

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

GABRIEL DE SOUZA MOREIRA

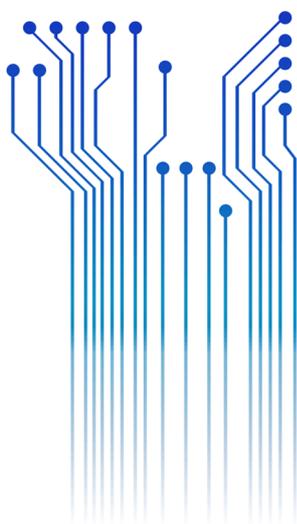


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
ENERGIA FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO EM  
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2021

GABRIEL DE SOUZA MOREIRA

ENERGIA FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO EM  
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias renováveis e instalações elétricas

Orientador:  
Professor Leimar de Oliveira

Campina Grande  
2021

GABRIEL DE SOUZA MOREIRA

ENERGIA FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO PARA IMPLANTAÇÃO EM  
CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Energias renováveis e instalações elétricas

Aprovado em        /        /

**Professor Edmar Candeia Gurjão**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Leimar de Oliveira,**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha filha, Isadora  
Albuquerque Moreira e a minha amada esposa  
Aline Pacheco Albuquerque.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Leonardo Antônio e Solange Duarte, por me fornecerem a oportunidade de poder realizar meus estudos contribuindo diretamente para minha formação pessoal e profissional.

Agradeço também à minha esposa Aline Pacheco Albuquerque por me auxiliar e apoiar a sempre persistir nos meus objetivos, me incentivando a sempre ser o melhor que posso em tudo que realizo.

Aos meus amigos, Jarbas, Ewerton e Digo Costa pelo suporte prestado com todo conhecimento atribuído e compartilhado para que fosse possível a execução desse Trabalho de Conclusão de Curso.

A todos os professores do curso de graduação que contribuíram em minha jornada em especial ao meu orientador Leimar de Oliveira por toda aprendizagem transmitida e auxílio prestado na realização deste trabalho.

Agradeço também aos demais funcionários da UFCG, em especial a Adail Paz e Tchai Oliveira por todo o suporte prestado e pelo empenho em ajudar todos os alunos do curso de Engenharia Elétrica na solução de qualquer problema.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que fosse possível a conclusão de mais uma etapa rumo a minha formação acadêmica.

*“ Não ganhe o mundo e perca sua alma; sabedoria é melhor que prata e ouro”*

Bob Marley.

## RESUMO

A atual crise energética, que atinge o Brasil, decorrente da escassez de recursos hídricos, e da crescente demanda no consumo de energia elétrica nas atividades socioeconômicas, tendo em vista que a matriz elétrica nacional se concentra nas hidrelétricas, tem levado a necessidade de utilização de outras fontes complementares de geração. Nessa situação as termelétricas tem sido a principal opção para suprir essa carência, porém, estas geram grandes emissões de poluentes, além de ter um alto custo de produção. Considerando os grandes impactos ambientais que as termelétricas acarretam, outras tecnologias se apresentam mais adequadas por serem fontes renováveis e menos poluentes como as gerações eólica e solar. Dentre as opções, a geração solar fotovoltaica tem sido uma alternativa viável por ser uma das mais versáteis e pelo fato da luz solar ser abundante em praticamente todo o território nacional. Com esta perspectiva o presente trabalho buscou realizar um estudo de caso avaliando o dimensionamento de instalação de um projeto de energia solar em condomínio residencial localizado na cidade de Lagoa Seca na Paraíba. Mediante a realização do estudo foi possível destacar a avaliação dos métodos financeiros de: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado atribuídos ao projeto. A análise da viabilidade econômica atribuída a instalação da usina solar fotovoltaica realizada no estudo de caso permitiu concluir que a utilização desse sistema é viável em termos econômicos, fortalecendo sua escolha na ampliação do uso de novas fontes de geração de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Projetos, Análise Financeira, Viabilidade Econômica.

# ABSTRACT

The current Brazilian energy crisis resulting from the scarcity of water resources, given that the national electricity matrix is concentrated in hydroelectric plants, and the growing demand for electricity consumption in socio-economic activities, has led to the need to use other complementary sources of generation. In this situation, thermoelectric plants have been the main option to meet this need, however, they generate large pollutants emissions, in addition to having a high production cost. Considering the great environmental impacts that thermoelectric generators cause, other technologies are more suitable due to being renewable and less polluting sources, such as wind energy and solar energy. Among the options, photovoltaic solar energy has been an excellent alternative because it is one of the most versatile and cheaper and because sunlight is abundant in practically the entire national territory. With this perspective, the present work sought to carry out a case study evaluating the project of the installation of a solar energy project in a residential condominium located in the city of Lagoa Seca in Paraíba. By carrying out the study, it was possible to highlight the evaluation of the financial methods of Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback attributed to the project. The economic feasibility analysis attributed to the installation of the photovoltaic solar plant in this work allowed us to conclude that utilization of this type of system is economically viable, strengthening its choice in expanding the use of new sources of electricity.

**Keywords:** Solar Photovoltaic Energy, Projects, Financial Analysis, Economic Viability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Experimento realizado por Becquerel	20
Figura 2.2 – Célula solar fotovoltaica fabricada por Pearson, Chapin e Fuller	21
Figura 2.3 – Instalação de células de Silício à rede telefônica	21
Figura 2.4 – Satélite Vanguard I	22
Figura 2.5 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil	24
Figura 2.6 – Matriz elétrica do Brasil	24
Figura 2.7 – Incidência solar ao longo do ano	27
Figura 2.8 – Sistema <i>Off-grid</i>	29
Figura 2.9 – Sistema <i>On-Grid</i>	30
Figura 2.10 – Modelo Atômico + Cristal de Silício	32
Figura 2.11 – Célula fotovoltaica de junção PN	33
Figura 2.12 – Modelo atômico semicondutores extrínsecos	33
Figura 2.13 – Junção PN	34
Figura 2.14 – Representação de uma célula fotovoltaica	35
Figura 2.15 – Célula fotovoltaica Monocristalina	36
Figura 2.16 – Célula fotovoltaica Policristalina	37
Figura 2.17 – Módulos fotovoltaicos de filmes finos flexíveis	38
Figura 2.18 – Principais tecnologias de células fotovoltaicas	39
Figura 2.19 – Salto Quântico + Modelo Atômico Atual	40
Figura 2.20 – Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica	41
Figura 2.21 – Gráfico I x V x P módulo fotovoltaico	42
Figura 2.22 – Gráfico I x V: 1 célula (vermelho), N células em série (azul)	43
Figura 2.23 – Gráfico I x V: 1 célula (vermelho), N células em paralelo (azul)	43
Figura 2.24 – Ilustração de células, módulos e painéis	44
Figura 2.25 – Gráficos I x V de frações da irradiância padrão	45
Figura 2.26 – Inversor de tensão trifásico acoplado a módulo solar	45
Figura 2.27 – Estratégia PWM em braço de Inversor de frequência	46
Figura 4.1 – Obtenção das coordenadas geográficas	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Cálculo da média de consumo mensal	56
Tabela 4.2 – Dados de irradiação solar diária	58
Tabela 4.3 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos	59
Tabela 4.4 – Características técnicas do inversor	60
Tabela 4.5 – Fluxos de caixa e valores acumulados	64
Tabela 4.6 – Cálculos de VPL	66
Tabela 4.7 – Cálculos de Payback descontado	67

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>
EMUC	Empreendimentos de Múltiplas Unidades Consumidoras
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NDU	Norma de Distribuição Unificada
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMT	Tempo Máximo Tolerado
TUSD	Tarifa de Utilização do Sistema de Distribuição
UC	Unidades Consumidoras
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VPL	Valor Presente Líquido
VCC	Tensão de Corrente Contínua

# LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampere
GW	Gigawatt
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt Hora
kWp	Quilowatt Pico
MW	Megawatt
TW	Terawatt
V	Volt
W	Watt

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	16
1.1	Estrutura do Trabalho .....	17
1.2	Objetivo .....	17
1.3	Motivação .....	18
2	Fundamentação Teórica.....	19
2.1	Energia Solar Fotovoltaica.....	19
2.1.1	Histórico da Energia Fotovoltaica .....	19
2.1.2	Energia Fotovoltaica na Atualidade.....	23
2.2	Energia Solar.....	25
2.3	Irradiação Solar.....	26
2.4	Sistema de Geração Fotovoltaica.....	28
2.4.1	Classificação dos Sistemas ( <i>On-Grid</i> , <i>Off-Grid</i> E Híbrido) .....	28
2.5	Células e Módulos Fotovoltaicos .....	31
2.5.1	Construção do Módulo e da Célula.....	31
2.5.2	Tipos de Célula.....	35
2.5.2.1	Primeira geração .....	36
2.5.2.2	Segunda geração .....	37
2.5.2.3	Terceira geração.....	38
2.5.3	Funcionamento da Célula e do Módulo .....	39
2.6	Painéis Fotovoltaicos .....	44
2.7	Inversores.....	45
2.8	Resoluções e Normas Regulamentadoras .....	47
2.9	Métodos Financeiros para Análise de Viabilidade Econômica.....	49
2.9.1	Valor Presente Líquido (VPL).....	49
2.9.2	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	50
2.9.3	<i>Payback</i> Descontado.....	51
3	Metodologia.....	52
3.1	Levantamento do Consumo Médio de Energia Elétrica.....	52
3.2	Localização, Posicionamento e Avaliação do Recurso Solar.....	53
3.3	Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos .....	53
3.4	Dimensionamento do Inversor .....	54
3.5	Dimensionamento dos Condutores e Dispositivos de Proteção .....	54
3.6	Análise Financeira .....	55
4	Desenvolvimento.....	56
4.1	Levantamento do Consumo Médio de Energia Elétrica.....	56
4.2	Localização, Posicionamento e Avaliação do Recurso Solar.....	57
4.3	Dimensionamento dos Módulos Fotovoltaicos .....	58
4.4	Dimensionamento do Inversor .....	60

4.5	Dimensionamento dos Condutores e Dispositivos de Proteção .....	61
4.5.1	Dimensionamento dos Condutores CC e CA.....	61
4.5.2	Dimensionamento dos dispositivos de proteção .....	63
4.6	Análise Financeira .....	63
4.6.1	Valor Presente Líquido .....	65
4.6.2	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	66
4.6.3	<i>Payback</i> Descontado.....	67
5	Considerações Finais .....	69
6	Referências Bibliográficas.....	70
Anexos.....		72
Anexo A – <i>Datasheet</i> do inversor .....		72
Anexo B – <i>Datasheet</i> dos Módulos Fotovoltaicos .....		74

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil vem enfrentando uma crise energética devido aos baixos níveis nos reservatórios de água e a má administração do recurso existente, essa problemática existe em razão da matriz elétrica brasileira ainda está baseada principalmente no uso de hidrelétricas de grande porte, que segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) representam cerca de 65% da matriz elétrica nacional<sup>1</sup>.

Por depender da incidência de chuvas em locais e momentos específicos, bem como a competição pelo uso da água em outras atividades essenciais para a sociedade, como abastecimento humano, agricultura, pecuária, comércio, serviços e indústria dificulta a administração do recurso hídrico, logo as termelétricas fosseis mesmo tidas como caras e poluentes vem sendo usadas como saída.

No entanto, essa estratégia já mostrou seus limites e efeitos colaterais: os aumentos nas contas de energia, com bandeiras amarelas e vermelhas, que prejudicam a economia do país e pressionam a inflação, impactando inclusive os preços dos alimentos e outros produtos essenciais.

Segundo Dutra et al. (2013) a energia solar, dentre as fontes de energias renováveis, destaca-se principalmente por apresentar vantagens, como ser autônoma, apresentar baixo impacto ao meio ambiente e ser uma fonte renovável. Diante desses benefícios tem-se uma confiabilidade em seu uso, uma vez que ainda apresenta redução de custos de consumo a longo prazo tornando a geração fotovoltaica cada vez mais requisitada no Brasil e no mundo.

A região com maior incidência solar no Brasil de acordo com Cunha (2019) é a região nordeste, destacando-se como privilegiada quando comparada as demais regiões do país. Segundo Rabuske et al. (2018) em virtude desse alto potencial solar pode-se destacar a geração fotovoltaica dentre os tipos de energias renováveis como sendo uma das opções a se considerar para superar os desafios enfrentados no setor elétrico brasileiro.

Entretanto, apesar do Brasil possuir condições favoráveis para a energia fotovoltaica, sendo citado por possuir grande potencial devido a quantidade de radiação

---

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 04/10/2021.

solar predominante durante a maior parte do ano, este recurso ainda é pouco explorado no país. Sendo assim, dada a importância da geração própria de energia renovável no cenário econômico e social do Brasil o presente trabalho destaca a implantação de usinas solares fotovoltaicas como fonte de energia em áreas residenciais avaliando em termos econômicos sua implantação.

## 1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

No desenvolvimento do trabalho consta no Capítulo 2 uma fundamentação teórica com abordagens dos principais itens que se fazem necessários para melhor entendimento do trabalho abordado, buscando fundamentar um conhecimento acerca da relevância da execução do estudo realizado. No Capítulo 3 estão descritos os métodos aplicados na execução do trabalho. As atividades que foram desenvolvidas relatando a importância de aspectos que englobam desde a avaliação da incidência solar, como o dimensionamento do sistema de uma usina fotovoltaica, finalizando com uma análise financeira onde elucidada-se a execução do projeto acarretando na viabilidade econômica almejada estão descritas no Capítulo 4. Por fim no Capítulo 5 foram expostas algumas considerações conclusivas em virtude da execução do estudo ressaltando as contribuições que o mesmo proporcionou em fins acadêmicos e profissionais.

## 1.2 OBJETIVO

A execução do presente trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo de caso referente a implantação de um sistema de geração de energia solar fotovoltaica em um condomínio residencial localizado na cidade de Lagoa Seca, na Paraíba buscando aplicar os conhecimentos adquiridos no curso, além de novos conhecimentos acerca do tema abordado. A realização desse estudo proporciona uma perspectiva do dimensionamento do sistema a ser implantado bem como suas particularidades, salientando o estudo de viabilidade econômica visando demonstrar a relevância da utilização desse tipo de tecnologia na diversificação da matriz energética nacional.

### 1.3 MOTIVAÇÃO

Atualmente a matriz energética do Brasil tem sua maior parcela proveniente de fontes não renováveis, o que vem acarretando grandes danos ao meio ambiente, sendo assim, novos estudos estão sendo desenvolvidos buscando fontes energéticas de novas fontes menos prejudiciais, como a energia fotovoltaica. O uso desse tipo de energia é viável no Brasil, com destaque na região Nordeste, uma vez que sua localização dispõe um alto índice de irradiação solar.

Dessa maneira, os sistemas fotovoltaicos foram ganhando espaço. Como a princípio sua produção apresentava um alto custo apenas uma parcela restrita da população possuía acesso, todavia, no cenário atual, com a redução dos valores dos equipamentos de um sistema fotovoltaico, os incentivos governamentais como a facilidade para financiamento, os sistemas estão cada vez mais em uso.

Logo, a execução desse trabalho permite uma análise mais detalhada acerca da viabilidade econômica do uso dessa nova fonte energética onde diante dos benefícios proporcionados tem-se uma maior confiabilidade em seu uso, uma vez que ainda apresenta redução nos valores da conta de energia e retorno financeiro a médio/longo prazo o que torna a energia solar cada vez mais requisitada no Brasil e no mundo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os principais aspectos teóricos acerca do trabalho desenvolvido com ressalva a importância da implantação da geração fotovoltaica como fonte complementar para a matriz energética, visando a redução de impactos ambientais e maior viabilidade econômica da geração de energia elétrica. Alguns aspectos sobre o funcionamento do sistema fotovoltaico de acordo com classificação também serão tratados ressaltando desde os principais componentes que formam a usina fotovoltaica, as normas e resoluções vigentes que regulam sua instalação e uso de acordo com os órgãos competentes, bem como métodos de análise financeira que auxiliam na avaliação da viabilidade econômica dos projetos.

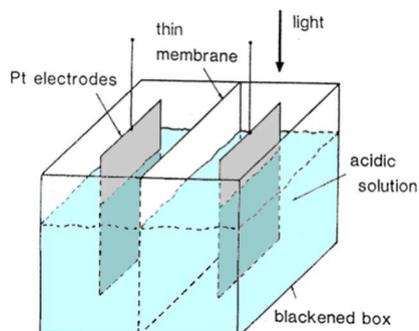
### 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

#### 2.1.1 HISTÓRICO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Diversos trabalhos registram a história da energia fotovoltaica, dentre eles Vallêra e Brito (2006) que descrevem cronologicamente em seu estudo alguns marcos evolutivos ocorridos em quase dois séculos de existência dessa tecnologia de conversão da radiação solar em energia elétrica.

No ano de 1839, o físico francês Alexandre Edmond Becquerel relatou a conversão da radiação solar em energia elétrica, chamado de efeito fotovoltaico. O fenômeno ocorria através de um dispositivo que se denominou de célula solar fotovoltaica. Esse ensaio decorreu da observação de placas metálicas, de platina ou prata que quando imersas em uma solução ácida e expostas a luz solar produziam uma diferença de potencial, ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Experimento realizado por Becquerel



Fonte: (MENDONÇA, 2016).

William Grylls Adams e Richard Evans Day, realizaram em 1876 um estudo utilizando o Selênio (Se) para produzir energia elétrica apenas pela ação da luz. Foi construído assim o primeiro aparato fotovoltaico utilizando conceitos de física de estado sólido. O experimento relatou que quando expostos à radiação, os eletrodos de Selênio geravam uma corrente elétrica. Essa descoberta foi realizada utilizando amostras para investigar a fotocondutividade do Selênio, descobrindo assim o efeito fotovoltaico num semicondutor.

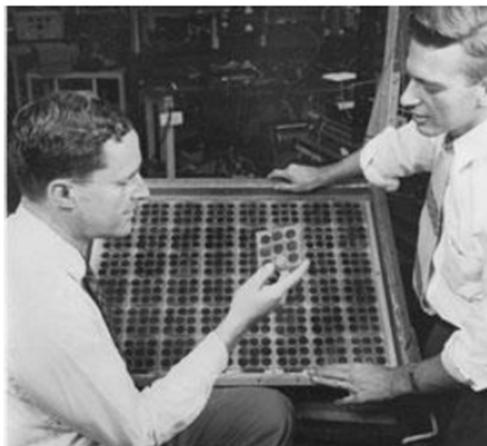
No ano de 1905, o físico Albert Einstein publicou um artigo sobre a lei do efeito fotoelétrico, a qual explicou o fenômeno que ao incidir feixes de luz em um material semicondutor, energia é transferida por pacotes, chamados fótons. Os fótons excitam os elétrons, permitindo que eles possam se afastar do núcleo do átomo do semicondutor, saindo da camada de valência, estando livre para circular e constituir corrente. Einstein recebeu um prêmio Nobel em 1921 por essa descoberta<sup>2</sup>.

No ano de 1930 estabeleceu-se a primeira teoria do efeito fotovoltaico.

A primeira célula solar moderna foi apresentada em 1954 por Pearson, Fuller e Chapin, ilustrada na Figura 2.2, tinha uma eficiência de apenas 6%, gerando 5 mW de potência elétrica e era feita de Silício. Russell Ohl foi quem inventou a primeira placa de Silício e também foi o primeiro a patentear o sistema fotovoltaico moderno. No entanto, seu êxito só foi possível graças ao trabalho de Calvin Fuller, Gerald Pearson e Daryl Chapin.

<sup>2</sup> Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/einstein-s-legacy-the-photoelectric-effect/>>. Acesso em: 23/04/2021.

Figura 2.2 – Célula solar fotovoltaica fabricada por Pearson, Chapin e Fuller.



Fonte: (MENDONÇA, 2016).

Chapin procurava uma fonte de energia alternativa para as baterias usadas em redes telefônicas remotas logo, Fuller e Pearson entraram em contato com o físico e, em 1955, células de Silício foram usadas pela primeira vez como fonte de alimentação de uma rede telefônica na Geórgia, Estados Unidos, ilustração na Figura 2.3.

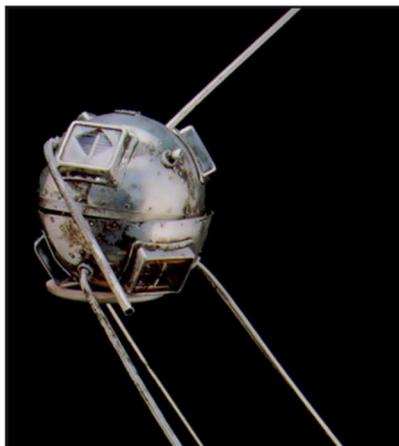
Figura 2.3 – Instalação de células de Silício à rede telefônica.



Fonte: <http://web.ist.utl.pt/palmira/solar.html>.

Em virtude dos estudos em semicondutores progredindo. Não tardou muito para que o governo americano se interessasse pela nova tecnologia que casou perfeitamente com as necessidades do programa espacial, no ano de 1958 as primeiras células fotovoltaicas foram utilizadas para alimentar um satélite (Vanguard I), ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Satélite Vanguard I



Fonte: (VALLÊRA E BRITO, 2006).

A década de 70 foi marcada por desenvolvimentos importantes nas células fotovoltaicas uma vez que a crise do petróleo e a consequente elevação dos custos sobre os combustíveis fósseis, viu-se que era necessário buscar outras fontes de energia, o que tornou a energia solar uma opção para atender as necessidades da sociedade. No entanto, os custos ainda eram elevados, o que tornou os investimentos no ramo solar limitados apenas para grandes empresas, a produção anual não passava de 1 MW.

Já na década de 80 foram instaladas na Europa e EUA centrais fotovoltaicas piloto de médio porte (dezenas a centenas de kWp). Poucos anos depois na década de 90 Alemanha e Japão criam políticas de incentivo para a energia fotovoltaica com o objetivo de reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera realizando grandes investimentos no setor.

De acordo com Machado e Miranda (2015) considerando que no ano 2000 o consumo global de energia foi de 13 TW e a estimativa para 2050 é de 30 TW, a energia enviada pelo sol está sobrando. Em 2004, foram produzidos cerca de mil milhões de células, com eficiências da ordem dos 16%, ultrapassando pela primeira vez a barreira de 1 GW de potência eléctrica anual instalada. A partir de 2006 a China passa a produzir componentes para o mercado contribuindo para a redução drástica dos custos de fabricação ocorrendo um novo recorde ao obter uma célula solar com 40% de eficiência e pela primeira vez, a utilização de células solares de Polissilício alcança o restante das tecnologias fotovoltaicas.

Em 2011, as fábricas solares chinesas se expandiram de forma rápida, tornando os custos de fabricação mais acessíveis. Dessa forma, as instalações desde então passaram a crescer em todo mundo e o uso de novas tecnologias vêm sendo cada dia mais difundido.

## 2.1.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ATUALIDADE

Dados da *Internacional Energy Agency (IEA)* compilados pela ABSOLAR mostram hoje o Brasil na 9ª colocação do ranking anual global, no qual os cinco primeiros são China, Estados Unidos, Vietnã, Japão e Alemanha.

Em 2020, o Brasil recuperou seu protagonismo entre os “top 10” países que mais instalaram energia solar no ano, tanto em grandes usinas quanto nos telhados e pequenos terrenos. Foram cerca de R\$ 15,9 bilhões em novos investimentos e 3,15 GW em potência adicionada no período.

Nesse cenário, o Nordeste se destaca em projetos de todos os portes e perfis. A região conta com 2,4 GW em usinas fotovoltaicas em operação, o que representa 70% de toda a capacidade instalada da fonte em geração centralizada no Brasil. Também é a principal região em termos de novos empreendimentos, alcançando 13,9 GW dos 24,3 GW de projetos em desenvolvimento.<sup>3</sup>

Conforme supracitado, ao longo da última década, a energia solar fotovoltaica vem ganhando cada vez mais notoriedade em todo mundo, com uma taxa de crescimento continuamente alta que deverá manter-se devido à necessidade de energias limpas, uma vez que a energia solar se trata de uma das mais eficientes e com menor impacto ao meio ambiente quando comparada as demais.

De acordo com dados da ANEEL/Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) atualizados em agosto de 2021 a potência instalada tendo como fonte a radiação solar, conforme representado na Figura 2.5, até julho de 2021 atingiu um total de 9.738 MW, onde 6.310,5 MW, cerca de 65 % correspondia a geração distribuída e 35% representava a energia centralizada<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> Disponível em: <https://www.absolar.org.br/artigos/nordeste-horizonte-de-oportunidades-para-a-energia-solar/>. Acessado em: 30/08/2021.

<sup>4</sup> Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acessado em: 30/08/2021.



Embora ainda haja predominância de produção energética decorrente das hidrelétricas, pode-se destacar o aumento de fontes energéticas renováveis como a energia solar fotovoltaica que vem apresentando dentre os principais benefícios a geração de mais de 9,7 GW operacionais desde de 2012, mais de R\$ 51,3 bilhões em novos investimentos privados, mais de 292 mil novos empregos gerados, bem como a arrecadação de R\$ 14,4 bilhões em tributos e redução na emissão de mais de 10,7 milhões de toneladas de dióxido de carbono (ABSOLAR, 2021).

## 2.2 ENERGIA SOLAR

Apesar da alta incidência de radiação solar ao longo do ano no Brasil, principalmente na região Nordeste, decorrente da sua localização na zona intertropical do planeta, este recurso ainda é pouco difundido no país, onde menos de 1% da energia elétrica gerada é decorrente da energia solar. Logo, no cenário atual diversos estudos vêm sendo desenvolvidos buscando um melhor aproveitamento dessa matriz (JÚNIOR, 2018 p.234).

De acordo com Monteiro 2016 o sol, principal fonte de energia para a terra, além de ser responsável pela manutenção da vida com a provisão necessária aos ciclos globais, apresenta grande potencial de aproveitamento de forma direta ou indireta por meio de sistemas que sejam capazes de captar e converter sua radiação em outras formas de energia.

Uma vez que a radiação solar permite que ocorram fenômenos de evaporação, indução dos ventos, desenvolvimento da matéria orgânica e dos combustíveis fósseis, permite-se classificar todas as outras fontes de energia como formas indiretas da energia solar. Como forma de energias diretamente ligadas a esta energia pode-se destacar a energia térmica e a energia elétrica, que por meio de efeitos, como os efeitos termelétrico e fotovoltaico, agem sobre determinados materiais.

Dentre os benefícios de uso da energia proveniente do Sol, Oliveira (2017) elucida que a longo prazo a utilização da energia fotovoltaica possibilita o desenvolvimento de regiões onde o custo da eletrificação pela rede convencional é consideravelmente alto com relação ao retorno financeiro, além de outras contribuições como a diminuição do uso de recursos derivados do petróleo. A energia solar pode ser utilizada em sistemas de irrigação de culturas, refrigeração de alimentos, vacinas e remédios, aquecimento e

iluminação artificial, conforto térmico e iluminação natural em projetos de construção civil entre outros.

Alguns países como Alemanha, pioneira nesse ramo, e os Estados Unidos executam projetos governamentais para que o uso de painéis solares em residências seja mais disseminado. Essa ação contribuiu para que houvessem investimentos em larga escala em virtude da eficiência atingida, uma vez que a energia solar pode ser aproveitada tanto através de sistemas centralizados como distribuídos (CUNHA, 2019).

Em estudo desenvolvido por Bezerra (2020) pode-se verificar que um aumento progressivo do uso da energia solar como fonte energética alternativa torna-se vantajoso já que a disponibilidade de energia solar na superfície terrestre é muito superior à demanda global de energia elétrica, e destaca ainda que as tecnologias que fazem uso dessa energia renovável se tornam mais competitivas em diversos países, inclusive no Brasil.

Este cenário de aumento expressivo na expansão da geração solar tende a se manter no mundo nos próximos anos, devido sua produção ser a partir de fonte renovável, tendo em vista também às perspectivas de redução do custo de geração e o aumento da eficiência da tecnologia fotovoltaica.

A energia solar funciona a partir de placas solares que são responsáveis pela captação da luz e empregam o calor dos raios solares para geração de eletricidade (em sistemas de energia solar fotovoltaica e energia heliotérmica) ou aquecimento de líquidos (energia solar térmica).<sup>5</sup>

Existem 3 tipos de energia solar: a energia solar fotovoltaica, a energia solar térmica e a energia heliotérmica. Cada uma atua de uma forma diferente. A energia solar fotovoltaica funciona por meio do efeito fotovoltaico, gerando eletricidade; a energia solar térmica utiliza o sol como fonte de energia para aquecer líquidos; a energia heliotérmica também aquece líquidos e utiliza o vapor gerado para mover turbinas.

## 2.3 IRRADIAÇÃO SOLAR

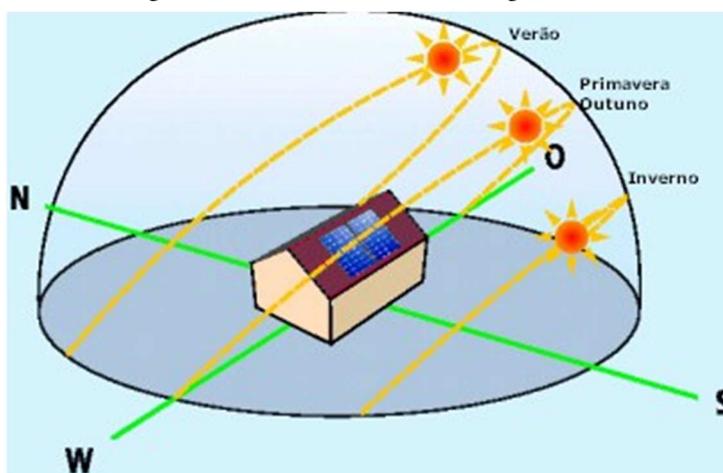
Um ponto crucial na instalação de placas solares é o ângulo de incidência da irradiação solar, pois a absorção de energia é máxima quando os raios incidem

---

<sup>5</sup> Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>>. Acesso em: 03/05/2021.

perpendicularmente na placa. O problema é que a posição do sol varia no decorrer do dia e também do ano variando esse ângulo. Uma placa fixa numa única posição, só vai aproveitar o melhor ângulo de incidência em determinado período do dia e no resto do tempo vai receber os raios enviesados. No decorrer do ano, o sol varia a sua posição em relação à superfície da Terra, e a menos que o residente esteja na linha do equador, os raios solares vão incidir nos painéis diferentemente no decorrer do ano. A Figura 2.7 representa o que está sendo relatado.

Figura 2.7 – Incidência solar ao longo do ano



Fonte: <https://www.electronica-pt.com/instalacao-sistema-fotovoltaico>.

Alguns estudos vêm sendo realizados sobre placas que acompanham o direcionamento solar, como um girassol faz, esse sistema é chamado “*tracker*”. Para o funcionamento deste sistema é necessário um motor que faça a placa acompanhar o Sol, gerando um gasto extra de energia nesse processo.

Por enquanto esse recurso ainda não é rentável do ponto de vista de geração de energia para locais próximos da linha do equador, em que ocorre pouca variação do ângulo de incidência no decorrer do ano, porém em locais mais próximos aos polos da terra, a situação é bem diferente, pois ocorre uma grande variação no ângulo de incidência dos raios solares, tornando os sistemas tradicionais muito ineficientes em certos períodos do ano, nesses casos o sistema *tracker* pode ser viável, contudo, os valores da manutenção e de aquisição são maiores do que os sistemas tradicionais.

## 2.4 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Existem três formas de funcionamento de um sistema de energia solar fotovoltaico, que varia pelo tipo de sistema instalado:

- Sistema de energia solar conectado à rede (*on-grid*);
- Sistema fotovoltaico isolado ou autônomo (*off-grid*);
- Sistema de energia solar híbrido.

### 2.4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS (*ON-GRID*, *OFF-GRID* E HÍBRIDO)

A energia solar pode ser aproveitada de diversas formas para gerar energia, mas a aplicação neste trabalho é a transformação de energia solar em energia elétrica diretamente, a chamada geração fotovoltaica.

Em termos gerais quando o esquema de funcionamento do sistema de geração de energia elétrica solar fotovoltaica baseia-se na utilização de painéis solares que captam a luz e, por meio do efeito fotovoltaico, geram energia elétrica, que é convertida pelo inversor solar, de corrente contínua para alternada, e, então, a eletricidade é distribuída.

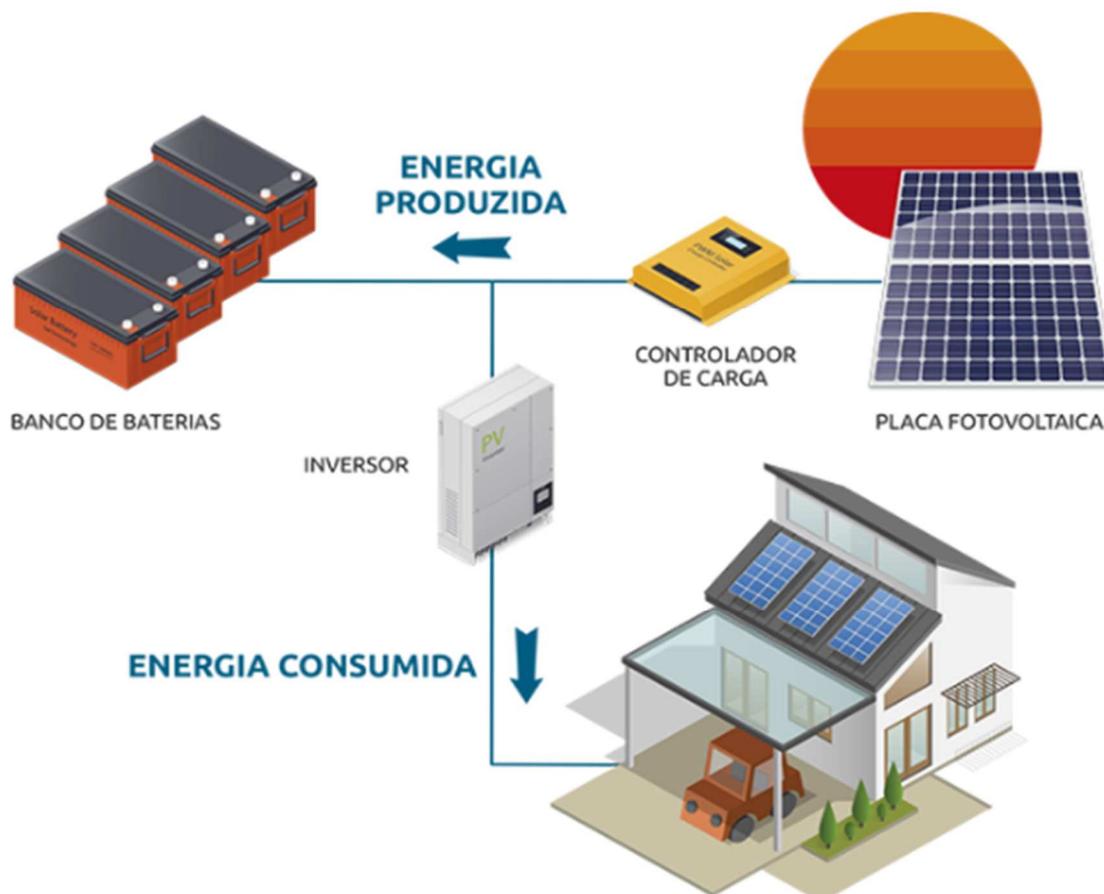
De acordo com a forma que esse sistema de energia funciona, ou seja, seu modo de operação, pode-se classificar um sistema de geração fotovoltaica como *on-grid*, que atua com a inserção de energia diretamente na rede elétrica de distribuição, *off-grid* que funciona por meio de baterias que armazenam eletricidade e híbrido, que tem sua operação de modo simultâneo, entre *on-grid* e *off-grid*, fazendo com que seu trabalho ocorra conectado à rede, enquanto o banco de baterias está carregando, e vice-versa.

Os chamados sistemas solares fotovoltaicos isolados ou remotos (*off-grid*) são essenciais para comunidades isoladas que vivem em ilhas, florestas, campos e outros locais remotos, os sistemas melhoram a qualidade de vida dessa população, uma vez que esses sistemas não estão conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo assim são sistemas autônomos, independentes da rede de distribuição de energia elétrica, que geralmente operam com o suporte de baterias ou outros sistemas de armazenamento. Como não conta com o auxílio da rede de distribuição, é necessário o armazenamento da energia “excedente” para uso nos períodos sem sol, como à noite ou em momentos em que a radiação solar não é suficiente (dias chuvosos).

Dentre esse tipo de sistema pode ocorrer uma classificação por grupos de acordo com suas diferentes finalidades, como os sistemas voltados aos agricultores que podem ser utilizados em diversas atividades na zona rural, como bombeamento de água e irrigação, por exemplo. Os projetados para reduzir custos para famílias de baixa renda que podem ser aplicados diretamente em casas pequenas ou em conjuntos habitacionais. Bem como os aparelhos solares fotovoltaicos como por exemplo: *power banks*, *notebooks*, mochilas, guarda-chuvas, barracas *de camping*, veículos elétricos, brinquedos e outros pequenos equipamentos elétricos e eletrônicos que podem incorporar energia solar fotovoltaica para recarregar, alimentar e apoiar seu funcionamento.

Os sistemas *off-grid* dependem de alguma forma de armazenamento de energia, ou então só operará quando houver luz solar. Geralmente se instala um banco de baterias em paralelo com os painéis solares, e quando há iluminação do sol, o banco recebe energia dos painéis armazenando-a, e quando não há, a energia no banco é consumida pela carga, esse esquema pode ser melhor observado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Sistema *Off-grid*.



Fonte: <https://www.ecoaquecedores.com.br/energia-solar-fotovoltaica-off-grid/>.

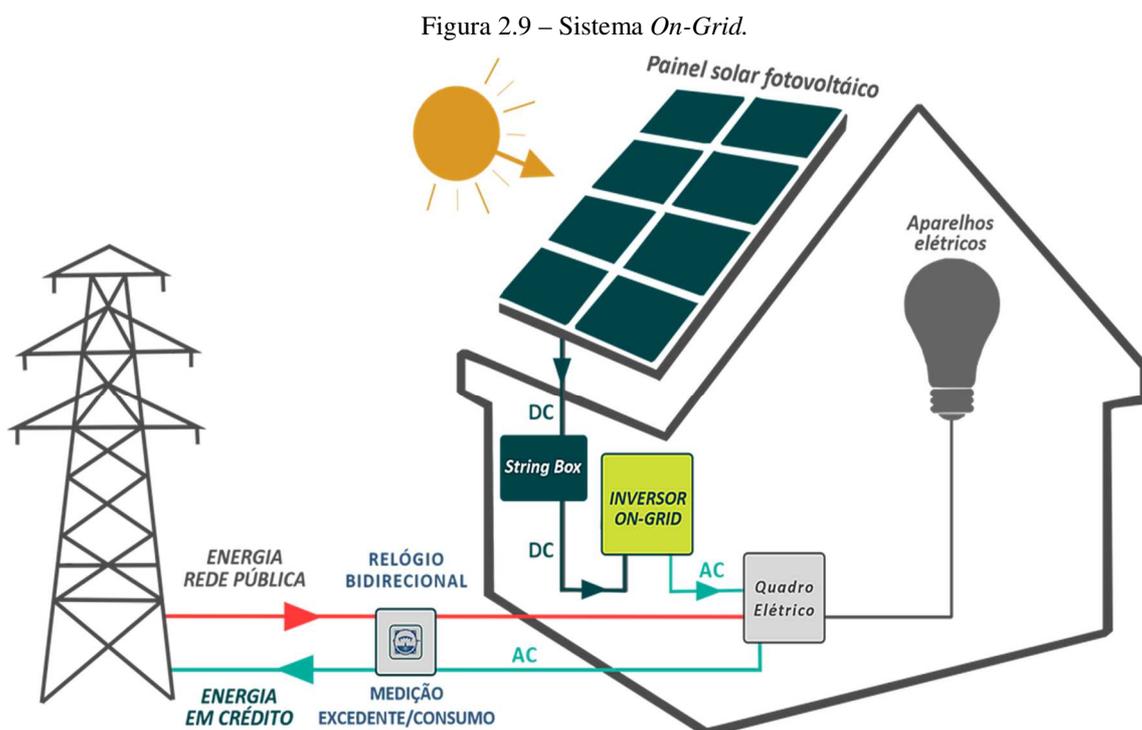
As baterias possuem uma relação direta entre o percentual de descarga e sua vida útil. Quanto maior for a profundidade da descarga da bateria até a próxima recarga mais rapidamente o sistema se degenera, perdendo a eficiência de armazenamento e tendo que ser repostado futuramente. Portanto, pelo fato das baterias ainda serem muito caras e terem vida útil reduzida, os projetos de geração fotovoltaica *off-grid* acabam sendo inviabilizados pelo alto custo de compra e manutenção do sistema.

Após as resoluções de 2012 e de 2015, o medidor bidirecional foi permitido e popularizado entre as distribuidoras de energia. Com esse medidor, tanto a energia que a residência demanda, como a energia que a residência fornece podem ser contabilizadas, dessa forma servindo de crédito na conta de energia para o consumidor (microgerador).

Com isso a geração *on-grid* pode ser iniciada no Brasil mediante a utilização dos seguintes equipamentos:

- Painel Fotovoltaico: gerador de energia contínua;
- *String Box*: proteção contra surtos, curtos e sobrecargas;
- Inversor de frequência: transforma sinais elétricos contínuos em sinais alternados, necessário para inserção na rede elétrica;
- Medidor Bidirecional: responsável por contabilizar a energia elétrica que é inserida na rede e a energia que é consumida pela residência.

Um esquema elétrico dos componentes fundamentais se encontra na Figura 2.9.



Fonte: <https://www.allgreen-solar.com>.

Assim como no sistema *off-grid*, quando se tratam de sistemas conectados à rede elétrica (*on-grid*) a geração distribuída também possui algumas modalidades principais como por exemplo, geração distribuída junto à carga quando um sistema é instalado em uma unidade consumidora e a energia gerada é utilizada no próprio local. Condomínio com geração distribuída e EMUC (Empreendimentos de Múltiplas Unidades Consumidoras) onde a energia gerada é repartida entre os condôminos em percentuais definidos pelos próprios consumidores. Pode também ser utilizada para abastecer as áreas comuns do edifício. Autoconsumo remoto quando o sistema permite ao consumidor instalar um micro ou minigerador em um local diferente de onde reside e utilizar os créditos gerados para compensar seu consumo e reduzir sua conta de energia (desde que dentro da mesma área de concessão). Geração Compartilhada (*Community Solar*) tem-se diversas partes interessadas (pessoas ou empresas) que se reúnem em um consórcio ou cooperativa e investem em um sistema de micro ou minigeração distribuída. Os créditos de energia gerados e injetados na rede pelo sistema são divididos entre esse grupo de consumidores.

É válido ressaltar que em alguns estados existe a aplicação do ICMS sobre a Tarifa de Utilização do Sistema de Distribuição (TUSD), as alíquotas de ICMS aplicado variam de 12% a 32%, dependendo do estado e da faixa de consumo, logo nem sempre é interessante possuir um sistema de geração superdimensionado.

Com a união dos sistemas *off-grid* e *on-grid* é possível compor um sistema híbrido, essa solução pode ser viável em locais de difícil acesso onde o fornecimento de energia não é muito estável, nesse caso uma residência estará suprida de energia para suas necessidades básicas, mesmo que o fornecimento da concessionária seja interrompido.

## 2.5 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

### 2.5.1 CONSTRUÇÃO DO MÓDULO E DA CÉLULA

O Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, CEPTEL, aborda o processo de construção de uma placa/painel e detalha seu funcionamento a nível atômico<sup>6</sup>. O painel é

---

<sup>6</sup> Disponível

em: <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=321#:~:text=Se%20um%20jun%C3%A7%C3%A3o%20pn%20for,origem%20a%20uma%20diferen%C3%A7a%20de](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321#:~:text=Se%20um%20jun%C3%A7%C3%A3o%20pn%20for,origem%20a%20uma%20diferen%C3%A7a%20de)>.

Acesso: 26/04/2021.

composto por várias células dispostas matricialmente, estando conectadas em série mais paralelo.

A célula é composta por dois cristais unidos fisicamente, constituídos majoritariamente de Silício (semicondutor – 4 elétrons na camada de valência) e uma impureza, chamada de dopante. O cristal puro de Silício já é uma estrutura estável onde os átomos se agrupam de forma a cada átomo compartilhar os 4 elétrons com 4 vizinhos como representado na Figura 2.10 ao lado de um cristal de Silício puro (semicondutor intrínseco).

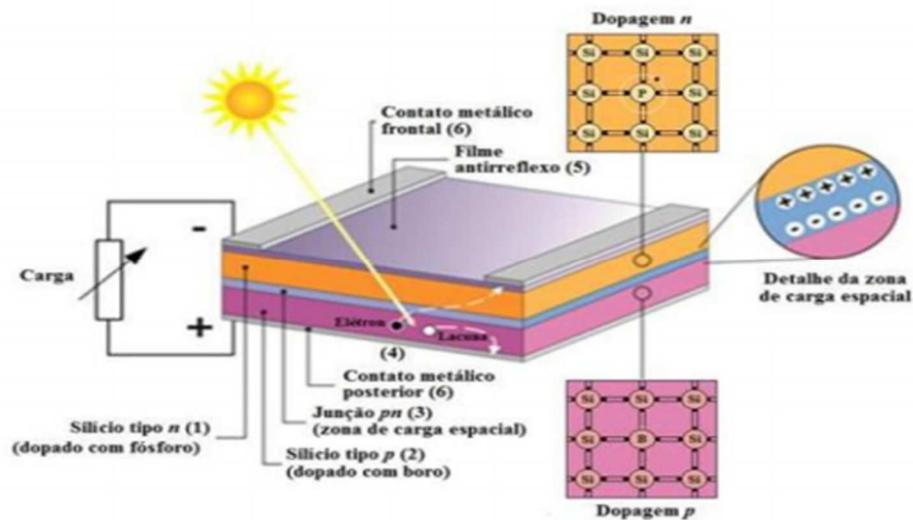
Figura 2.10 – Modelo Atômico + Cristal de Silício.



Fonte: <http://fatecelectronica.blogspot.com/2011/08/materiais-semicondutores.html> / [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicio\\_met%C3%A1lico.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicio_met%C3%A1lico.png).

Um dos dois cristais é dopado com impureza com sobra de elétrons na camada de valência (tipo N - alusão aos elétrons) como o fósforo, arsênio e antimônio. O outro cristal é dopado com impureza com déficit de elétrons na camada de valência (tipo P - detentor de lacunas) como Boro, Gálio e o Índio. Quando um semicondutor é dopado, ele recebe a denominação de semicondutor extrínseco (Figura 2.11).

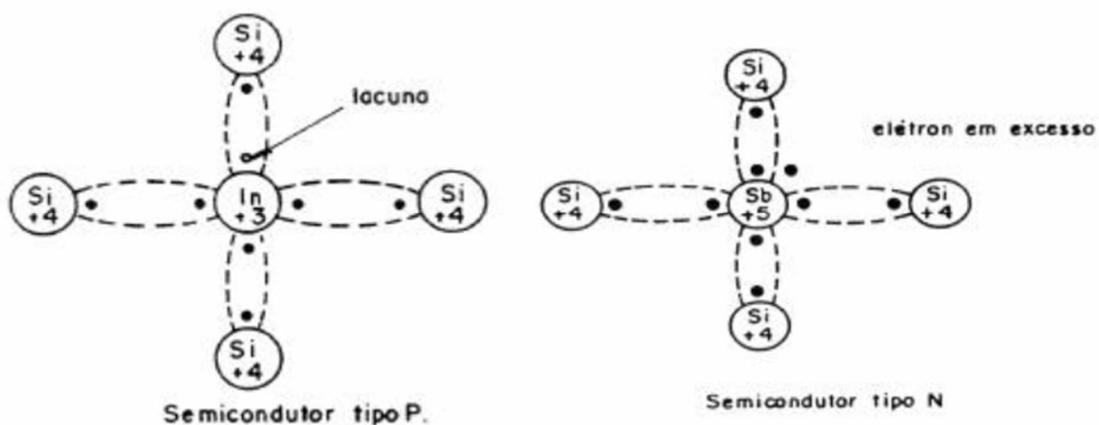
Figura 2.11 – Célula fotovoltaica de junção PN.



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

Essa sobra/déficit de elétrons deve ser entendida quando equiparada ao referencial dos 4 elétrons da camada de valência do Silício que formam a estrutura cristalina. Por isso ter 3 elétrons na camada de valência faz um bom dopante tipo P e ter 5 um bom dopante tipo N, dessa forma mantendo a estrutura do cristal e polarizando a placa. Na Figura 2.12 são representados os modelos atômicos das camadas de valência de semicondutores extrínsecos tipo P (índio) e N (antimônio).

Figura 2.12 – Modelo Atômico Semicondutores Extrínsecos.



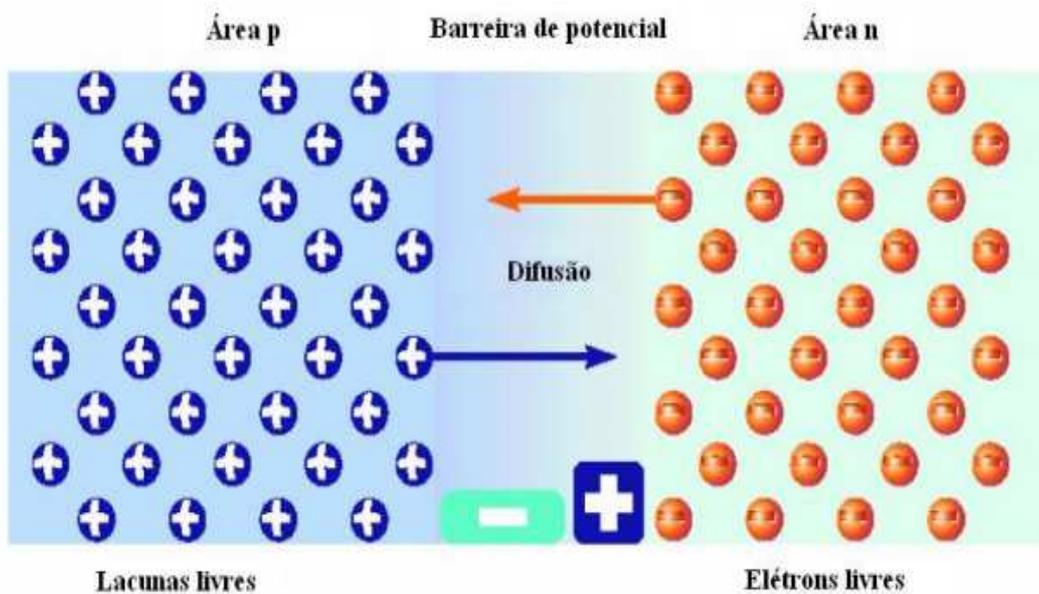
Fonte: <http://fatecelectronica.blogspot.com/2011/08/materiais-semicondutores.html>.

Assim como relatado em Malvino (1997), em posse dos dois cristais dopados, pode-se dar início ao processo de formação da junção PN. Ao unir os dois cristais ocorre um efeito de criação da região de depleção (barreira de depleção - junção PN).

Primeiramente ocorre uma movimentação dos elétrons de N para P (ou de lacunas de P para N), então gradualmente os cristais que antes eram neutros, começam a ficar

polarizados, o tipo N ficando positivo (pois está doando elétrons que possuía previamente) e o P negativo. Em um segundo momento, essa difusão de elétrons chega a um nível de acúmulo de íons tão grande, que o campo elétrico gerado pelos íons interrompe a difusão, chegando a um equilíbrio. A região em que se acumularam os íons recebe o nome de região de depleção ou junção PN. Este processo está representado na Figura 2.13.

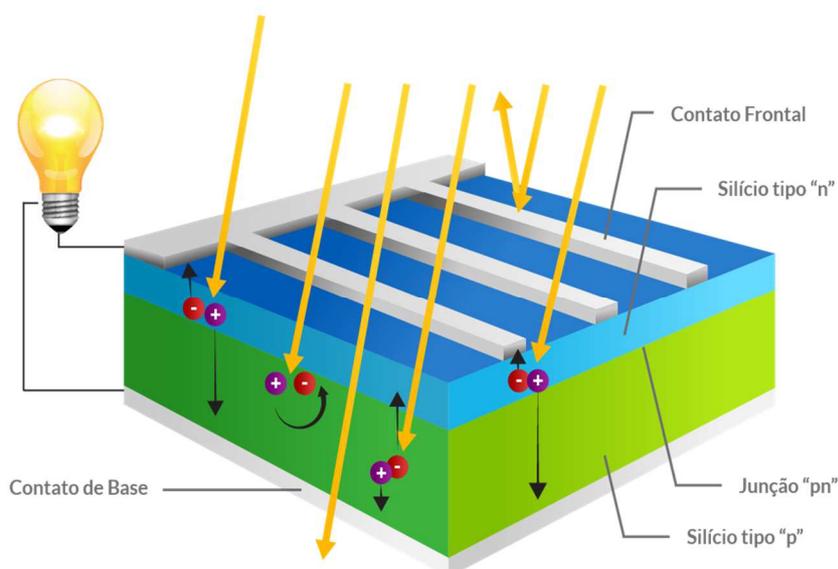
Figura 2.13 – Junção PN.



Fonte: (BARROS, 2011).

Com os cristais unidos e a junção PN equilibrada, acopla-se os contatos metálicos em cada zona da célula (P ou N), agrupa-se com outras células (fazendo conexões em série e em paralelo a depender da tensão/corrente de saída do módulo), encapsula-se e coloca uma camada de vidro temperado para proteção contra chuvas, queda, e demais intempéries que possam vir a danificar as células. Dessa forma o módulo está construído.

Figura 2.14 – Representação de uma célula fotovoltaica.



Fonte: <https://guianortesolar.com.br/energia-solar/celulas-fotovoltaicas/342784>.

### 2.5.2 TIPOS DE CÉLULA

Vários tipos de célula são produzidos atualmente, algumas chegando à marca de 46% de eficiência (com 4 junções PN e com concentrador) ou mais concebida pela *Fraunhofer*, porém em termos comerciais, as tecnologias mais difundidas são as que chegam ao Brasil. Nessa lista temos:

- m-Si: Silício monocristalino com 25% de eficiência;
- p-Si: Silício policristalino com 21,3% de eficiência;
- CdTe: Telureto de cádmio com 22,1% de eficiência;
- a-Si: Silício Amorfo com 13,6% de eficiência;
- CGIS: Disseleneto de cobre índio gálio com 22,3% de eficiência<sup>7</sup>.

Além da eficiência, as células também são avaliadas pela resistência física, maleabilidade, custo, variáveis de interesse no momento de um projeto.

A composição de material semiconductor de Silício cristalino caracteriza essas células como de primeira geração. O Silício é o segundo material mais abundante na superfície do planeta e representa mais de 80% dos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado.

<sup>7</sup> NREL National Renewable Energy Laboratory 2020.

### 2.5.2.1 PRIMEIRA GERAÇÃO

A composição de material semiconductor de Silício cristalino caracteriza essas células como de primeira geração. As células fotovoltaicas monocristalinas são caracterizadas por possuírem um aspecto uniforme, sendo conhecidas como as mais eficientes devido ao transporte eficaz dos elétrons com uma ordem de pureza de 99,99%, sua produção necessita de altas temperaturas (1440°C) o que torna o seu processo de fabricação mais oneroso. Devido a célula possuir uma camada anti reflexiva, esta pode apresentar uma coloração azulada ou preta, como pode ser observado na Figura 2.15 a seguir.

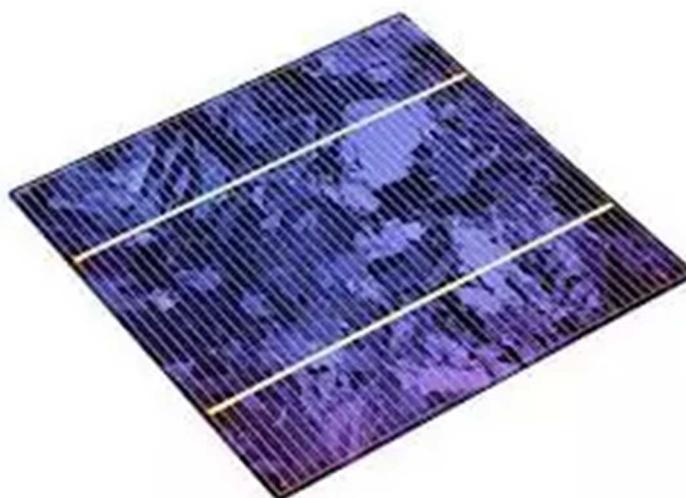
Figura 2.15 – Célula fotovoltaica monocristalina.



Fonte: <https://canalsolar.com.br/>.

As células fotovoltaicas constituídas de Silício policristalino (p-Si), apresentam a mesma matéria prima do monocristalino todavia diferem do aspecto uniforme por serem formadas por um aglomerado de inúmeros cristais, com orientações espaciais e tamanhos diferentes, como pode ser visualizado na Figura 2.16, tornando esse material menos eficiente em termos de conversão fotovoltaica. Sua produção envolve menores custos quando comparada a célula constituída de Silício monocristalino uma vez que se trata de um processo de fabricação mais simples onde são utilizadas menores temperaturas

Figura 2.16 – Célula fotovoltaica Policristalina.



Fonte: <https://canalsolar.com.br/>.

#### 2.5.2.2 SEGUNDA GERAÇÃO

As células de segunda geração, também conhecidas como células de filme fino, diminuíram os custos no processo de fabricação em relação às células fotovoltaicas de primeira geração.

Essas células possuem uma fina película depositada sobre substratos de baixo custo como metais, vidros, cerâmicas e alguns polímeros apresentando eficiências de conversões mais baixas, sendo necessário uma maior área para atingir a mesma potência, são menos sensíveis a altas temperaturas (tornando mais adequados para locais com temperaturas muito elevadas) e sua eficiência não sofre alterações consideráveis relacionado ao sombreamento da célula.

Devido a versatilidade e por serem mais leves, essas células são utilizadas desde cobertura de telhados ou fachadas de edifícios até em relógios ou calculadoras (Figura 2.17).

Figura 2.17 – Módulos fotovoltaicos de filmes finos flexíveis.



Fonte: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>.

As células de filme fino podem ser classificadas como: a-Si:H (Silício amorfo hidrogenado), CdTe, CIGS, CIS (disseleneto de cobre e índio).

Tirando as células de Silício amorfo, todas as tecnologias já passaram de 20% de eficiência, conforme supracitado. As células de arseneto de gálio (GaAs) também tem marcas excelentes de eficiência, chegando a 29,1%, porém não são muito comercializadas aqui no Brasil. Isso se deve ao fato do cádmio (Cd) ser um elemento tóxico e o telureto (Te) um material raro. Já o CIGS por possuir um custo muito elevado durante o processo de fabricação (MENDONÇA, 2016).

### 2.5.2.3 TERCEIRA GERAÇÃO

As tecnologias utilizadas recentemente contemplam a terceira geração, nessa classe estão inclusas as células de multijunção, células sensibilizadas por corantes (DSSC)<sup>8</sup> e células orgânicas ou híbridas. As células multijunção quando comparadas as células de segunda geração apresentam eficiências maiores devido o emprego de mais de um semicondutor com *gaps* de energia diferentes, permitindo que uma maior parcela do espectro solar seja absorvida.

Já as células fotovoltaicas sensibilizadas por corantes, também conhecidas como células solares foto-eletróquímicas (células de Grätzel) têm como base um semicondutor formado entre um fotoeletrodo, uma solução eletrolítica e um contra eletrodo, ou seja, um sistema fotoeletroquímico. Essas células possuem eficiência inferior as de primeira geração, todavia apresentam um menor custo de produção.

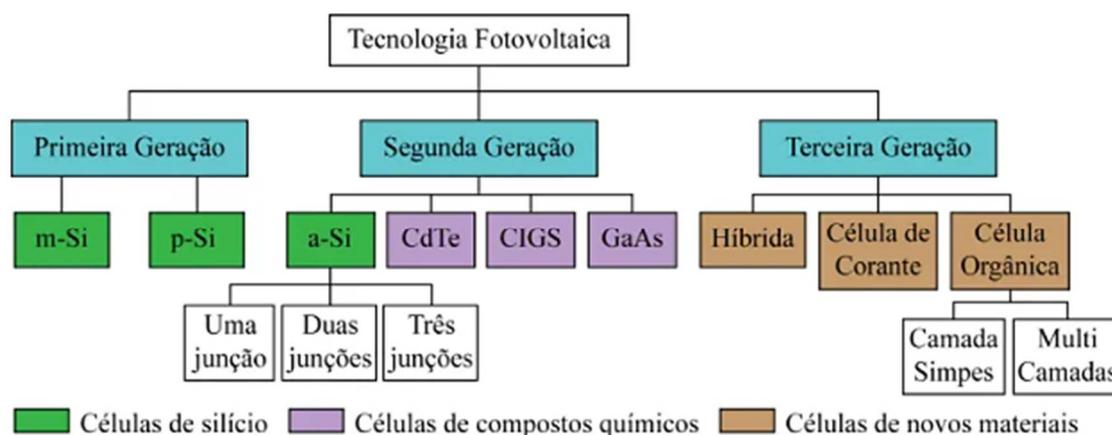
---

<sup>8</sup> *Dye-Sensitized Solar Cell*

As células solares orgânicas utilizam em sua fabricação um material de baixo custo e alto rendimento de produção que em grande parte é feito de plástico permitindo que possuam uma flexibilidade mecânica e sejam descartáveis.

As tecnologias utilizadas na terceira geração tem como finalidade a redução dos custos de produção, fazendo uso de materiais não tóxicos e abundantes na natureza. Na Figura 2.18, é possível observar as principais tecnologias anteriormente citadas.

Figura 2.18 – Principais tecnologias de células fotovoltaicas.



Fonte: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>.

### 2.5.3 FUNCIONAMENTO DA CÉLULA E DO MÓDULO

Com a incidência de luz solar no painel, energia é transmitida da luz para os elétrons da célula em forma dos pacotes de energia já mencionados previamente, fótons. Como apresentado foi graças à descoberta da dualidade onda partícula na mecânica quântica, que se constatou que a luz ao incidir nos elétrons se manifestava como partícula, e cada fóton que ela carrega, entrega energia de forma discreta correspondente à:

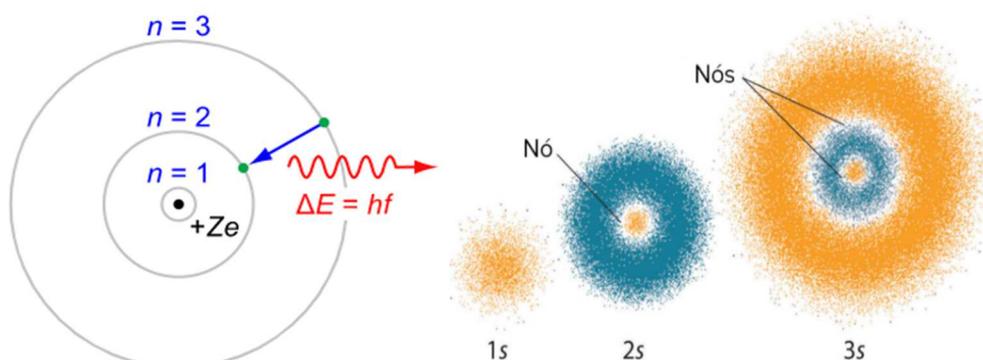
$$E = h * f \quad (2.1)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck (homenagem ao pai da física quântica, Max Planck) e  $f$  é a frequência da onda de luz em hertz<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/quantum-numbers-and-orbitals/a/the-quantum-mechanical-model-of-the-atom>. Acesso em: 27/04/2021.

O elétron excitado pelo fóton se afasta do núcleo do átomo, podendo saltar de um orbital para o outro, denominado de salto quântico (de acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg é impossível determinar simultaneamente a energia e o posicionamento de um elétron). O orbital é a região onde provavelmente o elétron permeará, mas não é certa a sua localização. Na Figura 2.19 são apresentados no lado esquerdo o modelo atômico proposto por Bohr e no lado direito o modelo proposto após as considerações de outros físicos como De Broglie, Heisenberg e Schrodinger a partir do modelo de Bohr.

Figura 2.19 – Salto Quântico + Modelo Atômico Atual.



Fonte: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/quantum-physics/quantum-numbers-and-orbitals/a/the-quantum-mechanical-model-of-the-atom>.

Os elétrons mais afastados do núcleo recebem menor influência de atração eletromagnética, portanto mais próximos da banda de condução, onde podem se locomover como corrente elétrica. Sob ação do campo elétrico formado pela barreira de depleção, os elétrons mais afastados do núcleo que foram excitados pelos fótons, circulam por um circuito elétrico, assim como representado na Figura 2.19.

As células fotovoltaicas podem ter diferentes modelagens elétricas, uma suficiente é apresentada em Hecktheuer (2001) e citada em Coutinho (2016). Por possuir uma junção PN, o entendimento é de se comportar como um diodo, que possui a mesma junção, além de estar associado com uma fonte elétrica (fonte receptora de fótons e impulsadora de elétrons). A corrente ideal ( $I_i$ ) resultante da célula é dada como a soma algébrica da corrente fotogerada ( $I_L$ ) quando a célula está iluminada e a corrente da célula com a junção no escuro ( $I_D$ ):

$$I_i = I_L - I_D \quad (2.2)$$

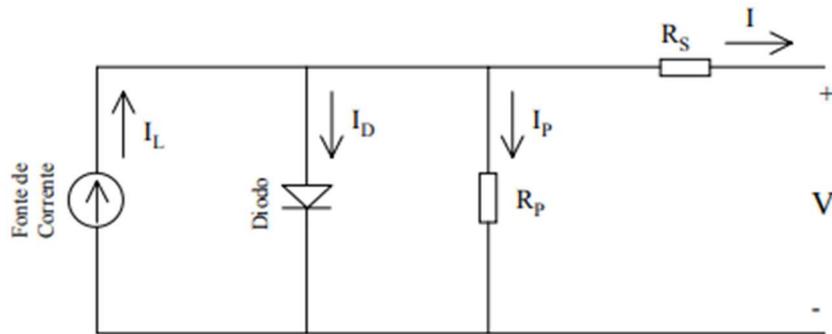
Uma aproximação para determinar  $I_D$  é utilizar a seguinte equação:

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Onde:  $I_0$  é a corrente de saturação reversa,  $e$  é a carga de um elétron,  $V$  é a tensão nos terminais da célula,  $m$  é o fator de idealidade do diodo,  $k$  é a constante de Boltzman e  $T$  é a temperatura de junção da célula.

Uma vez fixados os parâmetros do modelo da célula, a corrente de escuro é uma função exponencial da tensão nos terminais. Quando são acrescentadas, no modelo ideal, as perdas Ôhmicas por resistência elétrica (série) e por correntes de fuga (paralelo), o modelo fica como mostrado na Figura 2.20.

Figura 2.20 – Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica



Fonte: (HECKTHEUER, 2001).

Segundo Kirchoff, o somatório de todas as correntes que vão para um nó é zero, portanto:

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

$$I = -I_p - I_D + I_L = -\frac{V}{R_p} - \frac{IR_S}{R_p} + I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$I = \frac{\left[ -\frac{V}{R_p} + I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_S)}{mkT}\right) - 1 \right] \right]}{1 + \frac{R_S}{R_p}} \quad (2.6)$$

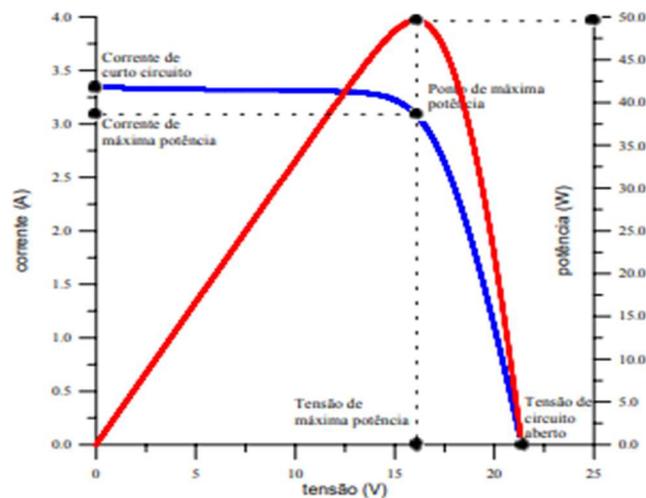
Considerando que esta seja uma célula fabricada e mantida com alta qualidade, os valores de  $R_p$  são altos (célula bem encapsulada) e de  $R_s$  são baixos (baixas perdas resistivas), o valor da tensão de terminal permanece sendo inversamente proporcional ao da corrente de saída, porém com característica exponencial.

Para modelar os módulos a partir das células, deve-se multiplicar o número de células associadas em série  $N_s$  pelo fator  $mkT/e$ , obtendo-se então:

$$I = \frac{\left[-\frac{V}{R_p} + I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{e(V + IR_s)}{mkTN_s}\right) - 1 \right]\right]}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (2.7)$$

A Figura 2.21 se refere à curva (azul) de funcionamento  $I \times V$  de um módulo específico e a curva (vermelha) de potência para o par  $(I, V)$ :

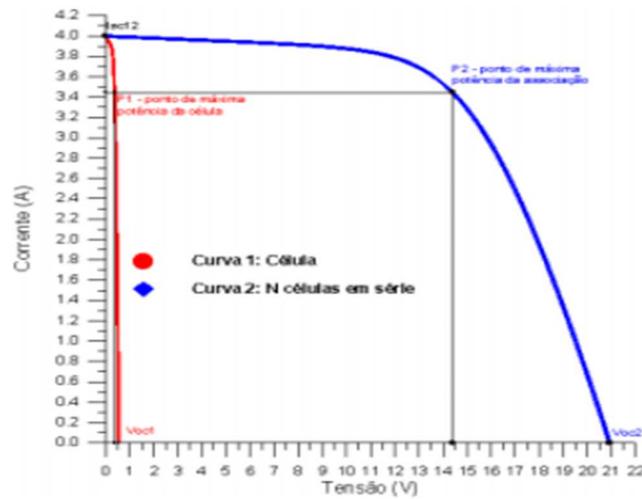
Figura 2.21 – Gráfico  $I \times V \times P$  módulo fotovoltaico.



Fonte: (HECKTHEUER, 2001).

É perceptível que, no gráfico azul após um certo nível de tensão, ocorre um decaimento muito acelerado devido à influência exponencial da corrente de escuro. Ao aumentarmos o número de células em série, a tensão sobre cada uma diminui, refletindo no momento que ocorre o decaimento (joelho), esticando também a tensão de máxima potência (efeito da Figura 2.22).

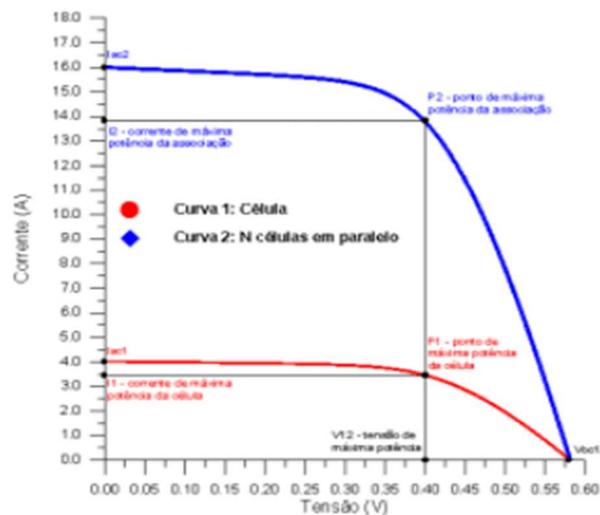
Figura 2.22 – Gráfico I x V: 1 célula (vermelho), N células em série (azul).



Fonte: (HECKTHEUER, 2001).

A associação em paralelo constitui efeito de somar as correntes das células, não alterando a tensão sobre, sendo representado na Figura 2.23.

Figura 2.23 – Gráfico I x V: 1 célula (vermelho), N células em paralelo (azul).



Fonte: (HECKTHEUER, 2001).

Ainda na curva I x V podemos identificar a corrente de curto circuito ( $V=0$ ) e a tensão de circuito aberto ( $I=0$ ) dos módulos. No gráfico vermelho, de potência, encontra-se o melhor ponto de operação, em que a corrente e tensão tem seu produto maximizado.

## 2.6 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O conjunto de módulos ligados em série ou paralelo é chamado de painel. Conforme representado na Figura 2.24.

Figura 2.24 – Ilustração de células, módulos e painéis



Fonte: <https://www.electronica-pt.com/painel-solar-fotovoltaico>

A eficiência dos painéis fotovoltaicos depende da eficiência de cada célula, portanto do tipo de tecnologia utilizada nela, da irradiação/irradiância solar (irradiação é a integral da irradiância no tempo, sendo irradiação a energia pela área do módulo ao invés de ser a potência pela área), da temperatura (para painéis bem dimensionados, quanto mais frio, maior é a máxima potência) e da sujeira do painel (uma vez que o vidro protetor precisa estar limpo para que a luz do sol atinja as células). De acordo com o manual de engenharia desenvolvido pela CEPEL<sup>10</sup> a fórmula para encontrar a eficiência de um painel é dada por:

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{MP}}{GA_M} \quad (2.8)$$

Onde  $P_{MP}$  é a potência máxima,  $G$  é a irradiância em  $W/m^2$  e  $A_M$  é a área do módulo.

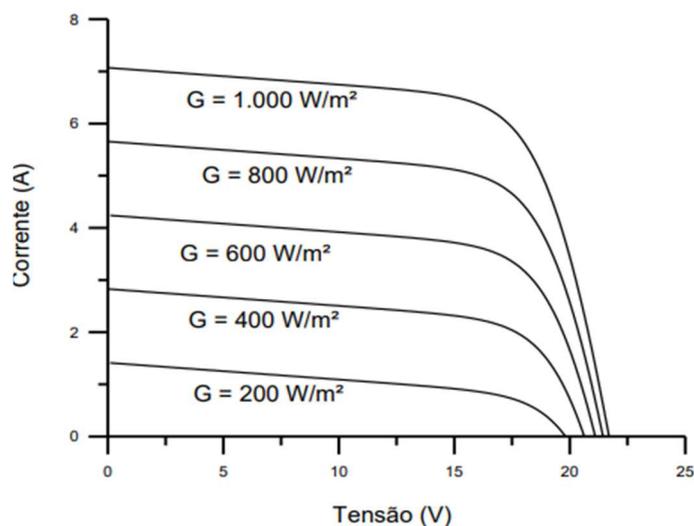
Em condições padrão, a irradiância vale  $1000W/m^2$ , e quando multiplicada pela área do módulo, temos um valor referência para nos guiar o que seria ideal para um

<sup>10</sup> Disponível

em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 27/04/2021.

módulo gerar, sendo então os 100% predeterminados para o rendimento. A potência máxima é encontrada como mencionado na seção anterior, referente aos módulos. Na Figura 2.25 são apresentadas as curvas I x V referente a irradiâncias menores do que a padrão.

Figura 2.25 – Gráficos I x V de frações da irradiância padrão

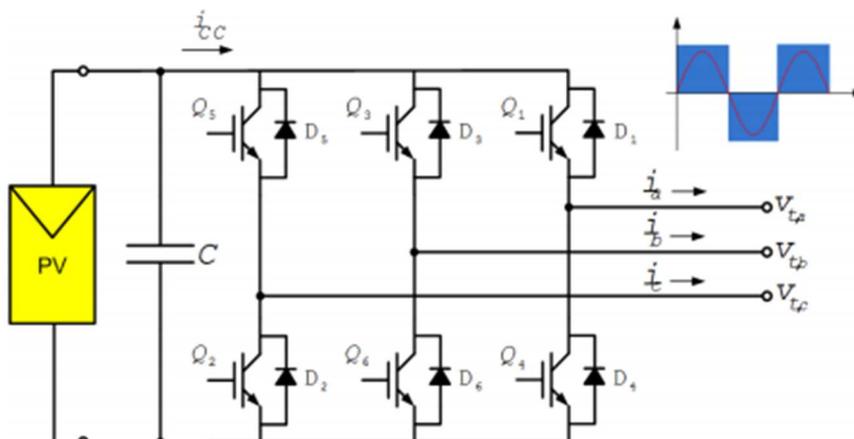


Fonte: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf).

## 2.7 INVERSORES

Uma vez que a corrente emitida pelo painel fotovoltaico é contínua e a rede elétrica brasileira opera alternadamente, é necessário um equipamento capaz de transformar CC em CA, essa é a função de um inversor no sistema de geração fotovoltaica. Na figura 2.26 é apresentado o diagrama elétrico de um inversor de tensão trifásico.

Figura 2.26 – Inversor de tensão trifásico acoplado a módulo solar.

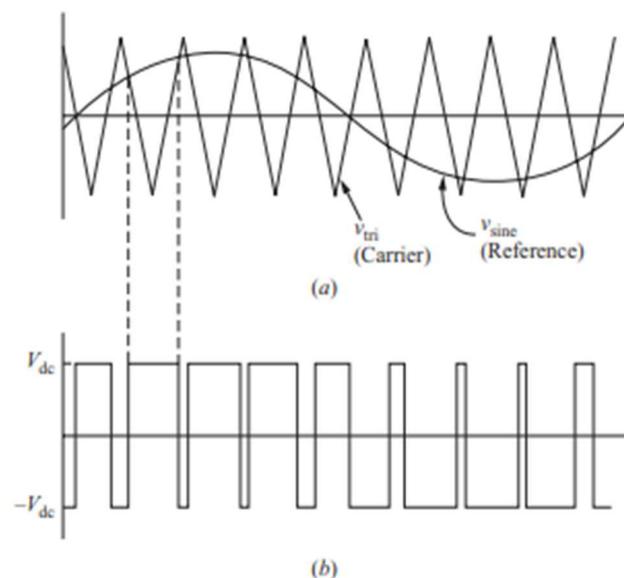


Fonte: <http://www.eletrica.ufpr.br/p/arquivostccs/493.pdf>

Em acordo com Hart (2011), primeiramente temos o módulo de filtragem de baixas frequências representado pelo capacitor, responsável por atenuar variações bruscas de tensão e corrente momentâneas que ocorram no painel fotovoltaico (representado pela sigla PV). Após isso temos as etapas de chaveamento pelos componentes *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), onde em cada fase existe um braço com 2 IGBTs, que em atuação coordenada e complementar (quando um está acionado, o outro está desativado) são responsáveis pela modulação por largura de pulso (PWM).

Essa modulação tem como premissa comparar uma onda triangular (portadora) com uma onda senoidal (referência), dessa forma quando uma estiver maior que a outra, o par está numa configuração (ex: Q1-on Q4-off) e quando estiver menor o par inverte (ex: Q1-off Q4-on), como representado na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Estratégia PWM em braço de Inversor de frequência.



Fonte: (HART, 2011).

A tensão apresentada na saída do inversor em um ciclo *on-off*, é a média entre o tempo que está desligado e o tempo que está ligado. Portanto, quanto maior for o período ligado do pulso em comparação com o desligado, maior será a média de tensão da saída, e quanto mais frequente for o ciclo *on-off*, mais próxima de uma senóide será a saída do inversor. A frequência do ciclo é determinada pela frequência da portadora e o limite de ciclos é dado pela capacidade de chaveamento dos IGBTs.

Outro aspecto importante do inversor para o uso em sistemas solares é a função MPPT - *Maximum Power Point Tracking*. Ela é responsável por tentar alcançar

correntes e tensão que resultem na máxima potência encontrada no joelho dos gráficos I x V x P.

## 2.8 RESOLUÇÕES E NORMAS REGULAMENTADORAS

A medida que os sistemas de energia solar fotovoltaicos passaram a ter seu uso mais disseminado foi observada a necessidade de aplicação de normas técnicas regulamentadoras. De acordo com Lopes (2020) a elaboração dessas normas tem sua finalidade atribuída a intenção de garantir a qualidade das instalações e conexões à rede elétrica de distribuição, assim como estabelecer procedimentos de segurança do trabalho para os funcionários e fornecimento adequado de energia elétrica aos consumidores.

Em virtude de a atividade de geração de energia fotovoltaica já ser regulamentada no país, é fundamental conhecer e respeitar o seu sistema normativo que, inclusive, balizou o projeto e a execução do objeto deste trabalho. O conjunto de normas e resoluções são instituídas pelo órgão regulador e fiscalizador da atividade energética no Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. No âmbito regional, as concessionárias de distribuição de energia elétrica também estabelecem normas subsidiárias às normas da ANEEL restritas à sua área de concessão.

A conexão de sistemas de geração distribuída é regida no Brasil por meio de normatizações recentes com início em abril de 2012 através da Resolução Normativa 482/2012 (REN 482/2012), da ANEEL, que permitiu definir o que viria a ser a mini e a microgeração distribuída, bem como a permissão para que qualquer consumidor possa gerar sua própria energia renovável conectada à rede de distribuição, com o acúmulo de créditos energéticos, ou *net metering*, que é utilizado hoje, descrevendo inclusive, os critérios necessários para a conexão à rede de sistemas de energia solar fotovoltaicos.

Essa Resolução foi resultado de um processo de Consulta Pública que estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e mini geração distribuída ao sistema de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

Visando promover melhorias na norma instituída, em 2015 a ANEEL realizou a Audiência Pública que resultou na publicação da Resolução Normativa – REN ° 687/2015 com a finalidade de mitigar os custos e o tempo para a conexão da micro e mini geração, programar o sistema de compensação de energia elétrica de acordo com as condições

gerais de fornecimento, estender o público alvo e melhorar as informações na fatura de energia elétrica.

A ANEEL determinou que centrais geradoras de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW seriam consideradas como microgeração de energia fotovoltaica, enquanto geradores com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL seriam considerados como minigeração. Também foram criados formulários padrões para a realização da solicitação de acesso pelo consumidor e o prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW que é de 34 dias. Entre algumas modificações ainda se destaca o aumento da validade dos créditos, que passaram de 36 meses para 60 meses, ou seja, caso a energia injetada na rede seja superior à consumida, cria-se um crédito de energia que pode ser utilizado para abater o consumo da unidade consumidora nos meses subsequentes ou em outras unidades de mesma titularidade.

Em outubro de 2017 foi publicada a Resolução Normativa nº 786/2017, por meio do qual a Agência Nacional de Energia Elétrica alterou a Resolução Normativa nº 482/2012 estabelecendo que, de maneira resumida, a micro ou mini geração distribuída permita que unidades consumidoras tenham pequenas centrais geradoras para a produção de energia elétrica, a qual é injetada nas redes das distribuidoras e posteriormente compensada com o consumo da própria unidade consumidora ou de outra unidade de sua titularidade, fazendo com que a unidade consumidora pague menos (ou até mesmo nada) pelo consumo de energia elétrica.

É de fundamental importância ter ciência que a Resolução Normativa 482/2012 teve como prazo de validade previsto o ano de 2020, e desde 2019 os órgãos competentes vem trabalhando no Projeto de Lei 5829/19 que deve vir a fundamentar a nova Resolução Normativa sobre a geração distribuída. O Projeto de Lei 5829/19 foi aprovado na câmara dos deputados no dia 18/08/2021 e segue para apreciação do Senado Federal.

Vale salientar que para fim de projeto e solicitação de conexão de sistemas de geração distribuída a rede de distribuição, é fundamental seguir as orientações normativas da concessionária de energia da região de conexão do sistema.

A concessionária que atua em vários estados brasileiros e tem concessão sobre o sistema de distribuição da Paraíba é a Energisa, que normatiza o acesso a sua rede de distribuição por meio das Normas de Distribuição Unificadas 013 e 015 (NDU 013 e NDU 015). Estas normas definem os critérios mínimos que devem ser observados para a ligação de sistemas de geração distribuída em baixa tensão, NDU 013, e em média tensão,

NDU 015. Trazendo os modelos de documentos (relacionamento operacional, solicitação de acesso), os prazos dos trâmites, características de proteção, enfim, todos os critérios que o acessante deve obedecer para ter sua planta de geração distribuída conectada à rede.

## 2.9 MÉTODOS FINANCEIROS PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para toda proposta de projeto de investimento um dos fatores determinantes para aceitação do mesmo é que ele seja economicamente viável para o investidor, partindo desse princípio, é possível utilizar algumas ferramentas da matemática financeira e da engenharia econômica para analisar a viabilidade econômica e rentabilidade providas pela implantação de um sistema de geração fotovoltaica.

Visando prover um panorama comparativo com outras possibilidades de investimento de baixo risco, alguns métodos financeiros para seleção de alternativas de investimento podem ser aplicados.

Nesse estudo os métodos de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) permitirão definir a viabilidade econômica do projeto de implantação do sistema fotovoltaico dentro do seu período de vida útil, por meio da comparação com investimentos em ativos do mercado financeiro, assim como o método *Payback* descontado trará uma noção do tempo necessário para recuperar o investimento inicial para implantação do mesmo.

### 2.9.1 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)

O método Valor Presente Líquido tem como principal finalidade calcular um possível lucro gerado pelo projeto por meio do transporte de todos os fluxos de caixa futuros para um valor presente em função de uma taxa de desconto.

De acordo com Nogueira (2012) o método VPL consiste em transportar todos os fluxos de capitais para o momento presente e efetuar a sua soma algébrica, com a observação de que todos os benefícios apresentarão sinais positivos e todos os custos serão negativos, ou seja, esse método demonstra, em termos de valor presente, o impacto dos elementos futuros associados a um projeto ou uma alternativa de investimento, mediante os fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil.

Sendo assim, como o próprio nome sugere, o VPL resulta da adição de todos os fluxos de caixa na data zero ou data base.

Pode-se calcular o VPL de acordo com a seguinte equação.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1 + K)^t} \quad (2.9)$$

Onde,

$t$  = Período do horizonte de planejamento;

$I$  = Investimento inicial;

$FC_t$  = Fluxos de caixa referente a cada ano no horizonte de planejamento;

$K$  = Custo do capital ou Taxa de Desconto.

Depois de aplicar a Equação 2.9 ao problema, faz-se uma análise temporal e comparam-se os fluxos de caixas distintos.

Um valor positivo para o VPL significa ganhos e o projeto é economicamente viável, se for negativo indica perdas e o projeto é inviável, e um VPL nulo indica uma situação indiferente (benefícios e custos se anulam).

A melhor alternativa será aquela com maior VPL, já que o mesmo permite calcular a atratividade de um investimento

## 2.9.2 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é o valor da taxa de juros que torna zero o Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa de capitais.

Logo, através de sua análise devem ser aceitas situações nas quais a relação entre a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e a TIR garanta um VPL positivo.

Ou seja, se a Taxa Interna de Retorno for maior que a Taxa Mínima de Atratividade, tem-se um projeto economicamente viável, caso contrário, o projeto é inviável e não deverá ser aceito. Caso a TIR seja igual a TMA, o projeto é indiferente, pois não agrega ou desagrega valor para a empresa (LOPES, 2020).

### 2.9.3 *PAYBACK* DESCONTADO

O método *payback* descontado em termos gerais trata-se do tempo necessário para que o investimento inicial seja inteiramente coberto pelos rendimentos acumulados, ou seja, esse método aborda o tempo necessário para recuperar o investimento inicial do projeto.

Deste modo é um indicador utilizado para avaliar o tempo de retorno, bem como os riscos e a viabilidade de um investimento. Difere-se do *payback* simples por descontar o custo de capital nos fluxos de caixa, ou seja, os valores das entradas e saídas são baseados no tempo presente.

Segundo Lopes (2020) a partir do tempo máximo tolerado (TMT), que nada mais é do que o tempo estimado pelas empresas para que se obtenha o retorno financeiro, pode-se realizar uma comparação de acordo com o *payback*, e assim estimar-se uma melhor decisão quanto à implantação do projeto, onde se o *payback* for menor do que o TMT, o projeto deve ser aceito, caso contrário, torna-se inviável.

## 3 METODOLOGIA

Nos tópicos a seguir serão descritos os métodos utilizados para realização dos estudos referentes ao dimensionamento, bem como a análise financeira de um projeto de implantação de sistema de geração de energia fotovoltaica. As instalações do condômino consistem de dez unidades consumidoras, de forma que se faz necessário a utilização do sistema de compensação de créditos para redução dos valores pagos nas contas de energia.

### 3.1 LEVANTAMENTO DO CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA

#### ELÉTRICA

Para realização do dimensionamento do sistema foi realizado um levantamento do consumo médio mensal de cada uma das unidades consumidores e posteriormente foi obtido o consumo médio total referente a soma das médias.

Primeiramente para obtenção de um melhor dimensionamento do sistema de geração de energia fotovoltaica será realizado o levantamento do consumo médio pela soma do consumo de todos os meses em função do número de meses somados, conforme Equação (3.1):

$$\text{Consumo Médio} = \frac{\sum \text{Consumo de cada mês}}{\text{Número de meses somados}} \quad (3.1)$$

Esse valor será de fundamental importância uma vez que baseado no resultado obtido dimensiona-se os componentes do sistema como o arranjo dos módulos fotovoltaicos, dispositivos de proteção e condutores e o inversor, de forma que se supra a demanda energética requerida.

## 3.2 LOCALIZAÇÃO, POSICIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

Para realizar um bom projeto, um dos passos fundamentais é a avaliação do recurso solar do local da instalação, nessa avaliação é necessário utilizar alguma ferramenta de geolocalização, por exemplo o sistema de GPS do *Google Maps*, para determinar as coordenadas geográficas do local, e com base nestas coordenadas consultar o potencial solar da região.

Na realização da consulta será utilizado o site do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sergio de S. Brito (CRESESB - <http://www.cresesb.cepel.br/>) no qual existe um centro de dados gratuito contendo informações de grande relevância como a irradiação solar diária média mensal e a inclinação de direcionamento dos painéis, dados diretamente relacionados com o potencial do recurso solar.

A instalação da usina fotovoltaica será realizada em duas localidades uma em solo e a outra sobre uma estrutura referente a cobertura do espaço destinado ao salão de festas do condomínio, a escolha do local visa um espaço que permitirá o máximo de eficiência dos módulos, com a prevenção de que não ocorra sombreamento no decorrer do dia.

## 3.3 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Partindo do princípio que módulos fotovoltaicos são elementos constituídos por um agrupamento de células que a amplo modo são responsáveis por captar a luz do sol e converte-la em energia elétrica fotovoltaica, sabe-se que podem ser apresentados por sua potência-pico (Wp) e pelos modelos de células que os constituem.

Sendo assim para o melhor dimensionamento de como serão dispostos a fim de se obter uma melhor exposição solar algumas características são importantes e deverão ser avaliadas para o correto dimensionamento do sistema. Aspectos como: Tensão de Máxima Potência (Vmpp); Tensão em Circuito Aberto (Voc); Corrente de Máxima Potência (Ioc); Corrente de Curto Circuito (Isc); Potência Máxima (Pmax) e a tensão nominal; Eficiência; Coeficientes de Temperatura; Coeficientes de Radiação e o Fator de Forma (FF).

Relacionando os aspectos citados anteriormente nos itens 2.1 e 2.2 será obtido um valor de potência instalada necessário para suprir a demanda energética. A partir deste valor serão determinados o número de módulos e a potência do inversor adequados para o sistema.

### 3.4 DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

Conforme supracitado, baseado na potência instalada será definido o inversor a ser utilizado visando avaliar o custo benefício, uma vez que há uma gama de modelos e fabricantes disponíveis no mercado.

Considerando que o estudo em questão tratará de um sistema fotovoltaico conectado à rede, será avaliado qual tipo de inversor se adequa melhor nessa aplicação, uma vez que esses podem ser classificados quanto ao posicionamento e conexão junto aos módulos em: inversores centrais, inversor *Multistring*, inversor de *String* e micro inversor associado módulo solar.

### 3.5 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Em virtude de o sistema fotovoltaico conectado à rede ser composto de forma simplificada por um conjunto de módulos fotovoltaicos, cabeamento de corrente contínua (CC), *string box* com proteções CC, inversor, cabeamento de corrente alternada (CA) e proteção CA, faz-se necessário a aplicação de algumas normas que determinam os critérios de proteção que um sistema fotovoltaico deve possuir, tanto em sua parte CA quanto sua parte em CC.

Logo, o presente estudo acompanhará o dimensionamento dos dispositivos de proteção e conectores visando a aplicação das normas NBR 5410, 5419, 16612 e 16690 no projeto de instalação da usina solar tendo que o conjunto de normas prevê que as instalações devem ter como características básicas a proteção contra choques elétricos do usuário bem como as proteções do sistema contra efeitos térmicos e incêndios, sobrecorrente, sobretensão, descargas atmosféricas, ante ilhamento e capacidade de seccionamento.

### 3.6 ANÁLISE FINANCEIRA

Mediante o projeto do sistema de energia solar fotovoltaica serão utilizados alguns métodos de análise financeira visando avaliar a capacidade desse projeto com relação a geração de lucro, assim como analisar se a implantação da usina solar se trata de um projeto viável economicamente.

Aplicados os métodos do Valor Presente Líquido, da Taxa Interna de Retorno e *Payback Descontado*, os resultados obtidos permitirão uma análise de correlação entre investimento inicial e possível ganho patrimonial gerado pela implantação do sistema, bem como com a rentabilidade das aplicações em ativos do mercado financeiro. Neste processo é possível quantificar o tempo necessário para se recuperar o capital investido bem como a sua taxa lucro ao longo do tempo de funcionamento da usina.

Vale salientar que a análise financeira além de viabilizar uma melhor visualização acerca do investimento aplicado permite a percepção de uma valorização do imóvel no qual o sistema foi instalado.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Nos tópicos seguintes serão desenvolvidos os métodos de dimensionamento, projeto e análise financeira mediante a implantação de um sistema de geração solar fotovoltaico para redução das despesas com energia elétrica das dependências de um condomínio de alto padrão localizado nas imediações da cidade de Campina Grande, Paraíba.

### 4.1 LEVANTAMENTO DO CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA

#### ELÉTRICA

A primeira etapa para realização do dimensionamento de um sistema solar é o levantamento do consumo médio de energia. Para o caso em estudo as dependências do condomínio são atendidas por um total de 11 Unidades Consumidores (UC), donde uma delas é a principal e na qual será conectado o sistema de geração. As 10 UCs restantes serão atendidas pelo sistema de compensação de energia, com percentuais determinados da geração excedente. A tabela 4.1 demonstra os valores de consumo das 11 unidades desde o mês de maio de 2020 até o mês de março de 2021, bem como a média de consumo mensal por unidade e a total.

Tabela 4.1 – Cálculo da média de consumo mensal em kWh.

		05/20	06/20	07/20	08/20	09/20	10/20	11/20	12/20	01/21	02/21	03/21	Média
1	4/2701779	314	237	262	259	226	185	196	170	185	160	181	215,9
2	4/2272565	838	667	723	735	682	655	733	649	706	704	819	719,2
3	4/2272011	227	184	231	246	232	231	246	210	206	175	196	216,7
4	4/2276566	1271	1008	1123	1180	1098	1086	1236	1085	1191	1073	1275	1147,8
5	4/2272029	297	269	347	345	301	259	308	534	538	384	516	372,5
6	4/2271633	253	185	188	158	170	229	293	196	209	360	271	228,4
7	4/2271625	2474	1792	1824	1890	1919	1973	2020	1804	2061	1817	2016	1962,7
8	4/2271765	1209	951	1063	1082	1028	987	1141	1008	1142	1025	1143	1070,8
9	4/2701761	188	156	256	257	231	229	248	215	205	192	215	217,5
10	4/2272003	570	450	361	427	613	688	2171	3206	4354	3975	4008	1893,0
11	4/3564929	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,73
	Somatório mensal	7641	5899	6378	6579	6500	6522	8592	9077	10797	9865	10648	8045,27

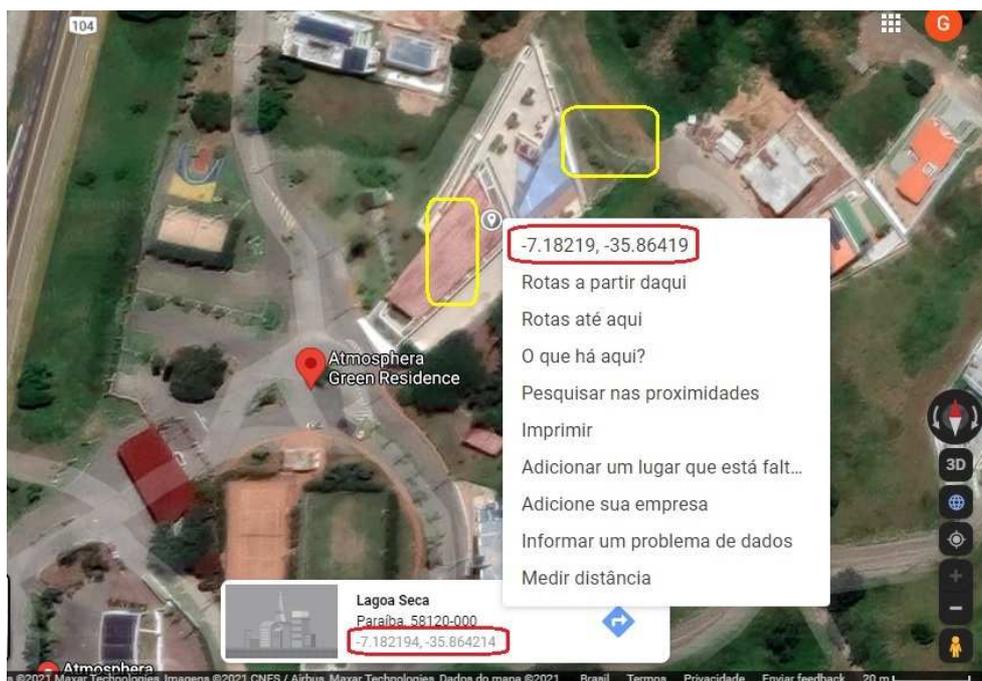
Fonte: Próprio autor.

Temos que o condomínio como um todo apresenta um consumo médio mensal de 8045,273kWh/mês, que será o valor base para o cálculo da potência do sistema de geração. Partindo do consumo médio mensal e tendo ciência que um ano possui 365 dias e 12 meses, podemos dizer que um mês possui aproximadamente  $365/12 \cong 30,4$  dias, logo podemos calcular o consumo médio diário do condomínio fazendo,  $8045,273/30,4 \cong 264,6471kWh/dia$ , obtido esse valor podemos seguir para a localização, posicionamento e avaliação do recurso solar.

## 4.2 LOCALIZAÇÃO, POSICIONAMENTO E AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

O passo seguinte, após a obtenção da média de consumo diário, é consultar a média de irradiação solar no local da instalação, tal consulta pode ser feita pelo site CRESESB – (<http://www.cresesb.cepel.br/>) através do caminho Potencial Energético => Potencial Solar e inserindo a latitude e longitude exatos do ponto em questão, para obter as coordenadas da localidade basta consultar o *Google Maps* ou outra ferramenta de geolocalização. A Figura 4.1 ilustra as coordenadas do condomínio em estudo.

Figura 4.1 – Obtenção das coordenadas geográficas.



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/preview>.

Após inserir os dados de latitude e longitude no *data center* foram obtidos os dados contidos na Tabela 4.2 onde é possível constatar, destacado em amarelo, o potencial energético solar para a localidade que é de aproximadamente 5,25 kWh/m<sup>2</sup>dia.

Tabela 4.2 – Dados de irradiação solar diária.

Estação: Campina Grande Município: Campina Grande, PB - BRASIL Latitude: 7,201° S Longitude: 35,849° O Distância do ponto de ref.( 7,182475° S; 35,864899° O):2,7 km															
Angulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m <sup>2</sup> dia]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano Horizontal	0° N	5,55	5,67	5,77	5,23	4,63	4,06	4,16	4,90	5,49	5,75	5,99	5,76	5,25	1,93
Ângulo igual a latitude	7° N	5,32	5,54	5,76	5,37	4,85	4,30	4,38	5,07	5,54	5,66	5,77	5,50	5,25	1,47
Maior média anual	4° N	5,42	5,60	5,77	5,32	4,76	4,20	4,29	5,00	5,53	5,70	5,87	5,62	5,26	1,67
Maior mínimo mensal	22° N	4,68	5,06	5,54	5,46	5,15	4,64	4,69	5,26	5,45	5,26	5,10	4,76	5,09	0,91

Fonte: <http://www.cresesb.cepel.br/>.

Podemos então calcular a média de horas de luz solar por dia no local dividindo a irradiação solar diária média pela irradiação solar padrão utilizada nos testes dos módulos fotovoltaicos que é 1kW/m<sup>2</sup>.

$$\text{Logo, } 5,25 \text{ kWh/m}^2 \text{ dia} / 1 \text{ kW/m}^2 = 5,25 \text{ h/dia.}$$

### 4.3 DIMENSIONAMENTO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Tende feito uma avaliação adequada do recurso solar na região da instalação, é possível calcular um valor base de potência do sistema para que se possa obter uma geração adequada que supra as necessidades do consumidor.

Logo podemos calcular a potência que o sistema deve ter por meio da Equação 4.1.

$$\text{Potência do sistema} = \frac{\text{Consumo diário}}{\frac{\text{Horas de exposição solar diárias}}{1 - \text{Perdas}}} \quad (4.1)$$

Para estimar as perdas do sistema deve ser realizado um estudo aprofundado e complexo que envolve diversos fatores como perdas térmicas, sujeira nos painéis perdas nos cabamentos CC e CA perdas de conversão no inversor e mais alguns outros, o que

seria bastante oneroso para nosso projeto, além disso constatou-se que a maioria dos estudos de perdas já realizados por projetistas de sistemas solares experientes obtém valores aproximados de 25%, portanto esse percentual será adotado em nosso estudo.

$$Potência\ do\ sistema = \frac{\frac{264,6471kWh/dia}{5,25h/dia}}{1 - 0,25} \cong 67,21kWp. \quad (4.2)$$

Agora, sabemos que o sistema deve possuir pelo menos 67,21 kWp de capacidade de geração em painéis fotovoltaicos. Para definição dos módulos foi realizada uma consulta de mercado e escolha da melhor proposta, na qual foi selecionado em conjunto com os administradores do condomínio um kit de geração adequado para a situação, o mesmo é composto por um conjunto de 172 módulos fotovoltaicos de 410Wp da marca TALLMAX modelo TSM-DE15M, esse conjunto possui capacidade de geração de 70,520kWp que supre com alguma sobra a potência necessária calculada. Abaixo segue Tabela 4.3 com as principais características técnicas dos módulos, as informações mais detalhadas podem ser consultadas no *datasheet* dos módulos no Anexo B.

Tabela 4.3 – Características técnicas dos módulos fotovoltaicos.

Dados Elétricos (STC)	
Máxima Potência – P <sub>MAX</sub> (Wp)	410
Tensão de Máxima Potência – V <sub>MPP</sub> (V)	40,7
Corrente de Máxima Potência – I <sub>MPP</sub> (A)	10,07
Tensão de Circuito Aberto – V <sub>OC</sub> (V)	49,4
Corrente de Curto Circuito – I <sub>SC</sub> (A)	10,59
Eficiência – η <sub>m</sub> (%)	20,2

Fonte: <https://www.goldendistribuidora.com.br/orderproductdownloadsfile/aa4ba63b-c5ea-4ce1-b485-bb4add0ede6b>

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DO INVERSOR

O inversor, assim como os módulos, teve sua escolha pautada na relação custo benefício a partir de uma pesquisa com fornecedores e escolha de um kit de geração específico. O inversor que acompanha o kit é o modelo MAX 75KTL3 LV da *Growatt* que conta com 75kW de capacidade de geração mais que suficiente para suprir as necessidades de geração do condomínio e algumas outras características bastante interessantes. Vale salientar que o modelo em questão é um inversor tipo *Multistring* que conta com 7 entradas MPPT independentes.

Na Tabela 4.4 estão as principais informações técnicas do modelo de inversor adotado. No entanto, as informações técnicas mais detalhadas podem ser consultadas no *datasheet* do mesmo no Anexo A.

Tabela 4.4 – Características técnicas do inversor.

Ficha de dados	MAX 75KTL3 LV
Entradas CC	
Máxima potência CC	112500W
Máxima tensão	1100V
Tensão de partida	250V
Tensão nominal	600V
Máxima corrente de entrada por <i>string</i>	25A
Número de MPPTs Independentes	7
Número de <i>strings</i> por MPPT	2
Saída CA	
Potência nominal de saída	75000W
Máxima potência aparente CA	83300VA
Máxima corrente de saída	112,7A
Tensão nominal CA	220/380V
Frequência de grade	50/60Hz
Fator de potência	0,8
Máxima eficiência	98,8%

Fonte: <https://energeasysolar.com.br/wp-content/uploads/2020/03/Datasheet-Growatt-MAX-75-kW.pdf>

É possível observar na Tabela 4.4 que o modelo de inversor adotado possibilita a conexão de um total de 14 *strings* de painéis, sendo essas com até 7 configurações distintas, logo uma opção para os arranjos de painéis é 6 conjuntos de 18 módulos mais 4 conjuntos de 16 módulos totalizando os 172 painéis referentes ao kit escolhido, lembrando que esse arranjo só é possível pois o inversor possui 7 entradas MPPT independentes.

## 4.5 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Como supracitado no tópico 3.5 para realizar um dimensionamento adequado dos dispositivos de proteção bem como dos condutores é essencial observar algumas normativas básicas que são a NBR 5410, que estabelece as condições a que se devem satisfazer as instalações elétricas de baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens, a NBR 5419 que estabelece os requisitos para a determinação de proteção contra descargas atmosféricas, a NBR 16612 que estabelece os requisitos mínimos para qualificação e aceitação de cabos singelos de condutor flexível para uso em corrente contínua de energia fotovoltaica e a NBR16690 que estabelece os requisitos de projeto das instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos.

Sabendo dos requisitos das normas vigentes é possível então realizar o correto dimensionamento dos condutores bem como os demais dispositivos de proteção exigidos para o funcionamento seguro de todo o sistema.

### 4.5.1 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES CC E CA

Para dimensionar os condutores do lado CC do sistema é necessário conhecer algumas características dos módulos fotovoltaicos e também a forma como se deseja conecta-los, no projeto em questão os módulos supracitados na sessão 4.3 possuem tensão de circuito aberto de 49,4V e corrente de curto circuito de 10,59A, os mesmos estão arranjados em dois tipos de *strings*, com 18 módulos ligados em serie e com 16 módulos ligados em serie dessa forma a máxima tensão de cada *string* e dada pela equação 4.3:

$$V_{SMAX} = \text{Número de módulos} \times V_{OC} + \text{Número de módulos} \times (V_{OC} \times \alpha \times \Delta T) \quad (4.3)$$

Onde:

$V_{SMAX}$ , é a tensão máxima da string;

$V_{OC}$ , é a tensão de circuito aberto do módulo;

$\alpha$ , é o coeficiente de temperatura da tensão de circuito aberto;

$\Delta T$ , é a variação de temperatura no local da instalação.

Logo, para as *strings* de 18 módulos temos:

$$V_{SMAX} = 18 \times 49,4 + 18 \times (49,4 \times -0,0029 \times -10) \cong 915V$$

E para as *strings* de 16 módulos temos:

$$V_{SMAX} = 16 \times 49,4 + 16 \times (49,4 \times -0,0029 \times -10) \cong 813V$$

Como o inversor possui 7 entradas MPPT independentes e cada uma delas possui conexão para até 2 *strings* não é necessário realizar nenhuma conexão em paralelo externa, logo a máxima corrente de cada *string* é igual a corrente de curto circuito dos módulos  $I_{SMAX} = I_{CC} = 10,59A$ . Seguindo as recomendações da NBR16690 os cabos do lado CC do sistema devem ser atestados pela NBR16612, logo no mercado são comuns os cabos para sistemas fotovoltaicos de  $4\text{mm}^2$ ,  $6\text{mm}^2$  e  $10\text{mm}^2$  e qualquer um deles atende o requisito de capacidade de condução de corrente, porém como alguns dos arranjos podem ficar um pouco distantes do inversor foi solicitado no Kit adquirido condutores de  $6\text{mm}^2$  visando reduzir ao máximo as quedas de tensão no sistema, vale salientar que os condutores específicos para sistemas fotovoltaicos possuem dupla isolamento para no mínimo 1,5kV e proteção a raios UV.

Para os condutores do lado CA do sistema é preciso observar as características de saída do inversor, onde a máxima corrente de saída é 112,7A e a tensão nominal é 220V Fase-Neutro e 380V Fase-Fase, logo pelo critério da capacidade de condução de corrente e considerando o método de instalação D foi adotado um condutor multiplex em alumínio de  $70\text{mm}^2$  e isolamento em XLPE nas fases que possui capacidade de condução de até 138A e isolamento para até 750V.

#### 4.5.2 DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Para o lado CC do sistema a NBR16690 recomenda a utilização de caixas de junção “*StringBox*” dotados de Fusíveis, DPSs e chaves seccionadoras, porém o modelo de inversor adotado possui DPSs classe II em todas as entradas, bem como chaves seccionadoras para desligar toda a alimentação provida pelos arranjos fotovoltaicos e como as strings não serão ligadas em paralelo o uso de fusíveis é desnecessário, dessa forma a utilização de caixas de junção foi dispensada.

Para o lado CA do sistema a NBR16690 recomenda a utilização de uma caixa de distribuição provida de disjuntor e DPSs apropriados, como o inversor possui saída trifásica foi adotado um disjuntor tripolar de 125A, pois a máxima corrente de saída do inversor é 112,7A e a capacidade de condução dos condutores adotados é 138A, como o inversor também possui DPSs classe II para o lado CA não seria necessário a instalação dos mesmos na caixa de distribuição, porém é aconselhável ter proteção extra para proteger o inversor de surtos provenientes da rede de distribuição, portanto foram adotados DPSs CA de 275v e 20kA classe 2 instalados nas três fases e no neutro.

## 4.6 ANÁLISE FINANCEIRA

Para aplicar os métodos de análise supracitados deve-se levantar algumas informações acerca do projeto, tais como o investimento inicial, a economia mensal gerada pela implantação do sistema e os valores referentes ao fluxo de caixa anual.

Para o valor de investimento inicial, foi realizada uma pesquisa de mercado em empresas do ramo fotovoltaico, e obteve-se como melhor proposta o valor de R\$218.000,00, correspondente ao custo do material e a todos os demais custos de implantação do sistema.

Para o levantamento da economia gerada pelo sistema tomaremos como base a capacidade de geração do sistema proposto, que consiste de 172 módulos de 410Wp capazes de gerar até 70,520kWp e fornecer 277,67kWh/dia a uma taxa por kW já com impostos de R\$0,716620, logo economizando aproximadamente R\$5.970,00 por mês.

Com base nesses valores iniciais estimados podemos construir uma tabela de fluxo de caixa na qual foi adotada uma taxa de aumento anual no valor da tarifa de energia de 8% ao ano, uma taxa de redução na capacidade de geração dos equipamentos de 0,6% ao

ano e também foi considerado um período de análise de 25 anos, tempo referente ao período de vida útil garantida por maioria dos fabricantes de equipamentos.

Dentro desse período foram desconsiderados custos de manutenção, tendo em vista que a possibilidade da mesma é mínima.

Tabela 4.5 – Fluxos de caixa e valores acumulados.

Anos	Valor da tarifa de energia	Capacidade de geração anual	Economia anual gerada	Fluxos de caixa futuros	Valores acumulados
0				-R\$ 218.000,00	-R\$ 218.000,00
1	R\$ 0,72	101349,55	R\$ 72.629,11	R\$ 72.629,11	-R\$ 145.370,89
2	R\$ 0,77	100741,45	R\$ 77.968,81	R\$ 77.968,81	-R\$ 67.402,08
3	R\$ 0,84	100137,00	R\$ 83.701,07	R\$ 83.701,07	R\$ 16.299,00
4	R\$ 0,90	99536,18	R\$ 89.854,78	R\$ 89.854,78	R\$ 106.153,77
5	R\$ 0,97	98938,96	R\$ 96.460,90	R\$ 96.460,90	R\$ 202.614,67
6	R\$ 1,05	98345,33	R\$ 103.552,71	R\$ 103.552,71	R\$ 306.167,38
7	R\$ 1,14	97755,26	R\$ 111.165,90	R\$ 111.165,90	R\$ 417.333,28
8	R\$ 1,23	97168,73	R\$ 119.338,82	R\$ 119.338,82	R\$ 536.672,09
9	R\$ 1,33	96585,72	R\$ 128.112,61	R\$ 128.112,61	R\$ 664.784,70
10	R\$ 1,43	96006,20	R\$ 137.531,45	R\$ 137.531,45	R\$ 802.316,15
11	R\$ 1,55	95430,16	R\$ 147.642,76	R\$ 147.642,76	R\$ 949.958,90
12	R\$ 1,67	94857,58	R\$ 158.497,45	R\$ 158.497,45	R\$ 1.108.456,36
13	R\$ 1,80	94288,44	R\$ 170.150,19	R\$ 170.150,19	R\$ 1.278.606,54
14	R\$ 1,95	93722,71	R\$ 182.659,63	R\$ 182.659,63	R\$ 1.461.266,17
15	R\$ 2,10	93160,37	R\$ 196.088,76	R\$ 196.088,76	R\$ 1.657.354,93
16	R\$ 2,27	92601,41	R\$ 210.505,21	R\$ 210.505,21	R\$ 1.867.860,14
17	R\$ 2,46	92045,80	R\$ 225.981,55	R\$ 225.981,55	R\$ 2.093.841,70
18	R\$ 2,65	91493,52	R\$ 242.595,72	R\$ 242.595,72	R\$ 2.336.437,41
19	R\$ 2,86	90944,56	R\$ 260.431,35	R\$ 260.431,35	R\$ 2.596.868,76
20	R\$ 3,09	90398,90	R\$ 279.578,27	R\$ 279.578,27	R\$ 2.876.447,03
21	R\$ 3,34	89856,50	R\$ 300.132,86	R\$ 300.132,86	R\$ 3.176.579,89
22	R\$ 3,61	89317,36	R\$ 322.198,63	R\$ 322.198,63	R\$ 3.498.778,52
23	R\$ 3,90	88781,46	R\$ 345.886,67	R\$ 345.886,67	R\$ 3.844.665,19
24	R\$ 4,21	88248,77	R\$ 371.316,26	R\$ 371.316,26	R\$ 4.215.981,45
25	R\$ 4,54	87719,28	R\$ 398.615,43	R\$ 398.615,43	R\$ 4.614.596,88

Fonte: Próprio autor.

Para construção da Tabela 4.5, na segunda coluna (valor da tarifa de energia) foi considerado como base o valor da tarifa já com impostos aplicados no período atual, e para definição dos valores dos anos consecutivos foi considerada uma taxa de aumento de 8% a cada ano.

Para a terceira coluna (economia anual gerada) foi utilizado como base o valor de capacidade geração anual calculado a partir da capacidade de geração diária do sistema, que é 277,67kWh/dia multiplicado pela quantidade de dias de um ano, que são 365 dias, logo estima-se uma geração de 101349,55kWh/ano, multiplicando esse valor pelo valor da tarifa, obtém-se uma estimativa de economia gerada por ano. Já para a quarta coluna (Fluxo de caixa) poderiam ser considerados os valores pagos por taxa de disponibilidade da rede e iluminação pública, porém esses valores são irrisórios para nossa análise e foram desprezados, logo o fluxo de caixa é igual a economia anual gerada, por fim a quinta e última coluna (Valor acumulado) foi considerado o investimento inicial no valor de R\$218.000,00 donde foram deduzidos os valores de economia anual gerada e posteriormente acumulando o lucro obtido pelo sistema.

#### 4.6.1 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

Como explicado na seção 2.9.1 o método VPL consiste de uma ferramenta que traz os valores de fluxo de caixa futuros para o presente, a fim de avaliar a viabilidade de um projeto no período atual, essa conversão de tempo dos valores e feita por meio de uma taxa de desconto, visando ter como base de comparação investimentos em ativos de baixo risco do mercado financeira, serão adotadas como taxa de desconto as taxas de retorno atuais da Poupança (3,68%), da Selic (5,25%) e do Tesouro Direto Prefixado para 2031 (10,57%), os cálculos desse método foram realizados por meio do *software Microsoft Excel* que dispõe de uma ferramenta específica para obtenção desses valores e facilita consideravelmente a obtenção e análise dos resultado.

Na seção 2.9.1 consta a equação que gera o resultado para o método VPL e na mesma consta a variável K descrita como custo do capital, é exatamente nesse ponto que são aplicadas as taxas de retorno atuais dos ativos do mercado financeiro.

Na Tabela 4.6 estão expostos todos os valores presentes dos fluxos de caixa do projeto para cada uma das taxas de desconto, e na última linha consta o resultado final do método VPL que consiste da soma de todos os fluxos de caixa em valor presente em seguida subtraindo do investimento inicial realizado.

Tabela 4.6 – Cálculos de VPL.

Fluxos de caixa futuros	Valor Presente (Poupança)	Valor Presente (Selic)	Valor presente (Tesouro Prefixado 2031)
-R\$ 218.000,00	-R\$ 218.000,00	-R\$ 218.000,00	-R\$ 218.000,00
R\$ 72.629,11	R\$ 70.051,23	R\$ 69.006,28	R\$ 65.686,09
R\$ 77.968,81	R\$ 72.532,21	R\$ 70.384,44	R\$ 63.774,38
R\$ 83.701,07	R\$ 75.101,06	R\$ 71.790,13	R\$ 61.918,31
R\$ 89.854,78	R\$ 77.760,89	R\$ 73.223,88	R\$ 60.116,26
R\$ 96.460,90	R\$ 80.514,92	R\$ 74.686,27	R\$ 58.366,65
R\$ 103.552,71	R\$ 83.366,49	R\$ 76.177,87	R\$ 56.667,96
R\$ 111.165,90	R\$ 86.319,05	R\$ 77.699,26	R\$ 55.018,71
R\$ 119.338,82	R\$ 89.376,19	R\$ 79.251,03	R\$ 53.417,46
R\$ 128.112,61	R\$ 92.541,59	R\$ 80.833,79	R\$ 51.862,81
R\$ 137.531,45	R\$ 95.819,11	R\$ 82.448,16	R\$ 50.353,41
R\$ 147.642,76	R\$ 99.212,70	R\$ 84.094,77	R\$ 48.887,94
R\$ 158.497,45	R\$ 102.726,48	R\$ 85.774,27	R\$ 47.465,12
R\$ 170.150,19	R\$ 106.364,71	R\$ 87.487,31	R\$ 46.083,71
R\$ 182.659,63	R\$ 110.131,80	R\$ 89.234,56	R\$ 44.742,50
R\$ 196.088,76	R\$ 114.032,30	R\$ 91.016,71	R\$ 43.440,32
R\$ 210.505,21	R\$ 118.070,94	R\$ 92.834,45	R\$ 42.176,05
R\$ 225.981,55	R\$ 122.252,62	R\$ 94.688,49	R\$ 40.948,57
R\$ 242.595,72	R\$ 126.582,40	R\$ 96.579,57	R\$ 39.756,81
R\$ 260.431,35	R\$ 131.065,53	R\$ 98.508,40	R\$ 38.599,74
R\$ 279.578,27	R\$ 135.707,43	R\$ 100.475,76	R\$ 37.476,34
R\$ 300.132,86	R\$ 140.513,74	R\$ 102.482,42	R\$ 36.385,64
R\$ 322.198,63	R\$ 145.490,27	R\$ 104.529,14	R\$ 35.326,68
R\$ 345.886,67	R\$ 150.643,05	R\$ 106.616,75	R\$ 34.298,55
R\$ 371.316,26	R\$ 155.978,32	R\$ 108.746,04	R\$ 33.300,33
R\$ 398.615,43	R\$ 161.502,55	R\$ 110.917,86	R\$ 32.331,17
VPL:	R\$ 2.525.657,59	R\$ 1.991.487,62	R\$ 960.401,53

Fonte: Próprio autor.

Pode-se constatar que em comparação aos três fundos de investimento já citados, o projeto é viável e rentável, pois todos os resultados dos VPLs foram positivos.

#### 4.6.2 TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Assim como para o VPL para calcular a taxa interna de retorno foi utilizado o *software Microsoft Excel* que dispõe de uma ferramenta bastante simplificada para obtenção da TIR, já que essa taxa não é tão simples de se obter manualmente.

A TIR do projeto foi de 41% que comparado as taxas de retorno dos ativos de mercado torna o projeto bastante atrativo, já que  $TIR = 41\% > 10,57\% > 5,25\% > 3,68\%$ .

#### 4.6.3 PAYBACK DESCONTADO

Para aplicação do método de análise *Payback* descontado foram utilizados os valores presentes com as taxas de custo do capital comparativa aos fundos de investimento para obter os capitais acumulados nos três casos (poupança, Selic e tesouro prefixado), conseqüentemente obteremos três tempos de retorno distintos, porém bem próximos.

Tabela 4.7 – Calculos de Payback descontado.

Anos	Valor Presente (Poupança)- R\$	Capital acumulado- R\$	Valor Presente (Selic)- R\$	Capital acumulado- R\$	Valor presente (Tesouro Prefixado 2031)- R\$	Capital acumulado- R\$
0	-218000,00	-218000,00	-218000,00	-218000,00	-218000,00	-218000,00
1	70051,23	-147948,77	69006,28	-148993,72	65686,09	-152313,91
2	72532,21	-75416,56	70384,44	-78609,27	63774,38	-88539,52
3	75101,06	-315,50	71790,13	-6819,15	61918,31	-26621,21
4	77760,89	77445,39	73223,88	66404,74	60116,26	33495,05
5	80514,92	157960,31	74686,27	141091,01	58366,65	91861,69
6	83366,49	241326,80	76177,87	217268,88	56667,96	148529,66
7	86319,05	327645,85	77699,26	294968,13	55018,71	203548,37
8	89376,19	417022,04	79251,03	374219,16	53417,46	256965,83
9	92541,59	509563,63	80833,79	455052,95	51862,81	308828,65
10	95819,11	605382,74	82448,16	537501,11	50353,41	359182,06
11	99212,70	704595,44	84094,77	621595,88	48887,94	408070,00
12	102726,48	807321,92	85774,27	707370,15	47465,12	455535,12
13	106364,71	913686,64	87487,31	794857,46	46083,71	501618,82
14	110131,80	1023818,44	89234,56	884092,02	44742,50	546361,32
15	114032,30	1137850,74	91016,71	975108,74	43440,32	589801,65
16	118070,94	1255921,68	92834,45	1067943,19	42176,05	631977,70
17	122252,62	1378174,30	94688,49	1162631,68	40948,57	672926,27
18	126582,40	1504756,70	96579,57	1259211,25	39756,81	712683,08
19	131065,53	1635822,23	98508,40	1357719,65	38599,74	751282,82
20	135707,43	1771529,67	100475,76	1458195,41	37476,34	788759,16
21	140513,74	1912043,40	102482,42	1560677,83	36385,64	825144,80
22	145490,27	2057533,67	104529,14	1665206,97	35326,68	860471,49
23	150643,05	2208176,72	106616,75	1771823,72	34298,55	894770,03

24	155978,32	2364155,04	108746,04	1880569,76	33300,33	928070,36
25	161502,55	2525657,59	110917,86	1991487,62	32331,17	960401,53
Payback- Anos:	3,004		3,093		3,443	

Fonte: Próprio autor.

Analisando os tempos de *payback* obtidos, constata-se que para todas as taxas de desconto dos ativos do mercado financeiro aos quais compara-se o projeto recupera-se os investimentos iniciais após o 3º ano com uma pequena variação pois, a taxa de desconto da poupança é a menor, logo o investimento inicial é recuperado antes, em 3,004 anos para a Selic, que possui taxa de desconto intermediária o investimento inicial e recuperado em 3,093 anos e por fim para o tesouro direto prefixado para 2031 que possui maior taxa de desconto o investimento inicial e recuperado em 3,443 anos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou demonstrar a viabilidade técnica e econômica do uso da energia solar fotovoltaica de forma complementar (on-grid) como alternativa para a redução dos custos com o consumo de energia elétrica do usuário direto, como também para minimizar os riscos do desabastecimento (apagão) decorrentes da crise hídrica que atinge o país. Tendo em vista o crescente uso dessa fonte energética pelos consumidores, desde os pequenos sistemas para habitações unifamiliares e condomínios residenciais até sistemas maiores para grandes indústrias, shoppings centers e parques de geração fotovoltaica que já estão em implantação pelo Brasil adentro.

Para ilustração prática e didática o estudo de caso em questão demonstrou todo o processo de dimensionamento para implantação realizado em condomínio localizado no município de Lagoa Seca – Paraíba, onde abordou-se desde o levantamento do consumo, o dimensionamento dos dispositivos, escolha dos equipamentos, até a avaliação financeira, confirmando de forma técnica a viabilidade econômica do projeto que se revelou muito atraente quando comparado às aplicações e investimentos em ativos do mercado financeiro.

A aplicação do projeto de energia solar fotovoltaica apresentou-se economicamente viável, proporcionando um valor de VPL positivo, sendo o mesmo favorável quando comparado as três taxas de desconto (Selic, taxa de rendimento de da poupança e tesouro prefixado), por meio dos outros métodos financeiros utilizados também foi possível constatar uma Taxa Interna de Retorno de 41% e *Payback* descontado entre 3 e 3,5 anos.

Dessa forma é possível comprovar que apesar do investimento inicial ainda ser consideravelmente alto, o retorno é garantido em curto/médio prazo e que os sistemas de energia solar fotovoltaica além de trazerem diversas vantagens, como a redução de emissão de dióxido de carbono ao meio ambiente e diversificação da matriz energética também pode ser considerado um ótimo investimento econômico.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. Dados infográfico. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 30/08/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Geração Distribuída. Disponível em < [http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD\\_Fonte.asp](http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp) >. Acesso em: 30/08/2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 482 (REN 482/2012). Brasília, DF, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 687 (REN 687/2015). Brasília, DF, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa N° 786 (REN 786/2017). Brasília, DF, 2017.

ALTENER. (2004). **Energia Fotovoltaica - Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação.**

BARROS, H. A. (2011). **Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12 KWP conectado à rede.** (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COUTINHO, C. R. (2016) **O Efeito do Sombreamento e Diodos de Bypass em Módulos Fotovoltaicos.** (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

CUNHA, A. M. (2019). **Análise da viabilidade de geração de um sistema fotovoltaico: estudo de caso residencial.** (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

ENERGISA. NDU 001. **Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária.** João Pessoa, PB, 2019.

ENERGISA. NDU 013. **Critérios Para a Conexão de Acessantes de Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição Para Conexão em Baixa Tensão.** João Pessoa, PB, 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>>. Acesso em: 04/10/2021.

HART, D. W. **Power electronics.** Tata McGraw-Hill Education, 2011.

HECKTHEUER, L. A. (2001). **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos.** (Tese de doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

IEA. *Internacional Energy Agency. Disponível em:* <<https://www.iea.org/countries/brazil>>. Acesso em:04/10/2021.

LOPES, P. J. A. (2020). **Energia fotovoltaica: estudo de caso de uma fábrica.** (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

MACHADO, C. T., & MIRANDA, F. S. (2015). **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão.** Revista virtual de química, v.7, n.1, p.126-143.

MALVINO, A. P. **Eletrônica.** São Paulo: Makron Books. v. 1, n.1, 1997.

MENDONÇA. Y. de M. (2016). **Eficiência fotovoltaica: um estudo da evolução.** (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

MONTEIRO, M. da C. (2016). **Células fotovoltaicas de Silício cristalino: tecnologias e processos de fabricação.** (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES).

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. **Meio século de história fotovoltaica.** Gazeta de Física, v. 1, n. 2, p. 17, 2006.

# ANEXOS

## ANEXO A – *DATASHEET* DO INVERSOR

### MAX 75KTL3 LV

- 7 MPPTs
- Diagnóstico inteligente
- Alta eficiência até 98.8%
- Conexão WIFI local
- Monitoramento de strings
- SPD tipo II CA & CC

**Growatt**

POWER  
- ING O  
TOMO -  
RROW O

**Growatt**  
www.ginverter.com

## GROWATT - PRODUTO

Ficha de dados		MAX 75KTL3 LV
<b>Dados de entrada</b>		
Máxima potência CC		112500W
Máxima tensão de CC		1100V
Tensão de saída		250V
Faixa de tensão MPPT		195V-1000V
Tensão nominal		600V
Máxima corrente de entrada por string		25A
Número de MPPT independentes / strings por MPPT		7/2
<b>Saída (CA)</b>		
Potência nominal de saída CA		75000W
Máxima Potência aparente de CA		83300VA
Máxima corrente de saída		112.7A
Tensão nominal CA		220V/380V
Frequência de grade CA		50±0.5Hz
Factor de potência		0.8-0.8c
THDi		<3%
Tipo de conexão de rede CA		3W+N+PE
<b>Eficiência</b>		
Máxima eficiência		98.8%
Eficiência europeia		98.3%
Eficiência MPPT		99.9%
<b>Dispositivos de proteção</b>		
Proteção de polaridade reversa CC		sim
Interruptor CC		sim
Proteção contra surtos CC		Tipo II
Monitoramento de falha à terra		sim
Proteção contra curto-circuito da saída		sim
Proteção contra surtos de CA		Tipo II
Monitoramento de falha de string		sim
Proteção anti-RD		opcional
<b>Dados Gerais</b>		
Dimensões (LxWxP)		860x600x300mm
Peso		82kg
Faixa de temperatura operacional		-25°C ... +60°C
Auto-consumo à noite		< 1W*
Topologia		Sem transformador
Forma de refrigeração		Resfriamento inteligente
Grau de proteção ambiental		IP65
Altitude		4000m
Humidade relativa		0-100%
<b>Características</b>		
Exibição		LED/WIFI+APP
Interfaces:USB/R485/ WIFI		Sim/ Sim/ Sim
Garantia: 5 anos		Sim

IEC61000-4/3, IEC 62109-1/2, IEC 61727, IEC 62116

## ANEXO B – DATASHEET DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Mono Multi Solutions

0

# TALLMAX<sup>M</sup>

MÓDULO DE LAYOUT MOLDADO 72



**72 LAYOUT**  
MÓDULO MONOCRISTALINO

---

**390-410W**  
GAMA DE SAÍDA DE POTÊNCIA

---

**20,2%**  
MÁXIMA EFICIÊNCIA

---

**0~+5W**  
TOLERÂNCIA DE POTÊNCIA POSITIVA

**PRODUTOS**  
TS4MCE15M (R)

**GAMA DE POTÊNCIA**  
390-410W

**Saída de alta potência**

- Combinado com a tecnologia MBB, máximo de 410W
- Reduzir o custo de balanço do sistema com contendor de maior capacidade de energia e tensão do sistema de 1500V

---

**0 design de meia-célula traz maior eficiência**

- Layout de meia célula (144 monocristalinos)
- Baixos coeficientes térmicos para maior produção de energia em alta temperatura de operação
- Baixa perda de energia na conexão da célula devido ao layout de meia célula (144 monocristalinos)

---

**Altamente confiável devido ao rigoroso controle de qualidade**

- Mais de 30 testes internos (UV, TC, HF, etc)
- Requisito de teste interno da Trina mais rigoroso do que a autoridade de certificação

---

**Certificado para suportar as condições ambientais mais desafiadoras**

- Carga negativa de 2400 Pa
- Carga positiva de 5400 Pa
- 2400/5400 é a carga medida e o fator de segurança é 1,5 vezes

Fundada em 1997, a Trina Solar é líder mundial em fornecimento de soluções gerais para energia solar. Com presença local em todo o mundo, a Trina Solar é capaz de fornecer um serviço excepcional a cada cliente e em cada mercado, assim entregando nossos produtos inovadores e confiáveis com o apoio da Trina como uma marca forte e rentável. A Trina Solar agora distribui seus produtos fotovoltaicos para mais de 100 países em todo o mundo. Estamos empenhados em construir colaborações estratégicas e mutuamente benéficas com instaladores, desenvolvedores, distribuidores e outros parceiros para impulsionar a energia solar.

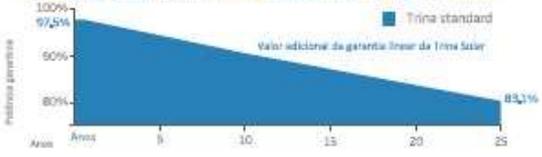
**Produtos abrangentes e certificados de sistema**

IEC61215 / IEC1730 / IEC61730 / IEC61701 / IEC62716 ISO 9001: Sistema de Gestão de Qualidade ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental ISO14064: Verificação de Emissões de Gases de Efeito Estufa OHSAS 18001: Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional




**GARANTIA DE DESEMPENHO LINEAR**

10 anos de garantia do produto • Garantia de energia linear de 25 anos

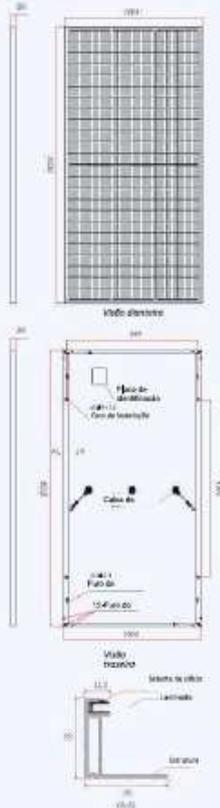


Anos	Produção garantida (%)
0	97,4%
25	83,1%

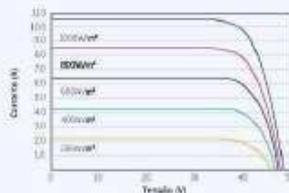
De 2º ano ao 25º ano, o declínio médio anual da potência não será superior a 0,05%.



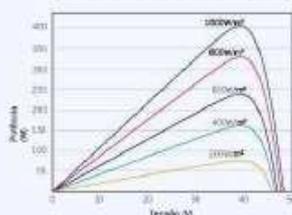
## DIMENSÕES DO MÓDULO PV (mm)



## CURVAS I-V DO MÓDULO PV (405W)



## CURVAS DE P-V DO MÓDULO PV (405W)



## DADOS ELÉTRICOS (STC)

Potência máxima em watts- $P_{max}$ (Wp)*	390	395	400	405	410
Tolerância de saída de energia- $P_{max}$ (W)	0 - +5				
Potência máxima de tensão- $V_{mp}$ (V)	40,0	40,1	40,3	40,5	40,7
Corrente máxima de potência- $I_{mp}$ (A)	9,75	9,86	9,92	10,00	10,07
Voltagem de circuito aberto- $V_{oc}$ (V)	48,5	48,7	49,0	49,2	49,4
Corrente de curto-circuito- $I_{sc}$ (A)	10,30	10,37	10,45	10,52	10,59
Eficiência do módulo $\eta_{mod}$ (%)	19,2	19,4	19,7	19,9	20,2

Condição de teste padrão (STC): irradiância 1000 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 25°C, massa de ar AM1,5.  
\* Tolerância de medição: ± 3%.

## DADOS ELÉTRICOS (NMOT)

Potência máxima- $P_{max}$ (Wp)	294	298	301	306	309
Potência máxima de tensão- $V_{mp}$ (V)	37,6	37,7	37,9	38,1	38,3
Corrente máxima de potência- $I_{mp}$ (A)	7,83	7,91	7,96	8,02	8,08
Voltagem de circuito aberto- $V_{oc}$ (V)	45,6	45,8	46,1	46,3	46,5
Corrente de curto-circuito- $I_{sc}$ (A)	8,30	8,36	8,43	8,48	8,54

NMOT: Irradiância e 800W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente de 20°C, velocidade do vento 1m/s.

## DADOS MECÂNICOS

Células solares	Monocristalino
Orientação celular	144 células (6 x 24)
Dimensões do módulo	2024 x 1004 x 35 mm (79,69 x 39,53 x 1,38 polegadas)
Peso	22,8 kg (50,3 lb)
Vidro	3,2 mm (0,13 polegadas), alta transmissão, vidro reforçado com revestimento térmico
Materiais encapsulantes	EVA
Backsheet	Branco
Estrutura	35 mm (polegadas) de liga de alumínio anodizado
J-Box	P 68 avaliado
Cabos	Cabo de tecnologia fotovoltaica de 4,0mm <sup>2</sup> (0,006 polegadas <sup>2</sup> ), Ratador N 140 mm / P 285 mm (5,51 / 11,22 polegadas) Paisagem: N 1400 mm / P 1400 mm (55,12 / 55,12 polegadas)
Conector	TS4 / MC4EVO2

## CLASSIFICAÇÕES DE TEMPERATURA

NMOT temperatura máxima de célula nominal	+11 °C ± 3°C
Coefficiente de temperatura de $P_{max}$	-0,37% / °C
Coefficiente de temperatura de $V_{oc}$	-0,29%/°C
Coefficiente de temperatura de $I_{sc}$	0,05%/°C

(NÃO excede a faixa de operação caso duas ou mais células em conexão padrão)

## GARANTIA

10 anos de garantia de fabricação de produtos  
Garantia de energia linear de 25 anos  
(Por favor, consulte a garantia do produto para mais detalhes)

## CLASSIFICAÇÕES MÁXIMAS

Temperatura operacional	-40 - +85°C
Tensão máxima do sistema	1500V DC (IEC)
Classificação de fusível da série máxima	20A

## CONFIGURAÇÃO DE EMBALAGENS

Módulos por caixa: 30 peças  
Módulos por contêiner de 40' : 660 peças

