



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LÊDSON LED FREITAS DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE DA COSERN**

MOSSORÓ

2021

LÊDSON LED FREITAS DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE DA COSERN**

Trabalho de conclusão de Curso de Engenharia Elétrica apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, campus Mossoró, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar - UFERSA.

MOSSORÓ - RN

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586l Silva, Lêdosn Led Freitas da .
Levantamento dos custos do ciclo de vida de um
sistema fotovoltaico residencial conectado à rede
da COSERN / Lêdosn Led Freitas da Silva. - 2021.
63 f. : il.

Orientador: Victor de Paula Brandão Aguiar.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2021.

1. Levantamento. 2. Custos. 3. Geração. 4.
Dimensionamento. I. Aguiar, Victor de Paula
Brandão , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

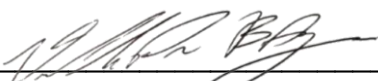
LÊDSON LED FREITAS DA SILVA

**LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO RESIDENCIAL CONECTADO À REDE DA COSERN**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Defendida em: 19/11/2021

BANCA EXAMINADORA



Victor de Paula Brandão Aguiar, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Adriano Araújo Gonçalves Junior, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

RESUMO

Este trabalho realiza um estudo de caso sobre o levantamento dos custos do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede localizado na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte, com o intuito de abordar os possíveis custos relacionados a instalação do sistema até o fim da sua vida útil, que são: os custos iniciais, custos de manutenção, custos de reposição, custos de energia e geração e os custos de descarte do sistema. Os dados de irradiação solar na região foram analisados através de dados meteorológicos obtidos no site da CRESESB, foi utilizado recursos normativos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e foram escolhidos equipamentos no mercado brasileiro de acordo com seus dados técnicos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, considerando que 137kWh é equivalente a 1kWp do sistema instalado e tendo em vista uma perda de 25% do sistema para determinar a geração mensal.

A análise técnica mostrou que a cidade de Mossoró possui um grande potencial de geração devido ao seu nível de radiação solar e para atender o perfil de consumo da unidade consumidora foi dimensionado um sistema de 2,86kWp para compensar um consumo médio mensal de 392,41 kWh, composto por 8 módulos de 400W de potência, do fabricante *Jinko Solar* e um inversor de 3kW, do fabricante *Growatt*. O projeto teve um custo inicial de R\$19.960,80 para a aquisição dos equipamentos e toda instalação necessária, foi feito um levantamento dos custos durante 25 anos em alguns anos específicos para comparar com os custos que seria sem o sistema solar e com o sistema solar em funcionamento, obtendo um valor de R\$65.786 que seria pago sem o sistema solar durante 25 anos e um valor de R\$9.179,90 com o sistema solar durante os mesmos anos.

Foi concluído que, após o levantamento dos custos para avaliação econômica, a implantação desse sistema fotovoltaico se apresentou viável e compensou todo o investimento inicial feito, mesmo com os custos de manutenção e reposição durante a vida útil.

Palavras-chave: Levantamento, Custos, Geração, Dimensionamento.

ABSTRACT

This work performs a case study on the survey of the life cycle costs of a residential photovoltaic system connected to the network of COSERN located in the city of Mossoró, Rio grande do Norte, in order to address the possible costs related to the installation of the system until the end of its useful life, which are the initial costs, maintenance costs, replacement costs, energy and generation costs and disposal costs of the system. The solar irradiation data in the region were analyzed through meteorological data obtained from the CRESEB website, normative resources of the National Agency of Electric Energy (ANEEL) were used and equipment was chosen from the Brazilian market according to their technical data for the sizing of the photovoltaic system, considering that 137kWh is equivalent to 1kWp of the installed system and considering a loss of 25% of the system to determine the monthly generation.

The technical analysis showed that the city of Mossoró has a great potential for generation due to its level of solar radiation and to meet the consumption profile of the consumer unit under study a system of 2.86kWp was dimensioned to compensate an average monthly consumption of 392.41 kWh, the system is composed of 8 monocrystalline modules of 400W of power, from the manufacturer Jinko Solar and a 3kW inverter, from the manufacturer Growatt. The project had an initial cost of R\$19,960.80 for the acquisition of the equipment and all the necessary installation and a survey was made of the costs for 25 years in some specific years, the first, fifth, tenth, fifteenth, twentieth and twenty-fifth years to compare with the costs that would be without the solar system with the solar system in operation and a value of R\$65,786 was obtained that would be paid without the solar system for 25 years and a value of R\$9,179.90 with the solar system during the same years.

It was concluded that, after raising the costs for economic evaluation, the implementation of this photovoltaic system presented itself as viable and compensated all the initial investment made, even with the maintenance and replacement costs during its useful life.

Keywords: Survey, Costs, Generation, Dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações geométricas entre os raios solares a superfície terrestre.....	13
Figura 2 - Relações geométricas entre os raios solares à superfície terrestre.....	13
Figura 3 - Componentes da radiação solar	15
Figura 4 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado	16
Figura 5 - Sistema Off-Grid (Isolado)	17
Figura 6 - Diagrama um sistema fotovoltaico Off-Grid	18
Figura 7 - Sistema conectado à rede (On-Grid ou Grid-Tie)	19
Figura 8 - Diagrama de um sistema conectado à rede de distribuição.....	19
Figura 9 - Camadas de um módulo fotovoltaico	20
Figura 10 - Curva característica I-V e curva de potência P-V.....	21
Figura 11 - Curva I-V e arranjo dos módulos em série.....	22
Figura 12 - Curva I-V e arranjo dos módulos em paralelo.....	23
Figura 13 - Símbolo do inversor	23
Figura 14 - Funcionamento do inversor CC-CA	24
Figura 15 - String box.....	25
Figura 16 - Medidor bidirecional	26
Figura 17 - Medições do medidor bidirecional.....	26
Figura 18 - Esquema de compensação.....	29
Figura 19 - Localização da cidade de Mossoró	33
Figura 20 - Inversor Growatt MIC 3000TL-X	37
Figura 21 - Etiqueta growatt MIC 3000TL-X.....	37
Figura 22- Módulo Jinko JKM400M-72-V	38
Figura 23 - Medidas módulo Jinko JKM400M-72-V.....	39
Figura 24 - Estrutura de suporte no telhado.....	40
Figura 25 - Estrutura de solo	40
Figura 26 - Estrutura de solo	41
Figura 27 - Perdas do estudo feito em 2001	45
Figura 28 - Fatores de perdas.....	45
Figura 29 - Comparação dos custos	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Histórico de consumo durante um ano (2020-2021)	33
Tabela 2- Dados mensais de irradiação média em Mossoró	34
Tabela 3 - Detalhes sobre a etiqueta	38
Tabela 4 - Especificações sobre o módulo.....	39
Tabela 5 - Equipamentos para o projeto solar.....	42
Tabela 6 - Materiais utilizados na instalação.....	43
Tabela 7 - Custos de manutenção periódica.....	44
Tabela 8 – Projeto de geração com perda de 25%	46
Tabela 9 - Estimativa dos créditos e os custos no primeiro ano do sistema	48
Tabela 10 - Custos de geração de acordo com a eficiência dos módulos	49
Tabela 11 – Garantia da Growatt, Jinko e Clamper Solar	50
Tabela 12 - Custos da Growatt, Jinko e Clamper Solar	50
Tabela 13 - Estimativa dos custos no quinto ano	52
Tabela 14 - Estimativa dos custos no décimo ano	53
Tabela 15 - Estimativa dos custos no décimo quinto ano	54
Tabela 16 - Estimativa dos custos no vigésimo ano.....	54
Tabela 17 - Estimativa dos custos no vigésimo quinto ano.....	55
Tabela 18 - Estimativa dos custos de manutenção e reposição.....	56

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1 Energia Solar	12
3.1.1 Efeito fotovoltaico	15
3.2 Sistema fotovoltaico	16
3.2.2 Sistema de geração fotovoltaico Grid-Tie (On-Grid)	18
3.3 Componentes do sistema solar fotovoltaico conectado à rede (On-Grid)20	
3.3.1 Módulos Fotovoltaicos.....	20
3.3.2 Inversores.....	23
3.3.3 String Box.....	24
3.3.4 Medidor bidirecional	25
3.4 Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)	27
3.4.1 Sistema de microgeração distribuída	27
3.4.2 Sistema de minigeração distribuída	27
3.4.3 Sistema de compensação	28
3.4.4 Geração Compartilhada	29
3.5 Análise do Custo de Ciclo de Vida (ACCV)	30
4 METODOLOGIA	31
5 ESTUDO DE CASO	32
5.1 Descrição da Localidade	32
5.2 Perfil de Consumo.....	33
5.3 Dados Meteorológicos	34
5.4 Dimensionamento do sistema.....	34
5 LEVANTAMENTO TÉCNICO	36
5.1 Inversor	36
5.2 Módulos.....	38
5.4 Estrutura de suporte	39
6 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA (LCCV)	41
6.1 Custos Iniciais	42
6.2 Custos de manutenção	43
6.3 Custos de energia	44
6.4 Custos de reposição	50

6.5 Custos de descarte	51
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	51
7.1 Comparação dos custos	56
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, novas fontes alternativas de energia têm sido amplamente estudadas como soluções complementares à matriz energética atual, e por meio desses estudos, têm mostrado que uma fonte de energia que foi utilizada em 1950 ganhou espaço e atenção no cenário nacional. A conversão da energia solar em elétrica a partir do princípio dos elementos fotovoltaicos é uma das alternativas mais promissoras, sabendo-se que os painéis fotovoltaicos podem aumentar a produção de energia limpa em grandes centros, seja ela residencial ou comercial, o negócio está crescendo e ganhando cada vez mais adeptos e concretizando a ideia de que muitos autores acreditam que usar sua própria geração de energia solar é a decisão certa e pode garantir eficiência de produção de médio a longo prazo e redução de custos (JÚNIOR e SOUZA, 2018).

Conforme dados do relatório BEN 2020 (Balanço Energético Nacional), realizado pelo EPE (Empresa de Pesquisa Energética), com o aumento do consumo global de energia e a diversificação da matriz energética, são necessárias alternativas de produção de energia para suprir a crescente demanda, dessa forma, as energias renováveis passaram a ocupar mais espaço na geração de energia elétrica no cenário mundial e regional. A utilização de energias renováveis é uma boa solução e com isso a energia solar fotovoltaica é uma das tecnologias que vem crescendo, sendo uma fonte considerada limpa e sustentável. Sua principal vantagem é a utilização da radiação solar para a produção de energia elétrica, não produzindo emissões de gases durante a sua vida útil.

Os maiores obstáculos para as fontes de energias renováveis estão relacionados ao desenvolvimento de materiais de conversão de energia mais eficientes para a transformação de energia solar em energia elétrica e a difusão de novas tecnologias nessas fontes. O alto custo da conversão de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos também está associado a esses obstáculos, por mais que tenha a vantagem de não exigir manutenção contínua, seu investimento ainda é alto (JÚNIOR e SOUZA, 2018).

A utilização do sistema de geração energia solar fotovoltaica vem tornando-se viável para os consumidores implantarem em suas residências ou comércios sistemas de microgeração ou minigeração, com o objetivo de reduzir o gasto com

energia elétrica. Como o país incentiva o uso de energia solar, alguns padrões foram desenvolvidos para geração de energia distribuída, na qual os consumidores instalam sistemas fotovoltaicos e geram sua própria energia, e por meio de um sistema de compensação a Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL afirma que a geração e o consumo são compensados pela própria concessionária (ANEEL).

Para que seja possível entender os impactos mais abrangentes de uma tecnologia, é necessário analisar não somente durante o seu tempo de utilização, mas também levar em consideração todas as etapas. Dentro deste contexto, a análise do ciclo de vida (ACV) e a análise do custo do ciclo de vida (ACCV) são formas de avaliar parâmetros importantes na instalação de um sistema fotovoltaico, sendo assim, este trabalho analisará os custos do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede da COSERN.

Em primeiro lugar, uma revisão bibliográfica relacionada ao assunto será realizada. A revisão da literatura será dividida em tópicos na qual será abordado assuntos importantes para o entendimento base sobre o assunto até o levantamento dos custos do ciclo de vida do sistema, expondo informações das mais diversas fontes para obter os resultados mais ricos possíveis. Também durante o período de revisão bibliográfica, uma descrição detalhada de todos os componentes presentes no sistema solar será descrita para entender melhor seu funcionamento e como é feita a geração distribuída. Para tornar a coleta de análise de dados o mais compreensível e coerente possível, o objetivo e a metodologia do trabalho serão detalhados.

2 OBJETIVOS

O intuito desse trabalho é fazer um levantamento do custo do ciclo de vida (LCCV) de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede da COSERN, para o fomento de uma avaliação significativamente melhor da eficácia de custo em longo prazo de um projeto em contrapartida a métodos de avaliação econômica clássica que se concentram apenas no investimento e nos possíveis benefícios de curto prazo. Desta forma, será feito o método de avaliação econômica para demonstrar por meio dos custos iniciais, custos de operação, custos de manutenção, custos de descarte e a definição dos custos totais junto a comparação do antes e depois do projeto solar para a definição de todos os custos referentes a alguns anos específicos para saber a viabilidade do projeto em estudo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentado todo o embasamento teórico necessário para a realização do presente trabalho, com base em uma revisão dos trabalhos já existentes sobre o tema abordado, que pode ser em livros, artigos, enciclopédias, monografias, teses e outros materiais cientificamente confiáveis.

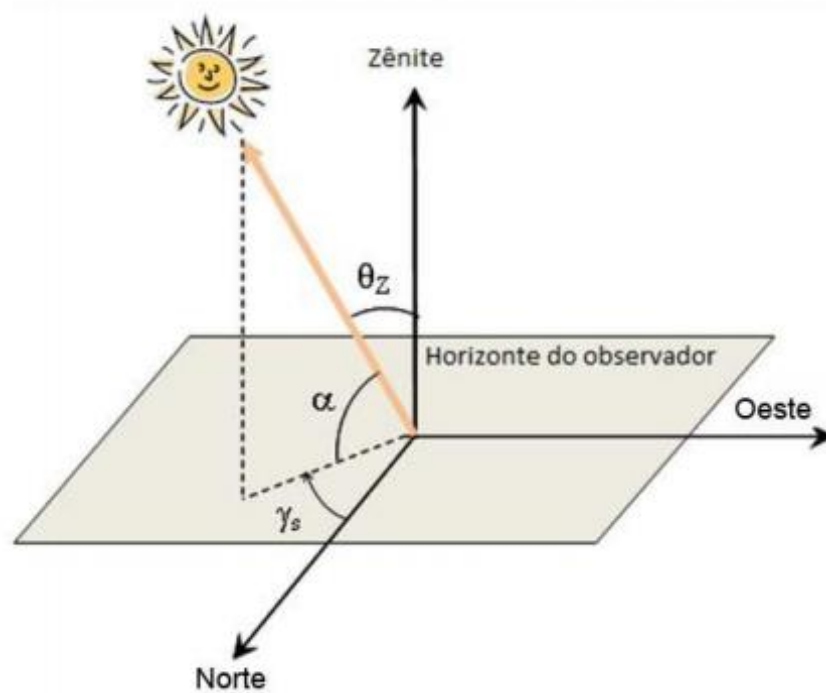
3.1 Energia Solar

A energia solar é conhecida como a energia obtida do Sol, por meio da sua geração em seu núcleo, as ondas eletromagnéticas, os fótons, chegam à superfície da Terra, de maneira direta ou difusa. A energia solar é considerada uma fonte de energia renovável, produzida pela luz e calor do Sol. Ela pode ser utilizada por diversas tecnologias que estão se aperfeiçoando constantemente, sendo considerada uma energia limpa e renovável, essa fonte de produção de energia é uma das que mais cresce no mundo atualmente. A energia solar é obtida pela conversão da radiação solar em energia elétrica por meio de materiais semicondutores, fenômeno denominado efeito fotovoltaico. Recebemos o suficiente de energia em forma de calor para atender às necessidades todos os anos em nosso planeta, porém não aproveitamos da melhor forma todos esses potenciais para o abastecimento da energia (WORUBY, 2018).

A energia solar representa uma grande fonte de energia. Ao considerar a energia solar, é importante notar que a fonte de quase toda a energia na Terra é o Sol. É importante ressaltar que a Terra recebe $1,5 \times 10^{18}$ kWh ao ano de energia solar, sendo que o consumo mundial de energia para este mesmo período é 10.000 vezes menor, sendo assim, esse fato indica que o Sol é uma fonte inesgotável de energia, possuindo um enorme potencial de utilização em várias formas de energia e mostrando que das energias renováveis a energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras (CRESESB, 2014).

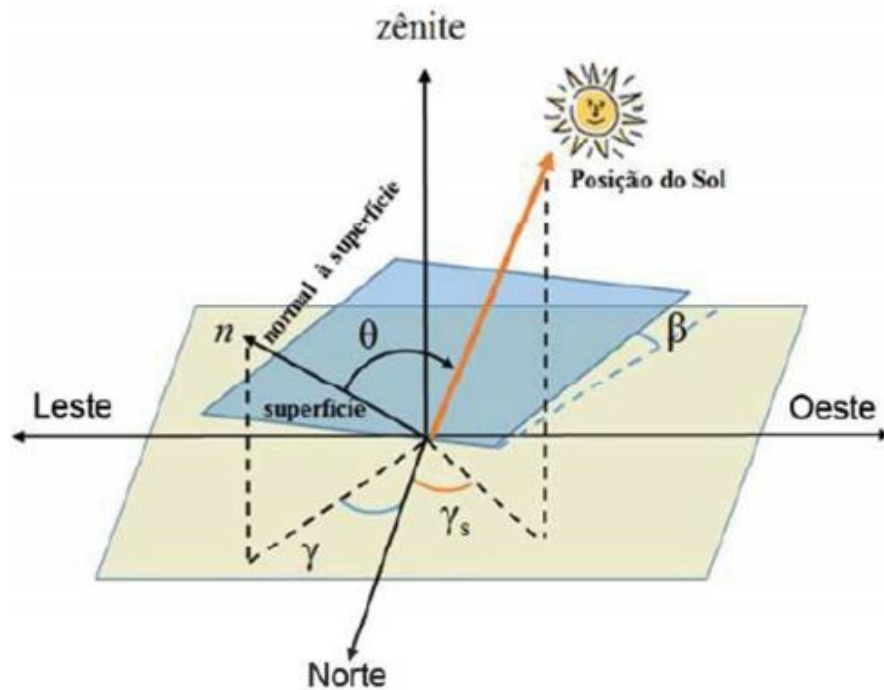
De acordo com a CRESESB (2014), as relações geométricas entre os raios solares variam de acordo com o movimento do Sol e a superfície terrestre, de modo que são descritas por alguns ângulos definidos a seguir e mostrados na Figura 1 e Figura 2.

Figura 1 - Relações geométricas entre os raios solares a superfície terrestre



Fonte: CRESCCEB, 2014.

Figura 2 - Relações geométricas entre os raios solares à superfície terrestre



Fonte: CRECESB, 2014.

- Ângulo Zenital (θ_Z): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite);

- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador);

- Ângulo Azimutal do Sol (γ_s): também chamado azimuth solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte (0°) geográfico, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste);

$$-180^\circ \leq \gamma_s \leq +180^\circ$$

- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas convenções do azimuth solar;

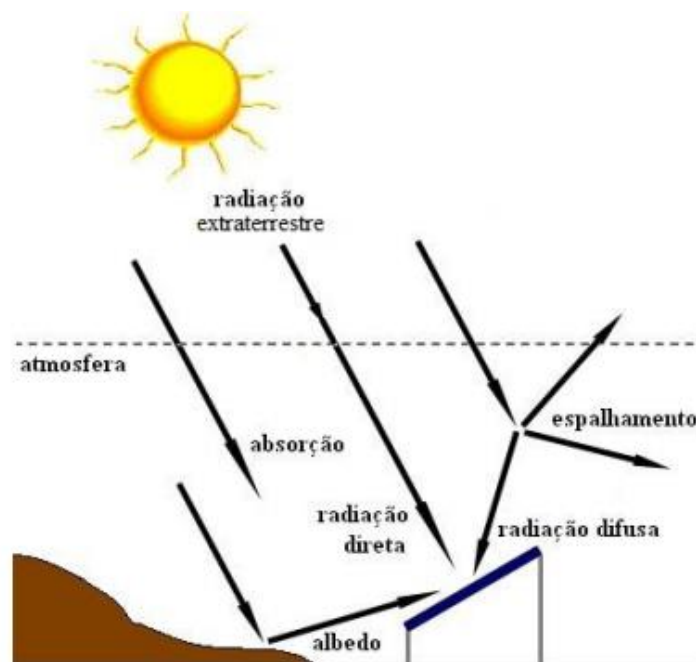
- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [0° 90°];

- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

Levando em consideração toda a radiação que chega à superfície da Terra, uma parcela da energia solar bate na atmosfera e nas nuvens e retorna para o espaço, a mesma é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa. A radiação direta é aquela que provém diretamente da direção do Sol, ou seja, é a fração da radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre sem sofrer qualquer tipo de alteração. A difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Uma observação interessante é que ainda que o dia esteja totalmente sem nuvens, cerca de 20% da radiação que atinge a superfície é difusa. Já em um dia totalmente nublado, não há radiação direta, e 100% da radiação é difusa (CRECESB, 2014).

De acordo com a inclinação da superfície em relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente, seja ele no solo, vegetação, obstáculos ou terrenos rochosos. O coeficiente de reflexão destas superfícies é chamado de “albedo”, e pode ser visto na apresentação Figura 3.

Figura 3 - Componentes da radiação solar



Fonte: CRECESB, 2014.

3.1.1 Efeito fotovoltaico

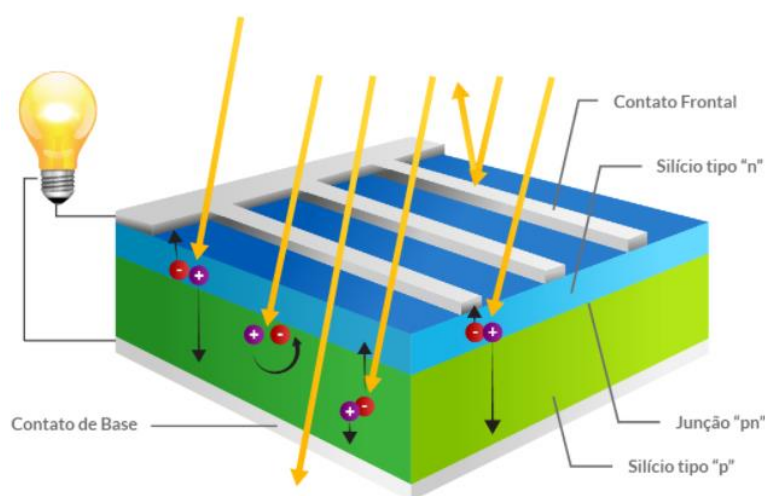
O efeito fotovoltaico foi descoberto por Edmond Becquerel em 1839, no decorrer dos anos algumas tecnologias foram sendo desenvolvidas e melhoradas até ser criada uma das aplicações mais promissoras que foi o uso da energia fotovoltaica para a geração de energia elétrica em satélites. Para definir se um local possui condições adequadas para instalações fotovoltaicas e garantir o seu maior aproveitamento, devem ser feitas algumas análises para saber a intensidade da radiação solar no local e suas alterações ao longo do ano, para isso precisa ser realizado um estudo com essas medidas. (CRESESB, 2014)

O efeito fotovoltaico é a geração por uma corrente ou tensão através da exposição à luz de um material semicondutor, tendo como exemplo o Silício. A junção de uma fina camada de Silício do tipo N e uma mais espessa do tipo P forma a chamada junção PN. A junção PN acontece quando os elétrons da parte N migram para a parte P até atingirem o equilíbrio elétrico da junção, quando são expostos à luz, absorvem fótons, que culminam na passagem de elétrons da camada de valência para a banda de condução, originando um campo elétrico interior à junção. Como consequência, uma corrente elétrica tende a atravessar a carga externa e o

valor desta corrente em relação à carga depende da intensidade luminosa disponível no momento (MELO, 2020).

A célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela mantém o fluxo de elétrons em um circuito elétrico enquanto possui uma incidência de luz sobre ela, denominando esse fenômeno como efeito fotovoltaico. Conforme é demonstrado na figura 4.

Figura 4 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica de silício cristalizado



Fonte: BLUE SOL, 2018.

3.2 Sistema fotovoltaico

O método tradicional de produção de eletricidade é centralizado e longe de pontos de consumo, causando assim as perdas ao longo do sistema de distribuição e levando o aumento dos custos de distribuição, trazendo danos ao meio ambiente e até mesmo as empresas. Quando falamos em energia fotovoltaica, pensamos na energia que está sendo produzida próximo do ponto de consumo, tornando a tecnologia mais convencional para produção da eletricidade (RODRIGUES, 2002).

A geração de energia elétrica com a utilização dos módulos fotovoltaicos é dividida em duas categorias que são conhecidas como: Off-Grid (isolado) e Grid-Tie (On-Grid). A escolha entre os dois modos é determinada de acordo com a disponibilidade ou necessidade do consumidor e da rede de distribuição próxima ao

local. Sendo assim, as decisões do modo escolhido afetam diretamente o custo geral do sistema fotovoltaico (MELO, 2020).

3.2.1 Sistema de geração fotovoltaico Off-Grid (isolado)

O sistema OFF-GRID, conforme é mostrado na Figura 5, têm toda a energia que foi gerada armazenada nas baterias, garantindo o funcionamento do sistema durante os períodos de incidência solar insuficiente. O método de funcionamento desse sistema é o seguinte: O sistema captura a luz solar por meio dos painéis fotovoltaicos e gera a eletricidade a partir da corrente contínua. Essa energia passa pelo controlador de carga responsável pela proteção das baterias evitando que alguma descarga profunda sobrecarregue o sistema, toda essa energia será armazenada por um conjunto de baterias que será convertida para corrente alternada através do inversor de frequência que a converte de corrente contínua para corrente alternada e logo em seguida estará disponível para o consumo (JÚNIOR e SOUZA, 2018).

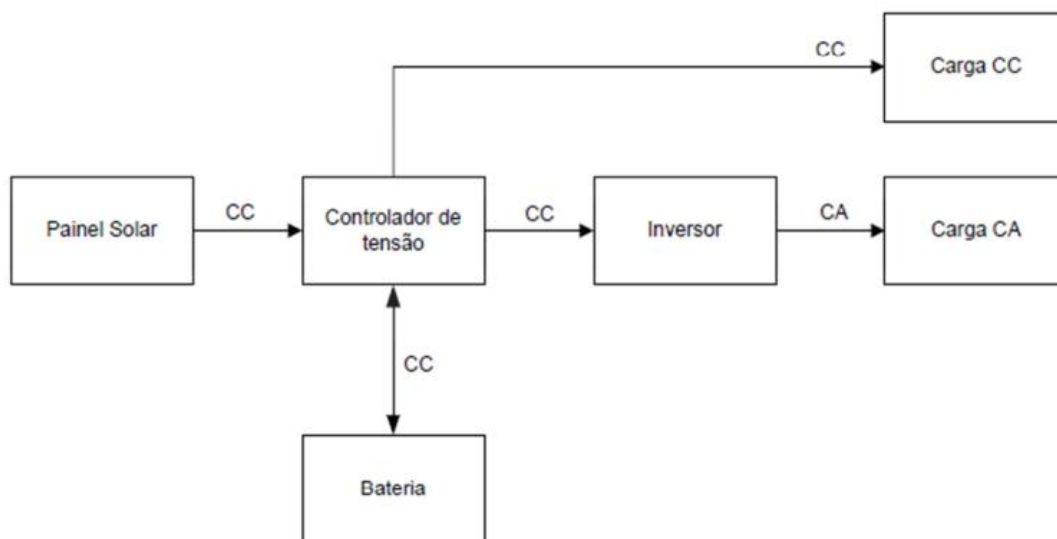
Figura 5 - Sistema Off-Grid (Isolado)



Fonte: MELO, 2020.

Em seguida, na figura 6, têm-se um diagrama que representa a operação de um sistema Off-Grid alimentando cargas CC e CA.

Figura 6 - Diagrama um sistema fotovoltaico Off-Grid



Fonte: GOETZE, 2017.

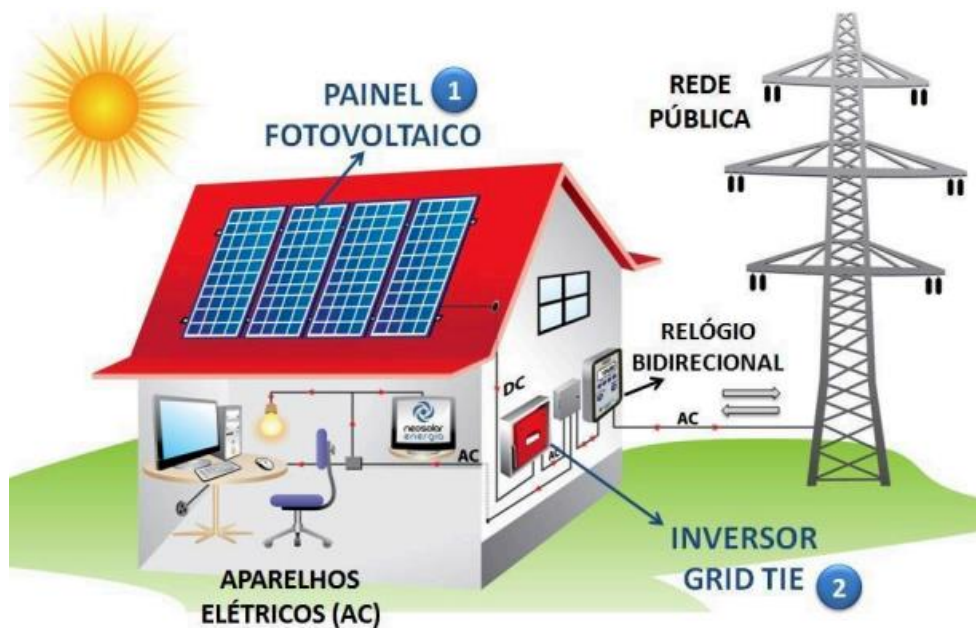
3.2.2 Sistema de geração fotovoltaico Grid-Tie (On-Grid)

O sistema Grid-Tie (On-Grid) ou também conhecido como sistema conectado à rede, são aqueles que possuem interligação com a rede de distribuição da concessionária local e serão a principal finalidade do estudo abordado neste trabalho.

O sistema On-grid é diferente do Off-grid, e pode ser visto na figura 7 que esse tipo de sistema não tem a necessidade de armazenamento de energia por meio de baterias. O principal objetivo do sistema é reduzir os custos de energia elétrica, podendo também criar créditos de energia junto à concessionária, tendo em virtude a garantia de fornecimento de energia da rede da concessionária caso as condições de irradiação solar não sejam favoráveis. Esse tipo de sistema contém um medidor bidirecional, que é fornecido pela concessionária local, tendo como função fazer a leitura do consumo e do excedente de energia gerada pelo local na qual está instalado o sistema, quadro de distribuição e de entrada e também da *stringbox*: que é um equipamento de proteção contra surtos, descargas atmosféricas e curtos-circuitos (MELO, 2020).

Os painéis fotovoltaicos podem ser instalados em qualquer edificação, desde que apresentem uma orientação solar favorável realizado por meio de um estudo do local, ou seja, que estejam voltadas para norte, leste ou oeste, sendo a orientação ideal que as superfícies dos painéis fotovoltaicos estejam voltadas para o norte geográfico, no hemisfério sul, pois essa orientação possibilita uma maior captação da energia produzida pelo Sol (JÚNIOR e SOUZA, 2018).

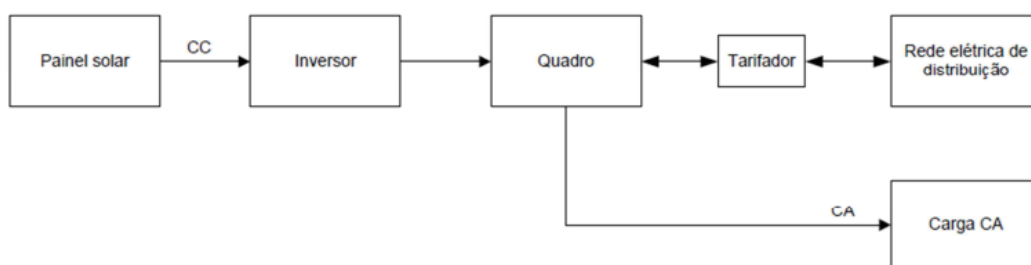
Figura 7 - Sistema conectado à rede (On-Grid ou Grid-Tie)



Fonte: MELO, 2020.

Em seguida, na figura 8, têm-se um diagrama que representa a operação de um sistema conectado à rede.

Figura 8 - Diagrama de um sistema conectado à rede de distribuição



Fonte: GOETZE, 2017.

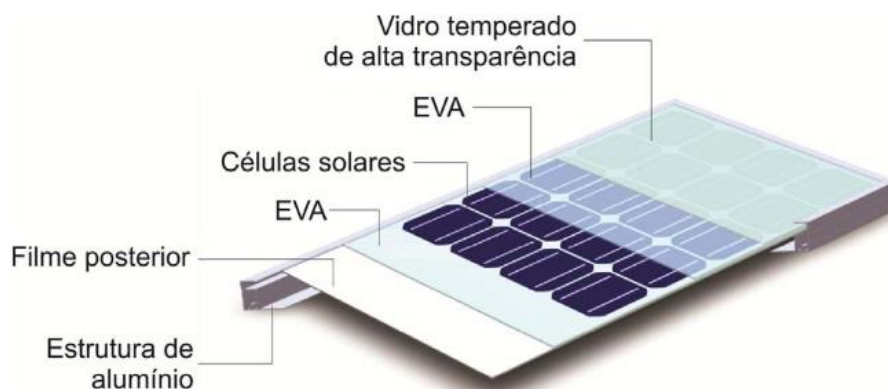
3.3 Componentes do sistema solar fotovoltaico conectado à rede (On-Grid)

Nesta seção serão descritos os componentes do sistema solar fotovoltaico conectado à rede, desde a captação da energia pelo sol, até a conversão em energia elétrica, em corrente alternada, proteção e segurança. Descrevendo de maneira detalhada cada função dos componentes.

3.3.1 Módulos Fotovoltaicos

Segundo a norma da ABNT (2013) NBR 10899, a definição de módulo fotovoltaico consiste em um conjunto de células fotovoltaicas que são interligadas eletricamente e encapsuladas, com o intuito de absorver a energia do sol e gerar energia elétrica, sendo o módulo fotovoltaico composto por diversas camadas que são apresentadas na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Camadas de um módulo fotovoltaico



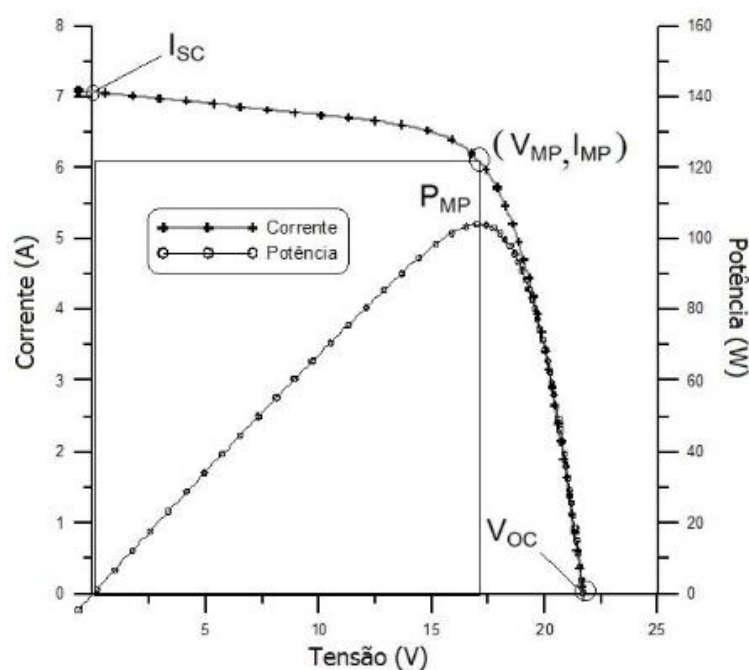
Fonte: CRESESB, 2014.

Para conseguir obter a maior captação solar ao longo do ano, é necessário ter atenção para a direção e inclinação do painel solar. Para obter o melhor ângulo de inclinação para as placas solares, é necessário prestar atenção na variação de acordo com a mudança da altura solar na latitude especificada ao longo do ano. No Brasil é de costume utilizar a inclinação equivalente à latitude do local selecionado e nunca menor que 15°, pois dessa maneira é possível facilitar a limpeza dos módulos. É importante lembrar dos locais que costumam ter muita poeira, pois é

necessário realizar a limpeza da superfície dos módulos regularmente, pois a sujeira é um fator que afeta na captação de luz gerando uma consequência negativa para os módulos, reduzindo o seu desempenho e sua geração (BESSO, 2017).

Um módulo fotovoltaico é identificado pela sua potência elétrica de pico (Wp), mas pode ser observado um conjunto de características. As grandezas elétricas utilizadas para caracterizar um módulo são características que dependem de certas condições como, temperatura e irradiância solar. Quando um módulo está posicionado na direção do Sol, uma tensão pode ser medida entre os terminais positivo e negativo usando um voltímetro, observando a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e ao conectar os terminais desse módulo a um amperímetro mede-se sua corrente de curto-circuito (I_{sc}). Mas um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica I-V. Outra curva importante é de potência em função da tensão, chamada de P-V, que identifica o ponto com o valor máximo de potência, esse ponto corresponde um ponto na curva I-V, com valores de tensão e corrente denominados tensão e corrente de máxima potência (V_{MP} , I_{MP}) (CRESESB, 2014). Pode-se observar na Figura 10 a seguir.

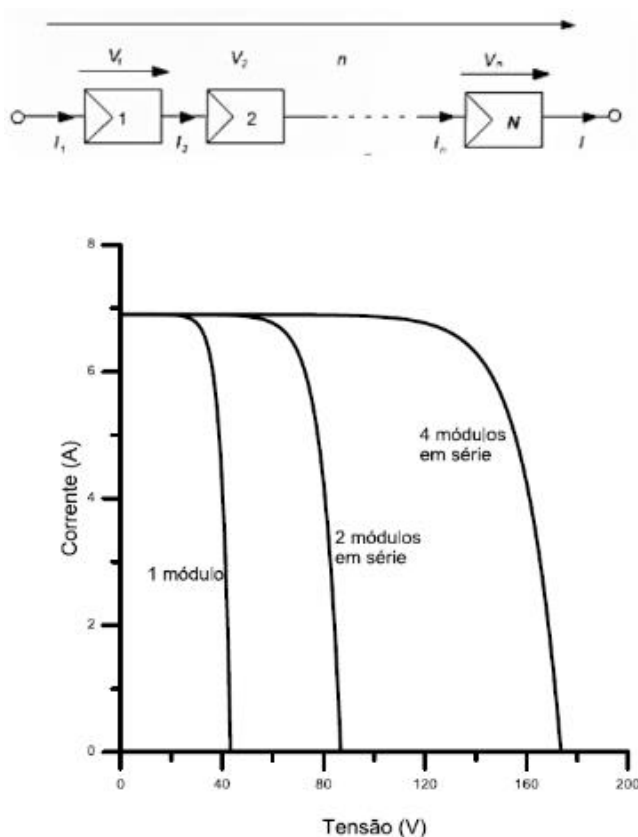
Figura 10 - Curva característica I-V e curva de potência P-V



Fonte: CRESESB, 2014.

Para obter a maior geração de energia requer combinação de painéis fotovoltaicos para otimizar o processo, de modo que pode ser conectado em série ou paralelo. Organizado em série são conectadas as placas de modo que o terminal positivo do módulo seja conectado ao terminal negativo de outro módulo idêntico. Desta forma, obtêm-se o somatório das tensões correspondente a cada módulo e a corrente permanece a mesma em todo sistema. A relação é mostrada na curva da Figura 11.

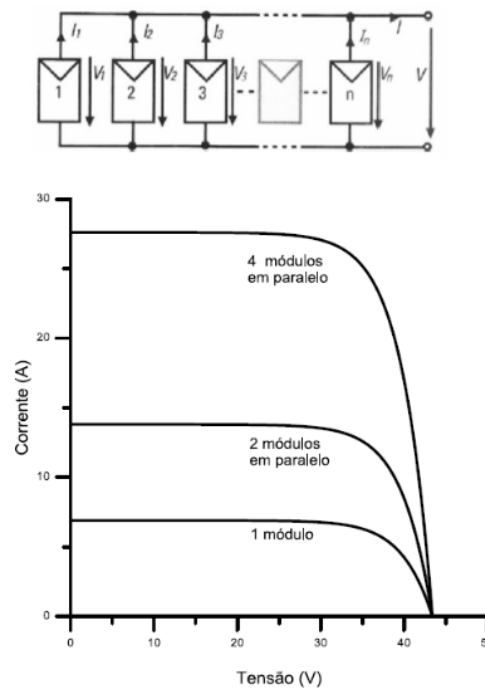
Figura 11 - Curva I-V e arranjo dos módulos em série



Fonte: BESSO, 2017.

A associação em paralelo é realizada são conectados todos os terminais positivos dos módulos entre si e fazendo o mesmo com os terminais negativos. Diferente do que acontece na associação em série, a corrente final do sistema é a soma das correntes e a tensão permanece a mesma. Pode-se observar o arranjo dos módulos e a curva I-V na Figura 12.

Figura 12 - Curva I-V e arranjo dos módulos em paralelo



Fonte: BESSO, 2017.

3.3.2 Inversores

Os inversores são equipamentos eletrônicos utilizados para converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), são construídos com auxílio de dispositivos semicondutores de potência e compostos de chaves eletrônicas controláveis. Essas chaves possuem as seguintes características: bloqueia elevadas tensões; conduz elevadas correntes, com mínima queda de tensão (baixa resistência); muda instantaneamente do estado de condução para bloqueio ou vice versa; demandando baixa potência em direção ao sinal de controle (BESSO, 2017). O símbolo do inversor é apresentado abaixo na Figura 13.

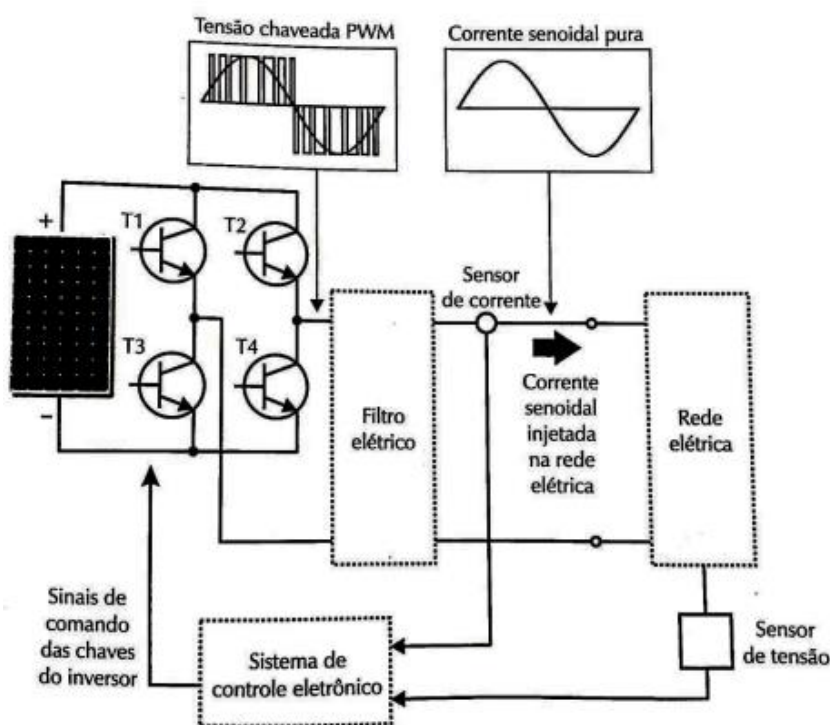
Figura 13 - Símbolo do inversor



Fonte: SILVA, 2015.

O inversor é um dos principais equipamentos do sistema de energia solar e são responsáveis pela conversão CC-CA, ou seja, corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). É responsável também de garantir a segurança do sistema e medir a energia produzida pelos painéis solares, suas principais características são: número máximo de *strings* na entrada, frequência da rede elétrica, distorção de corrente injetada na rede, grau de proteção, número de entradas por MPPT, tensão de operação na conexão com a rede, temperatura de operação, potência de corrente alternada na saída, potência de corrente continua na entrada e rendimento/eficiência (CASSIANO, 2020). Na figura 14 é mostrado o funcionamento do inversor CC-CA.

Figura 14 - Funcionamento do inversor CC-CA



Fonte: MELO, 2020.

3.3.3 String Box

A *string box* é um equipamento com a função de servir como dispositivo de proteção. Sua composição pode ser alterada de acordo com o projeto ou inversor utilizado, pois alguns já vem com a string box integrada, normalmente é montado dentro de uma caixa com proteção e isolamento adequados. Possui entradas CC,

que estão relacionadas aos cabos vindos das *strings* e conta com fusíveis, chaves seccionadoras CC e DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos). Um exemplo de String Box é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - String box



Fonte: Autoria própria, 2021.

3.3.4 Medidor bidirecional

Um medidor bidirecional é o componente básico de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede. Ao contrário dos medidores de eletricidade tradicionais (também chamados de relógios), o medidor de resultado de imagem do medidor bidirecional pode medir não apenas a energia consumida pelo dispositivo, mas também a energia injetada na rede. Para casas com energia solar, o medidor bidirecional medirá toda a energia (em quilowatt-hora) que é injetada na rede pela usina fotovoltaica instalada na propriedade (SOLIS, 2019). O medidor bidirecional é mostrado na figura 16.

Figura 16 - Medidor bidirecional



Fonte: Autoria própria, 2021.

O medidor bidirecional apresenta duas medições: a de energia consumida (normalmente identificada pelo código 003) e a energia injetada (normalmente identificada pelo código 103). Na figura 17 temos o seguinte exemplo, foram consumidos 655 kWh e injetados 827 kWh.

Figura 17 - Medições do medidor bidirecional



Fonte: SOLIS, 2019.

3.4 Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR)

O Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) não faz a utilização de baterias para o armazenamento de energia, porque toda sua geração é entregue diretamente à rede da concessionária (CRESESB, 2014).

O SFVCR em baixa ou média tensão contribui com a geração distribuída (GD), além disso, colabora a disponibilizar energia próxima ao ponto de consumo. Dessa maneira, o sistema conectado à rede elétrica da concessionária é visto como armazenador, devido ao fato de toda a energia gerada ser colocada em paralelo com a energia da rede (SIQUEIRA e SANTOS, 2016).

De acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, os consumidores podem gerar sua própria eletricidade a partir de energia renovável ou cogeração qualificada e podem até fornecer eletricidade excedente à sua rede de distribuição local. Trata-se do micro e da minigeração distribuídas de energia elétrica, e a inovação pode combinar economia financeira, consciência social e ambiental e desenvolvimento autossustentável.

3.4.1 Sistema de microgeração distribuída

Conforme a Resolução normativa nº 687/2015, a ANEEL considerada como microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (Resolução nº 482, 2015 – ANEEL).

3.4.2 Sistema de minigeração distribuída

Conforme a Resolução normativa nº 687/2015, a ANEEL considerada como minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5MW e que utiliza cogeração qualificada ou energia renovável que atenda aos regulamentos da ANEEL para se

conectar à rede de distribuição por meio da instalação de unidades consumidoras (Resolução nº 482 em 2015-ANEEL).

3.4.3 Sistema de compensação

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o sistema de compensação de energia elétrica. O sistema permite que a energia excedente gerada por unidades consumidoras de micro ou microgeração de energia sejam injetadas em uma rede de distribuição, gerando assim um modo de armazenamento desse excedente.

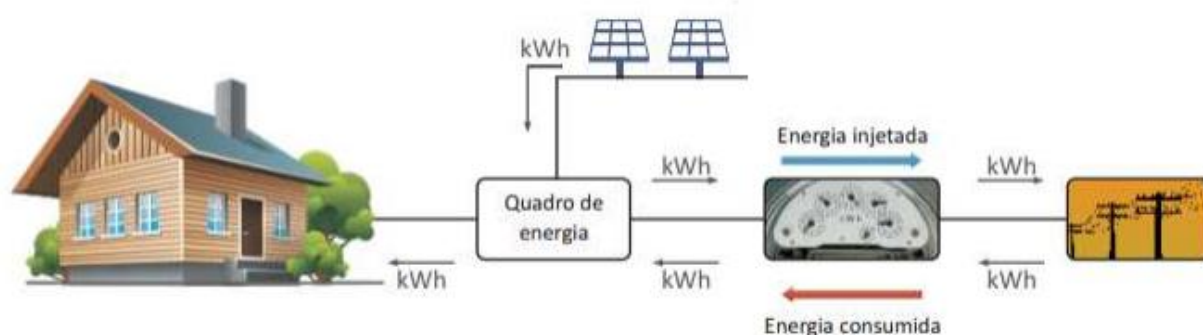
De acordo com a Resolução Normativa 414 de 2010, da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), fica estipulado:

- Residências com padrão monofásico: valor referente ao consumo de 30 kWh;
- Residências com padrão bifásico: valor referente ao consumo de 50 kWh;
- Residências com padrão trifásico: valor referente ao consumo de 100 kWh.

De acordo com a ANEEL (2012), os sistemas fotovoltaicos devem ser submetidos a um sistema de compensação de energia onde a quantidade de energia gerada em um mês for maior do que a energia consumida naquele mês, o consumidor ficará com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses posteriores.

Os créditos guardados pela unidade geradora ou qualquer outra unidade que esteja dentro do rateio do sistema, tem um prazo de validade em torno de 60 meses, podendo ser utilizados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular, por mais que sejam em outras localidades, de modo que essa área de atendimento seja correspondente a mesma distribuidora. Um esquema do sistema de compensação é mostrado na figura 18.

Figura 18 - Esquema de compensação



Fonte: Cadernos Temáticos ANEEL

3.4.4 Geração Compartilhada

De acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015, a geração compartilhada de energia da ANEEL é caracterizada por consórcio ou cooperativa formada por pessoas físicas ou jurídicas da mesma área de concessão ou licenciamento, que reúna consumidores. O consórcio ou cooperativa possui unidades consumidoras de microgeração ou minigeração de energia distribuída em locais diferentes das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015).

O consórcio de geração distribuída de energia reúne empresas e pessoas jurídicas, firma contratos e usufrui das vantagens do compartilhamento de recursos. De acordo com a Lei nº 6.404, de 15 de dezembro de 1976, o consórcio deve estar cadastrado no CNPJ e ser proprietário da unidade consumidora (UC) que instalará o gerador. Além disso, a regulamentação da ANEEL também permite que consórcios que visam prover acesso ao consumo de bens e serviços ingressem no sistema de compensação. Desta forma, o administrador passará a ser o dono da instalação do UC (LIMA, 2018).

O uso de energia compartilhada facilita a produção de energia solar em maior escala. Porque, com este modelo generativo, o problema do espaço na qual será instalado foi resolvido, por meio da sua instalação longe das unidades consumidoras, por exemplo em sítios e fazenda, ajudando aqueles que não têm muitos recursos para apoiar o custo inicial fixo para promover o investimento em energia solar.

3.5 Análise do Custo de Ciclo de Vida (ACCV)

Todos os bens obtidos, têm-se um ciclo de vida útil, tempo em que o produto não será mais capaz de realizar sua função originalmente esperada devido ao desgaste, tendo um custo elevado durante o período de uso ou para manter em funcionamento, tornando-se cada vez mais comum agora, principalmente para produtos eletrônicos, devido à tecnologia desatualizada. Na maioria das vezes, as pessoas não têm o hábito de verificar essas despesas com base em suas decisões de compra, mas é aconselhável agir de maneira inteligente e acompanhar o ciclo de vida econômico para que possa ter um retorno esperado (NETO, 2018).

A Análise de Custo do Ciclo de Vida (LCCA) é uma técnica de avaliação adequada para considerar certas decisões de investimento, pois a LCCA ajuda a determinar a melhor relação custo-benefício para a execução de um projeto. Os cálculos do custo do ciclo de vida precisam definir a lucratividade a longo prazo do produto de forma mais clara; demonstrar a eficiência do planejamento do ciclo de vida; quantificar o impacto do custo das alternativas selecionadas nas fases de engenharia e alocar os custos técnicos aos produtos que usam isto (SOUZA, 2017).

Uma análise de engenharia econômica mostra que o aumento da eficiência energética trará custos adicionais de fabricação. Estes devem ser ponderados em relação aos custos da energia referentes às metas de redução. O procedimento de engenharia econômica não estipula que o fabricante deva utilizar a opção técnica (ACCV) utilizada na análise para atender ao padrão de eficiência energética, assegura que existe pelo menos um caminho prático para atingir o padrão. Uma vez que a análise de engenharia econômica é completada, analisam-se os impactos econômicos dos potenciais e melhorias em eficiência energética para os consumidores, utilizando as metodologias de período de retorno do investimento (*payback period*) e ACCV (QUEIROZ *et al.*, 2004).

O ACCV usa o custo do ciclo de vida (LCC) como ferramenta, que é a soma dos seguintes custos de compra (P) e custos operacionais anuais com desconto (O) ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento (N, em anos). Comparado com o *payback period*, o CCV inclui a consideração de dois fatores adicionais, vida útil do equipamento e taxa de desconto consumidor (QUEIROZ *et al.*, 2004).

A equação geral para o caso seguinte é mostrada abaixo:

$$CCV = C_{inicial} + C_m + C_{rep} + C_d - C_e$$

Onde:

$C_{inicial}$ = Custos iniciais referentes a compra, mão de obra e instalação dos equipamentos;

C_m = Custos referentes à manutenção dos equipamentos presentes no sistema;

C_{rep} = Custos de reposição de peças e equipamentos ao longo da vida útil do sistema;

C_d = Custos referentes ao descarte pós vida útil do sistema fotovoltaico;

C_e = Energia gerada pelo sistema fotovoltaico durante toda sua vida útil.

4 METODOLOGIA

No presente trabalho são utilizados métodos quantitativos e qualitativos que, segundo Zanella (2009), são estudos complementares e podem ser utilizados em conjunto. Também será apresentado o estudo de viabilidade econômica do sistema de geração de energia solar, avaliando tecnicamente e economicamente por meio de um estudo de caso a implementação de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede da COSERN na cidade Mossoró, Rio Grande do Norte, levando em consideração o levantamento do custo do ciclo de vida (ACCV).

Como a metodologia visou obter uma revisão da literatura, os procedimentos de toda a pesquisa desse trabalho foram separados por etapas e alcançando o maior número de publicações relacionadas ao tema. O trabalho foi desenvolvido seguindo um planejamento sequencial de atividades conforme descrito abaixo:

1. **Definição do local:** Nessa etapa foi definido o local do estudo como sendo uma residência na cidade de Mossoró.
2. **Levantamento do consumo:** Após definição do local, foi realizado um levantamento do consumo da residência através da fatura de energia elétrica da concessionária, durante o período de 12 meses.
3. **Dimensionamento do sistema:** Nessa etapa foi dimensionamento

o sistema para saber qual a potência total do sistema, quantidade de módulos necessários e a área mínima exigida.

4. Definição dos equipamentos do sistema: Nessa etapa foi estabelecido o modelo do inversor, módulo fotovoltaico e estruturas utilizadas no sistema.

5. Levantamento dos custos do ciclo de vida: Nessa etapa foi realizada um levantamento dos custos do ciclo de vida do sistema, sendo levado em consideração os custos iniciais referentes a compra, mão de obra e instalação dos equipamentos, custos referentes à manutenção dos equipamentos, custos de reposição de peças e equipamentos ao longo da vida útil do sistema, custos referentes ao descarte pós vida útil do sistema fotovoltaico, energia gerada pelo sistema fotovoltaico durante toda sua vida útil e por fim algumas tabelas com a definição de todos os custos referentes a alguns anos específicos.

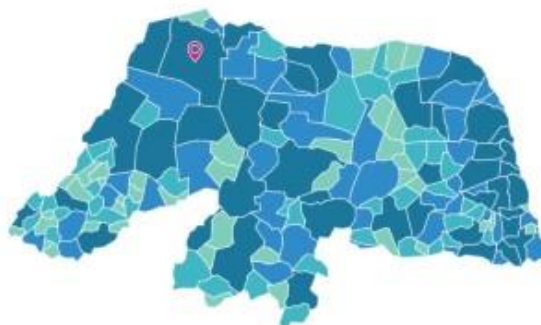
5 ESTUDO DE CASO

Nesse tópico será definido alguns critérios do sistema fotovoltaico em estudo, como a descrição da localidade de instalação, perfil de consumo com base na fatura de energia do local e os dados meteorológicos da cidade correspondente aos 12 meses do ano, mostrando qual é o melhor mês de irradiação solar.

5.1 Descrição da Localidade

De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade de Mossoró está situada no interior do estado do Rio Grande do Norte, na região Nordeste do Brasil, sua área corresponde a um total de 2.110,207 quilômetros quadrados, o que lhe dá o título de maior município do estado do Rio Grande do Norte, em termos de extensão territorial. A figura 20 mostra a localização da cidade de Mossoró.

Figura 19 - Localização da cidade de Mossoró



Fonte: IBGE, 2018

5.2 Perfil de Consumo

O estudo de caso foi realizado para uma residência unifamiliar na Rua Camilo Paula, Nova Betânia, na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte. Será avaliado a alternativa de fornecimento integral do consumo médio das faturas de setembro/2020 até agosto/2021, com a configuração do sistema fotovoltaico conectado à rede “*grid-tie*”.

Para melhor compreensão, o histórico de consumo do projeto que foi usado neste trabalho são os seguintes:

Tabela 1- Histórico de consumo durante um ano (2020-2021)

Ano	Mês	Consumo (kWh)
2021	Agosto	362
2021	Julho	385
2021	Junho	380
2021	Maio	402
2021	Abril	401
2021	Março	378
2021	Fevereiro	389
2021	Janeiro	415
2020	Dezembro	400
2020	Novembro	383
2020	Outubro	392
2020	Setembro	422
Média		392,41 (kWh)

Fonte: Autor, 2021.

5.3 Dados Meteorológicos

O programa *SunData* destina-se ao cálculo da irradiação solar média diária mensal em qualquer parte do território nacional e constitui o CRESESB como uma ferramenta de apoio às tentativas de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. O dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede determina a capacidade de geração necessária para o consumo estimado, para esse fim, é utilizada a média de irradiação diária. De acordo com os dados inseridos no *SunData* (CRESESB) foi determinado os valores médios mensais da radiação para a cidade de Mossoró descrito na Tabela 2.

Tabela 2- Dados mensais de irradiação média em Mossoró

Mês	Irradiação solar média
	(kWh/m ² /dia)
Janeiro	5,85
Fevereiro	5,86
Março	5,93
Abril	5,56
Maio	5,26
Junho	4,93
Julho	5,21
Agosto	5,86
Setembro	6,24
Outubro	6,39
Novembro	6,45
Dezembro	6,08

Fonte: Autor, 2021.

5.4 Dimensionamento do sistema

Para uma instalação de um sistema fotovoltaico, é importante dimensionar determinados parâmetros com o objetivo de otimizar os componentes do sistema e atender toda a necessidade da residência na qual será instalado.

De acordo com Pereira (2017), é importante definir o montante de energia a ser gerada, levando em consideração que uma geração de energia mensal de 137 kWh é equivalente para cada kWp instalado. Essa consideração feita foi testada também em uma tabela de dimensionamento considerando as perdas do sistema para nível de comparação e observar se os kWp do sistema e a quantidade de módulos iriam coincidir.

$$P_t = \frac{C_{mensal}}{r}$$

$$P_t = \frac{392,41}{137} = 2,86 \text{ kWp}$$

Onde;

P_t = Potência total do sistema (Wp);

C_{mensal} = Energia gerada ao mês (Wh);

r = Relação entre geração e capacidade do sistema (Wh/Wp).

Para obter a energia gerada ao mês foi utilizado a média aritmética da fatura de energia do período compreendido entre maio de 2021 e junho de 2020, totalizando um período de 12 meses. Com a potência total do sistema e com potência nominal individual dos painéis, pode-se calcular a quantidade de painéis necessários no sistema a ser instalado.

$$Np = \frac{P_t}{P_m}$$

$$Np = \frac{2,86 \cdot 1000}{400} = 7,16 \cong 8 \text{ módulos}$$

Onde;

Np = Número de painéis;

P_t = Potência total do sistema (Wp);

P_m = Potência individual do módulo (Wp);

A partir da quantidade e disposição dos painéis fotovoltaicos é obtida a área necessária para alocação do conjunto de painéis.

$$A_T = Np * Ap$$

$$A_T = 8 * (1,979 * 1,002)$$

$$A_T = 15,86 \text{ m}^2$$

Onde;

A_T = Área mínima total da instalação (m²)

Np = Número de painéis;

Ap = Área (comprimento x largura) do painel fotovoltaico utilizado (m²)

5 LEVANTAMENTO TÉCNICO

O levantamento técnico do sistema fotovoltaico é realizado de acordo com etapas construtivas para determinar a quantidade de energia elétrica gerada. Definido os equipamentos a serem utilizados no sistema, foram escolhidos os seguintes modelos de inversores, módulos fotovoltaicos e *string box* a serem utilizados e as determinadas estruturas necessárias para montagem do sistema solar.

5.1 Inversor

O inversor é um dos componentes mais importantes do sistema fotovoltaico, necessário ser bem escolhido para garantir toda segurança e conseguir um melhor aproveitamento de toda energia gerada pelas placas. O inversor escolhido pertence a *Growatt*, líder mundial em soluções de energia inteligente, fundada em 2010 na China e tem uma produção anual de 20 GW.

O modelo escolhido denomina-se MIC 3000TL-X, representado na Figura 20, o qual tem eficiência máxima de 97,6%, possui uma *string* por MPPT e possui monitoramento por meio de um *datalogger* conectado à internet na qual passa informações via aplicativo que pode ser baixado em qualquer smartphone ou acompanhar pelo site oficial do fabricante utilizando um computador.

Figura 20 - Inversor Growatt MIC 3000TL-X



Fonte: Manual growatt, 2018.

A Figura 21 e a Tabela 3 apresentam dados referentes ao inversor escolhido, os quais foram retirados do manual fornecido pelo site do fabricante. Foi determinado apenas um inversor no sistema, pois esse modelo possui as características essenciais para o funcionamento e proteção do sistema.

Figura 21 - Etiqueta growatt MIC 3000TL-X

 PV Grid Inverter	
Model name	MIC 3000TL-X
Max. PV voltage	550 d.c.V
PV voltage range	65 V-550 d.c.V
PV Isc	16 d.c.A
Max. input current	13 d.c.A
Max. output power	3000 W
Max. apparent power	3000 VA
Nominal output voltage	230 a.c.V
Max. output current	14.3 a.c.A
Nominal output Frequency	50/60 Hz
Power factor range	0.8leading~0.8lagging
Safety level	Class I
Ingress Protection	IP65
Operation Ambient Temperature	-25°C - +60°C
CE, VDE0126-1-1, VDE-AR-N4105, UTE2013, EN 50438 IEC62116, IEC61727	
	
Made in China	

Fonte: Manual growatt, 2018.

Tabela 3 - Detalhes sobre a etiqueta

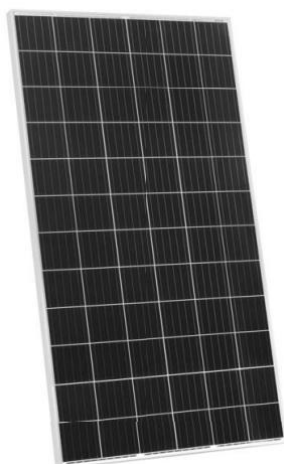
Nome do modelo	MIC 3000TL-X
Máxima tensão de entrada CC	500V
Máxima corrente de entrada CC	13A
Tensão de partida	80V
Faixa de tensão MPP	65V~550V
Tensão nominal CA	230V
Frequência de rede CA	50/60Hz
Máx. potência aparente	3000VA
Corrente normal de saída CA	14,3A

Fonte: Adaptado de manual growatt, 2018.

5.2 Módulos

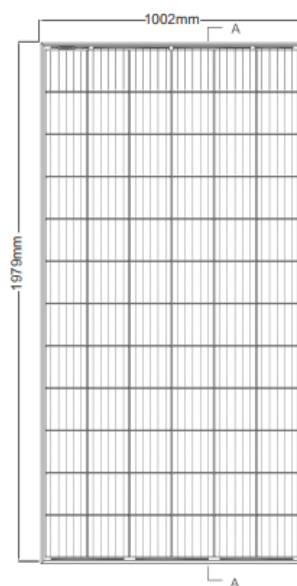
Os módulos fotovoltaicos escolhidos para a instalação são os módulos de 400Wp da Jinko Solar. Esta escolha deve ser baseada na garantia de confiabilidade de fabricação fornecida pela empresa por possuir a certificação necessária para atender padrão mundial. O modelo dos módulos escolhidos é o JINKO SOLAR JKM400M-72-V mostrado na Figura 22 e Figura 23 e os detalhes são mostrados na Tabela 4.

Figura 22- Módulo Jinko JKM400M-72-V



Fonte: Datasheet Jinko, 2020

Figura 23 - Medidas módulo Jinko JKM400M-72-V



Fonte: Datasheet Jinko, 2020

Tabela 4 - Especificações sobre o módulo

Tipo de módulo	JKM400M-72-V
Potência máxima (P _{máx})	400Wp
Tensão de potência máxima (V _{mp})	41.7V
Corrente de potência máxima (I _{mp})	9.60A
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	49.8V
Corrente de curto-circuito (I _{sc})	10.36A
Eficiência do módulo STC (%)	20.17%
Temperatura de operação (°C)	-40°C~+85°C
Tensão máxima do sistema	1500VDC (IEC)

Fonte: Adaptado de datasheet Jinko, 2020.

5.4 Estrutura de suporte

É uma infraestrutura que fornece suporte e agrupamento de painéis fotovoltaicos, auxilia na ligação entre eles e fixa os painéis ao solo ou edifícios integrados. A estrutura de suporte sugerida para sistema fotovoltaico do trabalho é um suporte composto por trilhos de alumínio, juntamente com *clamps* e parafusos.

Para uma estrutura de solo é usado uma estrutura em aço galvanizado a fogo para ancoragem das placas, nas figuras 24, 25 e 26 a seguir tem-se exemplos de estruturas de suporte.

Figura 24 - Estrutura de suporte no telhado



Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 25 - Estrutura de solo



Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 26 - Estrutura de solo



Fonte: Autoria própria, 2021

6 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DO CICLO DE VIDA (LCCV)

De acordo com o Manual do Custo do Ciclo de Vida, existem inúmeros custos associados à aquisição, operação, manutenção, descarte de uma instalação, qual desses custos precisa ser incluído é uma das primeiras decisões a serem feitas ao realizar um levantamento dos custos do ciclo de vida (LCCV). Não é necessário incluir todos os custos relacionados ao projeto, apenas os custos que são relevantes para a decisão e significativos em valor são necessários para tomar uma decisão de investimento válida. Os custos são relevantes para a decisão quando eles mudam de alternativa para alternativa e os que são aproximadamente iguais não serão um fator determinante na escolha entre as alternativas e, portanto, podem ser omitidos do cálculo.

O ACCV permite que você organize e calcule os custos de aquisição, propriedade, operação, manutenção e, por fim, descarte de uma instalação, sistema ou equipamento, depois de ter estimativas de custo, por ano, uma taxa de desconto e um período de estudo definido o cálculo poderá ser realizado.

6.1 Custos Iniciais

Os custos na fase de planejamento, construção ou aquisição do projeto são considerados como custos de investimento inicial, eles geralmente ocorrem antes que um sistema seja colocado em funcionamento. Os custos que surgem a partir da operação, manutenção, reparo, substituição e uso de uma instalação ou sistema durante sua ocupação ou período de serviço são custos futuros. Os valores residuais no final da vida do sistema ou no final do período de estudo, também são custos futuros.

O custo inicial de implementação de um sistema solar é bastante alto. Portanto, o investidor precisa garantir a segurança dos gastos e análises financeiras ativas sobre o retorno do seu investimento. Após o dimensionamento sistema fotovoltaico, é necessário que descreva em detalhes os componentes necessários para cada etapa do investimento, com a finalidade de realizar o estudo de viabilidade econômica, o orçamento do sistema foi baseado no preço de mercado atual para cada componente do sistema fotovoltaico. O orçamento dos custos iniciais considerando os equipamentos principais para o projeto encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Equipamentos para o projeto solar

Produto	Quantidade	Preço unidade (R\$)	Preço total (R\$)
Inversor Growatt MIC 3000TL-X	1	3927,51	3927,51
Módulo Jinko JKM400M-72-V	8	820,05	6540,40
String Box 1E/1S DC Clamper	1	542,43	542,43
TOTAL			11.010,34

Fonte: Autor, 2021.

Os custos de instalação de um projeto solar são referentes as estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos, essas estruturas podem ser feitas nos telhados das residências ou estrutura uma estrutura de solo, nesse estudo será utilizado uma estrutura de fixação em cima do telhado da residência composta por trilhos, parafusos e os *clamps* que ajudam na fixação dos módulos.

Tem-se também os materiais elétricos que são responsáveis por conduzir a corrente elétrica entre os módulos e os inversores, de modo que sejam dimensionados de forma adequada para que seja evitado os riscos e danos à instalação. É levado em consideração que o telhado não precisa de nenhuma obra civil para a realização do projeto, com isso não é necessário colocar nos custos. A Tabela 6 mostra uma média dos custos no mercado atual referentes a instalação de 8 módulos.

Tabela 6 - Materiais utilizados na instalação

Materiais	Preço (R\$)
Estrutura de fixação para 8 módulos	R\$895,90
Materiais elétricos	R\$809,94
TOTAL	1.705,84

Fonte: Autor, 2021.

Toda instalação de um projeto fotovoltaico tem os custos referente a mão de obra, na qual depende de a empresa colocar o preço que acha necessário para realizar o determinado serviço. O preço levado em consideração foi definido pela média de custo de algumas empresas da cidade de Mossoró, com base na média de preço de três empresas foi considerado um valor final de R\$7244,62 para a realização do serviço correspondente a implementação dos módulos, inversores e toda ligação elétrica necessária para deixar o sistema funcionando da forma correta que foi dimensionado anteriormente.

6.2 Custos de manutenção

O custo de manutenção de painel fotovoltaico é praticamente zero, aproximadamente 0,5% ao ano do valor inicial do sistema, essa é considerada uma das vantagens de produzir sua própria energia de forma limpa e renovável. A manutenção mais importante para o funcionamento adequado e sem perda de geração é a limpeza dos módulos, sendo que a chuva é uma das responsáveis por isso, mas também deve ser levado em consideração a inspeção da

produção de energia para saber se a geração está de acordo com o projetado, e também verificar se não há nenhuma danificação nas instalações.

A limpeza pode ser feita de forma manual, existem diversas empresas que fazem esse serviço ou até mesmo alguém da própria residência pode fazer esse tipo de manutenção nos painéis em média duas vezes por ano. A limpeza das placas pode ser realizada com água e uma esponja não abrasiva e a frequência dessa limpeza depende do nível de sujeira nas placas.

Foi realizada uma pesquisa correspondente a média de preço de três empresas na cidade de Mossoró, para que fosse obtido um preço para a limpeza de placas solares apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Custos de manutenção periódica

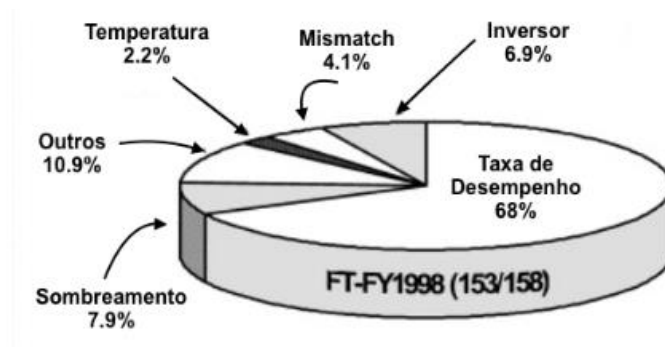
Qtd. de placas	Período	Preço por placa (R\$)	Preço total anual (R\$)
8	Trimestral	15,00	480,00
8	Semestral	15,00	240,00
8	Anual	15,00	120,00

Fonte: Autor, 2021.

6.3 Custos de energia

Utilizando os módulos de potência 400W definidos no dimensionamento do projeto, composto por 8 módulos fotovoltaicos com potência de 3,20 kWp e considerado uma perda média de 25% do sistema. Um estudo realizado no Japão em 2001 mostrou os principais fatores de perdas das instalações que foram observadas (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016). A divisão das perdas é mostrada na figura 27.

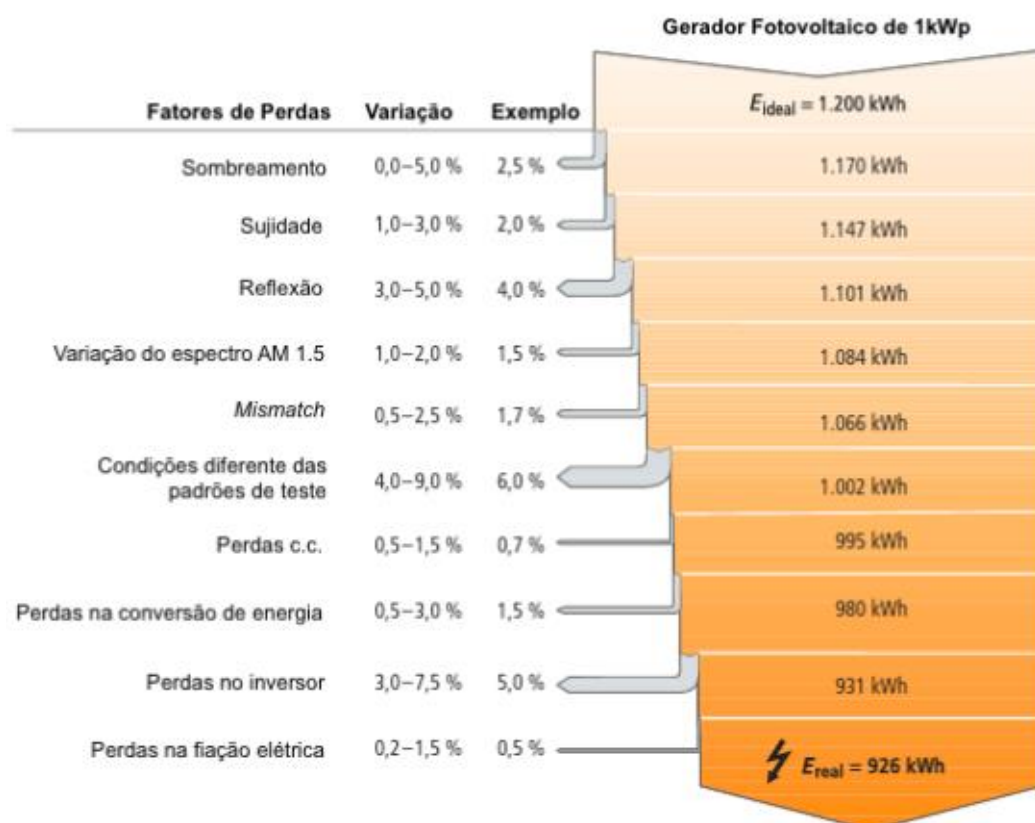
Figura 27 - Perdas do estudo feito em 2001



Fonte: ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016

Em um estudo mais recente, a Sociedade Alemã de Energia Solar quantificou os fatores de perdas (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016). Pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Fatores de perdas



Fonte: ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016

Alguns fatores de perdas foram acrescentados na figura 28, como as perdas na fiação elétrica, sujidade e variações das condições padrões de teste. O que na

figura 27 poderia estar relacionada a “outros” e as perdas por *mismatch* ou descasamento dos módulos, como também pode ser chamado, diminuiriam.

A seguir, têm-se os custos de geração mensal do sistema solar correspondentes com as perdas do sistema de 25%, considerando a irradiância média de cada mês para fazer o cálculo junto com a quantidade de dias que contém cada mês específico. Desse modo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Projeto de geração com perda de 25%

Mês	Consumo (kWh)	Perdas (%)	Irradiância média (kWh/m ² /dia)	Geração mensal do sistema solar (kWh/mês)
1	362	25%	5,86	435,98
2	385	25%	5,21	387,62
3	380	25%	4,93	354,96
4	402	25%	5,26	391,34
5	401	25%	5,56	400,32
6	378	25%	5,93	441,19
7	389	25%	5,86	393,79
8	415	25%	5,85	435,24
9	400	25%	6,08	452,35
10	383	25%	6,45	464,4
11	382	25%	6,39	475,41
12	422	25%	6,24	449,28
TOTAL ANUAL	4699,00			5081,88

Fonte: Autor, 2021.

A Resolução Normativa 482/12 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina as disposições para o sistema de compensação de energia, conhecido popularmente como créditos de energia solar. Os créditos de energia solar são produzidos com a sobra da energia gerada pelas placas solares em uma unidade consumidora e quando não é usada no seu imóvel retorna para a concessionária da sua região, que a transforma em créditos podendo ser usado futuramente (SOLAR PRIME, 2019).

Os créditos são usados automaticamente abatendo sua fatura de energia sempre que for preciso, dentro de um prazo de validade de 60 meses a partir do dia em que foram gerados. Os créditos que são gerados por um sistema podem ser usados em outras localidades, por exemplo em uma casa de campo ou um imóvel comercial, transferindo os créditos de energia solar para esses locais, mas para que isso seja permitido é necessário que os imóveis sejam atendidos pela mesma concessionária de energia e que a conta de luz tenha a mesma titularidade, seja um CPF ou CNPJ (SOLAR PRIME, 2019).

Na tabela 9 a seguir mostra a geração mensal de acordo com a eficiência dos módulos, assim como os créditos gerados na unidade consumidora pelo sistema fotovoltaico, custos de energia antes do sistema solar e depois do sistema solar, todos com base na tarifa de energia da COSERN com vigência de 22/04/2021 até 21/04/2022 no valor de R\$0,56, levando em consideração que os custos de energia depois do sistema solar quando são compensados pela geração serão pagos somente o mínimo exigido pela resolução normativa para um sistema monofásico que é de 30 kWh. Podendo também ser compensado pelos créditos gerados mensalmente na unidade consumidora, válidos por 60 meses, mas essa análise de compensação teria que ser feita mês a mês para ter uma estimativa exata de compensação. O intuito é mostrar os possíveis custos e benefícios que um sistema solar pode trazer após seu funcionamento.

Tabela 9 - Estimativa dos créditos e os custos no primeiro ano do sistema

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do módulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos antes do sistema (R\$)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	100%	435,98	73,98	0,56	202,37	16,80	41,36
2	385	100%	387,62	2,62	0,56	215,23	16,80	1,47
3	380	100%	354,96	-25,04	0,56	212,44	16,80	0
4	402	100%	391,34	-10,656	0,56	224,73	16,80	0
5	401	100%	400,32	-0,68	0,56	224,18	16,80	0
6	378	100%	441,19	63,19	0,56	211,32	16,80	35,33
7	389	100%	393,79	4,79	0,56	217,47	16,80	2,68
8	415	100%	435,24	20,24	0,56	232,00	16,80	11,31
9	400	100%	452,35	52,35	0,56	223,62	16,80	29,27
10	383	100%	464,4	81,4	0,56	214,11	16,80	45,51
11	382	100%	475,41	93,41	0,56	213,55	16,80	52,22
12	422	100%	449,28	27,28	0,56	235,91	16,80	15,25
TOTAL ANUAL	4699,00		5081,88	419,28		2.626,93	201,60	234,39

Fonte: Autor, 2021.

A eficiência estimada de um painel solar é de 25 anos funcionando com 80% de seu desempenho de fábrica, mas ao longo dos anos essa eficiência vai diminuindo de modo geral cerca de 3% no seu primeiro ano e 0,7% nos anos seguintes. Essa queda de eficiência ocorre por causa da Degradação Induzida pela Luz, conhecido como *Light Induced Degradation* (LID) que é a perda de eficiência das células e Degradação Induzida Potencial conhecido como Potential Induced Degradation (PID) que é queda na produção de energia das célula fotovoltaicas (PORTAL SOLAR, 2015).

Dessa maneira, foi realizada uma análise da energia considerando o decaimento da geração de energia pelo sistema fotovoltaico na tabela 10 e geração estimada de acordo com a eficiência dos módulos durante 25 anos e os custos de geração de acordo com a tarifa.

Tabela 10 - Custos de geração de acordo com a eficiência dos módulos

Ano	Eficiência do módulo (%)	Geração estimada (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos de geração anual (R\$/kWh)
1	100%	5081,90	R\$0,56	R\$2.845,87
2	97%	4929,45	R\$0,56	R\$2.760,49
3	96,03%	4880,15	R\$0,56	R\$2.732,89
4	95,60%	4858,30	R\$0,56	R\$2.720,65
5	94,90%	4822,73	R\$0,56	R\$2.700,73
6	94,38%	4796,30	R\$0,56	R\$2.685,93
7	93,82%	4767,59	R\$0,56	R\$2.669,85
8	93,25%	4738,88	R\$0,56	R\$2.653,77
9	92,69%	4710,16	R\$0,56	R\$2.637,69
10	92,12%	4681,45	R\$0,56	R\$2.621,61
11	91,56%	4652,74	R\$0,56	R\$2.605,53
12	90,99%	4624,02	R\$0,56	R\$2.589,45
13	90,43%	4595,31	R\$0,56	R\$2.573,37
14	89,86%	4566,60	R\$0,56	R\$2.557,30
15	89,29%	4537,89	R\$0,56	R\$2.541,22
16	88,73%	4509,17	R\$0,56	R\$2.525,14
17	88,16%	4480,46	R\$0,56	R\$2.509,06
18	87,60%	4451,75	R\$0,56	R\$2.492,98
19	87,03%	4423,04	R\$0,56	R\$2.476,90
20	86,47%	4394,32	R\$0,56	R\$2.460,82
21	85,90%	4365,61	R\$0,56	R\$2.444,74
22	85,34%	4336,90	R\$0,56	R\$2.428,66
23	84,77%	4308,18	R\$0,56	R\$2.412,58
24	84,21%	4279,47	R\$0,56	R\$2.396,50
25	83,64%	4250,76	R\$0,56	R\$2.380,42

Fonte: Autor, 2021.

6.4 Custos de reposição

Os custos de reposição estão associados ao tempo que será necessário para trocar alguns equipamentos do projeto de energia solar, seja os módulos, inversor, *string box* ou até mesmo a parte de elétrica da instalação. O tempo de garantia dos equipamentos são primordiais para esses custos de reposição e cada empresa trabalha com um tempo de garantia que seja favorável a ela. Na tabela 11 mostra o tempo de garantia fornecida pelo fabricante do equipamento, lembrando que não é necessariamente obrigatória a troca do equipamento após esse tempo, pois o tempo de eficiência dos equipamentos são em torno de 25 anos.

Tabela 11 – Garantia da Growatt, Jinko e Clamper Solar

Fabricante	Equipamento	Garantia pelo fabricante	Vida útil
Growatt	Inversor	5 anos	25 anos
Jinko solar	Módulos	12 anos	25 anos
Clamper	String box	3 anos	25 anos

Fonte: Autor, 2021.

Conforme a Tabela 11 temos as garantias dos fabricantes e a vida útil do sistema, se fosse necessário a troca dos equipamentos de acordo com os anos de garantia do fabricante, os custos do sistema fotovoltaico seriam maiores para que o sistema funcionasse durante os 25 anos conforme sua vida útil. A tabela 12 mostra um exemplo dos custos que seriam necessários para a troca dos equipamentos de acordo com os anos da garantia do fabricante durante 25 anos.

Tabela 12 - Custos da Growatt, Jinko e Clamper Solar

Equipamentos	Qnt. de trocas durante a vida útil	Preço do equipamento (R\$)	Custos durante 25 anos (R\$)
Inversor Growatt	5	3.297,51	19.637,55
Módulos Jinko	2	6.540,40	13.080,80
String box	8	542,43	4.339,44
TOTAL			37.057,79

Fonte: Autor, 2021.

6.5 Custos de descarte

Hoje em dia, mais de 90% dos materiais que compõem a tecnologia fotovoltaica podem ser aproveitados. No Brasil, de acordo com a legislação, essa tecnologia deve ser descartada de forma adequada de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define diretrizes relacionadas à gestão integrada e gestão de resíduos, tendo em vista que a empresa tem obrigação de evitar o descarte incorreto dos resíduos para eliminação de poluição ambiental, lembrando que os painéis solares são feitos de materiais recicláveis como plástico, cobre, vidro e alumínio. (CANAL SOLAR, 2021).

Os pesquisadores estão estudando as alternativas mais seguras para reciclar esses painéis porque eles possuem componentes recicláveis e metais pesados e não podem ser descartados para uma simples reciclagem. A ideia é permitir que todo o setor de energia fotovoltaica invista na criação de uma indústria voltada para o cumprimento de metas de desenvolvimento sustentável de materiais (CHAVES, 2020).

Uma alternativa temporária ao processamento é o envio de equipamentos ineficientes, mas em condições de uso, para locais de menor poder aquisitivo, pois se constata que a reciclagem não traz vantagens econômicas nem o armazenamento dos painéis até que a tecnologia de reciclagem pareça otimizada para o produto (CHAVES, 2020). Dessa maneira não será possível fazer um levantamento desses custos de descarte, pois é um procedimento que ainda está em estudo para obter melhores condições e obter uma fiscalização mais rigorosa por parte dos órgãos ambientais para que o descarte seja realizado de maneira correta.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse tópico será feito o levantamento dos custos de acordo com a eficiência dos módulos a cada 5 anos durante 25 anos de vida útil do sistema, assim como os custos de manutenção, reposição, quando necessário no decorrer desses anos e os custos que são pagos a concessionária de energia elétrica antes e depois da implementação do sistema de energia solar. É mostrado também os créditos gerados mensalmente de acordo com a geração do sistema, dependendo da

eficiência dos módulos que diminuem no decorrer dos anos, gerando uma quantidade menor de energia para o consumidor, todos esses valores são mostrados em reais para ter uma noção de custo.

Para os custos de manutenção e reposição foi considerado uma manutenção periódica nas placas de maneira semestral, onde a cada seis meses é realizada a limpeza dos módulos fotovoltaicos. Em relação a reposição dos equipamentos foi realizada a troca do inversor *Growatt* a cada 10 anos de utilização, embora os inversores consigam atingir uma vida média de 25 anos. De acordo com o (PORTAL SOLAR, 2015), recomenda-se substituí-los após 10 ou 15 anos de operação, para que não percam tanta eficiência na geração de eletricidade. Uma vida útil de 25 anos é recomendada apenas para os micros inversores, por trabalharem com uma voltagem menor, sua durabilidade sem perda de eficiência é um pouco mais lenta, dando um retorno maior no tempo de utilização. A Tabela 13 mostra a estimativa dos custos no quinto ano de funcionamento do sistema fotovoltaico juntamente com todas as informações relatadas acima.

Tabela 13 - Estimativa dos custos no quinto ano

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do módulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	94,90%	413,75	51,75	0,56	16,80	28,98
2	385	94,90%	367,85	-17,15	0,56	16,80	0
3	380	94,90%	336,85	-43,15	0,56	24,16	0
4	402	94,90%	371,38	-30,62	0,56	17,14	0
5	401	94,90%	379,90	-21,1	0,56	16,80	0
6	378	94,90%	418,69	40,69	0,56	16,80	22,73
7	389	94,90%	373,70	-15,3	0,56	16,80	0
8	415	94,90%	413,04	-1,96	0,56	16,80	0
9	400	94,90%	429,28	29,28	0,56	16,80	16,39
10	383	94,90%	440,71	57,71	0,56	16,80	32,31
11	382	94,90%	451,16	69,16	0,56	16,80	38,72
12	422	94,90%	426,36	4,36	0,56	16,80	2,44
TOTAL ANUAL	4699,00		4822,67	123,67		209,03	141,57

Fonte: Autor, 2021.

Foi possível observar na tabela 13 que tivemos uma eficiência do módulo de 94,90% no seu quinto ano e sua geração mensal nos meses foi menor do que o primeiro ano de funcionamento do sistema, pois a eficiência do módulo no primeiro ano era maior, onde no quinto ano o mesmo está mais desgastado. Foi possível notar uma geração anual de créditos 123,67 kWh, vale ressaltar que não foi realizada a análise de compensação mensal para saber qual mês seria abatido pelos créditos, foi mostrado apenas o que foi gerado de crédito no total do ano que está sendo analisado. A tabela também mostra os custos após o funcionamento do sistema, para saber se o consumidor irá pagar a taxa mínima a concessionária ou se irá pagar mais do que os 30kWh, essa análise é feita com base na diferença da geração mensal do sistema pelo consumo mensal, podendo ser estimado assim um possível valor de lucro em reais pelos créditos gerados naquele determinado mês.

Essa análise realizada para a tabela 13 foi a mesma análise feita para as demais tabelas a seguir. As Tabelas 14, 15, 16 e 17 mostram as mesmas informações com base nas eficiências dos módulos no décimo, décimo quinto, vigésimo e vigésimo quinto ano do funcionamento do sistema fotovoltaico, assim os custos mensais, geração mensal e créditos gerados serão diferentes para cada ano específico.

Tabela 14 - Estimativa dos custos no décimo ano

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do módulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	92,12%	401,62	39,62	0,56	16,80	22,18
2	385	92,12%	357,08	-27,92	0,56	16,80	0
3	380	92,12%	326,98	-53,02	0,56	29,69	0
4	402	92,12%	360,51	-41,49	0,56	23,23	0
5	401	92,12%	368,77	-32,23	0,56	18,04	0
6	378	92,12%	406,43	28,43	0,56	16,80	15,92
7	389	92,12%	362,76	-26,24	0,56	16,80	0
8	415	92,12%	400,94	-14,06	0,56	16,80	0
9	400	92,12%	416,70	16,70	0,56	16,80	9,35
10	383	92,12%	427,80	44,80	0,56	16,80	25,08
11	382	92,12%	437,95	55,95	0,56	16,80	31,33
12	422	92,12%	413,87	-8,13	0,56	16,80	0
TOTAL ANUAL	4699,00		4681,41	-17,59		222,16	103,86

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 15 - Estimativa dos custos no décimo quinto ano

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do modulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	89,29%	389,29	27,29	0,56	16,80	15,28
2	385	89,29%	346,11	-38,89	0,56	21,77	0
3	380	89,29%	316,94	-63,06	0,56	35,31	0
4	402	89,29%	349,43	-52,57	0,56	29,43	0
5	401	89,29%	357,45	-43,55	0,56	24,38	0
6	378	89,29%	393,94	15,94	0,56	16,80	8,92
7	389	89,29%	351,62	-37,38	0,56	20,93	0
8	415	89,29%	388,63	-26,37	0,56	16,80	0
9	400	89,29%	403,91	3,91	0,56	16,80	2,18
10	383	89,29%	414,67	31,67	0,56	16,80	17,73
11	382	89,29%	424,50	42,50	0,56	16,80	23,80
12	422	89,29%	401,17	-20,83	0,56	16,80	0
TOTAL ANUAL	4699,00		4537,66	-161,34		249,42	67,91

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 16 - Estimativa dos custos no vigésimo ano

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do modulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	86,47%	376,99	14,99	0,56	16,80	8,38
2	385	86,47%	335,18	-49,82	0,56	27,55	0
3	380	86,47%	306,93	-73,07	0,56	40,92	0
4	402	86,47%	338,39	-63,61	0,56	35,62	0
5	401	86,47%	346,16	-54,84	0,56	30,71	0
6	378	86,47%	381,50	3,5	0,56	16,80	1,96
7	389	86,47%	340,51	-48,49	0,56	27,15	0
8	415	86,47%	376,35	-38,65	0,56	21,64	0
9	400	86,47%	391,15	-8,85	0,56	16,80	0
10	383	86,47%	401,57	18,57	0,56	16,80	10,39
11	382	86,47%	411,09	29,09	0,56	16,80	16,29
12	422	86,47%	388,49	-33,51	0,56	18,76	0
TOTAL ANUAL	4699,00		4394,31	-304,09		286,35	37,02

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 17 - Estimativa dos custos no vigésimo quinto ano

Mês	Consumo total (kWh/mês)	Eficiência do módulo (%)	Geração mensal (kWh/mês)	Créditos gerados (kWh)	Tarifa de energia (R\$/kWh)	Custos depois do sistema (R\$)	Lucro dos créditos (R\$)
1	362	83,64%	364,66	2,66	0,56	16,80	1,48
2	385	83,64%	324,21	-60,79	0,56	34,04	0
3	380	83,64%	296,89	-83,11	0,56	46,54	0
4	402	83,64%	327,32	-74,68	0,56	41,82	0
5	401	83,64%	334,83	-66,17	0,56	37,05	0
6	378	83,64%	369,01	-8,99	0,56	16,80	0
7	389	83,64%	329,37	-59,63	0,56	33,39	0
8	415	83,64%	364,03	-50,97	0,56	28,54	0
9	400	83,64%	378,35	-21,65	0,56	16,90	0
10	383	83,64%	388,42	5,42	0,56	16,80	3,03
11	382	83,64%	397,64	15,64	0,56	16,80	8,75
12	422	83,64%	375,78	-46,22	0,56	25,88	0
TOTAL ANUAL	4699,00		4250,51	-448,49		331,36	13,26

Fonte: Autor, 2021.

Após o levantamento dos custos nas tabelas acima e definir as informações importantes depois do sistema solar instalado, levando em consideração a eficiência dos módulos, geração mensal e créditos gerados mensalmente, a Tabela 18 apresenta os custos de manutenção e reposição quando necessário, valores que são referentes aos 25 anos de vida útil do sistema fotovoltaico.

A manutenção dos módulos será realizada de forma semestral, ou seja, de 6 em 6 meses é necessária uma limpeza dos módulos, à depender também da época, em época de chuva não é necessário pagar pela limpeza, pois a mesma já faz o trabalho. A reposição necessária é do inversor *Growatt* junto com a *stringbox* e todo cabeamento necessário após os desgastes de 10 anos de utilização, reposição importante para que não venha perder eficiência durante os anos seguintes. Os módulos permanecem os mesmos, pois contam com 25 anos de vida útil. Vale ressaltar que está sendo considerado o mesmo preço durante os 25 anos de vida útil para realização desse levantamento dos custos.

Tabela 18 - Estimativa dos custos de manutenção e reposição

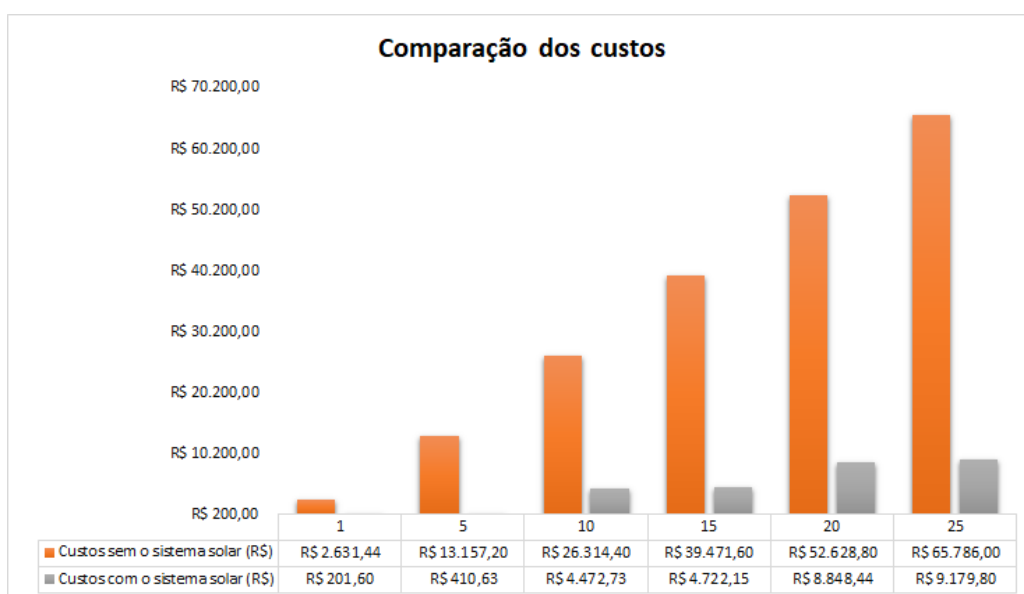
Ano	Manutenção (R\$)	Reposição (R\$)
1	240,00	0
5	1.200,00	0
10	2.400,00	3.839,94
15	3.600,00	0
20	4.800,00	3.839,94
25	6.000,00	0
TOTAL	6.000,00	7.679,88

Fonte: Autor, 2021.

7.1 Comparação dos custos

A figura 30 mostra um gráfico comparativo da análise realizada para o levantamento dos custos durante o primeiro, quinto, décimo, décimo quinto, vigésimo e vigésimo quinto ano dos custos sem o sistema solar e com o sistema solar implementado, sendo possível perceber que a relação desses custos é bem menor com a utilização do sistema fotovoltaico, baseado nesses 6 anos de estudo. Vale ressaltar que uma análise de todos os anos durante os 25 anos que está sendo levado em consideração, seria mais adequada, mostrando com mais exatidão os valores mostrados.

Figura 29 - Comparação dos custos



Fonte: Autoria própria, 2021

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à necessidade do uso de energia renovável para combater degradação ambiental excessiva, a energia solar é uma das melhores alternativas para uma geração de energia mais limpa. Ao longo dos anos, os sistemas fotovoltaicos tornaram-se cada vez mais acessíveis no Brasil permitindo que os consumidores consigam instalar um sistema fotovoltaico em suas residências, mas tudo isso faz com que pesquisas sejam necessárias para desenvolver soluções e criar melhores oportunidades para esse tipo de investimento.

O presente trabalho de conclusão teve como objetivo determinar de forma mais confiável as informações sobre os custos do ciclo de vida de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede da COSERN. O sistema modelo foi inicialmente dimensionado para um consumo médio mensal de 392,41 kWh e conta com um inversor *Growatt* de 3kw, 8 módulos *Jinko* de 400w e uma *stringbox clamp*. O sistema fica localizado na cidade de Mossoró, Rio Grande do Norte, obtendo os dados referentes a irradiação solar da localização do sistema por meio do site da CRESESB e no dimensionamento do sistema foi levado em consideração que uma geração de energia mensal de 137 kWh é equivalente para cada kWp instalado.

A Resolução Normativa nº 414 da Aneel (2010) define que residências com padrão monofásico pagam por um valor referente ao consumo de 30 kWh, com o padrão bifásico pagam por um valor referente ao consumo de 50 kWh e residências com padrão trifásico pagam por um valor referente ao consumo de 100 kWh. Dessa maneira, a residência levada em consideração para o estudo de caso é referente a um padrão monofásico, na qual pagará uma taxa mínima de consumo de 30 kWh/mês, sendo assim, com o levantamento técnico foi possível concluir que a cidade de Mossoró possui uma alta incidência de radiação solar, afirmando a viabilidade do projeto e grande geração de energia.

Para realizar uma pesquisa de custo de ciclo de vida, foram utilizadas as seguintes informações: primeiro, o projeto residencial foi dimensionado para uma perda de sistema de 25% e, em seguida, o custo do projeto inicial, custo de manutenção, custo de energia ou geração de energia que seria pago a concessionária sem o sistema solar e com o sistema solar. Foi considerado uma tarifa de R\$0,56 com base na energia da COSERN com vigência de 22/04/2021 até

21/04/2022, custos de reposição, custos de descarte e a definição total dos custos para alguns anos específicos, tendo apenas uma estimativa dos possíveis custos totais com uma comparação entre esses anos.

Os resultados da pesquisa de custo de ciclo de vida mostram que a implantação de um projeto de sistema fotovoltaico em Mossoró se mostra viável. Tem como resultado que os custos durante os 25 anos de vida útil do sistema fotovoltaico serão menores do que caso não tivesse o sistema e os custos pagos com a energia seria bem maior do que todos os custos relacionados ao sistema durante toda utilização, sejam os custos iniciais na compra e instalação dos equipamentos, manutenção, reposição do mesmo.

O mercado solar brasileiro está sempre mudando, sejam preços de equipamentos, preços de instalação, preços de energia locais, preços de manutenção e outros fatores que podem afetá-lo. Portanto, a recomendação para pesquisas futuras é levar em consideração todos esses aumentos ano a ano, e a proporção usada neste estudo para 25 anos. É recomendado também usar mudanças na proporção de tarifas de energia para melhores resultados. A avaliação de custos e a análise mensal dos créditos gerados pelo sistema também é importante para que seja feita uma compensação de energia mais precisa, e seja possível saber quais meses serão compensados, ou se há validade de crédito em outros anos dentro do prazo de 60 meses.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687. 2015.** Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013, NBR 10899: **Energia Solar fotovoltaica** – Terminologia. Segunda edição.

ABSOLAR. **Perspectivas para o mercado solar fotovoltaico global.** 2020. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/perspectivas-para-o-mercado-solar-fotovoltaico-global/>>. Acesso em: 04 set. 2021.

ANEEL– Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº414/2010.** 2010, Brasília. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2010414.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Nº 482/2012.** 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

BESSO, Rachel. **Sistema solar fotovoltaico conectado à rede – estudo de caso no centro de tecnologia da UFRJ.** 2017. 110 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CINTRA JÚNIOR, Anízio; SOUZA, Igor Menezes. **Células fotovoltaicas: o futuro da energia alternativa.** 2018. 52 f. TCC (graduação) - curso de graduação em engenharia civil, faculdade evangélica de Goianésia, Goianésia/go, 2018.

CASSIANO, Giovanna Bertoldo. **Análise da geração de energia solar fotovoltaica: estudo de caso em um supermercado no mato grosso do sul.** 2020. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande/MS, 2020.

CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**, 2014. Disponível em<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 05 set. de 2021

ENERGIA, Solis. **Como funciona o medidor bidirecional da energia solar?** 2019. Disponível em: <<https://solisenergia.com.br/como-funciona-o-medidor-bidirecional-da-energia-solar/>> Acesso em: 23 ago. 2021.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **BEN: Balanço Energético Nacional. 2020**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2020_PT.pdf> Acesso em: 12 ago. 2021.

FONTES, Ruy. **Efeito Fotoelétrico e Efeito Fotovoltaico**. 2018. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/efeito-fotoelettrico-fotovoltaico/>>. Acesso em: 25 ago. 2020.

FONTES, Ruy. **O Guia Mais Absurdamente Completo da Energia Solar Fotovoltaica**. 2019. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-fotovoltaica-guiasupremo/>>. Acesso em: 25 ago. 2020

GONÇALVES JÚNIOR, Adriano Araújo. **Estudo da rentabilidade de empreendimentos em eficiência energética pelo método da análise do custo de ciclo de vida**. 2020 - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.

GOETZE, Felipe. **PROJETO DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL: ESTUDO DE CASO**. 2017. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de

Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

GROWATT. **Manual de Instalação e Operação**. 2018. Disponível em: <https://www.ginverter.pt/upload/file/contents/2020/04/5e991ed84747f.pdf>. Acesso em: 07 set. 2021.

IBGE. **Cidades e estados, Mossoró. 2018**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/rn/mossoro.html>> Acesso em: 07 set. 2021.

KNEIFEL, Joshua; WEBB, David. **LIFE CYCLE COSTING MANUAL: for the federal energy management program**. Washington: Supersedes NIST Handbook 135, 2020. 295 p.

NETO, Teófilo Cortizo Moreira. **Aplicação da análise do custo do ciclo de vida em uma indústria de mineração com base na gestão de ativos**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

MELO, Felipe Cesar. **Análise de viabilidade técnica e econômica de um projeto fotovoltaico estudo de caso: estádio Aderbal Ramos da Silva**. 2020. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

NOGUEIRA, Eduardo Vieira. **A importância da energia solar**. 2020. 23 f. tcc (graduação) - curso de engenharia elétrica, anhanguera, campo grande, 2020.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. 530 p.

PEREIRA, Bruno Eustáquio Lima. **Análise de viabilidade econômica de implantação de um sistema de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos em sítio aeroportuário**. 2017. 67 f. Monografia (Especialização) -

Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo, Rs, 2017.

QUEIROZ, Guilherme de C. *et al.* Metodologia de análise de custo do ciclo de vida (ACCV). **Revista Brasileira de Energia**, Campinas, v. 12, n. 2, p. 1-17, 23 ago. 2021.

RODRÍGUEZ, Carlos Roberto Cervantes. **Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: O caso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

REIS, Gustavo Martins de Oliveira. **Análise do custo do ciclo de vida em sistemas com motores elétricos**. 2017. 62 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CHAVES, Renata. **Tenho que descartar meu painel solar fotovoltaico. E agora?** 2020. Disponível em: <<https://www.trilhoambiental.org/post/tenho-que-descartar-meu-painel-solar-fotovoltaico-e-agora>> Acesso em: 07 out. 2021.

SILVA, Luiz Felipe Muzzi. **A viabilidade da geração de energia solar em residências no município de Cuiabá-MT**. 2019. 40 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Ciências Contábeis, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

SIQUEIRA, Allan Fabio Pereira; SANTOS, Letícia Neves dos. **Estudo de implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR) na câmara municipal de são José dos pinhais**. 2016. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, Guilherme Trindade Martins Moreira da. **Dimensionamento e análise de viabilidade econômica de usina fotovoltaica em Nova Iguaçu – RJ**. 2015. 165 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SOLAR, JINKO. **Datasheet JINKO SOLAR**. 2020. Disponível em: <<https://url.gratis/74raGk>> Acesso em: 07 set. 2021.

WORUBY, Mauro Sérgio. **Sistema de energia solar residencial**. 2018. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Bacharel em Engenharia Elétrica, UNOPAR, Ponta Grossa, 2018.

ZANELLA, L.C.H. **Metodologia de Estudo e de Pesquisa em Administração**. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC; [Brasília]: CAPES: UAB, 2009.