

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DIEGO BARBOSA DE ALMEIDA

**ESTUDO DE CASO COM NOVAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS**

VOLTA REDONDA

2021

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DE CASO COM NOVAS TECNOLOGIAS DE MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em engenheiro eletricitista.

Aluno:

Diego Barbosa de Almeida

Orientador:

Prof. M.Sc. Edson de Paula Carvalho

VOLTA REDONDA

2021
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Diego Barbosa de Almeida

Título da monografia: Estudo de caso com novas tecnologia de módulos
fotovoltaicos

Orientador
Prof. MSc Edson de Paula Carvalho

Banca Examinadora:

Prof. M.Sc Edson de Paula Carvalho

Prof. Dr. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

Prof. Especialista Aloano Regio de Almeida Pereira

Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim. Ao meu tio que sempre foi um exemplo de estudos e esforço. Ao meu avô paterno e minhas avós maternas que sempre fizeram o esforço de criar pessoas melhores.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que todos os dias sempre fizeram o melhor por mim. Ao Professor Edson, que pegou meu trabalho próximo ao fim. Aos bons professores que tive durante toda a minha vida acadêmica, pois sempre me fizeram querer aprender mais. E finalmente às boas referências que perpassaram a minha vida pessoal.

RESUMO

O Sol se apresenta como uma fonte energética ilimitada, limpa e com custos cada vez menores. O Brasil possui uma excelente posição no mapa solar, com uma incidência atrativa durante todo o ano, apresentando um aumento constante do número de instalações fotovoltaicas. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica concisa do processo fotovoltaico, englobando o funcionamento dos principais componentes, os tipos de módulos utilizados comercialmente, um breve histórico da trajetória de evolução da tecnologia fotovoltaica no mundo e no Brasil. Propõe a implantação de um sistema fotovoltaico On-grid num comércio situado na cidade de Barra do Piraí, realizando um estudo de viabilidade financeira para o projeto, por fim uma rápida exploração do projeto sob a ótica da eficiência dos novos módulos solares sendo experimentados em laboratórios. Este estudo analisa o comércio como um bom nicho de investimento para o setor fotovoltaico, com um payback interessante, apesar de um investimento inicial elevado, a médio prazo (cerca de três anos) o projeto se paga e traz uma economia significativa após este período.

Palavras-chave: energia solar, energias alternativas, módulo fotovoltaico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivo específico	16
1.3 Justificativa.....	16
1.4 Metodologia.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Sobre as energias renováveis	18
2.2 Histórico da energia solar no mundo.....	23
2.3 Histórico da Energia Solar no Brasil.....	25
2.4 O que é energia solar?	28
2.5 O processo fotovoltaico.....	31
2.6 O módulo fotovoltaico.....	33
2.6.1 Breve histórico.....	33
2.6.2 Características Elétricas.....	34
2.7 Tipos de Módulos fotovoltaicos	41
2.7.1 Silício Monocristalino.....	42
2.7.2 Silício Policristalino.....	43
2.7.3 Silício Amorfo	44
2.8 Os sistemas fotovoltaicos.....	45
2.9 Associações de módulos.....	48
2.10 Inversor de frequência.....	50
2.10.1 Eficiência do inversor	50
2.11 Eficiência da instalação.....	51
3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	51
3.1 Localização	51
3.2 Levantamento estimado das cargas do estabelecimento.....	53
3.3 Análise do Consumo de Energia Elétrica	56

3.4 Escolha dos módulos fotovoltaicos	58
3.5 Escolha do inversor de frequência	60
3.6 Cálculo das strings	61
3.6 Esquema elétrico de proteções das string-boxes.....	63
3.8 Dimensionamento dos condutores para as strings boxes	63
3.9 Orçamento e detalhamento para o microgerador solar	64
3.10 Área e peso sobre a estrutura do telhado	65
3.11 Simulação de Produtividade do Sistema	66
4 DELIMITAÇÕES DE PROJETO SEGUNDO NOVAS TECNOLOGIAS	71
4.1 Fotoluminescência termicamente melhorada	71
4.2 Célula solar de seis junções.....	72
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
6 BIBLIOGRAFIA	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Insolação diária média anual.....	23
Figura 2 – Relações angulares da incidência dos raios solares.....	30
Figura 3 – Os tipos de irradiação solar.....	31
Figura 4 – Composição eletrônica dos condutores, isolantes e semicondutores	33
Figura 5 – Junção PN no módulo fotovoltaico	33
Figura 6 – Circuito equivalente de um painel solar.....	34
Figura 7 – curvas características superpostas Tensão-potência e $V \times I$	36
Figura 8 – Nível de corrente gerado de acordo com a irradiação solar.....	38
Figura 9 – A influência da temperatura na produção fotovoltaica.....	38
Figura 10 – Célula Fotovoltaica.....	39
Figura 11 – Módulo fotovoltaico	39
Figura 12 – String fotovoltaico.....	40
Figura 13 – Arranjo fotovoltaico.....	40
Figura 14 – A eficiência dos módulos comerciais.....	40
Figura 15 – Módulo de silício monocristalino.....	42
Figura 16 – Painel de silício policristalino.....	43
Figura 17 – Painel fotovoltaico de silício amorfo	44
Figura 18 – O Sistema GRID-TIE.....	46
Figura 19 – O sistema OFF-GRID.....	47
Figura 20 – Associação de módulos em série e curva característica.....	48
Figura 21 – Associação de módulos em paralelo e curva característica.....	49
Figura 22 – Associação de módulos em série e paralelo com curva característica ..	49
Figura 23 – Visão registrada por satélite e coordenadas	52
Figura 24 – Vista panorâmica do telhado do edifício.....	52
Figura 25 – Trajetória solar no entardecer durante as estações do ano	53
Figura 26 – Conta de energia do cliente	55
Figura 27 – Perdas térmicas do módulo fotovoltaico Leapton LP166M- 72-MH.....	60
Figura 28 – Proteções e conexões do sistema.....	63
Figura 29 – Índice solarimétrico durante os meses do ano	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cargas Levantadas	54
Tabela 2 – Média do consumo mensal detalhado	55
Tabela 3 – Custo de Disponibilidade	57
Tabela 4 – Modelos de módulos fotovoltaicos.....	59
Tabela 5 – Condições padrão do módulo fotovoltaico.....	59
Tabela 6 – Relação de módulos fotovoltaicos	60
Tabela 7 – Parâmetros elétricos do inversor escolhido	61
Tabela 8 – Lista de materiais utilizados	65
Tabela 9- Cálculo do payback do sistema.....	69
Tabela 10 – Cálculo do payback do investimento inicial	70
Tabela 11 - Valores de potência e área ocupada por módulos com fotoluminescência termicamente melhorada	72
Tabela 12 – Os resultados dos módulos de seis junções	72

LISTA DE SIGLAS

atm – Atmosferas

km – Quilômetros

W – Watts

AM – “Air mass” ou massa de ar

I_{mp} – Corrente de máxima potência

V_{mp} – Tensão de máxima potência

Wp – Watt pico

m^2 – Metro quadrado

J/K – Joule por Kelvin

P – Potência

S – Área

d.d.p – Diferença de potencial ou tensão

SiO₂ – Dióxido de silício ou silica

Hz – Hertz

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

η – Eficiência

dB – Decibéis

NASA – National Aeronautics and Space Administration

INT – Instituto Nacional de Tecnologia

Wh – Watt hora

Wp – Watt pico

Cu₂S – Sulfeto de cobre

CdS – Sulfeto de Cádmio

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

IPI – Imposto sobre Produtos Importados

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica

NR – Norma Reguladora

CM – Consumo Médio

HSP – Horas de Sol Pleno

N – Número de Painéis

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RCB – Relação Custo-Benefício

APÊNDICE

Apêndice 1 – Preço do inversor fotovoltaico.....	79
Apêndice 2 - Preço do módulo Canadian Solar – CS3Y-485W.....	79

ANEXOS

Anexo 1 – Datasheet do Módulo Lepton.....	78
---	----

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico das sociedades é notável o aumento da demanda pela produção de energia. Frente a isto, com o aumento da temperatura global e a possibilidade do esgotamento dos combustíveis fósseis, a humanidade tem buscado cada vez mais o investimento na energia renovável provinda de diversas fontes. Acredita-se que, as fontes tradicionais de geração de energia elétrica estejam chegando ao limite de produção, e que o excedente deverá ser produzido a partir de fontes alternativas.

Fonte inesgotável de energia, o Sol é reconhecido por ser o grande responsável pela presença de vida na Terra. Por diversas vezes, a ele foi atribuído o título de deidade maior, em inúmeras culturas. Deste modo, o Sol é a representação do calor e da vida, cultuado em todos os cantos do mundo.

O setor elétrico é caracterizado por ser essencial para a existência de todos os outros meios produtivos e em todas as esferas da sociedade. Seja pelo uso industrial e sua produção, ou a utilização pelos comércios e residências. A energia elétrica ilumina, aquece ou resfria os ambientes e impulsiona a água até a jusante de cada torneira. Sendo essencial para qualquer esfera produtiva das atividades humanas.

Nas últimas décadas, uma quantidade significativa de pesquisas tem como finalidade fontes renováveis e com largo potencial de produção para suplementar a demanda energética de uma população crescente. Incentivados pela crise petrolífera dos anos 70, o mundo se viu forçado a repensar energias, priorizando a implementação de energias que tivessem uma forma de produção limpa e que estivesse em mais harmonia com o meio ambiente. Tal movimento tem intenção de reduzir os impactos ecológicos para as gerações futuras.

Atualmente, a energia fotovoltaica é considerada complementar às matrizes energéticas renováveis mais utilizadas no mundo, que se baseiam na energia hidrelétrica e de biomassa. Os estudos relacionados aos módulos solares se iniciaram nos anos 50, com o desenvolvimento da dopagem do silício e na corrida espacial. Este foi o cenário que possibilitou uma maior pesquisa sobre a fonte solar e inseriu a pesquisa tecnológica nacional neste ramo, sendo hoje um dos grandes promotores do aumento do consumo de energia limpa nos grandes centros.

Dessa forma, a atuação se dá de forma residencial e empresarial, ou seja, a geração distribuída é apontada como altamente interessante para se obter lucros de

médio e de longo prazo, atraindo diversos novos clientes anualmente e contribuindo para uma nova forma sustentável de consumo e forçando o amadurecimento das empresas na busca por se alinharem aos novos hábitos de utilização energética.

Nesse sentido, os trabalhos de pesquisa possibilitam módulos fotovoltaicos cada vez mais eficientes na captação de energia, resultando numa diminuição do custo da geração por kWh fotovoltaico. Em decorrência disso há um aumento de políticas de incentivos governamentais para a implantação destes tipos de tecnologias, podendo atuar tanto numa forma de produção mais isolada, que é o caso da geração distribuída individual, quanto de maneira mais centralizada, através de grandes usinas solares.

Considerando o exposto é importante considerar que o Sol envia para a Terra, anualmente, mais energia do que a humanidade já consumiu durante toda a sua história. Tal contexto convida aos pesquisadores o desenvolvimento das tecnologias capazes de captar uma quantidade razoável de energia para o sustento de toda a cadeia produtiva, culminando numa geração de energia de forma silenciosa e sem impacto sobre a poluição atmosférica durante sua produção.

No caso brasileiro, o país possui um elevado potencial produtivo de energia solar, com uma alta irradiação média diária. Isto se relaciona com a localização próxima aos trópicos, concedendo ao país um potencial produtivo maior do que os países onde mais se investe em tecnologias fotovoltaicas, ou seja, na Europa.

No entanto, a tecnologia fotovoltaica ainda apresenta custos elevados se considerarmos a média de renda da população do país, o que prejudica a competitividade deste tipo de matriz - quando comparada à geração centralizada das usinas hidrelétricas. Se por um lado, a energia solar atenua custos com a distribuição da energia gerada, por outro, a inserção desses sistemas na rede vem sendo motivo de atenção para as usinas no que tange ao controle de tensão e sistemas de proteção. Enquanto o ciclo intermitente de geração se torna um empecilho para o usuário final, restando a este se conectar à rede ou investir num custoso banco de baterias.

Mediante essa dinâmica, o trabalho de conclusão de curso a seguir objetiva a realização de um projeto para um sistema de microgeração fotovoltaica que atenda às necessidades do cliente e que esteja de acordo com as normas nacionais da microgeração distribuída. Além disto, visa atender a um comércio na cidade de Barra do Piraí, na região Sul Fluminense, atentando-se à disponibilidade da incidência solar e do sombreamento local.

1.1 Objetivo geral

Realizar um projeto fotovoltaico do sistema ON-GRID em um comércio. Após a realização de um estudo sobre o sistema de geração fotovoltaica. Apresentando um breve comparativo do projeto sob novas condições, que seriam as novas tecnologias de módulos fotovoltaicos experimentais com alguma relevância para o mercado.

1.2 Objetivo específico

- Apresentar um breve estudo sobre os principais tópicos que abordam a produção de energia fotovoltaica.
- Realizar um comparativo das características deste tipo de produção quanto a outros modelos. Expondo suas vantagens e desvantagens;
- Orçar a implementação do sistema fotovoltaico num comércio.
- Análise da viabilidade econômica da implementação do sistema para a unidade objetivo do estudo.
- Realizar um breve comparativo da eficiência dos novos módulos solares e recalcular alguns conceitos chaves dos novos módulos para o sistema orçado.

1.3 Justificativa

Em face da necessidade por energias alternativas é interessante ao mercado energético buscar por novas fontes para suplementar as tradicionais matrizes das grandes distribuidoras. Nesta direção, pode-se não só suprir a crescente demanda por energia, quanto também atingir regiões distantes de modo cada vez menos dependente de sistemas de distribuição.

O país tem um grande potencial de insolação devido a sua posição geográfica no globo terrestre. Assim, tornando a energia solar uma alternativa viável e economicamente atrativa para cada vez mais consumidores, uma vez que sejam determinadas pelo governo as normas e os incentivos que favoreçam a produção (individual, privada ou coletiva) deste tipo de energia renovável. O que incentiva pesquisas sobre a tecnologia fotovoltaica no Brasil e no mundo.

O Sol possui uma capacidade energética com potencial infinito se consideradas as necessidades energéticas da humanidade no estágio de desenvolvimento atual.

Cabem aos pesquisadores desenvolver gradualmente tecnologias que favoreçam a captação desta energia “ilimitada”. Face a isto, todo estudo sobre a energia fotovoltaica se mostra pertinente.

1.4 Metodologia

O presente trabalho, inicialmente fará uma revisão bibliográfica dos conceitos de energia solar fotovoltaica. Segue com um estudo de caso, abordando o comércio mencionado anteriormente como objeto de estudo. E finaliza com uma análise do projeto sob as novas condições, pesquisando novas tecnologias que estão sendo experimentadas na área de eficiência energética dos módulos solares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sobre as energias renováveis

A energia é o recurso crucial para o desenvolvimento da tecnologia, da economia e ciência. Desta forma, seja ela mecânica, elétrica ou química é utilizada em toda a Terra. Seu meio de produção está diretamente ligado à disponibilidade do recurso energético em um determinado território, bem como a tecnologia disponível para a exploração desta matriz energética. "...da mesma forma, um país deve ter conhecimento para o aproveitamento e a recuperação dos recursos", (RAMPINELLI E JÚNIOR, 2012).

Uma vez que a oferta de energia provinda dos combustíveis fósseis é limitada e possuem alta capacidade poluente dada sua combustão, ocorre em escala crescente a demanda por novas fontes para suprir as necessidades do sistema de produção. Surgem, então uma gama de investimentos para o empreendimento em energias renováveis, que proporcionam uma pesquisa sobre os impactos ambientais, econômicos e sociais das alternativas energéticas frente às formas antigas de produção. Desenvolvendo trabalhos com biomassa, microgeração hidrelétrica, energia eólica, piezoelétrica, e a energia solar na tentativa de mitigar o consumo das usinas não renováveis e atender áreas remotas ou periféricas aos sistemas de produção convencionais (PACHECO, 2021).

De acordo com Bermann (2008), as fontes alternativas e renováveis de energia se destacam por seu impacto consideravelmente menor no ambiente, evitando assim a emissão direta de toneladas de gás carbônico na atmosfera. O que torna o debate ambiental um ponto crucial de interesse na discussão sobre o mercado energético alternativo, buscando inovações cada vez mais limpas e eficientes na sua produção e utilização.

O Brasil possui uma grande vantagem na corrida energética por fontes renováveis, pois é detentor de uma enorme biodiversidade e recursos naturais. O país é capaz de gerar energia por diversas vias, com uma vasta malha hidrográfica que permite geração de energia hidrelétrica, assim como a utilização de biomassa, gerando energia através de combustíveis com capacidade de renovação, assim como o álcool, o biodiesel, e a inovação do H-bio, como diz (AGRONEGÓCIOS, 2006).

Para Dalmaz et al. (2008), a primeira crise do petróleo foi um dos grandes propulsores para mudar a maneira de se pensar sobre a geração de energia. Neste aspecto, países como Alemanha, Dinamarca, os EUA e a Espanha foram os maiores investidores em formas alternativas de produção energética, destacando-se no setor. Cabe destacar que, nesta área citada, destacam-se a energia eólica e a solar. Em relação a esses, o cenário brasileiro, em especial o Nordeste, demonstra forte destaque para o Ceará e Fernando de Noronha - foi a primeira região a instalar parques eólicos, - enquanto o Sul foi destaque no pioneirismo da implementação da energia solar (KASPARY E JUNG, 2015).

No intuito de controlar os níveis de emissão de carbono na atmosfera, diversos países têm de se comprometer a triplicar a utilização de fontes renováveis como matriz energética até 2035, de acordo com o “Relatório Especial sobre Fontes de Energia Renovável”. O relatório postula a necessidade de que o mundo precise estabilizar e posteriormente mitigar a emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Tal atitude implicará a implementação de 14% para 35% da participação das fontes de energias renováveis, segundo dados estimados em 2012 por (MOREIRA, 2013).

De acordo com Galdino et al., (2000), antes da implantação de determinado tipo de energia por alguma cidade, indústria ou localidade, uma das propriedades a ser considerada é a capacidade de renovação desta fonte energética para o planeta Terra. Portanto, a energia elétrica só pode ser provida por uma fonte renovável ou uma fonte não-renovável. O Sol pode ser visto como a fonte primária de todas as demais matrizes energéticas, porém, se um processo de obtenção de energia se encontra num ciclo irreversível ou gera resíduos é definido dentro da categoria de não-renovável.

Uma das formas mais conhecidas de geração por meio de fontes não renováveis é a termoelétrica. Vale ressaltar que esta é resultante da queima de combustíveis fósseis (entre eles o carvão, petróleo ou gás natural) para movimentação dos geradores. Sua rápida instalação, proximidade das zonas consumidoras e disponibilidade abundante em boa parte do globo, torna as termoelétricas uma solução para mitigar a falta de opções renováveis em diversas localidades. No entanto, possui as desvantagens de ser uma grande colaboradora com as emissões de gases do efeito estufa, gerando uma considerável poluição térmica nos rios próximos – afetando ecossistemas locais, poluição sonora advinda do funcionamento dos motores e apresentando um custo elevado de produção quando comparado com

as demais fontes de energia, (EXPLICATORIUM, 2021).

Dentre as vantagens da energia nuclear, Pedro Reis (2011), aponta o preço do combustível urânio – muito mais barato que o petróleo (devido à alta demanda pelo material radioativo), com alto poder combustível, e isento de responsabilidade sobre a formação de chuvas ácidas ou efeito estufa. Seu transporte é fácil e sua tecnologia de produção consolidadas, o que o torna uma tecnologia relativamente segura, registrando apenas dois acidentes com mortes.

No entanto, por não representar uma tecnologia renovável (apesar de abundante), sabe-se que um dia as fontes de materiais nucleares podem vir a se esgotar. Também causa poluição térmica, devido ao alto aquecimento da água, posteriormente lançada em rios e mares, alterando ecossistemas e interferindo com o equilíbrio ambiental. Destaca-se também o enorme risco de catástrofe ambiental caso a pequena chance de um acidente aconteça, tornando os entornos das usinas inabitáveis (como aconteceu em Chernobyl). O rejeito da produção de energia nuclear é altamente tóxico e de complexo armazenamento. O plutônio 239 leva estimados 24 mil anos para perder metade de sua radioatividade e mais de 50 mil anos para se tornar inofensivo. Por fim, representa um custo altíssimo e complexo para a instalação de uma central geradora (MAXIM GROUP, 2020).

De acordo com Reis (2016) a forma de produção energética por biomassa apresenta vantagens como emitir uma quantidade menor de poluição em comparação com os combustíveis fósseis, tendo um baixo custo de aquisição dos combustíveis, e eficiência energética interessante.

Para Bermann (2008) esta matriz energética possui um alto custo para aquisição dos aparatos e para a formação de uma geração centralizada, causando um impacto ambiental considerável sobre a fauna e flora locais. Sendo crucial destacar a dificuldade acerca de seu armazenamento complexo, no que se refere ao material combustível em estado sólido e colabora para a formação de chuva ácida quando armazenado em estado líquido.

Notoriamente, as hidrelétricas são o carro-chefe no quesito de geração de energia no território nacional. Elas possuem a vantagem de representar uma das energias renováveis, já que esta matriz não polui a atmosfera, além de possuir a capacidade de reservar e suprir o consumo de água urbano, representando uma energia de baixo custo e desenvolvimento de uma rede de infraestrutura local para suprir a produção feita geralmente em locais mais afastados.

Porém, de acordo com Estudo Prático (2013), este método de produção tem como desvantagens a expropriação de comunidades ribeirinhas cujas áreas são inundadas, a destruição da fauna e flora em decorrência desta inundação, modificando, assim, o ecossistema com uma ocasional perda da variedade de espécies de peixes, causa uma ligeira mudança no clima local, decorrida pela concentração de umidade e também uma alta poluição sonora pelas turbinas. Podendo causar ainda erosão do solo com o desmatamento da vegetação local (REIS, 2019a).

A energia eólica elenca a classe das energias renováveis, dentre as suas vantagens, segundo Reis (2019b) estão a nulidade de emissão de qualquer gás do efeito estufa ou chuvas ácidas, exigindo muito pouca manutenção e possuindo um excelente retorno financeiro.

De acordo com Mundo da Elétrica (2021) é uma alternativa sustentável de geração de empregos, assim como pode agregar diferentes economias em sua área de instalação (agricultura e agropecuária). Porém, como desvantagens apresenta a intermitência do processo, que é atrelada à disponibilidade dos ventos e a característica de emitir poluição sonora - causada pelo barulho constante da ordem de 43dB das turbinas aero geradoras. Impacto visual evidente pelo tamanho das estruturas instaladas, assim como um dano à fauna aviária local, causado pelo choque físico das aves migratórias com as pás coletoras dos geradores.

De acordo com Blue Sol (2019), o objeto de interesse da pesquisa deste trabalho, a energia solar, também está sujeita a possuir vantagens e desvantagens em sua utilização. Como o estudo a seguir aponta, o processo funciona por excitação das células feitas de semicondutores através da luz, gerando corrente elétrica. Esta energia é transferida para o armazenamento ou ao inversor de frequência. As vantagens são:

- Sua geração é inteiramente sustentável e limpa. Não emite nenhum gás que colabore para o efeito estufa ou as chuvas ácidas;
- Não emite poluição sonora e pode compor ornando as estruturas residenciais, comerciais e industriais;
- Dentre os meios citados, trata-se da tecnologia mais portátil de todas. Podendo ser instalada isoladamente em lugares com acesso dificultado, respeitando a irradiação solar local;
- Os sistemas OFF-GRID não exigem qualquer custo com equipamentos

de transmissão;

- Devido à proximidade do consumidor, a geração sofre menos perdas para transmissão;
- Altamente atrativo para países com grande incidência solar, como nos países tropicais ou nos países com alta reflexão solar (áridos) e oceânicos;
- Baixos custos de manutenção (a manutenção limita-se muitas vezes a limpar os módulos e verificar superficialmente a saúde dos inversores);
- Grande vida útil dos componentes (estima-se a vida útil dos módulos solares em 25 anos e a garantia dos inversores em no mínimo 10 anos);
- Na Geração Distribuída os custos de produção (Wh) diminuem conforme a passagem do tempo.

Entretanto, pode-se elencar como desvantagens:

- O processo de extração do silício e confecção dos módulos gera poluição ambiental;
- Produção intermitente, variável e dependente da disponibilidade da irradiação solar, portanto não gera energia durante a noite e apresenta baixo rendimento em dias nublados ou com pouca luminosidade;
- Produção limitada ao ângulo de incidência dos raios solares, o que implica em baixa produção, especialmente em países de maiores latitudes;
- Quando comparada as formas de energia anteriores, possui menor eficiência (os painéis comerciais apresentam eficiência de 18%), no entanto a pesquisa e o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias vem aumentando a eficiência dos módulos;
- Custo inicial elevado, considerando o poder aquisitivo médio nacional;
- O descarte dos módulos solares inutilizados deve ser feito de maneira adequada;

O processo de armazenamento da energia excedente pode ser limitado ao investimento do consumidor em bancos de baterias (mas é dispensado no caso dos sistemas ligados à rede).

A figura 1 mostra a insolação média diária durante o ano.

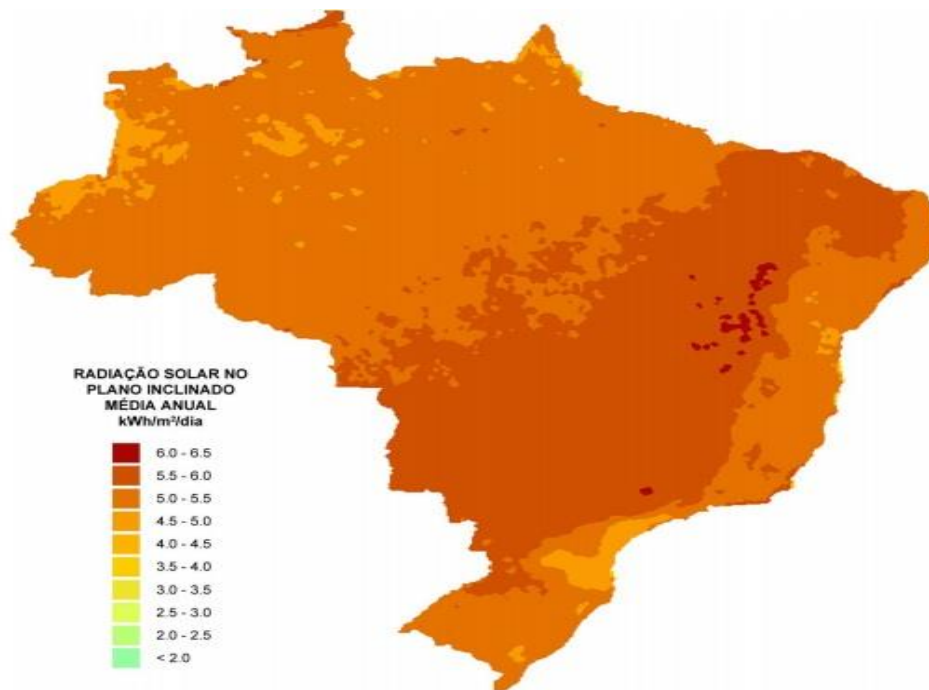


Figura 1– Insolação diária média anual
Fonte: INPE

2.2 Histórico da energia solar no mundo

O efeito fotovoltaico foi observado e reproduzido primeiramente em 1839, tendo sido descoberto pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. A obtenção de energia elétrica através da luz chama atenção de várias instituições desde sua descoberta com o surgimento da primeira célula fotovoltaica, (STROM BRASIL, 2016).

Em 1877 era produzido o primeiro aparato sólido capaz de sintetizar energia solar em eletricidade. Tratava-se de um filme de selênio depositado num substrato de ferro em que um filme de ouro muito fino servia de contato frontal. Desenvolvido por Adams e seu aluno Richard Day, este dispositivo tinha apenas 0,5% de eficiência. Apesar de experimental, o aparato ainda estava bem distante da eficiência de 18% dos módulos produzidos comercialmente, no contexto contemporâneo. A técnica foi aprimorada em 1883, por Charles Fritts, ao mesmo tempo em que Thomas Edison inaugurava a primeira usina elétrica comercial baseada na queima de carvão do mundo. A técnica de Fritts elevou para 2% a eficiência dos painéis.

A princípio, este tipo de energia era visto de modo distante, como algo futurístico, incapaz de se tornar comercial e restrito à pesquisa científica, dado seu notável custo de produção. Menos de um século depois, em 1923, Albert Einstein

conquistaria seu primeiro prêmio Nobel explicando em seu trabalho como funciona o efeito fotovoltaico. Fato histórico que consagrou este tipo de energia como viável para a produção de energia limpa e ilimitada (BLUE SOL, 2019).

O desenvolvimento da técnica de dopagem do silício, em 1954, pelo químico Calvin Fuller e os laboratórios Bell. Tal movimento foi compartilhado com o físico Gerald Pearson que aprimorou o processo, descobrindo também o efeito fotovoltaico da dopagem e compartilhando seus resultados com Daryl Chapin. Este momento, inaugura a era moderna da energia fotovoltaica.

Essa conquista foi apresentada formalmente no ano de 54, numa reunião da National Academy of Sciences, na cidade de Washington. Deste modo, a primeira fotocélula moderna utilizava o processo de dopagem do silício com arsênio e, posteriormente, boro de Fuller, corrigindo os empecilhos técnicos das antecessoras e aumentando significativamente as eficiências das células para 6%. O processo levou Fuller, Chapin e Pearson ao hall da fama dos inventores nacional *post-mortem*, no ano de 2008.

Para Blue Sol (2016), a invenção, no entanto, ainda enfrentava o empecilho dos altos custos de produção. Dentre as primeiras utilidades dos painéis fotovoltaicos destaca-se a corrida espacial, em 1958. O satélite Vanguard I entrou em órbita com um pequeno painel de apenas 1Watt que serviu para alimentar um rádio. A NASA também lançou ao espaço mais dois satélites no mesmo ano, portadores de energia solar: o Vanguard II e o Explorer III. O Sputnik III russo também contava com tal tecnologia. Em 1964 e 1966, finalmente a NASA lançaria o primeiro satélite e uma estação espacial alimentados integralmente por energia solar, mediante a produção de 470W e 1kW, respectivamente.

O investimento em pesquisa massiva para comercialização no território americano foi impulsionado pela crise energética entre os anos 70 e 80. Com o passar dos anos, o dispositivo fotovoltaico sofre redução no custo de produção e a medida em que seu uso é estimulado, mais empresas entram na concorrência e mais incentivos fiscais são introduzidos (BLUE SOL, 2016).

Em 78, a indústria fotovoltaica já correspondia a mais de 1MWp/ano em capacidade produtiva. No início da última década do século XX, os EUA lideravam a produção de módulos. Neste período foi quando os governos da Alemanha e do Japão incentivaram o desenvolvimento destas tecnologias no mercado, em resposta a uma crescente demanda por diminuição da emissão dos gases responsáveis pelo efeito

estufa, estabelecida no protocolo de Kyoto.

No final do século já eram produzidos mais de 175MWp em módulos solares no mercado mundial e o silício era a tecnologia mais amplamente difundida e utilizada. A alta demanda por este tipo de energia incentivou a concorrência feroz chinesa, que pode ser notada em 2006, com a entrada definitiva do país no mercado, que virou líder mundial após três anos em franca concorrência.

Segundo Cresesb (2014), até o ano de 2014, dentre os países com os maiores mercados fotovoltaicos estavam na Europa, com aproximados 74% da potência mundial produzida, sendo Alemanha (32.3GWp) e Itália (16GWp) os líderes mundiais. A energia fotovoltaica supria 2% da demanda elétrica total do continente, ao passo em que o Estado italiano tinha 5% do total da demanda suprida por esta matriz. A energia solar teve destaque nos últimos anos por ser a terceira fonte de energia com maior número de instalações no continente europeu, estando atrás apenas das centrais eólicas e do gás natural.

Os líderes atuais na produção de módulos fotovoltaicos são os chineses, detendo 64% da produção mundial, sendo que o mercado asiático detém 84% das indústrias produtoras de módulos. Ao mesmo tempo em que, a Europa segue, produzindo 11% dos módulos e os EUA 3%. Neste sentido é importante ressaltar que, o deslocamento das fábricas europeias e americanas para o oriente foi motivada pelo intuito de se livrar de custos de produção, pois encontram possibilidades mais atrativos no que se refere ao lucro, quanto aos seus países de origem.

2.3 Histórico da Energia Solar no Brasil

O Brasil desponta somente na história recente do mercado solar. De acordo com Cresesb (2014), apenas nos anos 50 teve o início da participação brasileira na confecção de módulos pelo INT – Instituto Nacional de Tecnologia e no Centro Tecnológico da Aeronáutica (atual Centro Técnico Aeroespacial). O desenvolvimento houvera sido impulsionado no Estado de São Paulo com a USP e o refinamento da técnica Czochralsky, em prol do desenvolvimento do silício monocristalino e da microeletrônica. Esta movimentação totalizou um primeiro momento com módulos de eficiência de 12,5%.

No Rio de Janeiro, na década de 70, em cooperação com outros países, o IME – Instituto Militar de Engenharia era responsável por uma linha de montagem de células de $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ (sulfeto de cobre/sulfeto de cádmio), com eficiência de aproximados 5%. Além disso, foi nesse momento quando o país se destacava por parrear com tecnologia de ponta segundo os padrões internacionais.

No Estado paulista logo no início dos anos 80, uma empresa chamada Heliodinâmica inaugurava sua sede, produzindo módulos para utilização residencial e fabril. Logo em 82, iniciou a produção de targos cilíndricos e lâminas de silício monocristalino. No ápice de sua produção as Heliodinâmica podia fazer concorrência com o mercado internacional. Poucos anos depois, em 85, produzindo aproximadamente 1MW/ano, a empresa era estimada em 10 milhões de dólares e contava com 100 colaboradores, como afirma (GALDINO ET AL., 2011)

Nesse mesmo sentido, tendo sido abraçada pelo protecionismo do mercado nacional e a Lei da Informática, que por 10 anos impediu a aquisição de equipamentos importados, a empresa viveu seus anos dourados - antes da gradual queda das barreiras comerciais. No ano de 1992, a empresa veio a declarar o encerramento da sua participação na atividade produtiva de módulos. O mercado nacional então ficou abastecido por multinacionais, limitando-se principalmente à compra do governo, e aquisição para uso próprio de empresas de telecomunicação e residencial. Não havendo grandes incentivos para amplo mercado nesta época (KONER, 1993).

As empresas de telecomunicação e o governo, no entanto desenvolveram painéis de silício monocristalino para serem implantados no primeiro satélite nacional. O INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, até os dias atuais, vem utilizando células de tripla junção em aplicações espaciais (CRESESB, 2014).

Para Órigo (2020), a Resolução Normativa nº 482, das ANEEL, estabeleceu o ano de 2012, como sendo o grande marco para o empreendimento fotovoltaico. Tal medida inaugurou a era da geração própria de energia, atrelada aos parâmetros da geração GRID-TIE e suas conexões às redes distribuídas. Esta resolução estabeleceu os parâmetros do que seria Microgeração (em leigas palavras o gerador de próprio consumo no telhado do seu próprio logradouro) e a diferenciou da Minigeração (Fazendas solares localizadas próximas aos consumidores finais com competência para explorar o setor energético local).

É importante ressaltar o impulso dado pelo governo para o avanço da energia solar com a instituição de outras medidas para dinamizar o setor fotovoltaico país,

como a redução de impostos sobre as importações de módulos e inversores – com o apoio do BNDES, e a isenção de impostos como IPI ou ICMS (ÓRIGO, 2021).

Através do decreto nº 7.212, ainda 2010, o governo estabelece que, os módulos fotovoltaicos e inversores são imunes à incidência do Imposto sobre Produtos Industrializados, o IPI. Desta maneira houve um benefício aos interessados na implantação de energia solar.

O BNDES através de uma linha crédito especializada financiou projetos para a geração de energia solar. Com a criação do “Plano Inova Energia” um fundo que incentivava diretamente as pesquisas e desenvolvimento de tecnologia da área fotovoltaica. Além de incentivar as indústrias com uma alíquota de 2% sobre os bens de capital para a produção nacional de dispositivos do ramo.

Pode-se observar um crescimento exponencial que, aqueceu o mercado. A potência total instalada no país cresceu de 7MW em 2012, para potências superiores a 6GW no ano de 2020, de acordo com as informações da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Um mercado que recebeu um investimento bruto de mais de 31 bilhões de reais e mais de 180 mil empregos desde a NR.

No setor da geração centralizada, de acordo com o Ministério de Minas e Energia, em 2014 ocorreu a primeira contratação de energia Solar pública do país. No intuito de desenvolver, ainda mais, o setor solar no país, em 2015 houve dois leilões de concessões objetivando o desenvolvimento da indústria solar no Brasil. Tal iniciativa esteve focada para o consumo e a reserva energética dos meios tradicionais. Porém, de acordo com o artigo 'Paradigmas da energia solar no brasil e no mundo' publicado pela revista eletrônica em Gestão, educação e Tecnologia Ambiental, as barreiras de custos ainda cerceiam o país.

Atualmente, o país ocupa a 16ª posição entre os Estados com maior quantidade de geração fotovoltaica, considerando o ranking mundial de energia fotovoltaica da Renewable Energy Agency. Com um salto significativo de onze posições somente nos últimos quatro anos, onde dispunha de 438,3MW de potência instalada divididas em 15,7 mil instalações de acordo com o Ministério de Minas e Energia. De acordo com esta instituição, o setor comercial é o que detém maior potência absoluta instalada, e nesta direção é o setor residencial que lidera em número de instalações, enquanto a indústria detém a maior média de potência entre os ramos.

A energia solar térmica provinda do aquecimento da água pelos coletores solares, também merece destaque, já que apresenta seus aproximados 13 a 14

milhões de m² instalados. Em observação das Pesquisas do Ministério de Minas e Energia, nota-se que o Sistema corresponde a 1300GWh produzidos, somando 0,2% da demanda total de energia elétrica do país no ano de 2016.

A irradiação média anual brasileira pode variar entre 1.200 e 2400kWh/m²/ano, configurando o país como uma grande promessa para a geração de energia fotovoltaica. Outro ponto relevante a ser destacado é que o melhor aproveitamento da energia solar está na região Nordeste. Com uma irradiação solar de alta qualidade. Assim, o estado baiano e uma pequena parte de Minas Gerais podem produzir até 6,5kWh/m²/dia.

Em contrapartida, a região menos favorecida é o Sul do país, podendo produzir cerca de 4,2kWh/m²/dia. Este potencial muito melhor do que o do país com maior aplicação da energia solar no mundo: a Alemanha. A produção média brasileira está muito acima da média da Europa, porém ainda está abaixo de regiões mais desérticas (cuja reflexão da luz é melhor), como a Austrália, África, Oriente Médio, Índia, Sudoeste dos EUA, México, Chile e Peru.

O Brasil vem em plena expansão do modelo de desenvolvimento fotovoltaico. Até o ano de 2026 é esperado que o país possua até 13GWp instalados no território nacional. Sendo 9,6GW de geração centralizada e 3,4GW de geração distribuída. Neste sentido, até 2050 estima-se uma expansão de até 78GW de potência instalada. Num cenário onde 20% dos domicílios vão possuir aquecimento de água por via solar.

2.4 O que é energia solar?

O Sol é a estrela única do nosso Sistema Solar, formada por diversificados elementos no estado gasoso em seu interior, principalmente o hidrogênio. Seu raio é de aproximadamente 700 mil quilômetros e devido à elevada pressão interna de aproximadamente 740 bilhões de atm., acontece a colisão de um número incontável de átomos de hidrogênio, descrevendo o fenômeno da fissão nuclear. Mediante uma temperatura de aproximadamente 15 milhões de °C em seu exterior, o Sol expelle de sua superfície, uma energia da ordem de $3,7 \times 10^{14}$ TW de potência, diariamente sendo que sua temperatura nas camadas superiores chega a aproximadamente 6000°C (FRIEDRICH, 1991).

Distante $149,6 \times 10^6$ km do nosso planeta, o que equivale a 8 minutos na velocidade da luz, apenas uma ínfima parte da energia expelida na superfície solar

chega à Terra, da ordem de 173.000TW ao dia, sendo que esta pequena porção de energia captada na atmosfera terrestre corresponde a 10.000 vezes ao uso anual de todas as fontes de energéticas utilizadas no globo durante todo o ano. O que equivale a dizer, então, que o Sol emite diariamente em direção ao nosso planeta mais energia do que a humanidade já utilizou durante toda a sua existência (OLIVEIRA E GUARONGHI, 2021).

Considerando que o Sol tem uma idade estimada na ordem de 6 bilhões de anos e que as estimativas são de que possui hidrogênio o suficiente para manter o ritmo de combustão e dissipação energética por mais 8 bilhões no ano, é seguro dizer que podemos considerar o Sol como uma fonte de energia inesgotável para o modelo de sociedade atual (FRIEDRICH,1991). Segundo Imhoff (1991), define-se, então por “energia solar” a energia irradiada pelo Sol em direção à Terra sob as formas de luz e calor. O processo de conversão da radiação em forma de luz solar em energia é chamado de fotovoltaico.

Em sua translação, o planeta Terra circula o Sol numa trajetória elíptica de baixa excentricidade com uma inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$ em relação ao eixo de translação. Resultando na percepção das estações do ano. Uma vez que a órbita do planeta em volta da estrela também altera o ângulo de incidência dos raios solares, dependendo de qual hemisfério o observador se encontre. O resultado também é a influência na temperatura do hemisfério e na quantidade de tempo iluminado (duração dos dias e noites).

Cresesb (2014), afirma que as variações entre as interações entre o Sol e o solo da Terra são descritas por diversos ângulos que são, como:

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

b) Altura ou Elevação Solar (α): ângulo situado entre os raios do Sol e a projeção destes raios sobre o horizonte do observador;

c) Ângulo Azimutal do Sol (γ_z): ou azimute solar é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano do observador e a direção norte e sul. O deslocamento angular se dá a partir do Norte (0°) geográfico, por conveniência positiva quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativa estando à esquerda (a Oeste);

d) Ângulo Azimutal da Superfície (γ): forma o ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas

convenções do azimute solar;

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

f) Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios solares e a normal ao objeto de captura da energia solar;

A figura 2, a seguir, mostra as relações angulares na incidência solar.

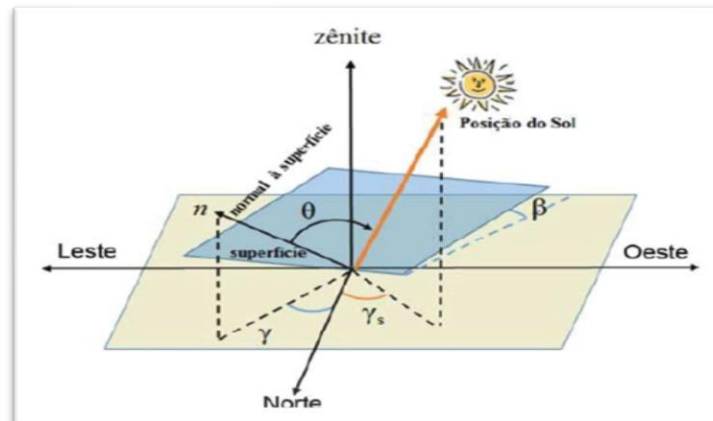


Figura 2 – Relações angulares da incidência dos raios solares
Fonte: Cepel

A radiação solar sofre redução à medida em que passa pela atmosfera, dados os efeitos físicos da luz de reflexão, dispersão e absorção. Estes efeitos estão ligados à presença de nuvens (onde a luz bate nas nuvens e volta para o espaço), poeira na atmosfera, poluentes, condições locais como solo, vegetação e hidrografia.

A luz aproveitável nos módulos fotovoltaicos é provinda da incidência direta dos raios solares, cujo produto são sombras bem definidas e por raios difusos resultantes dos processos de difusão mencionados no parágrafo acima. Invariavelmente, 20% da radiação solar seria de origem difusa, mesmo em dias sem nuvens. Neste aspecto, sabe-se que nos dias nublados não há incidência direta dos raios solares sobre a superfície. A Terra apresenta um nível médio de radiação por volta de 1kW/m^2 à pleno Sol num dia ensolarado. O valor foi adotado como padrão para o dimensionamento de células fotovoltaicas.

A figura 3 mostra o somatório das energias direta e difusa na produção de energia fotovoltaica.

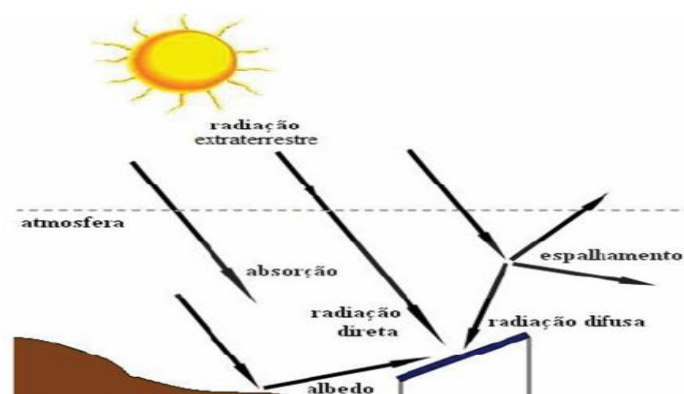


Figura 3 – Os tipos de irradiação solar
Fonte: Cepel

2.5 O processo fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são aparatos constituídos de material semicondutor. Basicamente transformando a energia luminosa, principalmente a solar, em energia elétrica. Sua característica principal é o que lhe dá o nome: transformar a luz em energia. O semicondutor, então se trata de um material com características de apresentar melhor condutividade que um isolante, e apresentar a capacidade de isolar a corrente elétrica, que não é inerente ao material condutor (TAVARES, 2009). O processo ocorre devido à existência de duas bandas de energia: a banda de valência, rica em elétrons livres e a banda de condução, onde existe espaços “vazios” para alocar elétrons. Entre os principais semicondutores disponíveis estão o germânio e o silício.

Dentre os semicondutores mencionados o silício se mostra mais utilizado. Seus quatro elétrons na camada de ligação se interligam formando uma rede cristalina. Ao receberem o processo de dopagem com elementos como fósforo, que possui cinco elétrons de ligação, o elétron excedente não permanece sozinho, dada a impossibilidade de ser ligado ao resto da banda de valência (SWART, 2007). Sobra então uma ligação frágil entre este elétron e o átomo de origem, sendo suficiente uma pequena quantidade de energia térmica para se desprender do átomo, partindo para a banda de condução. O processo de dopagem com o fósforo determina um

Semicondutor NP.

O processo de dopagem pode ser feito, ainda, com elementos de três elétrons de ligação, tal qual o boro. Nota-se assim, a carência de um elétron para se ligar aos elétrons do silício na camada de ligação desta junção. Esta ausência do elétron incorre num espaço para a combinação do elétron se chama “buraco” ou “lacuna”. Bastando um pouco de energia térmica para que o elétron do vizinho silício ocupe esta lacuna. Portanto, desloca-se este buraco para o próximo átomo do boro, caracterizando o boro como um dopante tipo P.

Ao se adicionar átomos de boro em uma metade de um silício puro e átomos de fósforo na outra metade se obtém a chamada junção PN. Nela, o trânsito de elétrons livres se dá do lado N, em sentido ao lado P onde se encontram as lacunas. Esse fenômeno desencadeia a movimentação dos elétrons para o lado P, tornando o semicondutor com carga positiva, formando assim um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de elétrons do lado N para o lado P. O processo se equilibra uma vez que se cria uma barragem dos elétrons livres remanescentes do lado N, provinda por um campo elétrico.

A exposição da junção PN à luz de energia maior que a energia do GAP (que significa o mínimo de energia necessária para o deslocamento de um elétron para a banda de condução), incorrerá no aparecimento de pares de elétrons e lacunas. Ocorrendo onde o campo elétrico é diferente de zero, acontece a aceleração das cargas, gerando corrente elétrica, caracterizando o efeito fotovoltaico pela diferença de potencial. Uma vez em curto por um condutor, ocorreria a circulação de elétrons (CRESESB, 2014).

A figura 4 mostra a representação com relação ao nível de energia da camada proibida dos elementos isolantes, condutores e semicondutores.



Figura 4 – Composição eletrônica dos condutores, isolantes e semicondutores
 Fonte: Mundo Educação UOL

A figura 5 mostra o esquema de junção PN aplicado num painel solar, representando a incidência da luz no nas fotocélulas, configurando o processo fotovoltaico.

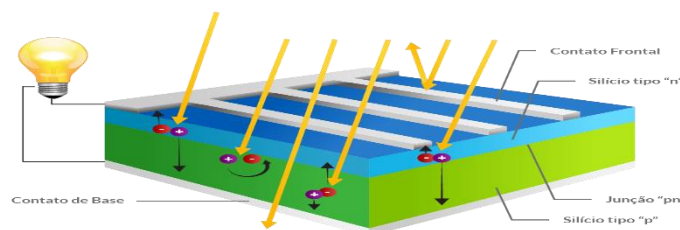


Figura 5 – Junção PN no módulo fotovoltaico
 Fonte: **Fonte:** Blog Blue Sol

2.6 O módulo fotovoltaico

2.6.1 Breve histórico

O módulo fotovoltaico (“painel solar”, para os leigos) ou fotocélula (unidade geradora fotovoltaica) converte em energia a radiação solar que nela se incide. O material mais comercializado para a produção destes dispositivos é o silício, dada a imensa disponibilidade do recurso mineral no globo.

Pereira et al (2006), menciona o custo do W por volta de 6 dólares e um

rendimento de apenas 2% da energia emanada sobre um painel solar, nos módulos fotovoltaicos pioneiros. A pesquisa aplicada durante as décadas se utilizou de diversos materiais semicondutores até chegar às modernas células de silício comercializadas amplamente no mercado atual.

2.6.2 Características Elétricas

A célula pode ser representada a partir dos valores de corrente e tensão em função dos fatores que influenciam na entrada, tais como a temperatura da célula e irradiância luminosa. Uma vez ciente de que o fenômeno fotovoltaico ocorre devido à exposição à luz e a geração de corrente elétrica por meio do campo elétrico formado na junção PN. A tensão, a corrente e a potência nominal são particularidades cruciais a serem observadas numa fotocélula. O W_p (Watt pico) é a unidade padrão determinada pela STC (Standard Test Conditions) para determinar a potência de um módulo solar.

Os testes são padronizados na referência de 25°C e $1\text{kW}/\text{m}^2$ de irradiância solar e massa de ar em 1,5AM. O valor pico é aferido durante a obtenção da corrente de máxima potência (I_{mp}) e a tensão de máxima potência (V_{mp}). O circuito equivalente do módulo é dado através da extrapolação da análise da célula fotovoltaica unitária que é considerada ideal. Sua representação, para um circuito elétrico seria uma fonte de corrente variável, onde as correntes geradas pela luz estão diretamente relacionadas à radiação luminosa incidente sobre a célula e sua temperatura neste momento. O circuito equivalente de um painel solar está representado na figura 6.

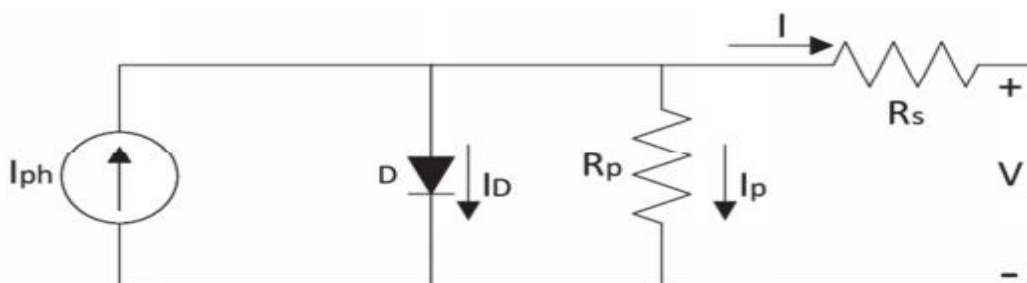


Figura 6 – Circuito equivalente de um painel solar
Fonte: Tavares

De acordo com Tavares (2009), o modelo utilizado é o modelo de um diodo,

denominado como modelo real. A corrente gerada pela luz é dividida entre as resistências em série (R_s), em paralelo (R_p) e a corrente do diodo que representa o esquema dos semicondutores da célula. A tensão e a corrente útil para a geração do sistema são aferidas nos terminais que conectam os módulos.

A lei de Kirchoff, aplicada no nó antes de R_s , auxilia a compreensão da aferição das corrente útil a ser transferida para o inversor conforme mostra a equação 1.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1)$$

Onde:

I – Corrente útil (A);

I_{ph} – Corrente gerada pelos módulos (A);

I_d – Corrente do diodo (A);

I_p – Corrente do resistor em paralelo (A).

I_p , ou corrente em paralelo, representa a corrente de fuga, apresentada na equação 2.

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2)$$

Onde:

V – Tensão (V);

I – Corrente (A);

R_s – Resistor em série;

R_p – Resistor em paralelo.

A corrente do diodo D pode ser encontrada a partir da equação 3, a seguir:

$$I_d = I_0 \cdot \left[e^{\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right] \quad (3)$$

Onde:

I_0 – Corrente de saturação reversa do diodo no escuro (A);

V – Tensão aplicada aos terminais do diodo (V);

e – Carga do elétron (C);

m – Fator de idealidade do diodo (entre 1 e 2 para o silício monocristalino);

k – Constante de Boltzmann (J/K);

T_c – Temperatura de operação da célula fotovoltaica (°C).

Sendo o valor da carga do elétron 1,602. 10⁻¹⁹ C.

Uma vez arranjadas em série as células, deve-se adicionar o termo representante do número de conexões feitas. Ao se utilizar as equações encontradas acima para determinar as correntes paralela e do diodo na equação da corrente aferida no módulo, teremos o detalhamento da corrente útil de acordo com a equação 4:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[e^{\frac{e \cdot V}{m \cdot k \cdot T_c}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (4)$$

Como a quantidade de luminosidade disponível afeta diretamente a performance do painel fotovoltaico, este não consegue sustentar uma tensão constante nos terminais.

A análise das curvas na figura 7 destacam pontos chave para a caracterização do rendimento do equipamento, são eles a tensão em circuito aberto, corrente de curto-circuito e o ponto de máxima potência.

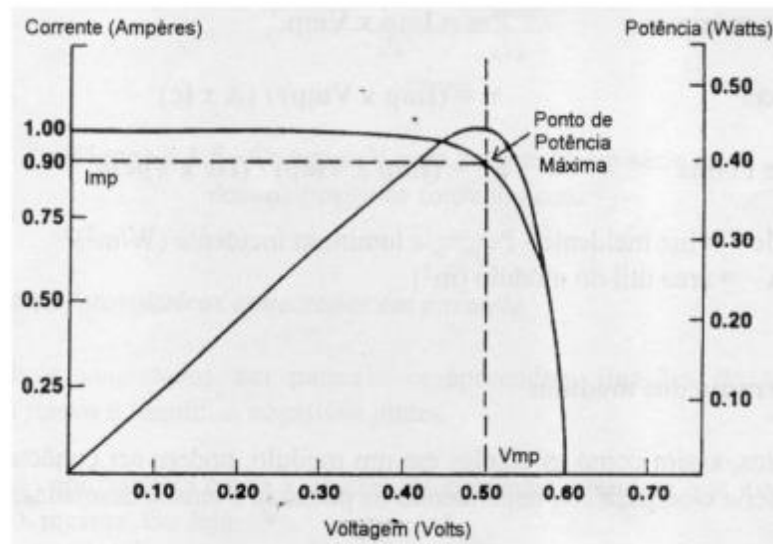


Figura 7 – curvas características superpostas Tensão-potência e V x I
Fonte: e-disciplinas USP

A tensão em circuito aberto corresponde ao fornecimento máximo de tensão

disponível pela célula, que pode ser atingido somente sem carga conectada, caracterizada pela abertura dos terminais.

A corrente de curto-circuito corresponde ao valor máximo fornecido de corrente pelo painel.

O ponto máximo de potência representa o ponto onde o equilíbrio entre a tensão e a corrente estão próximos ao máximo, permitindo assim a entrega do melhor desempenho de geração fotovoltaica oferecido pelo módulo.

As referências obtidas refletem as condições padrão de teste e têm importância para o bom dimensionamento do sistema e equipamentos utilizados. Devido à demanda de iluminação para a geração de energia no sistema fotovoltaico é possível inferir que, as condições climáticas terão influência sobre a potência gerada pelo sistema. Um dia nublado, logicamente fornecerá menos geração do que um dia ensolarado. A quantidade de luz incidente sobre o painel também afeta a quantidade de corrente gerada e a temperatura do ambiente. Esta última condição afeta diretamente a performance de todos os equipamentos elétricos. Nos módulos fotovoltaicos iremos observar uma queda no valor de tensão diretamente proporcional ao aumento de temperatura (FRUGIS, 2019).

Os dados obtidos são importantes para o cálculo das associações de células em módulos. Ou seja, nos módulos em strings e strings em arranjos, que são disposições feitas para gerar mais tensão ou corrente para o sistema. Uma string grande associada em série, visando elevar o nível da tensão gerada, pode apresentar uma perda significativa de geração desta tensão devido à temperatura elevada, submetendo ao risco da perda de tensão ser suficiente para inviabilizar o início do inversor de frequência grid-tie em dias de grande calor. Ao passo que, nos dias mais frios podem aumentar significativamente a tensão da string, vindo a danificar o inversor mal dimensionado.

O gráfico da figura 8 ilustra a influência da irradiação solar na geração de corrente no painel fotovoltaico.

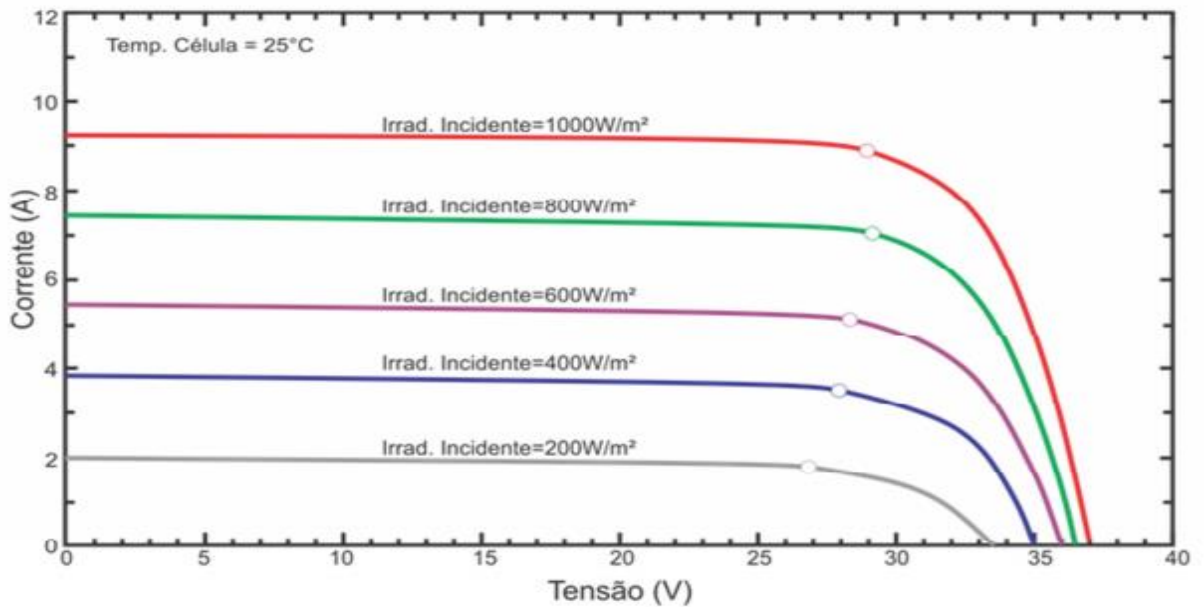


Figura 8 – Nível de corrente gerado de acordo com a irradiação solar
 Fonte: Kyocera

O gráfico da figura 9 mostra a influência da temperatura sobre a tensão gerada.

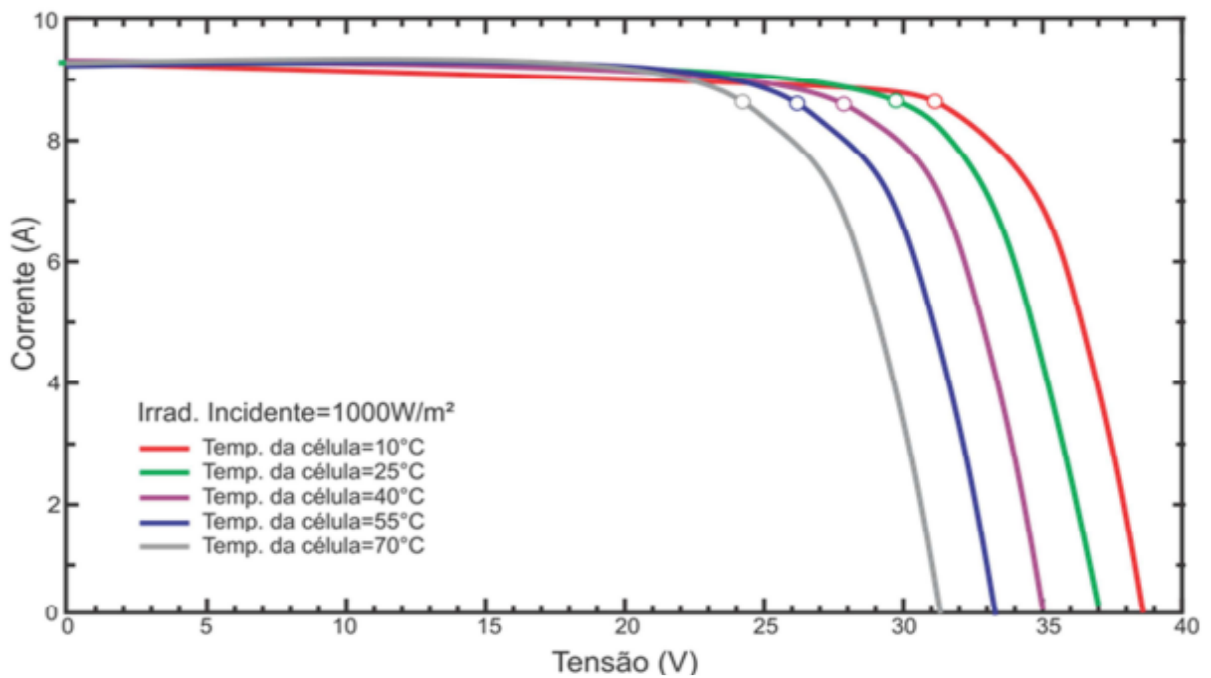


Figura 9 – A influência da temperatura na produção fotovoltaica
 Fonte: Kyocera

É importante observar que na construção de um painel são feitas associações de células de forma a gerar a potência desejada, um exemplo de célula fotovoltaica é mostrado na figura 10.



Figura 10 – Célula Fotovoltaica
Fonte: AliExpress

A união de células, que configura um módulo fotovoltaico é mostrada na figura 11.



Figura 11 – Módulo fotovoltaico
Fonte: Leroy Merlin

Como é mostrado na figura 12, a união de módulos é chamada de string.

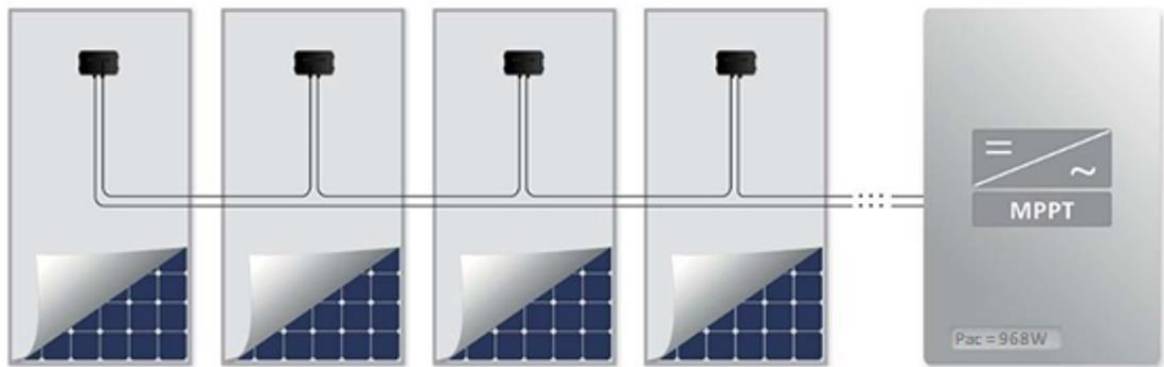


Figura 12 – String fotovoltaico
 Fonte: Jr. Solar

Um arranjo fotovoltaico é a união de duas ou mais strings, como mostrado na figura 13.



Figura 13 – Arranjo fotovoltaico
 Fonte: Portal Solar

Todos os módulos foram produzidos considerando a eficiência energética na captação da energia solar. É interessante notar que, a existência de módulos experimentais, cuja eficiência é aprimorada vêm sendo testados em laboratórios ou aportando projetos espaciais sofisticados. Os módulos comerciais atuais têm eficiência calculada entre 15% e 21%. Como mostra a tabela da figura 14.

eficiência	percentual do total de painéis produzidos	de uma forma simples
>=18%	~ 10%	OS PAINÉIS MAIS EFICIENTES
17-17.9%	~ 30%	ACIMA DA MÉDIA DE EFICIÊNCIA
16-16.9%	~ 30%	EFICIÊNCIA OK
15-15.9%	~ 20%	ABAIXO DA MÉDIA DE EFICIÊNCIA

Figura 14 – A eficiência dos módulos comerciais
 Fonte: Portal Solar

A equação a seguir demonstra a fórmula de como é calculada a eficiência de um painel solar:

$$\eta_{\text{módulo}} = \frac{P}{S} \cdot 0,1 \quad (5)$$

Onde:

$\eta_{\text{módulo}}$ – Eficiência do módulo;

P – Potência (W);

S – Área(m²).

O sombreamento nos módulos pode causar o aquecimento deles. Isso acontece devido à inversão na geração de corrente, fazendo com que o módulo atue como uma carga ao invés de um gerador. Os locais de sombreamento e aquecimento são denominados “pontos-quentes” (ou hot-spots) e podem vir a causar dano irreversível aos módulos afetados. A corrente recebida atua sobre o efeito joule, produzindo calor.

Diodos então são conectados inversamente no circuito com a finalidade de desviar a corrente produzida pelo sombreamento. Estes são denominados de “diodos de derivação” ou diodos de “by-pass”.

A fim de evitar que o efeito do sombreamento de uma célula afete módulo inteiro, ou pior, a string, consumindo corrente ao invés de gerar, similarmente se utilizam “diodos de bloqueio” em série nas strings.

Para instalações OFF-GRID é comum, utilizar-se de diodos para evitar o descarregamento das baterias sobre os módulos quando estes não estão produzindo. Nos sistemas GRID-TIE estes podem provocar a queda da d.d.p, portanto sendo dispensados (ZILLE, 2012).

2.7 Tipos de Módulos fotovoltaicos

Como visto anteriormente, o material mais utilizado para a produção dos semicondutores é o silício, segundo material mais abundante na crosta terrestre. Aparecendo principalmente na forma de argila, feldspato, granito, areia e a forma mais abundante, a sílica SiO₂, as principais condições em que este elemento está presente

nos módulos solares são a monocristalina, a policristalina e o silício amorfo.

2.7.1 Silício Monocristalino

O silício monocristalino é feito através do processo conhecido como “Czochralski” de custos relativamente baixos para as escalas de produtos eletrônicos. O processo envolve a retirada da sílica da natureza, onde ela passa primeiramente por um processo de fusão no qual fica liquefeita no forno à altas temperaturas. Na sequência há uma separação do oxigênio do silício. Ainda em estado líquido é adicionado o dopante do tipo P, normalmente o boro, e desta mistura é feita uma barra do silício monocristalino levemente dopado. Esta barra é fatiada em chapas finas de 0.3mm.

Após fatiada, as impurezas do material são retiradas e sobre a fatia é infundida dopagem do tipo N a fim de se obter a junção PN. Este processo incorre em fazer a difusão monitorada com vapor de fósforo no forno à altas temperaturas. O resultado é um material homogêneo, altamente puro (de 98 a 99% no processo de desoxidificação, e para o trabalho na fotocélula chega a 99,999999% ou “nove noves”). A figura 15 mostra um módulo fotovoltaico de silício monocristalino.

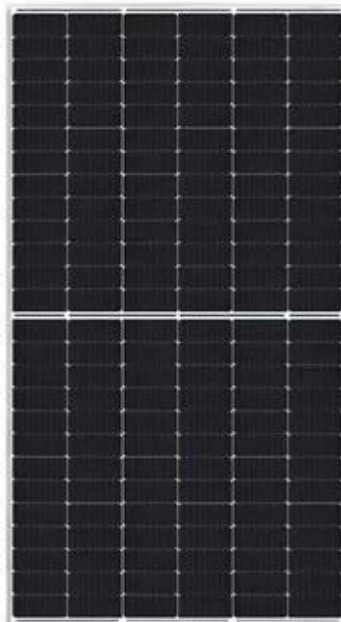


Figura 15 – Módulo de silício monocristalino
Fonte: Minha Casa Solar

O silício monocristalino gera o módulo de melhor eficiência dentre os painéis de silício, mas também é o painel com o maior valor agregado. Sua eficiência está entre os 16 e 21%.

2.7.2 Silício Policristalino

Trata-se de um painel solar fabricado através de uma técnica menos refinada. Assim, o silício policristalino é produzido através do corte da barra após o processo de desoxidificação. Logo após, o silício pode ter dois destinos: ser embalado num filme com substrato, podendo ser imerso neste substrato ou com a infusão do vapor. Deste processo resultam cristais únicos com tamanhos, apresentando diferentes características, níveis de pureza e estruturas. Sua eficiência, nas placas comerciais gira em torno dos 15%. Um módulo de silício policristalino é mostrado na figura 16.



Figura 16 – Painel de silício policristalino
Fonte: Minha Casa Solar

2.7.3 Silício Amorfo

Apresentando custo de produção ainda menor, o silício em estado amorfo, caracteriza-se pela particularidade estrutural de cada átomo dentro do módulo. O método de produção é consideravelmente barato e simples. O silício pode ser produzido através da infusão de diversos resíduos. Trabalhando também na faixa da luz visível o painel é ideal para sistemas de baixo custo (CHAGAS, 2014). Como postes de iluminação remota.

Suas desvantagens estão na menor eficiência em comparação com os outros módulos e um relatado desgaste prematuro das células, o que compromete ainda mais a eficiência do módulo no decorrer do tempo. Características compensadas pelo baixo custo e energia da produção e a capacidade de confecção de módulos maiores a um preço mais atrativo de acordo com (CHAGAS, 2014). Um Painel fotovoltaico de silício amorfo Mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Painel fotovoltaico de silício amorfo
Fonte: Archi Expo

2.8 Os sistemas fotovoltaicos

Tradicionalmente o paradigma da produção e do consumo de energia elétrica sempre se deu de forma concentrada numa usina geradora. Este método de produção e consumo sempre foi entreposto pela distribuição da energia produzida por longas redes distribuidoras, o que acarreta perdas elétricas por efeito Joule, danos ao meio ambiente, investimento com o custo dos equipamentos de distribuição e manutenção, além de onerar o consumidor final.

Hoje em dia, ao se pensar em geração fotovoltaica, pensa-se em produção e uso local da energia, com capacidade de armazenamento para usufruto próprio ou troca de créditos de energia elétrica com a empresa distribuidora concessionada.

É interessante notar que, a concepção da geração centralizada, primordialmente, também influenciava o pensamento da geração fotovoltaica. Uma vez que a energia fotovoltaica também fora concebida apenas como uma nova fonte de energia capaz de suprir as demandas por fontes alternativas, mas não a necessidade de encurtar o caminho da geração e do consumo. A evolução das tecnologias permitiu a concepção de sistemas cada vez menores e descentralizados até atingir a produção doméstica. Tal cenário, representa atualmente mais da metade da energia produzida quando falamos de energia solar.

A produção de energia elétrica fotovoltaica é dividida, atualmente em ON-GRID ou GRID TIE e OFF GRID. O Sistema GRID-TIE possui um inversor de frequência integrado a rede, responsável pela conversão da energia de corrente contínua produzida pelos módulos, em corrente alternada, atuando assim em sincronia com a frequência da central elétrica concessionada para o consumidor final. No inversor a corrente contínua é oscilada em 60Hz e a tensão de saída é limitada para a mesma tensão da rede disponível.

Este sistema funciona através de um relógio bidirecional que alimenta a rede quando a energia gerada pelos módulos é maior que a energia consumida pela residência, ao passo que quando o consumo é maior do que a geração a concessionária vai suprir a demanda do consumidor em horários sem produção, como à noite, num funcionamento análogo ao banco de baterias. O consumidor final usualmente paga uma taxa de disposição de energia elétrica e só pagará a mais caso consuma mais energia do que é capaz de gerar. Em períodos de alta produção, seu excedente gerado é convertido em créditos com a concessionária, que podem ser

usados no período de até três anos, ou transferidos para outras residências consumidoras, contanto que o usuário final seja o responsável pelo contrato social daquele imóvel. A ANEEL regula os créditos de acordo com a resolução 482/2012.

Este sistema é vantajoso, pois dispensa os custos com o armazenamento próprio da energia gerada. No entanto, apresenta a desvantagem de estar intrinsecamente ligado ao sistema integrado de energia, ou seja, uma vez sob qualquer queda no fornecimento de energia pela central, o consumidor da energia solar também será afetado.

De acordo com Bortoloto et al. (2006), o sistema GRID-TIE ainda pode ser dividido em dois subgrupos: um de forma centralizada, com as grandes centrais fotovoltaicas (minigeração), e de forma individual, de menor porte e próximo ao usuário (geração própria/microgeração). A figura 18 mostra uma instalação GRID-TIE.

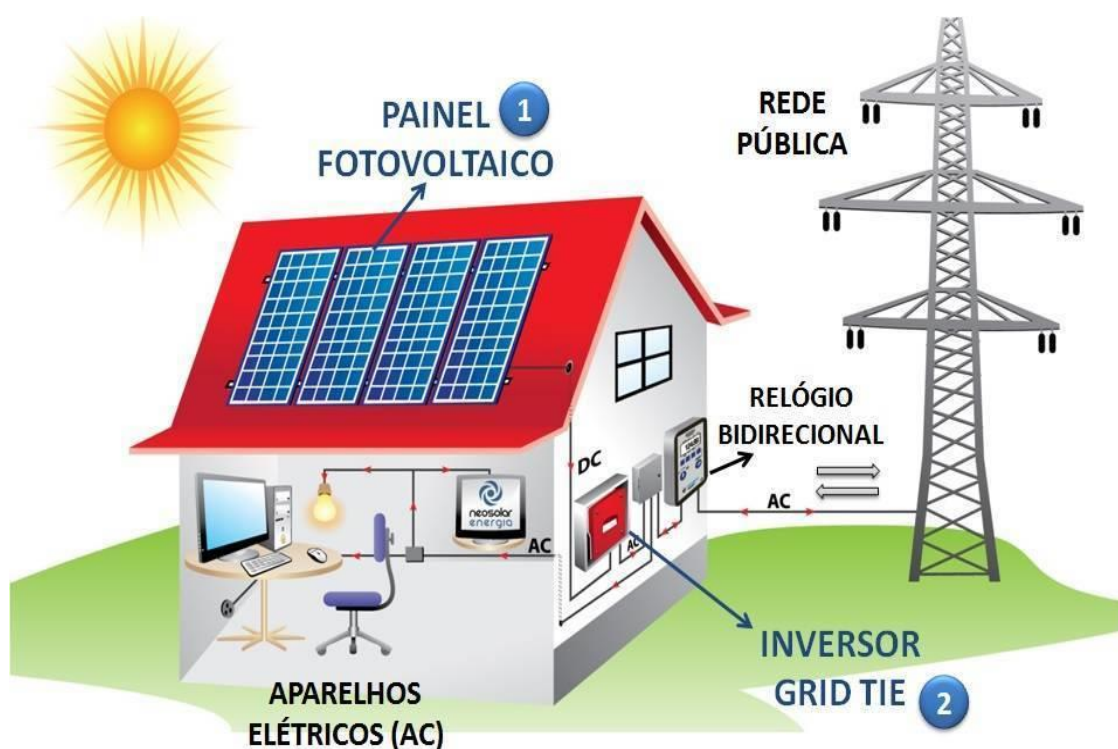


Figura 18 – O Sistema GRID-TIE
Fonte: Neo Solar

Já os Sistemas OFF-GRID se caracterizam por possuírem bancos de baterias com a função de armazenar toda a energia produzida pelos módulos. Sendo necessário o investimento de controladores de carga e inversores CC/CA para sua utilização em maior escala.

Como o próprio nome diz, o sistema é remoto e não depende da concessionária de energia para funcionar, ou seja, a energia gerada pelos módulos alimenta todas as cargas conectadas ao sistema, por isso, sua aplicação é mais específica. É típico em áreas remotas onde os custos para se levar a distribuição centralizada é inviável, como em regiões rurais, fazendas, florestas, plataformas e áreas pobres. Para Bertoloto et al. (2006), este tipo de aplicação ganha utilização em áreas urbanas a partir do momento em que condomínios empregam o sistema para usos específicos, como bombeamento de água, eletrificação de cercas, postes, etc.

O sistema OFF-GRID tem a vantagem de ser independente de uma central distribuidora, ou seja, seu fornecimento é contínuo e independente, dado que o armazenamento seja bem dimensionado e capaz de suprir a demanda local. Pode ser levado a qualquer lugar, virtualmente e não incidirão quaisquer custos com distribuição ou disponibilidade energética da central. Porém, como desvantagens estão o alto custo da implementação de bancos de baterias, agravados pela vida útil menor dos bancos, quando comparados à vida útil dos módulos solares e dos inversores. A figura 19 mostra o esquema do sistema OFF-GRID.

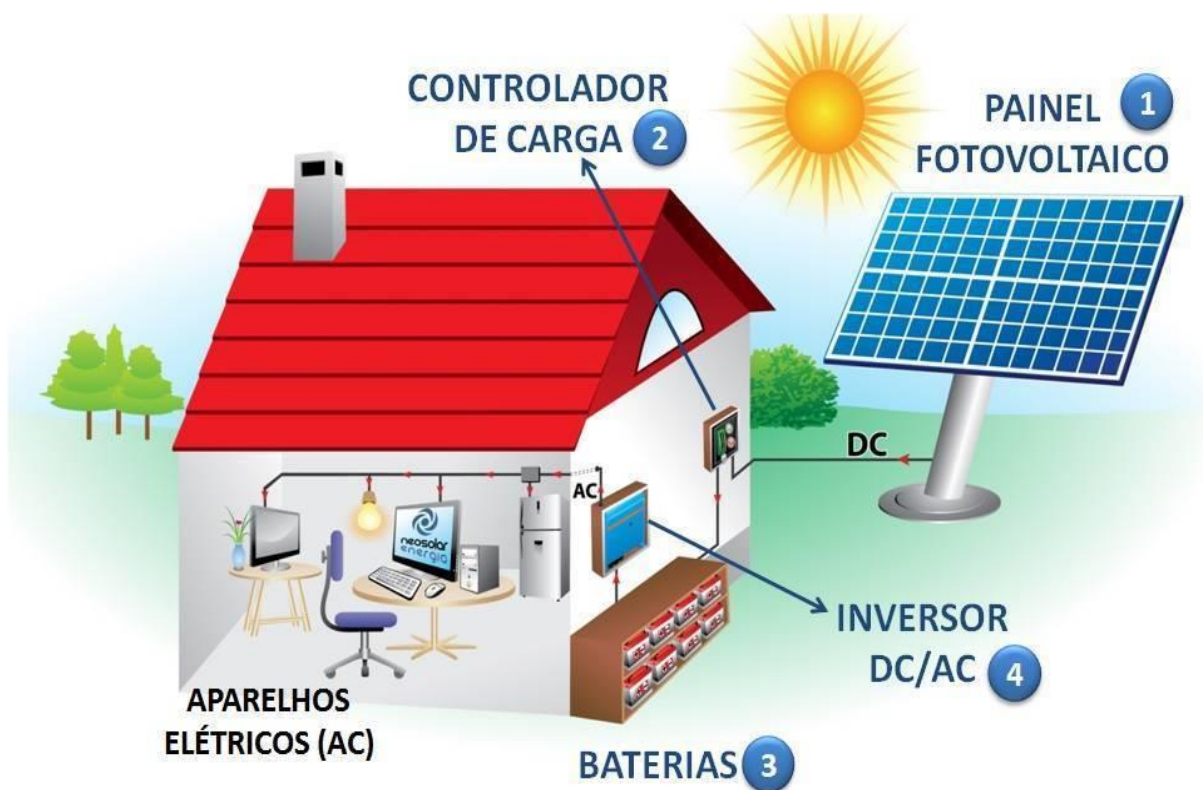


Figura 19 – O sistema OFF-GRID
Fonte: Neo Solar

2.9 Associações de módulos

Análogo às baterias e fontes elétricas é possível a associação de módulos fotovoltaicos em série ou em paralelo de modo a se alimentar o inversor com tensão e corrente desejados. É importante que, os módulos sejam iguais em potência e modelo para evitar superaquecimento do módulo menos potente. Logo, sob a mesma irradiância, o resultado é a soma das tensões em série geradas por cada módulo. As correntes que giram em cada módulo permanecem as mesmas.

$$V_n = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_x \quad (6)$$

$$I_n = I_1 = I_2 = I_3 = I_x \quad (7)$$

A figura 20 ilustra a associação em série de módulos, e um gráfico que demonstra o resultado do ganho de tensão gerado por essa associação.

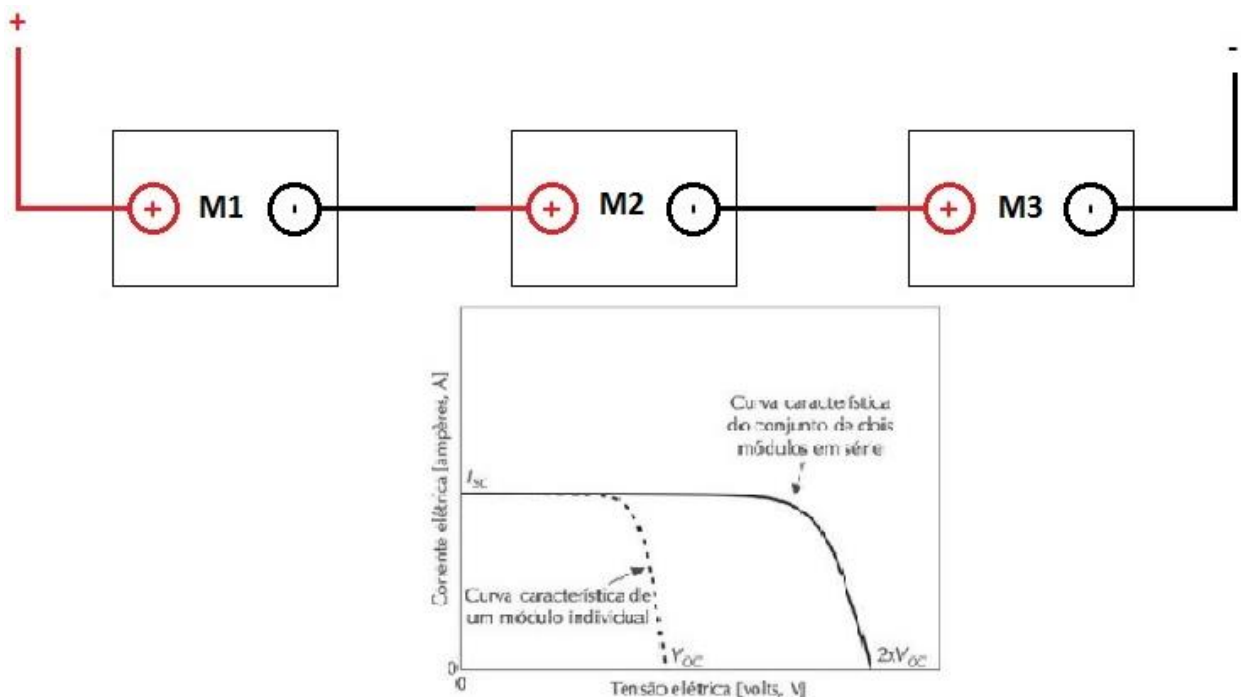


Figura 20 – Associação de módulos em série e curva característica
Fonte: O Autor

Note que, para dispositivos diferentes, a corrente do menor módulo limita a fluência de corrente pelo sistema. Observando a curva característica dessa associação, percebe-se a soma das tensões, enquanto as tensões nos terminais dos módulos permanecem as mesmas. Como mostrado nas equações 7 e 8, e na figura

21.

$$V_n = V_1 = V_2 = V_3 = V_x \quad (7)$$

$$I_n = I_1 + I_2 + I_3 + \dots I_x \quad (8)$$

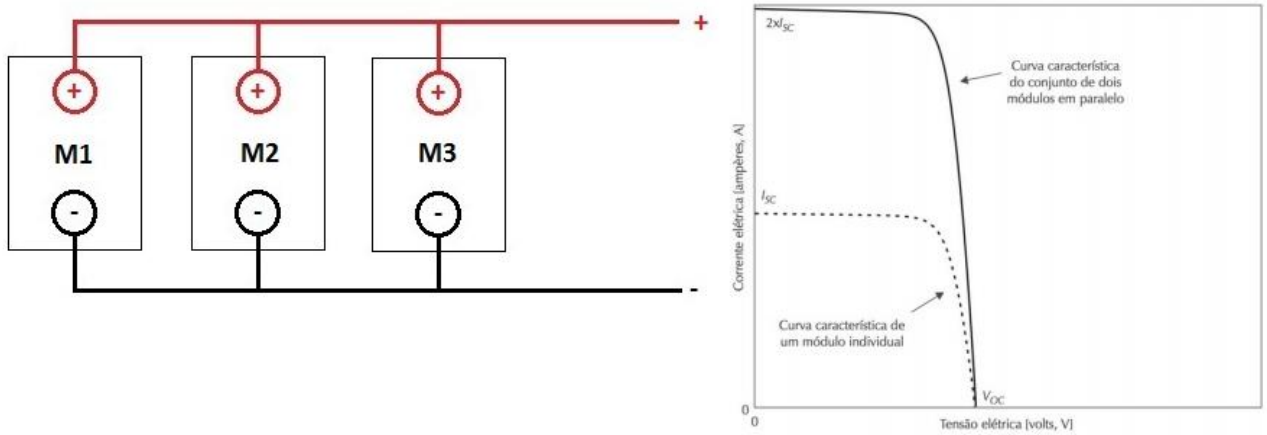


Figura 21 – Associação de módulos em paralelo e curva característica
Fonte: O Autor

Ainda é possível associar, paralelamente módulos que estejam conectados em série e paralelo, permitindo um ganho tanto de tensão quanto de corrente no sistema. Com isso, o ponto máximo de potência é afetado bruscamente, como mostrado na figura 22.

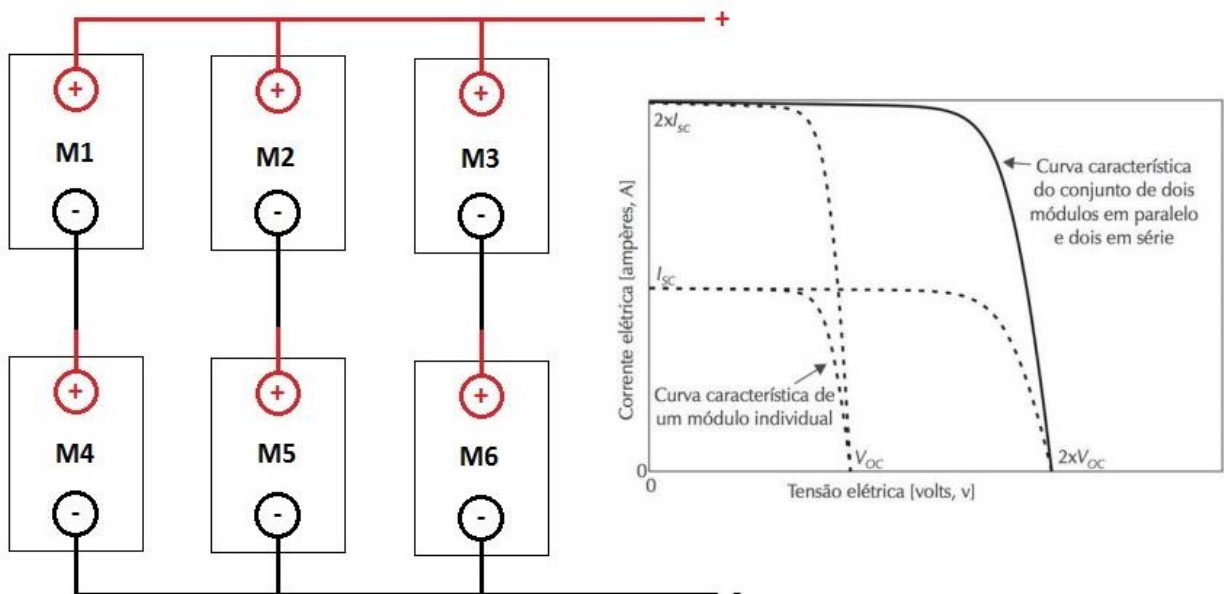


Figura 22 – Associação de módulos em série e paralelo com curva característica
Fonte: O Autor

2.10 Inversor de frequência

A corrente gerada pelos módulos fotovoltaicos é contínua. No entanto, na atualidade a grande maioria dos dispositivos domésticos e motores elétricos funcionam por corrente alternada para serem conectados à rede elétrica concessionada. A função do inversor de frequência é a transformação da energia captada pelos painéis (CC) em energia alternada (CA).

A modulação da largura de pulso chaveia a corrente contínua gerada pelos módulos em uma onda similar a onda senoidal da rede, uma vez que os inversores se autorregulam pelos padrões da concessionária no qual estão conectados. O inversor também pode transformar a corrente provinda dos bancos de bateria - nos casos da geração OFF-GRID - para a utilização domiciliar, ou realizar a entrega da energia gerada para a rede elétrica, como é o caso dos geradores GRID-TIE. Respeitando os limites de tensão e frequência da rede local.

2.10.1 Eficiência do inversor

Com isso, a potência de saída dos inversores respeita um modelo elaborado por Jantsch e Schmid, cuja eficiência de conversão é correlacionada com o autoconsumo e o carregamento. Podendo estar sujeita à quantidade de energia produzida no instante, com a tensão enviada pelos módulos e a temperatura do ambiente em que se encontra o inversor. Respeitando a equação 9 a seguir:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (9)$$

Onde:

η – Eficiência;

$P_{saída}$ – Potência de saída(W);

$P_{entrada}$ – Potência de entrada(W);

Portanto, os fatores que influenciam nas perdas de potência de saída estão relacionados ao autoconsumo do inversor, aos diodos e dispositivos de chaveamento e perdas das resistências.

2.11 Eficiência da instalação

Ao se dimensionar um sistema fotovoltaico é importante estar atento ao fator de eficiência da instalação, pois esta considera fatores importantes ao longo da vida útil do Sistema. Para esta análise são considerados os fatores:

- a) eficiência do inversor
- b) coeficiente de temperatura do módulo
- c) perdas nos cabos
- d) degradação nos módulos
- e) limpeza dos módulos

Desta maneira, utilizam-se valores entre 65% e 95% para os cálculos. No estudo de caso consideraremos o valor de 85%, (FRUGIS, 2019).

3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

A microgeração fotovoltaica tem como pilares para seu dimensionamento os critérios de irradiância solar local, a temperatura do ambiente e a potência que deve atender ao sistema - conforme mostrado no levantamento bibliográfico. Logo, o dimensionamento dos módulos fotovoltaicos e do inversor deve atender às demandas de forma satisfatória segundo os padrões da ABNT, ao passo que satisfaz e compensa peculiaridades geográficas e de potência.

3.1 Localização

A situação do imóvel em questão é um comércio de pequeno porte, situado na Rua Prefeito Iago José de Castro Valério, 1188, em Barra do Piraí, Região Sul-Fluminense do Estado do Rio de Janeiro. Cujas coordenadas são aproximadamente -22,477° e - 43,834°. A figura 23 mostra uma imagem em satélite do local, digitalizada pelo Google Earth.



Figura 23 – Visão registrada por satélite e coordenadas
Fonte: Google Earth

O prédio é localizado numa área de vale, na qual há morros. No entanto, não há interferência com nenhum sombreamento na área sobre a construção durante a maior parte do dia. A figura 24 mostra uma visão panorâmica do edifício e seu telhado.



Figura 24 – Vista panorâmica do telhado do edifício
Fonte: O Autor

A figura 25 mostra, através do aplicativo Sun Surveyor, a trajetória do sol sobre o telhado de interesse durante os solstícios e equinócios do ano. As fotos foram tiradas no dia 03/05/21, e pode-se observar um sombreamento parcial do telhado durante o entardecer do verão (21/12) e no entardecer do outono-inverno, devendo ser consideradas perdas na produção durante esse período no projeto.

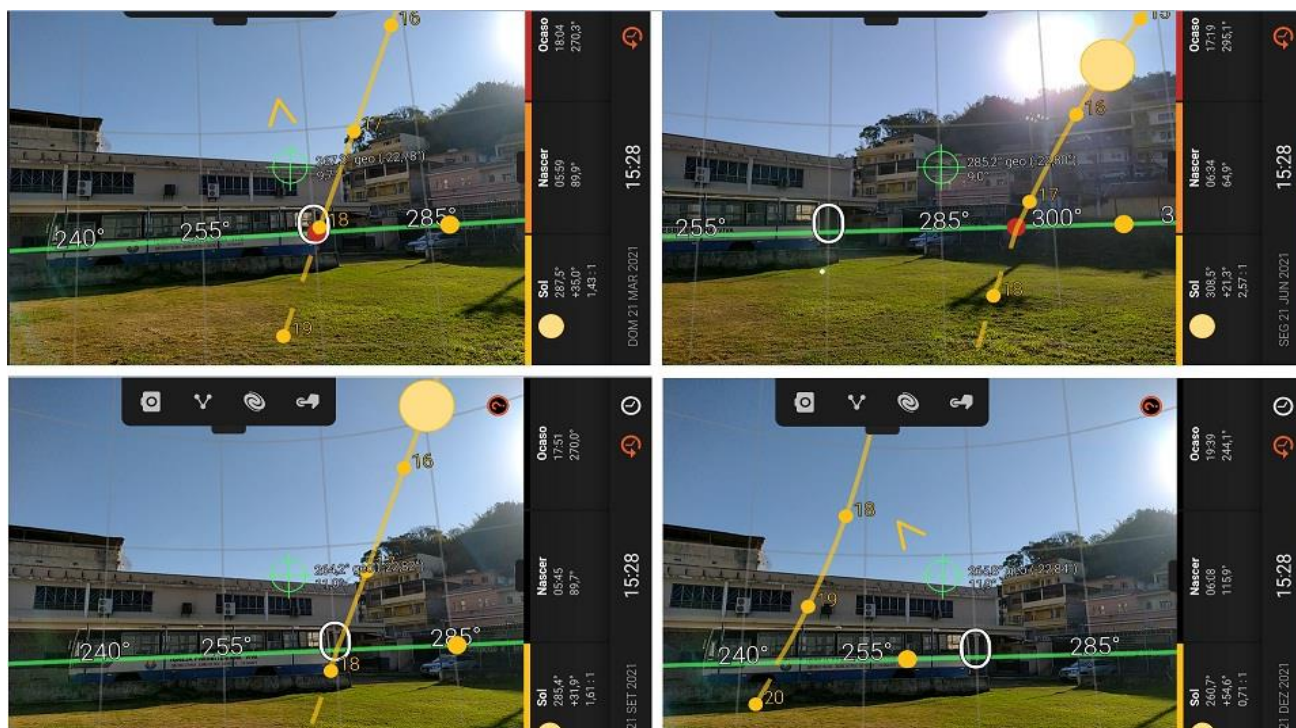


Figura 25 – Trajetória solar no entardecer durante as estações do ano
Fonte: O Autor (através do app Sun Surveyor)

A edificação localizada a oeste do estabelecimento provém sombreamento parcial do telhado, que deve ser contornado pela instalação dos módulos mais ao norte, para que o sombreamento seja anulado e haja maior aproveitamento da radiação solar.

3.2 Levantamento estimado das cargas do estabelecimento

Para análise do melhor sistema a ser empreendido pelo proprietário é interessante executar um levantamento das cargas do estabelecimento, a fim de concluir a viabilidade da autossuficiência total do Sistema em relação à rede de distribuição centralizada, sendo vigente no Sul Fluminense a Light/SA.

Trata-se de um supermercado local onde as cargas utilizadas são basicamente

de iluminação, computadores, refrigeradores (geladeiras) e maquinário especializado. A lista a seguir na tabela 1 utiliza estes quatro critérios para enumerar as cargas:

Tipo de Carga	Potência média (Wh)	Quantidade	Total(Wh)
Lâmpada LED 60W	60	7	420
Lâmpada LED 9W	9	4	36
Lâmpada Fluorescente 150W	150	3	450
Refrigerador 1 porta	150	1	150
Freezers 2 portas 500l	230	4	920
Refrigerador 3 portas autosserviço	315	1	315
Freezer 6 portas 2000l	1200	1	1200
Expositor Ilha 3 portas autosserviço	800	1	800
Balcão Refrigerado 2 portas	280	1	280
Balcão Refrigerado 3 portas	400	1	400
Máquina de fatiar	520	1	520
Moedor de carne	1500	1	1500
Serra de Carnes	600	1	600
Computadores	300	3	900
Televisão	90	1	90
Sistema de Alarme	100	1	100
Total			8681

Tabela 1 – Cargas Levantadas
 Fonte: O Autor

Utilizando-se dos dados presentes na conta de energia atualizada do cliente proprietário para extrair informações para os cálculos, assim como mostra a figura 26.

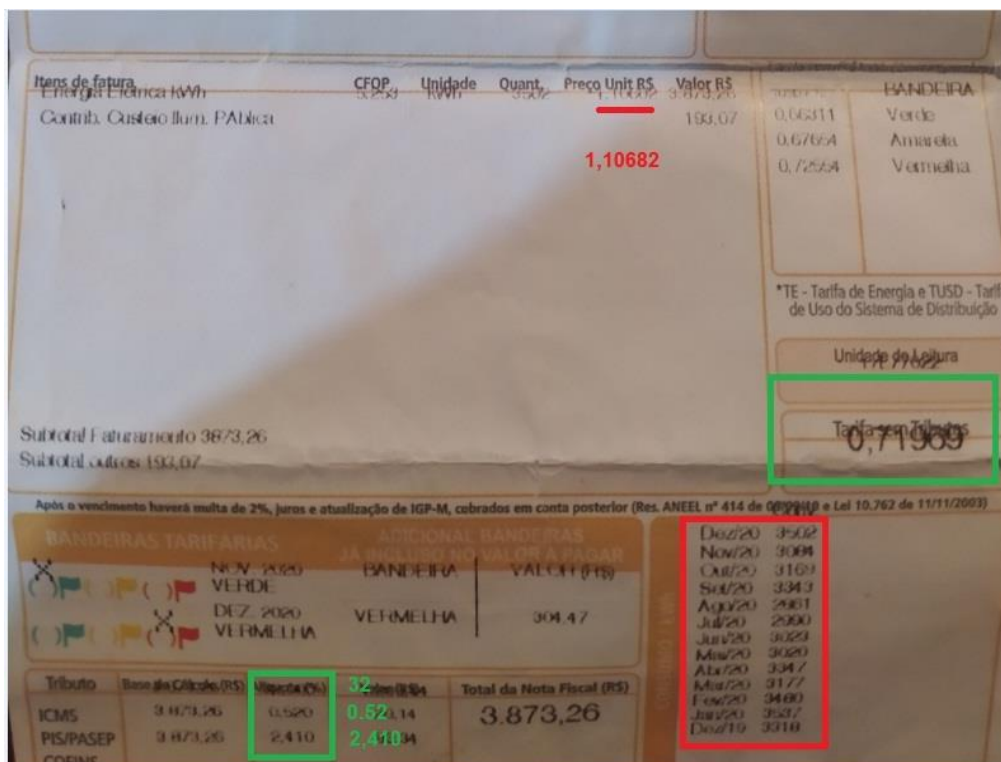


Figura 26 – Conta de energia do cliente
Fonte: O Autor

a) Consumo Médio: igual à média aritmética entre os consumos do ano vigente.

Mostrada na tabela 2:

Mês	Consumo (kWh)
Dez	3502
Nov	3084
Out	3169
Set	3343
Ago	2861
Jul	2990
Jun	3023
Mai	3020
Abr	3347
Mar	3177
Fev	3480
Jan	3537
Dez	3318
Média	3219,31

Tabela 2 – Média do consumo mensal detalhado
Fonte: O Autor

Logo, o Consumo Médio Mensal gira em torno de **3219,31kWh/mês**

b) Tipo de Ligação: **Trifásico**

c) Valor da Tarifa: para o cálculo do valor da tarifa final que o proprietário do estabelecimento deve pagar deve-se usar a seguinte fórmula, mostrada na equação 10:

$$Tarifa\ final = \frac{Tarifa \cdot 100}{100 - (ICMS + PIS + COFINS)} \quad (10)$$

Utilizando os valores em verde na figura 26 observa-se:

- Valor da tarifa sem impostos R\$ 0,71969

Encargos

- 32% ICMS
- 0,52% PIS/PASEP
- 2,41% de COFINS

Teremos na equação do cálculo da tarifa:

$$Tarifa\ final = \frac{Tarifa \cdot 100}{100 - (32 + 0,52 + 2,41)}$$

Resultando no valor de R\$1,1068 marcado em vermelho na figura 26.

3.3 Análise do Consumo de Energia Elétrica

A taxa referente à disponibilidade do serviço de disposição e fornecimento de energia elétrica, ou o Custo de Disponibilidade, é uma despesa obrigatória para imóvel ainda que este seja autossuficiente na geração de sua própria energia, estando este imóvel no Sistemas GRID-TIE. Assim como o Custo de Disponibilidade, a taxa de iluminação pública rateada, tem valores determinados pela ANEEL, que remetem aos gastos inerentes a transmissão de energia e manutenção da rede que chega ao logradouro. São cobrados de acordo com o Tipo de Ligação da Unidade Consumidora disposta na tabela 3:

Tipo de Conexão	Disponibilidade Mínima
Monofásica	30kWh/mês
Bifásica	50kWh/mês
Trifásica	100kWh/mês

Tabela 3 – Custo de Disponibilidade
Fonte: ANEEL

Objetiva-se, neste caso, que o Sistema Fotovoltaico deva produzir a potência média consumida em kW, excetuando o Custo de Disponibilidade, uma vez que o cliente é obrigado a pagar por este serviço com o valor mínimo. Dimensiona-se o Sistema utilizando os seguintes cálculos:

Com a Produção Otimizada na escala de 3219,31kWh, no final dos 30 dias de um mês médio, é recomendável que o sistema gere aproximadamente 3219,31kWh. Quando se trabalha com o dimensionamento, deve-se trabalhar com os valores diários de geração. A equação 11 que descreve a quantidade diária que deve ser gerada para a Produção Otimizada:

$$Pot = \frac{\text{Consumo médio}}{HSP \cdot \text{eficiência} \cdot 30 \text{ dias}} \quad (11)$$

Onde:

Pot – Potência a ser instalada;

HSP – Horas de Sol Pleno;

A eficiência da instalação é estimada em 85% e as Horas de Sol Pleno na cidade é de 5.2(pela análise da figura 22), logo:

$$Pot = \frac{3219,31}{5,2 \cdot 0,85 \cdot 30 \text{ dias}} = 24,28kW$$

Então, o sistema deve ser dimensionado para produzir uma faixa de 24.22kWh/dia para suprir a demanda desejada e considerando as perdas da carga. A equação 12 mostra a forma de cálculo do número de módulos:

$$N = \frac{Pot \cdot 1000}{P_{\text{módulo}}} \quad (12)$$

Onde:

N – Número de módulos;

$P_{\text{módulo}}$ – Potência gerada por cada módulo fotovoltaico.

Utilizando um painel modelo Leapton LP166M-72-MH de 450W, teremos então:

$$N = \frac{24,28 \cdot 1000}{450} = 53,96$$

Para suprir a demanda do cliente, precisa-se de, no mínimo 54 módulos. No entanto, neste projeto, utilizaremos 56 módulos, no intuito de suprir algumas perdas no inverno. Gerando 25200Wp no total.

3.4 Escolha dos módulos fotovoltaicos

Como critérios de escolha dos módulos fotovoltaicos foram considerados modelos atualizados, com circulação comercial no território nacional. Foram analisados tecnicamente pelos quesitos de valor, potência e eficiência para o estabelecimento do custo-benefício. Dentro destes padrões, o vencedor no quesito custo-benefício foi o modelo disponibilizado pela Leapton. Foram verificados certificados nacionais (selo INMETRO e PROCEL) para comercialização no território nacional, assim como o painel atende normas internacionais. O fabricante garante seu produto por 10 anos contra possíveis defeitos de fabricação, assim como também dá a garantia de 25 anos produzindo o mínimo estipulado em seus critérios de eficiência.

Apresenta-se, a seguir, a tabela 4 comparando os custos-benefícios de alguns fabricantes que possuem modelos circulantes no mercado nacional:

Fabricante	Modelo	Pot.(Wp)	Efic.(%)	Tecnologia	Preço (R\$)	RCB*
OSDA	ODA400-36M	400	20,16	Si-mono	839,00	2,098
Risen	RSM-156-6-445M	445	20,5	Si-mono	1.022,07	2,297
Canadian Solar	CS3W-450W	450	20,4	Si-mono	1.031,37	2,292
Canadian Solar	CS3Y-485W	485	20,6	Si-mono	1.115,07	2,299
Leapton	LP166M-72-MH	450	20,4	Si-mono	979,00	2,176
Risen	RSM150-8-500M	500	20,4	Si-mono	1.257,00	2,514

Tabela 4 – Modelos de módulos fotovoltaicos

Fonte: O Autor

*Para o cálculo da RCB (relação custo-benefício) é realizada a divisão entre o preço disponibilizado sobre a potência oferecida. Sendo assim, sua unidade é o R\$/Wp. Explícito na equação 13.

$$RCB = \frac{Preço}{Potência} \quad (13)$$

Pelos critérios adotados, o módulo escolhido foi o Leapton LP166M-72-MH (monocristalino). Este modelo atende às especificações qualificatórias, apresenta a segunda melhor relação custo-benefício, com o critério de desempate sendo a possibilidade de instalar 60 módulos ou menos sobre o telhado.

Segue a tabela 5, que analisa as características elétricas do módulo adquirido, seguindo os valores das condições padrões de teste (PTC).

Potência Máxima (P_{MP})	450W
Voltagem no Ponto Máximo de Potência (V_{MP})	41,40V
Corrente no Ponto Máximo de Potência (I_{MP})	10,88A
Voltagem de Circuito Aberto (V_{oc})	50,00V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	11,47A
Eficiência	20,40%

Tabela 5 – Condições padrão do módulo fotovoltaico

Fonte: O Autor

Deve-se, ainda, atentar-se às perdas de eficiência por influência da

temperatura conforme a figura 27.

Temperatura	γ_{pmt}	β_{voc}	α_{isc}
(-40 a 85°)	(-0,36%/°C)	(-0,28%/°C)	(0,05%/°C)

Figura 27 – Perdas térmicas do módulo fotovoltaico Leapton LP166M-72-MH

Fonte: O Autor

Os módulos têm uma garantia de eficiência mínima de 20,4% durante 25 anos e tende a apresentar perda de eficiência de forma linear, conforme mostra o dastasheet (ANEXO).

3.5 Escolha do inversor de frequência

Na análise e escolha do inversor a ser instalado, foram usados como critérios a potência nominal do inversor. É preciso ressaltar que por escolha do cliente, fora feito a escolha de somente um equipamento que pudesse suportar toda a potência produzida na intenção de economia de espaço. Os critérios adicionais foram preço, certificações para atuação no mercado nacional e internacional e proteções inerentes ao sistema instalado. Alguns modelos disponíveis encontram-se destacados abaixo na tabela 6:

Modelo	Pot. (kW)	Preço (R\$)	Proteção	Wifi
CSI-25KTL-GI-L	25	22.999,00	sim	sim
CSI-30KTL-GI-L	30	23.999,00	sim	sim
850P033200	33	26.418,91	sim	sim
SG-36-KTL-M	36	22.999,00	sim	sim
4210057040 Eco 27	27	23.970,00	sim	sim

Tabela 6 – Relação de módulos fotovoltaicos

Fonte: O Autor

Pelos critérios adotados, o modelo escolhido foi o Fronius 4210057040 Eco.27. Este modelo atende aos critérios do INMETRO e as normas Brasileiras ABNT NBR 16149, 16150 e ABNT NBR IEC 62116. Possui proteções adequadas, Wi-Fi interno, possui alta credibilidade no mercado brasileiro, oferece 27kWp na tensão trifásica adequada (220V) e a capacidade de sobre trabalho de 20%, possibilitando a ampliação do sistema para 32,4kWp e fornecer a string box montada para a instalação

sem custo adicional.

Seguem os parâmetros elétricos do inversor escolhido. Dispostos na tabela 7.

Potência Nominal	27000W
Tensão CC de partida	580V
Tensão CC máxima	1000V
Corrente CC máxima	71.6A
Faixa de Operação	580-850V
Potência Nominal CA	27000W
Tensão Nominal de Saída	220V
Corrente Nominal de Saída	39A
Eficiência	96,00%
Proteção Interna	Anti-ilhamento, Sobre/sub tensão, Sobre/subcorrente, Sobre/sub frequência, Proteção contra sobrecarga.
Grau de Proteção contra Resíduos e Água	IP66

Tabela 7 – Parâmetros elétricos do inversor escolhido

Fonte: O Autor

Através dos dados elétricos do inversor, deve-se então estabelecer o formato das strings associados para se atingir o mínimo de tensão e corrente para o funcionamento do inversor e o máximo de potência para a conservação da integridade do equipamento. A ligação de 4 strings com 14 módulos em série cada se mostrou adequada.

3.6 Cálculo das strings

Para o projeto, será realizado 4 strings, de 14 módulos, sendo assim, a voltagem de circuito gerada pelas strings, sabendo que de acordo com dados da tabela 4, de 50V, no circuito será, de acordo com a equação 14:

$$V_{oc} = 14 \cdot 50 = 700V \quad (14)$$

Valor que atende, sob condições ambiente, as tensões mínimas CC de operação do inversor escolhido.

O cálculo do fator de temperatura se faz necessário para compreender como o

equipamento visa funcionar durante um surto e/ou condições adversas. O aumento da temperatura é fator de grande influência sobre as características elétricas de qualquer equipamento. No intuito de verificar o comportamento elétrico do inversor na temperatura extrema de 70°C, sendo explicada como a temperatura ambiente (30°C) mais um calor extremo de 45°C, o comportamento será, de acordo com as especificações do fabricante, como mostrado na equação 15:

$$V_{ocst} = V_{oc} \cdot [1 + \beta_{voc} \cdot (T - 25)] \quad (15)$$

Onde:

V_{ocst} – Tensão de circuito aberto na string (V);

β_{voc} – Coeficiente térmico sobre a tensão (%/°C);

T – Temperatura (°C).

Utilizaremos a pior situação (V_{oc}), pois sabemos que tensão mínima da String maior tem de ser maior, de acordo com o princípio de associação de módulos. Numa temperatura de 70°C, então:

$$V_{ocst} = 700 \cdot [1 + (-0,0028) \cdot (70 - 25)] = 602V$$

Verificou-se que o inversor continua operante mesmo dentro das condições extremas de redução de tensão causadas pelas altas temperaturas, na faixa de tensão de 580-850V

Dado que o projeto foi estabelecido com 4 strings, teremos uma corrente de acordo com a equação 16:

$$I_{scst} = 4 \cdot 11,47 = 45,88A \quad (16)$$

Para a corrente máxima sob temperatura extrema, a equação será, de acordo com a equação 17:

$$I_{scmttp} = I_{scst} \cdot [1 + \alpha_{isc} \cdot (T + 25)] \quad (17)$$

Onde:

I_{scmttp} – Corrente da string (A)

α_{isc} – Coeficiente térmico sobre a corrente, de valor(%/°C);

T – Temperatura (°C)

Logo:

$$I_{scmtp} = I_{scst} \cdot [1 + 0,0005 \cdot (70 + 25)] = 46,912A$$

Valor muito confortável contra surto de corrente.

3.6 Esquema elétrico de proteções das string-boxes

Para o correto funcionamento do sistema, este deve estar protegido contra surtos de tensão e corrente contra descargas involuntárias vindas de ambos os lados do sistema. Como por exemplo um curto-circuito provindo do estabelecimento/distribuidora, ou contra o curto-circuito nos arranjos. Todas as strings visam a proteção de cada ponto da instalação, desde os módulos até o inversor. A figura 28, mostra o esquema elétrico de proteções do sistema que se considera instalar.

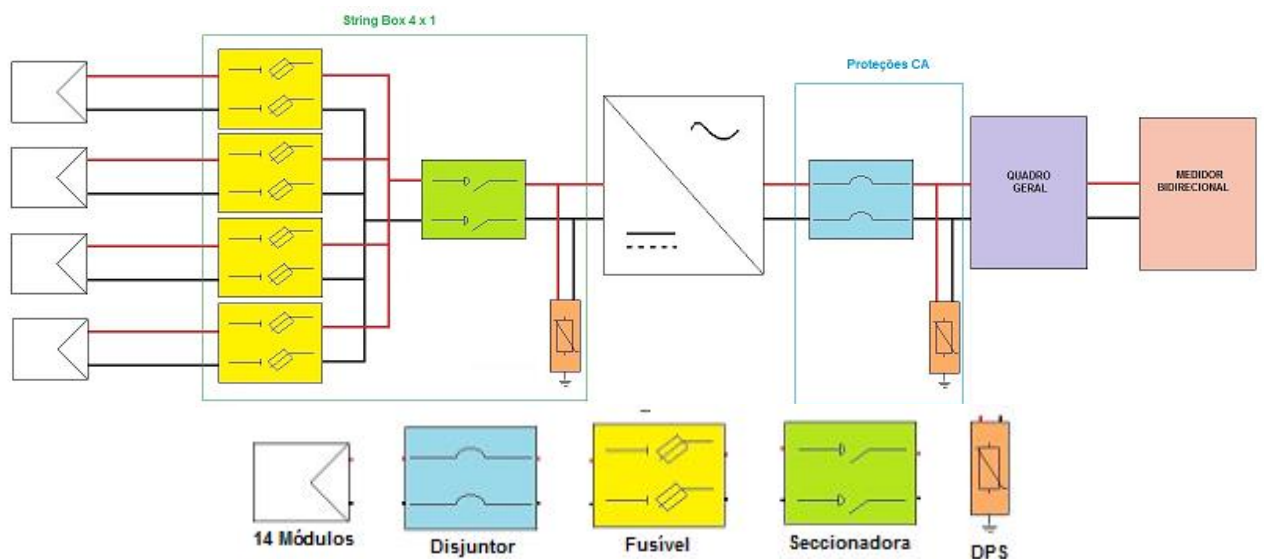


Figura 28 – Proteções e conexões do sistema

Fonte: O Autor

3.8 Dimensionamento dos condutores para as strings boxes

A bitola dos condutores para corrente contínua deve estar de acordo com o dimensionamento do sistema, com tensão e corrente apropriados. Portanto seguindo a fórmula na equação 18:

$$S = \frac{2 \cdot I \cdot l}{56 \cdot P_{emáx} \cdot V} \quad (18)$$

Sendo:

l – Largura do condutor dos módulos até a string box (m);

i - Corrente contínua (A);

$P_{em\acute{a}x}$ - Perda máxima do sistema;

Admitindo 1% de perdas.

Portanto:

$$S = \frac{2 \cdot 25 \cdot 45,88}{56 \cdot 0,01 \cdot 700} = 5,85mm^2$$

Utilizaremos então fios com a bitola de $6mm^2$

3.9 Orçamento e detalhamento para o microgerador solar

O telhado sobre a edificação é um ponto determinante dentre os detalhes a serem observados antecipadamente ao processo de instalação do sistema. Pois este determina o modo como os módulos serão fixados, assim como o valor para o serviço. Como observado através da Figura 24, a situação são telhas galvanizadas. A tabela 8 relaciona a lista de materiais utilizados.


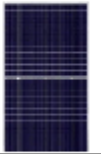





Descrição	Quantidade	Preço	Total	Imagem
Inversor Fronius 4210057040 Eco.27	1	R\$ 23.970,00	R\$ 23.970,00	
Módulo Leapton LP166M-72-MH	56	R\$ 979,00	R\$ 54.824,00	
Estr. de Fixação Telha Galvanizada 4 módulos	14	R\$ 350,00	R\$ 4.900,00	
Cabo Preto Solar 6mm ² (25m)	1	R\$ 312,50	R\$ 312,50	
Cabo Vermelho 6mm ² (25m)	1	R\$ 312,50	R\$ 312,50	
Terminal MC4 macho	6	R\$ 6,00	R\$ 36,00	
Terminal MC4 fêmea	6	R\$ 6,00	R\$ 36,00	
Projeto e Instalação(18%)			R\$ 15.190,38	
Total do Empreendimento			R\$ 99.581,38	

Tabela 8 – Lista de materiais utilizados
Fonte: O Autor

3.10 Área e peso sobre a estrutura do telhado

É importante a realização do cálculo estrutural do peso e da área ocupada pelos módulos sobre o telhado. Estes devem ser evidenciados pela multiplicação simples da área de cada módulo e seus pesos, somados ao peso das estruturas de suporte para os módulos. As informações de área e peso dos módulos foram informadas pelo datasheet do produto que contém as dimensões do módulo escolhido. Os pesos das estruturas foram estimados em 6kgs cada.

Área: $S = (2,108 \cdot 1,048) \cdot 56 = 123,72\text{m}^2$

Peso dos módulos: $P_{\text{Módulos}} = 24 \cdot 56 = 1344\text{kg}$

Peso das estruturas: $P_{\text{Estruturas}} = 6 \cdot 14 = 84\text{kg}$
Peso total: $P_{\text{total}} = 1428\text{kg}$

3.11 Simulação de Produtividade do Sistema

A figura pode conceber uma ideia de como será a produtividade durante o ano. Considerando uma simulação da produtividade do sistema é possível através da extrapolação. Como considerado anteriormente as Horas de Sol Plenas (HSP) no município foram estipuladas em 5.2, porém podemos utilizar como base para entender períodos de menor e maior produção. Tem se assim, ao observar o projeto estipulado, com base na figura 29.

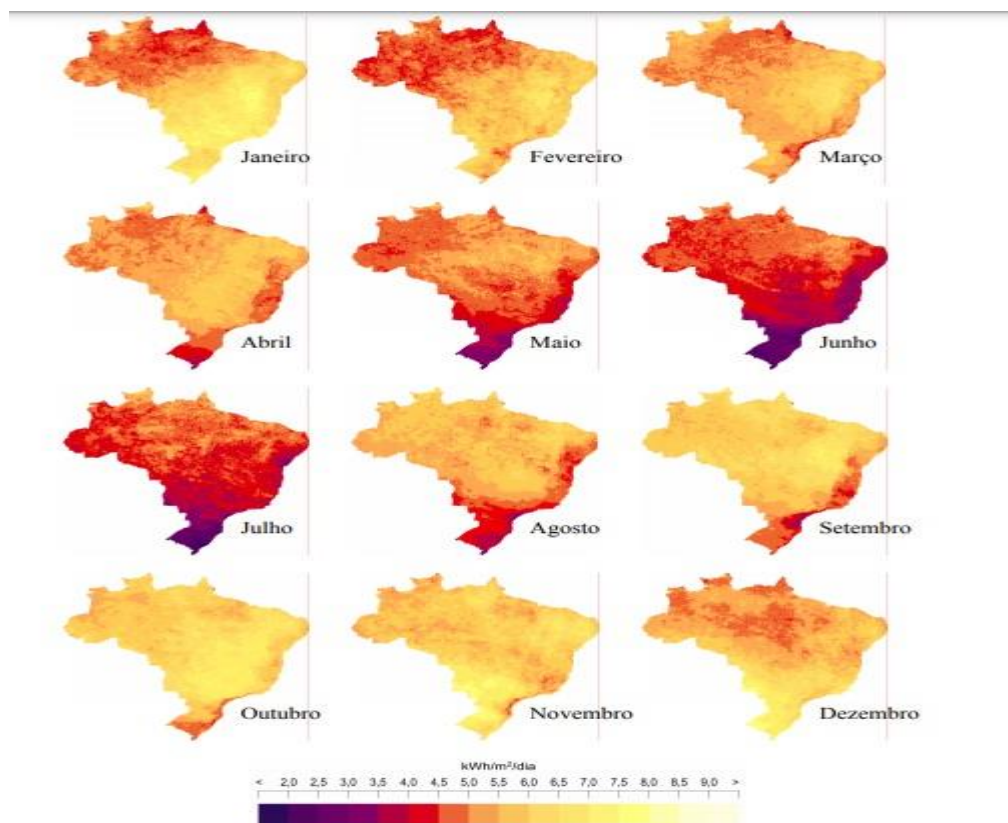


Figura 29 – Índice solarimétrico durante os meses do ano
Fonte: INPE

O payback é estipulado levando em conta a tarifa elétrica em vigor, cotada através da figura X em R\$ 1,1068. Os custos totais para a instalação do sistema são de R\$ 99.581,38, também estudado anteriormente. A economia mensal foi estipulada

determinando o novo custo da conta de energia quando comparado com a média das contas anteriores. Logo:

- Para as contas antigas com uma média de consumo de 3219,31kWh/mês

$$PM_{\text{méd}} = 3219,31 \times 1,1068 = R\$ 3.563,13$$

- Para as novas contas pagando somente a Custo de Disponibilidade da rede trifásica:

$$PM_{\text{méd}} = 100 \times 1,1068 = R\$ 110,68$$

A economia mensal estimada, então, é de:

$$3.563,13 - 110,68 = R\$ 3.452,45$$

Com a economia mensal estimada, torna-se possível o cálculo do payback. Na situação estudada, com a economia estipulada em 3443,37 ao mês, utilizamos o método do payback descontado, com fluxo de caixa exposto para demonstrar mensalmente a economia.

Foi simulado um investimento inicial do pagamento de 20% à vista do sistema.
 $99.581,38 - 20\% = 79.665,10$

O proprietário do comércio, consegue então um financiamento com 20% do valor em 36 taxas mensais iguais com juros de 7,16%a.a. (Média de juros para financiamento de imóveis). Onde as parcelas são calculadas da seguinte maneira:

$$PMT = VP \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (19)$$

Onde:

VP – Valor Presente (R\$);

i – Taxa de juros (%);

n = Período (meses);

Logo:

$$PMT = 79665,10 \cdot \frac{(1 + 0,00578)^{36} \cdot 0,00578}{(1 + 0,00578)^{36} - 1} = R\$ 2457,19 \text{ por mês}$$

Como o total de parcelas é 36 multiplica-se pelo valor mensal
 $36 \cdot 2457,49 = \text{R\$ } 88.469,64$

Somados, o valor total do investimento com as condições solicitadas chega a
 $\text{R\$ } 108.385,92$.

Fora utilizado para o caso do payback descontado de 4,52%, referentes a taxa de inflação do ano de 2020 segundo a revista.

Teremos então a tabela 9 a seguir:

Período	Entrada (R\$)	Retorno(R\$)
0	-108385,92	
1	3452,45	-104933,47
2	3439,71	-101493,76
3	3427,02	-98066,74
4	3414,37	-94652,37
5	3401,77	-91250,60
6	3389,22	-87861,38
7	3376,71	-84484,66
8	3364,25	-81120,41
9	3351,84	-77768,57
10	3339,47	-74429,09
11	3327,15	-71101,95
12	3314,87	-67787,07
13	3302,64	-64484,43
14	3290,45	-61193,98
15	3278,31	-57915,67
16	3266,21	-54649,45
17	3254,16	-51395,29
18	3242,15	-48153,14
19	3230,19	-44922,94
20	3218,27	-41704,67
21	3206,40	-38498,28
22	3194,56	-35303,71
23	3182,78	-32120,94
24	3171,03	-28949,90
25	3159,33	-25790,57
26	3147,67	-22642,90
27	3136,06	-19506,84
28	3124,49	-16382,35
29	3112,96	-13269,40
30	3101,47	-10167,93
31	3090,03	-7077,90
32	3078,62	-3999,28
33	3067,26	-932,02
34	3055,95	2123,93

Tabela 9- Cálculo do payback do sistema
Fonte: O Autor

Para o cálculo do payback do investimento inicial de R\$19.916,28, teremos a TMA de acordo com a tabela 10 abaixo:

Período	Entrada (R\$)	Saída (R\$)	Retorno (R\$)	Valor Presente (R\$)	Payback Descontado (R\$)
0	19916,28	R\$ 2.457,49			
1	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 991,29	R\$ 18.924,99
2	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 987,63	R\$ 17.937,36
3	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 983,99	R\$ 16.953,37
4	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 980,36	R\$ 15.973,02
5	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 976,74	R\$ 14.996,28
6	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 973,13	R\$ 14.023,15
7	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 969,54	R\$ 13.053,60
8	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 965,97	R\$ 12.087,64
9	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 962,40	R\$ 11.125,24
10	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 958,85	R\$ 10.166,39
11	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 955,31	R\$ 9.211,08
12	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 951,79	R\$ 8.259,29
13	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 948,27	R\$ 7.311,02
14	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 944,78	R\$ 6.366,24
15	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 941,29	R\$ 5.424,95
16	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 937,82	R\$ 4.487,14
17	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 934,36	R\$ 3.552,78
18	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 930,91	R\$ 2.621,87
19	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 927,47	R\$ 1.694,40
20	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 924,05	R\$ 770,35
21	3452,45	R\$ 2.457,49	R\$ 994,96	R\$ 920,64	-R\$ 150,29

Tabela 10 – Cálculo do payback do investimento inicial

Fonte: O Autor

Sendo possível vislumbrar o retorno próximo ao término de dois anos.

4 DELIMITAÇÕES DE PROJETO SEGUNDO NOVAS TECNOLOGIAS

Com o mercado fotovoltaico crescente, é interessante notar que periodicamente se publicam estudos de novas tecnologias principalmente no que se refere aos módulos fotovoltaicos, para que estes tenham melhoria no desempenho. Convertendo cada vez mais luz em energia elétrica. Como já estudado, a eficiência média dos módulos comercializados é de aproximadamente 18 a 20%.

É conhecido que módulos fotovoltaicos experimentais têm sido projetados para ter eficiência aprimorada em relação aos módulos comerciais. Os próximos parágrafos exploram alguns artigos e matérias de portais especializados a fim de estipular ganhos em números de módulos, área e peso de acordo com as eficiências de conversão de cada tecnologia de módulos.

4.1 Fotoluminescência termicamente melhorada

Segundo Ciclo Vivo (2016), apoiado artigo publicado pela revista Nature com os autores Manor et al (2016), o processo de melhora térmica da fotoluminescência consiste em utilizar um material que realiza a absorção da radiação solar, fazendo a conversão do calor e da luz em uma radiação ideal, que ao iluminar a célula, aumenta a eficiência da conversão. Os valores de eficiência de conversão, nas células multijunção estão aproximadamente em 46% de conversão. Sendo assim:

Assumindo que os módulos mantivessem a área do módulo escolhido, o novo módulo produziria aritmeticamente manipulando a equação 5, para potência:

$$P = \frac{\eta_{\text{módulo}} \cdot S}{0,1}$$

De forma análoga faremos manipulação da fórmula 5 para assumir a área do novo módulo, caso fosse mantida a potência gerada em 450W.

Os valores de número de módulos e área total das tabelas a seguir consideram as instalações projetadas no tópico 5.3 do projeto, utilizando a instalação de 25200kWp como referência para a mensuração dos valores obtidos.

A tabela 11 mostra então a nova área ocupada no telhado ou a nova quantidade

de módulos para instalação.

Potência (kW)	Área/módulo (m ²)	Nº de módulos	Área Total (m ²)
450,00	0,98	56	54,78
1016,23	2,21	25	54,78

Tabela 11 - Valores de potência e área ocupada por módulos com fotoluminescência termicamente melhorada

Fonte: O Autor

4.2 Célula solar de seis junções

De acordo com Reis (2020) citando a NREL (Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos) como a criadora de uma célula solar de seis junções. Resultado da utilização de 140 camadas de semicondutores que possuem a eficiência na conversão de radiação solar na taxa de 39,2% par a luz solar.

Portanto, com a eficiência dos módulos da NREL teremos os resultados na tabela 12:

Potência (kW)	Área/módulo (m ²)	Nº de módulos	Área Total (m ²)
450	1,148	56	64,29
866,01	2,2092	30	66,28

Tabela 12 – Os resultados dos módulos de seis junções

Fonte: O Autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tarefa se propôs a desenvolver um projeto detalhado de um sistema fotovoltaico atendendo a um comércio na cidade de Barra do Piraí. Apoiada sobre uma revisão teórica que sobre o processo fotovoltaico e os equipamentos utilizados durante a geração por energia solar. Fez-se também importante revisar a legislação e as normas para atender os requisitos da rede para a instalação.

O estudo da viabilidade orçou um projeto de alto valor inicial de aproximadamente R\$ 108.000,00, porém com um retorno atraente por volta de 3 anos. Com isso, comprova-se a teoria de que a área dos setores comerciais destaca-se como uma que mais tende a lucrar com a implantação do sistema fotovoltaico. Isto se dá devido as altas tarifas praticadas no estado e um bom índice de incidência solar média na região. Sendo ela, associada ainda a uma carga tributária desonerada pela microgeração distribuída.

Através do estudo pode-se também observar que, a melhoria da eficiência dos módulos solares pode ter um impacto direto sobre o peso da estrutura e área consumida sobre o telhado. Com o passar dos anos, a pesquisa e desenvolvimento tendem a possibilitar a comercialização de painéis mais eficientes a preços mais competitivos, o que tende a diminuir o custo por kWh produzido.

Como atrativo para o sistema fotovoltaico também há de se observar a tributação sobre os equipamentos e possíveis encargos sobre a energia produzida ou sobre os créditos gerados pelo proprietário do sistema. Políticas fiscais mais brandas e de incentivo teriam um balanço positivo para o sistema sustentável e de longo prazo.

Fica como sugestão para futuros trabalhos a pesquisa sobre o funcionamento dos módulos com maiores eficiências que podem ser acompanhadas de testes, de forma a complementar atividades posteriores.

6 BIBLIOGRAFIA

AGRONEGÓCIOS e tecnologia. “**Gazeta Mercantil**”, 2006, A-3.

apis3. “| Órigo Energia”. Acessado 31 de março de 2021. <https://origoenergia.com.br/blog/a-historia-da-energia-solar-no-brasil>.

BERNMANN, Célio. “**Crise ambiental e as energias renováveis**”. *Ciência e Cultura* 60, nº 3 (setembro de 2008): 20–29.

Blog Blue Sol. “**A Origem da Energia Solar: Usos, Tecnologias e Evolução**”, 30 de julho de 2019. <https://blog.bluesol.com.br/origem-da-energia-solar/>.

Blog Blue Sol. “**Guia Definitivo: As Vantagens e Desvantagens da Energia Solar**”, 9 de maio de 2018. <https://blog.bluesol.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>.

BORTOLOTO, Valter A et al. “**Geração de energia Solar on grid e off grid**”, [s.d.], 6.

CEPEL-CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

CHAGAS M., Francisco. **Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos**. Unicamp, 2014.

CicloVivo, Redação. “**Israelenses desenvolvem placas solares 70% mais eficientes**”. *CicloVivo* (blog), 24 de novembro de 2016. <https://ciclovivo.com.br/inovacao/tecnologia/israelenses-desenvolvem-placas-solares-70-mais-eficientes/>.

DALMAZ, A. et al. “**Energia eólica para geração de eletricidade e a importância da previsão.**” XIII (2008).

Ecoa. “**Vantagens e desvantagens da energia solar**”, 23 de janeiro de 2017. <https://ecoa.org.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>.

Estudo Prático. “**Energia Hidrelétrica - Vantagens e desvantagens - Estudo Prático**”. Acessado 5 de abril de 2021. <https://www.estudopratico.com.br/energia-hidreletrica-vantagens-e-desvantagens/>.

Estudo Prático. “**Energia solar no Brasil**”, 3 de julho de 2018.

<https://www.estudopratico.com.br/energia-solar-no-brasil/>.

Explicatorium. “**Energia termoelétrica vantagens e desvantagens**”. Acessado 5 de abril de 2021. <http://www.explicatorium.com/energia/energia-termoeletrica.html>.

FRUGIS, Paulo. **Apostila Neosolar – Energia Solar Fotovoltaica GRID-TIE**, 2019.

GALDINO, Marco A E et al. “**O Contexto das Energias Renováveis no Brasil**”, [s.d.], 9.

IMHOFF, Johninson. “**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**”, [s.d.], 146.

Jarabo Friedrich, Francisco, org. **El libro de las energias renovables**. 2. ed. Madrid: S.A.P.T, 1991.

Kaspary, Rosane Maria, e Carlos Fernando Jung. “**Energia Eólica no Brasil: Uma análise das vantagens e desvantagens**”, 2015, 17.

KONER, P. K. “**A review on the diversity of photovoltaic water pumping systems.**” 15 (1993).

MANOR, Assaf, NIMROD, Kruger, TAMILARASAN, Sabapathy, e ROTSCCHILD, Carmel. “**Thermally Enhanced Photoluminescence for Heat Harvesting in Photovoltaics**”. *Nature Communications* 7, nº 1 (20 de outubro de 2016): 13167. <https://doi.org/10.1038/ncomms13167>.

Maxim Group - “**Quais as Vantagens e Desvantagens da Energia Nuclear?**” Acessado 5 de abril de 2021. <https://maximgroup.com.br/quais-as-vantagens-e-desvantagens-da-energia-nuclear/>.

MOREIRA, R. N. “**Energia eólica no quintal da nossa casa?! Percepção ambiental dos impactos socioambientais na instalação e operação de uma usina na comunidade de sítio do Cumbe em Aracati- CE**”, 2013.

Mundo da Elétrica. “**Energia eólica, vantagens e desvantagens! - Mundo da Elétrica**”. Acessado 5 de abril de 2021. <https://www.mundodaeletrica.com.br/energia-eolica-vantagens-e-desvantagens/>.

OLIVEIRA, Carlos Arthur e GUARONGHI, Vinícius. “**Energia Solar**”. Acessado 3 de maio de 2021. <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/esolar/esolar.html>.

PACHECO, Fabiana. “**Energias Renováveis: breves conceitos**”, 2006.

Palmira Solar. “**Breve História da Energia Solar**”. Acessado 31 de março de 2021.

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

Portal Energia. “**Recorde de eficiência de 50% com nova célula solar de seis junções**”. *Portal Energia - Tudo sobre energias renováveis* (blog), 16 de abril de 2020. <https://www.portal-energia.com/recorde-eficiencia-nova-celula-solar-seis-juncoes/>.

Portal Energia. “**Vantagens e desvantagens da energia a biomassa**”. *Portal Energia - Tudo sobre energias renováveis* (blog), 12 de dezembro de 2016. <https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-biomassa/>.

Portal Energia. “**Vantagens e desvantagens da energia eólica**”. *Portal Energia - Tudo sobre energias renováveis* (blog), 10 de fevereiro de 2019. <https://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/>.

Portal Energia. “**Vantagens e desvantagens da utilização da energia nuclear**”. *Portal Energia - Tudo sobre energias renováveis* (blog), 4 de abril de 2011. <https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-utilizacao-da-energia-nuclear/>.

Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica. “**As Vantagens e Desvantagens da Energia Solar Fotovoltaica**”. Acessado 5 de abril de 2021. <https://www.portalsolar.com.br/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar.html>.

RAMPINELLI, Giuliano Arns, e Celso Generoso da Rosa Junior. “**Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica**”. *RECEN - Revista Ciências Exatas e Naturais* 14, nº 2 (2012): 273–302.

REIS, Pedro. “**Energia hídrica vantagens e desvantagens**”. *Portal Energia - Tudo sobre energias renováveis* (blog), 5 de setembro de 2019. <https://www.portal-energia.com/energia-hidrica-vantagens-e-desvantagens/>.

SOARES, G. F. et al “**Avaliação Técnico-Econômica da Aplicação de Sistemas Fotovoltaicos Individuais e de Centrais com Minirredsr na Eletrificação Rural.**” II ([s.d.]): 117–28.

Strom Brasil. “**A História da energia solar fotovoltaica**”, 23 de abril de 2016. <https://www.strombrasil.com.br/a-historia-da-energia-solar-fotovoltaica/>.

SWART, Jacobus W. “**Materiais Elétricos**”, 2007.

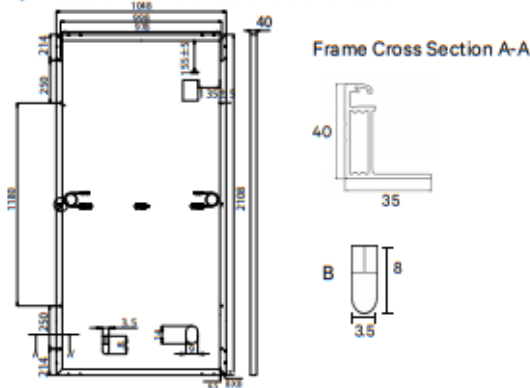
TAVARES, Carlos. “Universidade do Estado do Rio de Janeiro”, 2009, 131.

ZILLE, Roberto. “**Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**” Roberto Zille Livro | Passei Direto”. Acessado 23 de março de 2021. <https://www.passeidireto.com/arquivo/47249318/sistemas-fotovoltaicos-conectados-a-rede-eletrica-roberto-zille-livro>.



LP166*166-M-72-M

MECHANICAL DIAGRAMS



SPECIFICATIONS

Weight	24 kg
Dimensions	2108mm*1048mm*40mm
Cell Amount	72*2 pcs
Maximum System Voltage	1000/1500V
Junction Box	IP68
Frame	Aluminum Alloy
Cable	4mm ² , Landscape: N 1300mm/P 1300mm Portrait: N 1600mm/P 300mm
Connector	MC4 compatible
Application Level	Class A

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

Power	430W	435W	440W	445W	450W
Open Circuit Voltage	49.20V	49.40V	49.60V	49.80V	50.00V
Short Circuit Current	11.19A	11.26A	11.33A	11.40A	11.47A
Maximum Power Voltage	40.60V	40.80V	41.00V	41.20V	41.40V
Maximum Power Current	10.60A	10.67A	10.74A	10.81A	10.88A
Module Efficiency	19.5%	19.7%	19.9%	20.1%	20.4%

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

ELECTRICAL PARAMETERS AT NMOT

Power	322W	326W	330W	334W	338W
Open Circuit Voltage	46.10V	46.30V	46.50V	46.70V	46.90V
Short Circuit Current	9.08A	9.13A	9.19A	9.25A	9.31A
Maximum Power Voltage	37.70V	37.90V	38.10V	38.20V	38.30V
Maximum Power Current	8.56A	8.61A	8.66A	8.75A	8.84A
Module Efficiency	14.6%	14.8%	14.9%	15.1%	15.3%

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

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

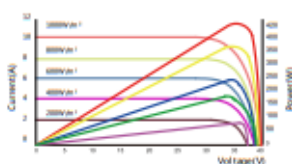
NMOT	41±3°C	Temp Coefficient of ISC	+0.05%/°C
Temp Coefficient of VOC	-0.28%/°C	Temp Coefficient of Pmax	-0.36%/°C

PACKING CONFIGURATION

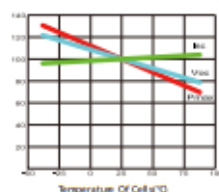
Modules/Pallet	26 Pieces	Modules/40'Container	616 Pieces
Packing Description	22 Pallets, Total=(26+26+4)x11=616 Pieces		

CHARACTERISTICS

LP166*166-M-72-MH-430W



LP166*166-M-72-MH-430W



MAXIMUM RATING

Output Tolerance	0~+5W
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Wind Load/Snow Load	2400pa/5400pa
Fuse Current	20A



Apêndice 1 – Preço inversor solar Fronius 25kWp



Inversor Solar Fronius 4210057040 Eco 27.0-3-S Potencia... ✕

Apresentação - O Fronius Eco é um inversor trifásico 380V sem transformador, que possui uma classe de potência de 25 e 27 k - W e, por isso ele consegue suprir perfeitamente as ...

[Ver detalhes do produto](#)

R\$ 23.970,89 Solius Energia Solar	R\$ 26.353,40 Submarino	R\$ 25.299,26 Americanas.com
--	-----------------------------------	--

[Comparar preços de 10 ou mais lojas](#)

Apêndice 2 - Preço do módulo Canadian Solar – CS3Y-485W



Painel Solar Half-Cell monocristalino 485W SKU
Canadian Solar - CS3Y-485W
104908897
Disponibilidade: 15 Dias úteis

R\$ 1.115,07 À vista
(7,00% de desconto no Boleto Bancário)

QUANTIDADE: 1 ▾

R\$ 1.139,05 Desconto de 5% à vista no cartão de crédito
ou **R\$ 1.199,00** no cartão de crédito
6 x sem juros de R\$ 199,83
ou 12 x de R\$ 113,39 com juros

[Ver parcelas](#)

GARANTIA

Frete e prazo: CEP Ok
Não sei meu cep

O produto conta com 12 anos de

COMPRAR 

Site Seguro