldo Solar 3000	Primo
$N_{smáx}^*$	259,74	129,87	259,74
$N_{smín}^{**}$	69,20	24,22	69,20
$N_{smáx}^{**}$	267,56	150,50	267,56
$N_{pmáx}^{***}$	4,19	4,79	4,19
N_s	123	123	123
N_p	1	1	1
FDI	1,02	1,02	1,02
Nº de inversores	1	1	1
Preço total (R\$)	8.834,07	4.383,31	6.980,00

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

* Determinado no item 6.2.1

** Determinado no item 6.2.2

*** Determinado no item 6.2.3

6.3 Dimensionamento de Cabos e Outros Acessórios da Instalação

Para fazer corretamente a instalação, faz-se necessário o dimensionamento dos cabos e dos perfis, onde serão fixados os painéis. Vale ressaltar que no caso das telhas solares não serão utilizados os perfis, pois a residência já possui a estrutura para alocação de telhas. Outro dimensionamento importante para se fazer é o da proteção do sistema, que será composto por dois níveis. O primeiro nível será antes do inversor e o segundo nível será depois do inversor, protegendo assim o sistema fotovoltaico.

6.3.1 Dimensionamento do Kit de Fixação

A residência possui uma área de 87,4 m² disponível para alocar tanto os painéis quanto as telhas solares. Os painéis e telhas serão instalados na água do telhado com direção ao norte, aproveitando a localização da residência que permite a instalação nessa direção. Para alocar os painéis serão necessários três kits de fixação, onde cada kit é composto por 2 barras perfil de alumínio com 4,2 m cada, 6 fixadores intermediários e 4 fixadores finais.

Na Tabela 6 é possível ver o gasto com os kits mencionados.

Tabela 6 – Quantidade de suportes para fixação dos painéis

	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Kit fixação	3	R\$ 327,54	R\$ 982,62

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

6.3.2 Dimensionamento dos Cabos

Para realizar o correto dimensionamento dos cabos, dois critérios serão utilizados, sendo um deles o critério da corrente e o outro critério da queda de tensão. Para utilizar esses critérios é necessário saber quantos circuitos o sistema possui, quantos estão agrupados, a distância entre os módulos solares e o inversor e a distância entre o inversor e o medidor bidirecional.

Os módulos solares estarão conectados a um circuito somente, pois pelo dimensionamento do inversor, foi possível observar que é permitido ligar todos em série, tanto os painéis quanto as telhas. Para os painéis será um circuito com os 7 módulos ligados em série, assim como as telhas, serão as 89 ligadas em série formando um circuito somente. A ligação entre os módulos estará disposta sobre o telhado de modo a minimizar a sua exposição ao sol e para que sofram menos ação de intempéries.

O circuito que conecta os módulos até o inversor descerá por um eletroduto aparente e o tipo de instalação é B1, sendo caracterizado por possuir condutores isolados e alocados em eletrodutos aparentes. Neste circuito, a corrente nominal é de 8,90 A e a tensão nominal é de 120 V, com o comprimento de 7,5 m até o inversor e de 10 m do inversor até o medidor bidirecional. Esses dados são importantes para os cálculos dos critérios utilizados.

Para o critério de corrente ou também chamado de critério de condução de corrente, a corrente do circuito deve ser ajustada a partir da quantidade de circuito agrupados, pelo tipo de instalação e pela temperatura do ambiente. A equação (16) mostra o cálculo de ajuste da corrente, onde o fator de correção de agrupamento vale 0,8 e o fator de correção de temperatura vale 1,06. Esses valores podem ser observados na Tabela 42 da NBR 5410:2008 (ABNT, 2008).

$$I' = \frac{I}{K1 \cdot K2} \quad (16)$$

Onde:

I'	corrente corrigida;
I	corrente do circuito;
$K1$	fator de correção de agrupamento;
$K2$	fator de correção de temperatura.

Pela equação (16) a corrente que vem dos módulos para o inversor vale 10,50 A e a corrente do inversor para o medidor bidirecional passa a valer 15,38 A. Com esses dados, analisa-se a Tabela 36 da NBR 5410, sendo possível ver que a seção mínima permitida é de 1 mm², entretanto o mínimo permitido pela NBR 5410 para circuitos que não sejam de iluminação é de 2,5 mm², sendo essa a seção escolhida, a partir desse critério.

Para o critério da queda de tensão, será adotado um limite máximo de 2% da tensão nominal. Os mesmos fatores considerados no critério anterior serão considerados na queda de tensão. Pela equação (17) chega-se ao valor que deverá ser encontrado na Tabela 10.22 da NBR 5410. Se o valor não for o mesmo, utiliza-se o menor valor imediato ao calculado.

$$\Delta V = \frac{e\% \cdot V_n}{I_n \cdot L} \quad (17)$$

Onde:

ΔV	queda de tensão calculada, em V;
$e\%$	máximo percentual permitido de queda de tensão, em %;
V_n	tensão nominal, em V;
I_n	corrente nominal, em A;
L	comprimento do circuito, em km.

Calculada a queda de tensão e com auxílio da Tabela 10.22 da NBR 5410, a seção mínima permitida por esse critério é de 1,5 mm², tanto para os condutores que vão dos módulos para o inversor quanto para os condutores que vão do inversor para a rede. Todavia, pelo mesmo motivo citado no critério anterior, a seção mínima que será utilizada para os dois trechos é de 2,5 mm².

As Tabelas 7 e 8 mostram o resultado do dimensionamento dos cabos para o sistema com painéis e telhas respectivamente, assim como o valor a ser pago pela sua aquisição. Vale ressaltar que será acrescido 20% do comprimento dos cabos, de forma a compensar as possíveis junções, onde a perda de parte do material. Nas mesmas tabelas, é mostrado o número de conjunto de conectores, sendo necessário 30 conjuntos para o sistema com painéis e 369 conjuntos para o sistema com telhas, onde cada conjunto possui o conector macho e fêmea e serão utilizados para fazer as ligações em série dos módulos.

Tabela 7 – Quantidade de condutores e conectores necessários para a ligação dos painéis

Material	Valor unitário	Quantidade	Valor total
Condutor 2,5mm²	R\$ 2,60	42 m	R\$ 109,20
Conjunto conectores	R\$ 6,29	30	R\$ 188,70
		Total	R\$ 197,90

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Tabela 8 – Quantidade de condutores e conectores necessários para a ligação das telhas

Material	Valor unitário	Quantidade	Valor total
Condutor 2,5mm²	R\$ 2,60	42 m	R\$ 109,20
Conjunto conectores	R\$ 6,29	369	R\$ 2.321,01
		Total	R\$ 2.430,21

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

6.3.3 Dimensionamento da Proteção do Sistema

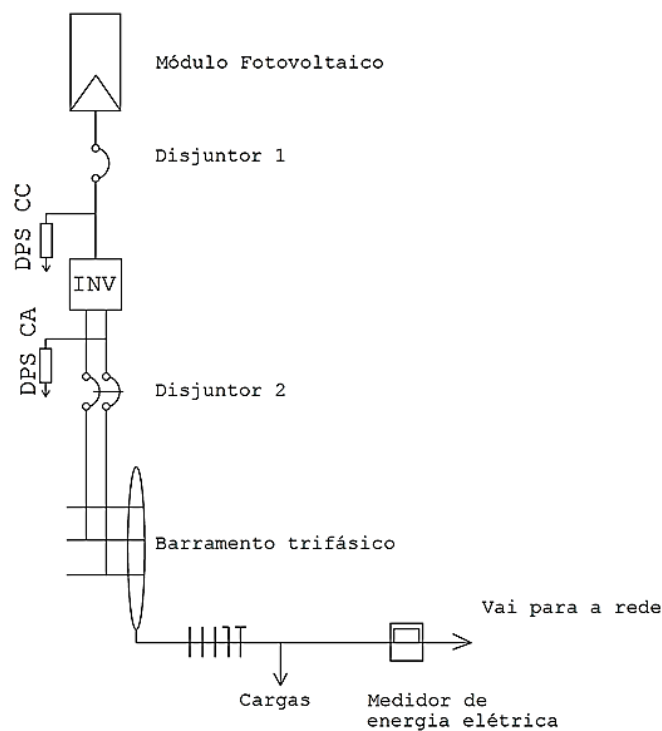
Para que o sistema fique seguro será utilizado um dispositivo de proteção contra surto (DPS) no lado CC e outro no lado CA, um disjuntor entre os módulos e o inversor e outro disjuntor entre o inversor e o medidor bidirecional. A Figura 20 apresenta o esquema de proteção utilizado.

A partir do dimensionamento dos cabos, a corrente do sistema fotovoltaico é de 8,90 A e os condutores utilizados possuem a seção de 2,5 mm², suportando corrente de até 24 A. Tendo

esses dados, o disjuntor utilizado deverá ter um valor entre a corrente de projeto e o máximo suportado pelo condutor. Para tal será utilizado um disjuntor de 10 A. Seguindo a mesma lógica, a corrente que sai do inversor para o medidor bidirecional é de 13 A, sendo assim será utilizado um disjuntor de 15 A.

Para dimensionar o DPS, a NBR 5410 define que o valor do DPS deve ser de 10% maior que a tensão de alimentação e sua corrente nominal de descarga não pode ser inferior a 5 kA. Seguindo essas definições o DPS escolhido foi o Clamper VCL.

Figura 20 – Proteção do sistema fotovoltaico



Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Na Tabela 9 é mostrado o resultado do dimensionamento da proteção do sistema.

Tabela 9 – Quantidade de dispositivos de proteção

Material	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Disjuntor WEG 10 A	R\$ 15,00	1	R\$ 15,00
Disjuntor Steck 16 A	R\$ 51,70	1	R\$ 51,70
DPS Clamper	R\$ 65,90	2	R\$ 131,80

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

6.4 Investimento do Sistema Fotovoltaico

Com o correto dimensionamento e com uma busca no mercado dos melhores componentes que compõe o sistema fotovoltaico, é possível determinar qual o valor do investimento inicial para a aquisição desse projeto. Na Tabela 10 é mostrado o investimento para a aquisição do sistema composto por painéis solares. Na Tabela 11, por sua vez, o valor do investimento se refere ao sistema composto por telhas solares.

Para os dois investimentos serão acrescidos 5% do valor para possíveis gastos com fretes. Diante disso o investimento para o sistema fotovoltaico com elaborado com painéis solares e telhas solares são respectivamente de R\$ 11.002,04 e R\$ 14.907,04.

Tabela 10 – Componentes do sistema fotovoltaico com painéis e o valor total do investimento

Material	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Painel solar 335W Risen Solar policristalino	R\$ 659,37	7	R\$ 4.615,59
Inversor Growatt Aldo Solar 3000	R\$ 4.383,31	1	R\$ 4.383,31
Condutor 2,5mm²	R\$ 2,60	42	R\$ 109,20
Conjunto conector mc4 macho e fêmea - Fortenergy	R\$ 6,30	30	R\$ 188,91
Perfis e suportes para estrutura solar	R\$ 327,54	3	R\$ 982,62
Disjuntor WEG MDW B10	R\$ 15,00	1	R\$ 15,00
Disjuntor Steck 16 A	R\$ 51,70	1	R\$ 51,70
DPS Clamper	R\$ 65,90	2	R\$ 131,80
5% de Frete			R\$ 523,91
		Total	R\$ 11.002,04

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Tabela 11 – Componentes do sistema fotovoltaico com telhas e o valor total do investimento

Material	Preço unitário	Quantidade	Preço total
Telha solar Sunny sn24m-2 monocristalino	R\$ 102,73	89	R\$ 7.314,38
Inversor Growatt Aldo Solar mic 3000 tl-x	R\$ 4.383,31	1	R\$ 4.383,31
Condutor 2,5mm²	R\$ 2,60	42	R\$ 109,20
Conjunto conector mc4 macho e fêmea - Fortenergy	R\$ 6,30	369	R\$ 2.323,59
Disjuntor WEG MDW B10	R\$ 15,00	1	R\$ 15,00
Disjuntor Steck 16 A	R\$ 51,70	1	R\$ 51,70
DPS clamper	R\$ 65,90	2	R\$ 131,80
5% Frete			R\$ 709,86
		Total	R\$ 14.907,04

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

7 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a análise de viabilidade serão utilizados dois métodos, sendo o primeiro, o valor presente líquido (VPL) e o segundo, o custo nivelado de energia (LCOE). Esses métodos são válidos e muito utilizados no mercado financeiro e no mercado de energia. Para tal análise será considerada a taxa mínima de atratividade, valor médio em 2020, mensurado em 2,56%.

7.1 Valor Presente Líquido

Para o cálculo do VPL é necessário ter o fluxo de caixa e neste projeto a saída será o mínimo valor a ser pago pelo cliente, pois mesmo que o sistema supra todo o consumo da residência, ainda é necessário pagar pelo custo de disponibilidade do sistema da rede que equivale ao consumo de 100 kW, por ser um sistema trifásico. Somado a esse consumo, anualmente terá o custo de manutenção e limpeza avaliado em R\$ 500,00. A entrada será a média anual que o cliente pagava por não ter o sistema fotovoltaico. Dito isso, o fluxo de caixa será a entrada menos a saída e no 13º ano, terá o acréscimo de mais um inversor, pois sua vida útil varia de 10 a 15 anos e para esse projeto foi considerado de 13 anos.

Com o auxílio da equação (5), explicado de uma forma mais ampla na seção 5, chega-se a um VPL de R\$ 37.741,06 para o sistema com painéis solares e um VPL de R\$ 33.836,05 para o sistema com telhas solares. Vale ressaltar que o período analisado é de 25 anos, que corresponde à vida útil dos sistemas. Nas Tabelas 12 e 13 são mostrados os resultados referentes a cada sistema ao decorrer dos anos.

Como é possível ver na Tabela 12, o sistema projetado com painéis se paga no quinto ano. Já a Tabela 13 mostra que o sistema fotovoltaico com telhas solares possui um *payback* no sexto ano.

7.2 Custo Nivelado de Energia

Para calcular o custo nivelado de energia, será feito uso da equação (6), apresentada na seção 5 e os mesmos custos utilizados no cálculo do VPL serão utilizados no LCOE, tais como taxa de

manutenção, custo com a taxa mínima a ser paga pela disponibilidade do sistema e a aquisição de um novo inversor no 13º ano.

Tabela 12 – Resultado do cálculo pelo método do VPL para o sistema com painéis solares

Ano	Entrada	Saída	Fluxo de caixa	Valor presente	Saldo
0	-	R\$ 11.002,04	R\$ -11.002,04	R\$ -11.002,04	R\$ -11.002,04
1	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.617,84	R\$ -8.384,19
2	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.566,51	R\$ -5.817,69
3	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.516,19	R\$ -3.301,49
4	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.466,85	R\$ -834,64
5	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.418,48	R\$ 1.583,84
6	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.371,06	R\$ 3.954,90
7	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.324,57	R\$ 6.279,47
8	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.278,99	R\$ 8.558,46
9	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.234,30	R\$ 10.792,77
10	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.190,49	R\$ 12.983,26
11	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.147,54	R\$ 15.130,81
12	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.105,43	R\$ 17.236,24
13	R\$ 4.459,10	R\$ 6.172,21	R\$ -1713,11	R\$ -1.324,29	R\$ 15.911,95
14	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.023,68	R\$ 17.935,63
15	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.984,00	R\$ 19.919,63
16	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.945,10	R\$ 21.864,72
17	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.906,96	R\$ 23.771,68
18	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.869,57	R\$ 25.641,24
19	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.832,91	R\$ 27.474,15
20	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.796,97	R\$ 29.271,12
21	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.761,73	R\$ 31.032,85
22	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.727,19	R\$ 31.760,04
23	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.693,32	R\$ 34.453,37
24	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.660,12	R\$ 36.113,49
25	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.627,57	R\$ 37.741,06

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

A soma dos custos ao longo de 25 anos, já corrigidos, é de R\$ 46.891,98 e a soma da energia gerada, já contabilizada a depreciação do sistema, é de 106.428,55 kWh e dessa forma o LCOE é de R\$ 0,44. Esse valor de LCOE é aproximadamente 20% mais barato que a venda pela concessionária, que vale R\$ 0,55, valor registrado no ano de 2020.

Tabela 13 – Resultado do cálculo pelo método VPL para o sistema com telhas solares

Ano	Entrada	Saída	Fluxo de caixa	Valor presente	Saldo
0	-	R\$ 14.907,04	R\$ -14.907,04	R\$ -14.907,04	R\$ -14.907,04
1	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.617,84	R\$ -12.289,19
2	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.566,51	R\$ -9.722,68
3	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.516,19	R\$ -7.206,49
4	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.466,85	R\$ -4.739,64
5	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.418,48	R\$ -2.321,16
6	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.371,06	R\$ 49,90
7	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.324,57	R\$ 2.374,47
8	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.278,99	R\$ 4.653,46
9	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.234,30	R\$ 6.887,77
10	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.190,49	R\$ 9.078,26
11	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.147,54	R\$ 11.225,80
12	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.105,43	R\$ 13.331,24
13	R\$ 4.459,10	R\$ 6.172,21	R\$ -1713,11	R\$ -1.324,29	R\$ 12.006,95
14	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 2.023,68	R\$ 14.030,63
15	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.984,00	R\$ 16.014,62
16	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.945,10	R\$ 17.959,72
17	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.906,96	R\$ 19.866,68
18	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.869,57	R\$ 21.736,24
19	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.832,91	R\$ 23.569,15
20	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.796,97	R\$ 25.366,12
21	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.761,73	R\$ 27.127,85
22	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.727,19	R\$ 28.855,04
23	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.693,32	R\$ 30.548,36
24	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.660,12	R\$ 32.208,48
25	R\$ 4.459,10	R\$ 1.788,90	R\$ 2.670,20	R\$ 1.627,57	R\$ 33.836,05

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

A soma dos custos ao longo de 25 anos, já corrigidos, é de R\$ 50.796,98 e a soma de energia gerada, já contabilizada a depreciação do sistema, é de 106.428,55 kWh e dessa forma o LCOE é de R\$ 0,47. Esse valor de LCOE é aproximadamente 15% mais barato que a venda pela concessionária, que vale R\$ 0,55, valor registrado no ano de 2020.

Tabela 14 – Resultado do cálculo pelo método LCOE para o sistema com painéis

Ano	$C_{o\&m}$	$C_{o\&m}/(1+i)^t$	E_t	$E_t/(1+i)^t$
0	R\$ 11.002,04	R\$ 13.079,05	5508,00	5508,00
1	R\$ 1.788,90	R\$ 1.744,25	5469,44	5332,92
2	R\$ 1.788,90	R\$ 1.700,71	5431,16	5163,41
3	R\$ 1.788,90	R\$ 1.658,26	5393,14	4999,28
4	R\$ 1.788,90	R\$ 1.616,87	5355,39	4840,37
5	R\$ 1.788,90	R\$ 1.576,51	5317,90	4686,52
6	R\$ 1.788,90	R\$ 1.537,16	5280,67	4537,55
7	R\$ 1.788,90	R\$ 1.498,79	5243,71	4393,32
8	R\$ 1.788,90	R\$ 1.461,38	5207,00	4253,67
9	R\$ 1.788,90	R\$ 1.424,90	5170,56	4118,46
10	R\$ 1.788,90	R\$ 1.389,33	5134,36	3987,55
11	R\$ 1.788,90	R\$ 1.354,65	5098,42	3860,80
12	R\$ 1.788,90	R\$ 1.320,84	5062,73	3738,08
13	R\$ 6.172,21	R\$ 4.443,51	5027,29	3619,26
14	R\$ 1.788,90	R\$ 1.255,72	4992,10	3504,22
15	R\$ 1.788,90	R\$ 1.224,38	4957,16	3392,83
16	R\$ 1.788,90	R\$ 1.192,82	4922,46	3284,99
17	R\$ 1.788,90	R\$ 1.164,02	4888,00	3180,57
18	R\$ 1.788,90	R\$ 1.134,96	4853,78	3079,47
19	R\$ 1.788,90	R\$ 1.106,63	4819,81	2981,59
20	R\$ 1.788,90	R\$ 1.079,01	4786,07	2886,81
21	R\$ 1.788,90	R\$ 1.052,08	4752,57	2795,05
22	R\$ 1.788,90	R\$ 1.025,82	4719,30	2706,21
23	R\$ 1.788,90	R\$ 1.000,21	4686,26	2620,19
24	R\$ 1.788,90	R\$ 975,25	4653,46	2536,90
25	R\$ 1.788,90	R\$ 950,90	4620,88	2456,26

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

Tabela 15 – Resultado do cálculo pelo método LCOE para o sistema com telha

Ano	C_{o&m}	C_{o&m}/(1+i)^t	E_t	E_t/(1+i)^t
0	R\$ 17.841,00	R\$ 17.841,00	5508,00	5508,00
1	R\$ 1.788,90	R\$ 1.744,25	5469,44	5332,92
2	R\$ 1.788,90	R\$ 1.700,71	5431,16	5163,41
3	R\$ 1.788,90	R\$ 1.658,26	5393,14	4999,28
4	R\$ 1.788,90	R\$ 1.616,87	5355,39	4840,37
5	R\$ 1.788,90	R\$ 1.576,51	5317,90	4686,52
6	R\$ 1.788,90	R\$ 1.537,16	5280,67	4537,55
7	R\$ 1.788,90	R\$ 1.498,79	5243,71	4393,32
8	R\$ 1.788,90	R\$ 1.461,38	5207,00	4253,67
9	R\$ 1.788,90	R\$ 1.424,90	5170,56	4118,46
10	R\$ 1.788,90	R\$ 1.389,33	5134,36	3987,55
11	R\$ 1.788,90	R\$ 1.354,65	5098,42	3860,80
12	R\$ 1.788,90	R\$ 1.320,84	5062,73	3738,08
13	R\$ 6.172,21	R\$ 4.443,51	5027,29	3619,26
14	R\$ 1.788,90	R\$ 1.255,72	4992,10	3504,22
15	R\$ 1.788,90	R\$ 1.224,38	4957,16	3392,83
16	R\$ 1.788,90	R\$ 1.192,82	4922,46	3284,99
17	R\$ 1.788,90	R\$ 1.164,02	4888,00	3180,57
18	R\$ 1.788,90	R\$ 1.134,96	4853,78	3079,47
19	R\$ 1.788,90	R\$ 1.106,63	4819,81	2981,59
20	R\$ 1.788,90	R\$ 1.079,01	4786,07	2886,81
21	R\$ 1.788,90	R\$ 1.052,08	4752,57	2795,05
22	R\$ 1.788,90	R\$ 1.025,82	4719,30	2706,21
23	R\$ 1.788,90	R\$ 1.000,21	4686,26	2620,19
24	R\$ 1.788,90	R\$ 975,25	4653,46	2536,90
25	R\$ 1.788,90	R\$ 950,90	4620,88	2456,26

Fonte: Produzida pelo próprio autor.

8 CONCLUSÕES

Ao longo dos últimos anos a busca por fontes alternativas de geração de energia, que sejam financeiramente mais viáveis e que causam um menor impacto ao meio ambiente, vem aumentando e, diante desse cenário, o uso da energia solar vem crescendo assim como surgem novas tecnologias para a obtenção dessa energia.

Diante do cenário atual, que apresenta para a sociedade diversas tecnologias para a obtenção de energia solar, tais como os painéis e telhas solares, faz-se necessário um estudo e correto dimensionamento dos possíveis sistemas a serem adotados, de forma que o cliente tenha um retorno significativo, o mais rápido possível.

Neste projeto foram apresentados e dimensionados dois sistemas fotovoltaicos, um composto por painéis solares e o outro com telhas solares, sendo este, uma tecnologia mais recente, se comparada com a primeira. Esses sistemas foram projetados para suprir o consumo de energia de uma residência situada em Vila Velha/ES que possui um consumo anual de energia de 5217 kWh.

Para o sistema com painéis solares será necessário um investimento inicial de R\$ 11.002,04 e pelo método VPL o cliente terá um *payback* no 5º ano, onde a partir deste ano o valor economizado anualmente poderá ser utilizado em outros empreendimentos. Pelo método LCOE foi mostrado que a aquisição desse sistema é vantajosa por vender uma energia 20% mais barata que a vendida pela concessionária.

Para o sistema com telhas solares será necessário um investimento inicial de R\$ 14.907,04 e pelo método VPL o cliente terá um *payback* no 6º ano, onde a partir deste ano o valor economizado anualmente poderá ser utilizado em outros empreendimentos. Pelo método LCOE foi mostrado que a aquisição desse sistema é vantajosa por vender uma energia 15% mais barata que a vendida pela concessionária.

Os dois projetos são viáveis financeiramente, retornando o valor do investimento a médio prazo e dentre os dois sistemas, aquele composto por painéis solares é mais vantajoso pois possui um valor de investimento inicial mais barato, um *payback* menor e custo nivelado mais barato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2008.

ARCHIEXPO. **Célula fotovoltaica policristalina**. 2021. Disponível em: <https://www.archiexpo.com/pt/prod/solar-innova/product-157636-1905101.html>. Acesso em: 27 mar. 2021.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa de juros básicas** – Histórico. 2021. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 27 mar. 2021.

BIGSUN. **Retorno do investimento em energia solar fotovoltaica: Principais variáveis que devemos analisar**. 2020. Disponível em: <https://www.bigsun.com.br/analise-financeira-da-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

BLUESOLAR ENERGIA SOLAR. **Célula solar: Conceitos básicos sobre como a luz do sol gera energia elétrica**. 2020. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-solar-o-que-e/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

_____. **Efeito fotoelétrico e efeito fotovoltaico: Entenda qual é geração de energia elétrica**. 2018a. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoeletrico-fotovoltaico>. Acesso em: 20 mar. 2021.

_____. **Placas fotovoltaicas: 7 principais questões respondidas que você não pode ficar sem saber**. 2018b. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/placas-fotovoltaicas>. Acesso em: 18 jul. 2020.

CASA DA SUSTENTABILIDADE. **Italianos criam telha que já vem com placas solares**. 2015. Disponível em: <https://casadasustentabilidade.wordpress.com/2015/11/27/italianos-criam-telha-que-javem-com-placas-solares/>. Acesso em: 18 jul. 2020.

CICLOVIVO. **1ª telha solar fotovoltaica do país será lançada pela Eternit**. 2019. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/arquitetura/1a-telha-solar-fotovoltaica-eternit/>. Acesso em: 04 dez. 2020.

CLIMATE-DATA.ORG. **Vila Velha clima**. 2021. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/espírito-santo/vila-velha-3163/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

CONTAAZUL. **O que é fluxo de caixa e como ele pode ajudar na sua empresa**. 2020. Disponível em: <https://blog.contaazul.com/o-que-e-fluxo-de-caixa/>. Acesso em: 27 mar. 2020.

CORPORATE FINANCE INSTITUTE. **Levelized Cost of Energy (LCOE)**. 2020. Disponível em: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/levelized-cost-of-energy-lcoe/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Módulos fotovoltaicos**. 2008. Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=331. Acesso em: 20 mar. 2021.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Potencial solar: SUNDATA** v 3.0. 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 04 dez. 2020.

COELHO, Allan Rodrigo Muckenberger. **Energias Renováveis**. 2016. 14 p. Estudo Dirigido na disciplina Meteorologia Aeronáutica (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade do Tuiuti do Paraná, Curitiba, 2016.

ECOMAI. **Sistemas on-grid**. 2021. Disponível em: <http://www.ecomais.ind.br/energia-solar>. Acesso em: 27 mar. 2021

ENERGÊS ENERGIA SOLAR. **Guia Completo do Módulo Fotovoltaico**. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/energia-solar/guia-completo-modulos-fotovoltaicos/>. Acesso em: 02 jul. 2021

ENGEHALL. **Painel solar fotovoltaico: O gerador de energia solar** 2018. Disponível em: <https://engehallrenovaveis.com.br/artigos/painel-solar-fotovoltaico>. Acesso em: 27 mar. 2021.

SILVA, Raissa Guimarães; CARMO, Marlon José do. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Proposta para Melhoria da Gestão Energética**. In: Inter Science Place, 2., 2017, Leopoldina, **International Scientific Journal**, Leopoldina: ISSN 1679, 2017. p. 137-144. Disponível em: <http://www.inter-science-place.org/isp/index.php/isp/article/view/649>. Acesso em: 04 jul. 2021.

MACHADO, Pedro de Almeida. **Condicionamento da Energia Solar Fotovoltaica para Sistemas Interligados à Rede Elétrica**. 2011. Disponível em: <https://www.ufjf.br/labsolar/2011/05/26/condicionamento/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

NAZARENO, Rogério. **O que é energia solar e como funcionam os painéis solares?** 2019. Disponível em: <https://extremesolar.com.br/o-que-e-energia-solar-e-como-funcionam-os-painéis-solares/>. Acesso em: 04 jul. 2021.

OLIVEIRA, Jaqueline Rezende. **A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável**. Ponta Grossa: Atena, 2019. 165 p. ISBN 978-85-7247-616-4. *E-book*.

PORTAL SOLAR. **Conheça a telha solar fotovoltaica**. 2020. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/conheca-telha-solar-fotovoltaica>. Acesso em: 18 jul. 2020.

_____. **Empresa holandesa desenvolve telhados que captam energia solar**. 2019a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/empresa-holandesa-desenvolve-telhados-que-captam-energia-solar.html>. Acesso em: 18 jul. 2020.

_____. **Energia Solar no Brasil**. 2019b. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 14 jul. 2020.

_____. **O que é energia solar?** 2014. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/o-que-e-energia-solar-.html>. Acesso em: 02 jul. 2021.

SEBRAE. **O que é fluxo de caixa e como aplicá-lo no seu negócio.** 2020. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/fluxo-de-caixa-o-que-e-e-como-implantar,b29e438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD#:~:text=O%20resultado%20do%20fluxo%20de,determinada%20data%20ou%20per%C3%ADodo.>). Acesso em: 27 mar. 2021.

SHAREENERGY. **Como funciona a célula fotovoltaica.** 2017. Disponível em: <https://shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/#:~:text=As%20c%C3%A9lulas%20fotovoltaicas%2C%20gerando%20eletricidade.&text=Assim%2C%20os%20el%C3%A9trons%20podem%20fluir,qualquer%20outra%20fonte%20de%20eletricidade>. Acesso em: 20 mar. 2021.

SOLAR HELIOS ENERGIA. **Cinturão energético sobre o Centro-Oeste torna a região promessa na produção de Energia Solar.** 2020. Disponível em: <https://www.solarhelios.com.br/post/cintur%C3%A3o-energ%C3%A9tico-sobre-o-centro-oeste-torna-a-regi%C3%A3o-promessa-na-produ%C3%A7%C3%A3o-de-energia-solar>. Acesso em: 04 jul. 2021.

TREASY. **Taxa de desconto: Saiba como avaliar os negócios.** 2017. Disponível em: <https://www.treasy.com.br/blog/taxa-de-desconto/> Acesso em: 27 mar. 2020. (IMATE-DATA, 2020).