

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
RARENA KELLEN REIS PEDROSA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O
MATLAB/SIMULINK**

**FORMIGA – MG
2018**

RARENA KELLEN REIS PEDROSA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O
MATLAB/SIMULINK**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Formiga, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. MSc. Rafael Vinícius Tayette da Nobrega.

**FORMIGA – MG
2018**

RARENA KELLEN REIS PEDROSA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O
MATLAB/SIMULINK**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 22 de novembro de 2018

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Rafael Vinícius Tayette da Nobrega

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Prof. Dr. Ulysses Rondina Duarte

Formiga/MG, 22 de novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as dificuldades que enfrentei, se não fosse por elas não teria chegado até aqui. Agradeço, principalmente, a Deus, pois se hoje comemoro essa conquista foi porque ele estava ao meu lado.

Agradeço, em especial, aos meus pais, Adriani e José Luis, meus exemplos de sabedoria e determinação, que ficaram na expectativa incentivando-me sempre a prosseguir.

Ao meu irmão, Rarden, por toda cumplicidade e apoio que mesmo distante se faz presente em meu coração.

Ao Prof.^o Rafael Vinícius Tayette da Nobrega pela sabedoria compartilhada e por toda a orientação e dedicação ao longo desse trabalho para comigo.

E a todos os meus amigos por me proporcionarem tantos momentos de alegria, pelo companheirismo, ajuda e principalmente, por todas as noites de estudo.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente participaram desse tão sonhado momento da minha vida compartilhando comigo uma das minhas maiores vitórias.

*“ Nunca desista de acreditar e nunca desista
de lutar, porque quem persevera acreditando
e lutando vencerá! ”*

(Élis Rocha)

RESUMO

A energia solar é a energia proveniente do Sol, considerada também um tipo de fonte renovável que pode ser aproveitada de diversas maneiras. Uma dessas possibilidades é a captação da radiação solar por painéis fotovoltaicos, convertendo a energia solar em energia elétrica. Atualmente, a utilização de sistemas fotovoltaicos conectados e desconectados da rede, compostos por painéis fotovoltaicos, tem aumentado consideravelmente. Dessa forma, tem-se um cenário propício para o estudo dos painéis fotovoltaicos, e de qualquer componente dos sistemas fotovoltaicos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação de painéis fotovoltaicos utilizando o *software* Matlab/Simulink, considerando a variação da radiação e da temperatura na geração da energia elétrica. Após a implementação validou-se a metodologia comparando as curvas de tensão e corrente (I-V) em função da temperatura e da radiação com as curvas do painel CS6U-330P da Canadian Solar, disponibilizadas pelo fabricante. A metodologia foi validada de forma satisfatória, uma vez que, o menor valor de concordância entre a curva simulada e a do fabricante foi de 96,3%. Posteriormente, visando mostrar a utilização prática da metodologia desenvolvida, aplicou-se a modelagem do painel fotovoltaico em dois exemplos: (i) residência localizada na cidade de Formiga/MG, que possui um arranjo de 36 painéis CS6U-330P da Canadian Solar já instalados; (ii) estudo comparativo entre o potencial de geração fotovoltaica da cidade de Formiga/MG com três cidades localizadas em países referências: China, Japão e Alemanha.

Palavras Chave: Energia solar. Painéis fotovoltaicos. Temperatura. Radiação solar. Matlab. Simulink.

ABSTRACT

Solar energy is the energy coming from the Sun, also considered a type of renewable source that can be harnessed in several ways. One of these possibilities is the capture of solar radiation by photovoltaic panels, converting solar energy into electric energy. Currently, the use of photovoltaic systems connected and disconnected from the grid, composed of photovoltaic panels, has increased considerably. In this way, there is a favorable scenario for the study of photovoltaic panels and any component of photovoltaic systems. Thus, the present work has the objective of modeling and simulation of photovoltaic panels using the software Matlab/Simulink, considering variation of radiation and the temperature in the generation of electrical energy. After the implementation, the methodology was validated by comparing the current-voltage curves as a function of temperature and radiation with the curves of the CS6U-330P panel by Canadian Solar, available from the manufacturer. The methodology was satisfactorily validated, since the lowest value of agreement between the simulated and the manufacturer curve was 96.3%. Subsequently, aiming to show a practical use of the adopted methodology, the photovoltaic panel modeling was applied in two examples: (i) a residence located in the city of Formiga/MG, which already has installed an arrangement with 36 CS6U-330P panels from Canadian Solar; (ii) a comparison between the potential for solar photovoltaic generation in the city of Formiga/MG and other three cities located in reference countries: China, Germany and Japan.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic panels, Temperature, Solar radiation. Matlab, Simulink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de energia no Brasil.	12
Figura 2 - Matriz de energia elétrica no Brasil.	13
Figura 3 - Distribuição mundial de irradiação solar anual em kWh/m ²	18
Figura 4 - Distribuição de radiação solar anual em kWh/m ² no Brasil.	19
Figura 5 - Irradiação Solar no Plano Horizontal da cidade de Formiga/MG.	20
Figura 6 - Bandas de energia entre os materiais.	22
Figura 7 – Representação esquemática de uma junção pn.	22
Figura 8 - Ilustração do efeito fotovoltaico.	23
Figura 9 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	24
Figura 10 - (a) Cristal de quartzo e (b) bloco de silício ultrapuro.	26
Figura 11 - Curva I-V de um painel genérico.	27
Figura 12 - Curva P-V de um painel genérico.	27
Figura 13 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em série. ..	28
Figura 14 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em paralelo.	28
Figura 15 - Lingotes de silício monocristalino.	29
Figura 16 - <i>Wafer</i> de silício monocristalino.	30
Figura 17 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.	31
Figura 18 - Lingote de silício policristalino.	32
Figura 19 - Células fotovoltaicas de silício policristalino.	32
Figura 20 - Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico policristalino HMF60P.	33
Figura 21 - Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico policristalino HMF60P	34
Figura 22 - Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico ideal.	36
Figura 23 - Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico, incluindo os resistores R_s e R_{sh}	37
Figura 24 - Painel fotovoltaico implementado no <i>software</i> Matlab/Simulink.	39
Figura 25 - Subsistemas do PV <i>module</i>	40
Figura 26 - Equação 4 da corrente de saturação reversa implementada no <i>software</i> Matlab/Simulink.	40
Figura 27 - Equação 3 da corrente de saturação implementada no <i>software</i> Matlab/Simulink.	41
Figura 28 - Equação 2 da foto corrente implementada no <i>software</i> Matlab/Simulink.	41
Figura 29 - Equação 7 da corrente <i>shunt</i> implementada no <i>software</i> Matlab/Simulink.	42
Figura 30 - Equação 6 da corrente de saída implementada no <i>software</i> Matlab/Simulink.	42

Figura 31 - Curvas I-V do painel CN-200S para diferentes valores de temperatura, 5°C, 25°C, 45°C e 65°C, mantendo a radiação solar constante, 1000 W/m ²	43
Figura 32 - Curvas P-V do painel CN-200S para diferentes valores de temperatura, 5°C, 25°C, 45°C e 65°C, mantendo a radiação solar constante, 1000 W/m ²	44
Figura 33 - Curvas I-V do painel CN-200S para diferentes valores de irradiação solar, 1000 W/m ² , 800 W/m ² , 600 W/m ² e 400 W/m ² , mantendo a temperatura constante, 25°C.....	44
Figura 34 - Curvas P-V do painel CN-200S para diferentes valores de irradiação solar, 1000 W/m ² , 800 W/m ² , 600 W/m ² e 400 W/m ² , mantendo a temperatura constante, 25°C.....	45
Figura 35 - Curva de obtenção da corrente, tensão e potência máximas.	45
Figura 36 - Comparação entre as curvas I-V simulada (linha contínua) e experimental (círculos) para diferentes temperaturas, 5°C, 25°C e 65°C, mantendo a radiação solar em 1000 W/m ²	48
Figura 37 - Comparação entre as curvas I-V simulada (linha contínua) e experimental (círculos) para diferentes valores de radiação solar, 1000 W/m ² , 800 W/m ² , 600 W/m ² e 400 W/m ² , mantendo a temperatura em 25°C.	49
Figura 38 - Localização das cidades analisadas.	55
Figura 39 - Comparação entre a energia gerada nominal por ano (sem temperatura) e a energia gerada de operação (com temperatura) por ano em cada localidade. ...	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.	25
Tabela 2 - Valores do painel fotovoltaico CN-200S da Xuzhou Superenergy.	43
Tabela 3 - Características do módulo fotovoltaico escolhido.	47
Tabela 4 - Parâmetros da modelagem do painel considerados na simulação.	48
Tabela 5 - Dados de concordância entre as características do manual e da simulação variando a temperatura.	50
Tabela 6 - Dados de concordância entre as características do manual e da simulação variando a radiação solar.	50
Tabela 7 - Valores de irradiação solar diária, temperaturas mínima, máxima e média mensal da cidade de Formiga/MG.	52
Tabela 8 - Informações da cidade de Formiga/MG utilizadas nos cálculos de geração de energia.	53
Tabela 9 - Dados obtidos da cidade de Formiga – Brasil.	55
Tabela 10 - Dados obtidos da cidade de Göttingen – Alemanha.	56
Tabela 11 - Dados obtidos da cidade de Guiyang – China.	56
Tabela 12 - Dados obtidos da cidade de Shimogou – Japão.	57
Tabela 13 - Energia gerada nominal total anual para as quatro cidades.	58
Tabela 14 - Dados obtidos da cidade de Formiga – Brasil.	58
Tabela 15 - Dados obtidos da cidade de Göttingen – Alemanha.	58
Tabela 16 - Dados obtidos da cidade de Guiyang – China.	59
Tabela 17 - Dados obtidos da cidade de Shimogou – Japão.	59
Tabela 18 - Energia gerada de operação total anual para as quatro cidades.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Problema	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Hipótese	14
1.4 Objetivo Geral	15
1.5 Objetivos Específicos	15
1.6 Estrutura do Trabalho	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Energia Solar	17
2.2 Efeito Fotovoltaico	21
2.3 Células Fotovoltaicas	24
2.4 Painel fotovoltaico	26
2.4.1 Painel fotovoltaico de silício monocristalino	29
2.4.2 Painel fotovoltaico de silício policristalino	31
2.5 Influência da temperatura no painel fotovoltaico	33
2.6 Influência da radiação solar no painel fotovoltaico	34
3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	36
3.1 Modelo elétrico do painel fotovoltaico	36
3.2 Fonte de Corrente Dependente (I_{ph})	37
3.3 Corrente de saturação (I_0)	38
3.4 Corrente de saída (I)	38
3.5 Implementação do painel fotovoltaico em Matlab/Simulink	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Validação da metodologia desenvolvida para modelagem do painel fotovoltaico	47

4.2 Exemplos de Aplicação	51
4.2.1 Exemplo de Aplicação 1	52
4.2.2 Exemplo de Aplicação 2	54
5 CONCLUSÕES	62
5.1 Trabalhos Futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO A – Dados do painel CS6U-330P da Canadian Solar	69

1 INTRODUÇÃO

O Sol é o principal componente para a formação de energia necessária ao desenvolvimento humano. É ele o responsável pela origem de diversas fontes de energia que geram trabalho, conforto e manutenção da vida. É a partir dele que acontecem a evaporação, origem do ciclo das águas, possibilita o represamento, causa, também, os ventos devido à radiação solar induzir a circulação atmosférica e principalmente, a geração de eletricidade (SILVA, 2008).

A busca por meios de geração renováveis que causem o menor impacto ambiental possível tem crescido nos últimos anos. O Brasil está entre os países que possuem níveis altos de utilização dessas energias. De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, o país irá elevar seus recursos renováveis de 43,5% para 47% em sua matriz energética. As Figuras 1 e 2 mostram a porcentagem de alguns tipos de geração de energia e a matriz de energia elétrica no Brasil (TINOCO et al., 2017).



Figura 1 - Tipos de energia no Brasil.

Fonte: Figura extraída de (TINOCO et al., 2017).

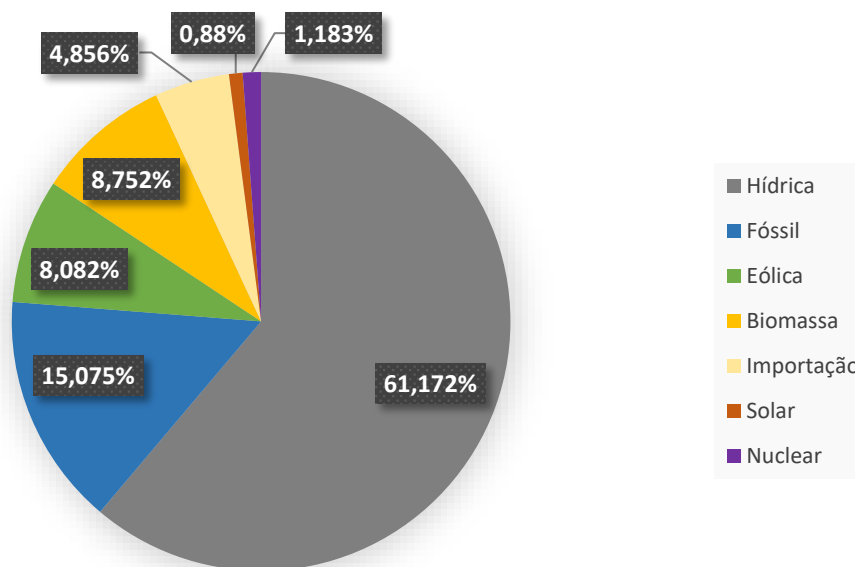


Figura 2 - Matriz de energia elétrica no Brasil.

Fonte: Figura adaptada de (ANEEL, 2018).

Atualmente, uma das energias renováveis que mais se destaca mundialmente é a energia solar. O Brasil possui altos índices de radiação solar em comparação com os demais países. Os níveis de radiação solar no território brasileiro variam entre 1500 e 2500 W/m² (NEVES, 2016). Dessa forma, tem-se um cenário propício ao desenvolvimento de trabalhos relacionados ao sistema fotovoltaico para a geração de energia elétrica por meio da energia solar. Neste trabalho, focou-se no estudo do painel fotovoltaico. Os painéis utilizados são compostos de células de silício mono ou policristalinas, e seu princípio de funcionamento é transformar a radiação solar em energia elétrica. A geração de energia elétrica por meio do painel fotovoltaico depende diretamente da radiação solar que incide sobre a placa, bem como a exposição a altas temperaturas diminuindo a eficiência do painel (SILVA, 2016). Assim, realizou-se estudos e análises visando a compreensão da influência da radiação e da temperatura na geração de energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos.

1.1 Problema

Atualmente, o Brasil está vivendo uma crise energética e isso acarreta na busca de energia alternativa tentando diversificar a matriz elétrica. Isso acontece devido às faltas de chuva, pois as usinas hidrelétricas constituem mais de 60% de energia

produzida no Brasil. Outros tipos de energia como as termelétricas causam um grande impacto ambiental e econômico. Para amenizar esse problema, a utilização de fontes renováveis de energia vem crescendo consideravelmente, principalmente a energia fotovoltaica, por ser uma fonte de energia não poluente e sustentável. (ARAÚJO; RANK; BUENO, 2016). Entretanto, este tipo de energia apresenta um baixo rendimento, e ainda assim, alguns fatores da natureza podem influenciar na geração da energia por meio do painel fotovoltaico, tais como a radiação solar e a temperatura de operação foram levados em conta no presente trabalho.

Com isso, realizou-se uma simulação no *software* Matlab/Simulink para modelar painéis fotovoltaicos que levam em consideração problemas como a radiação solar e a temperatura, com o intuito de calcular a potência de operação correta que o painel fornece na geração de energia elétrica.

1.2 Justificativa

De acordo com Pinho; Galdino (2014) algumas tecnologias foram desenvolvidas na Europa para explorar a energia solar, porém as temperaturas eram relativamente baixas comparadas com a do Brasil gerando um impacto grande na geração de energia. Por isso é feito um estudo no presente trabalho, cujo intuito é calcular a quantidade de energia gerada pelo painel fotovoltaico, levando em consideração a radiação solar e a temperatura. Por meio desses conceitos é possível obter a potência de operação do painel, que é diferente da potência nominal, auxiliando assim, no projeto correto de sistemas fotovoltaicos em diferentes regiões.

1.3 Hipótese

A questão energética se tornou uma grande preocupação do Brasil, pois nos últimos anos estão ocorrendo diversas mudanças climáticas, o que dificulta a geração de energia elétrica por meio da energia hidrelétrica (FERREIRA, 2016). Conseqüentemente, as usinas termelétricas são utilizadas para complementar a geração de energia elétrica no território brasileiro, o que aumenta o custo da energia elétrica para o consumidor final. Uma forma de contornar esta situação é a utilização apropriada dos recursos naturais e de fontes renováveis de energia.

E assim, a energia solar torna-se uma alternativa viável na geração de energia elétrica. Dessa forma, estudos realizados em painéis fotovoltaicos levando em conta a radiação solar e temperatura de operação, podem aumentar a demanda da utilização do sistema fotovoltaico, pois podem diminuir a queda na produção de energia e até mesmo aumentar a vida útil dos painéis.

1.4 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar a modelagem e simulação de painéis fotovoltaicos utilizando o *software* Matlab/Simulink com o intuito de verificar a influência da radiação solar e da temperatura de operação na geração da energia elétrica de origem fotovoltaica.

1.5 Objetivos Específicos

Alguns objetivos específicos devem ser alcançados para validar o objetivo geral do trabalho. São eles:

- Realizar um estudo para compreender os conceitos referentes a energia solar e painéis fotovoltaicos;
- Implementar a metodologia para simular os painéis fotovoltaicos, incluindo os efeitos de radiação e temperatura;
- Validar a metodologia, comparando a curva tensão-corrente (I-V) simulada com a curva do painel CS6U-330P da Canadian Solar;
- Analisar os impactos dos fatores, radiação solar e temperatura, na geração da energia elétrica a partir do painel fotovoltaico simulado;
- Aplicar a modelagem em exemplos de aplicação para verificar a validade da metodologia desenvolvida.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 é apresentado os conceitos teóricos necessários para a compreensão do sistema fotovoltaico, como informações sobre energia solar, efeito e células fotovoltaicos, tipos

de painéis fotovoltaicos, bem como a influência da radiação solar e da temperatura em um painel fotovoltaico. No Capítulo 3 tem-se o desenvolvimento da metodologia, implementando o painel fotovoltaico no *software* Matlab/Simulink. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4. Já no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho, e sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos teóricos sobre energia solar, efeito fotovoltaico, célula e painel fotovoltaico, bem como a influência da temperatura e da radiação nos sistemas fotovoltaicos.

2.1 Energia Solar

A utilização de energia elétrica pela humanidade vem crescendo significativamente, e assim, a busca por fontes renováveis e não poluentes aumentam também. Fontes essas, que não dependem de recursos limitados pela natureza e que produzem impactos reduzidos ao meio ambiente. A energia solar é uma energia que envolve esses princípios, mas não pode ser considerada uma fonte infinita. Porém, estudos mostram que a mesma poderá ser utilizada por aproximadamente oito bilhões de anos, sendo assim, considerada uma fonte de energia inesgotável (NIEDZIALKOSKI, 2013).

O Sol é a principal fonte de energia renovável dos demais tipos de energia. A superfície da Terra recebe $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia do Sol que corresponde dez mil vezes o consumo mundial anual de energia, suficiente para suprir milhares de vezes as necessidades mundiais (NIEDZIALKOSKI, 2013).

A energia solar, além de ser responsável pela preservação da vida da humanidade na Terra, é fundamental também na geração de outras fontes de energia: a energia da biomassa que origina da captação solar através da fotossíntese convertendo energia solar em energia química; a energia eólica com origem nas diferentes temperaturas e pressão atmosférica originadas pelo aquecimento solar: a hidráulica que possui origem nas chuvas e evaporação causadas pelo Sol; e os combustíveis fósseis que se originam da decomposição da matéria orgânica causada pela energia solar, sendo eles petróleo, gás natural e carvão (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Sendo a principal fonte de energia do planeta Terra, a energia solar, a exploração desse recurso tem como principais aspectos reduzir o mercado de petróleo, diminuindo os gases poluentes emitidos na atmosfera e tornando o país menos exposto à instabilidade de recursos hídricos (MACHADO; CORREA, 2015),

tendo que, segundo (ANEEL, 2018), 60,913% da energia elétrica gerada no Brasil é originada pelas usinas hidroelétricas.

O aproveitamento da energia solar é devido sua irradiação que incide no sistema que gera a energia elétrica. Os níveis de irradiação dependem da estação em que o ano se encontra e da região de acordo com a meteorologia e diferenças de latitude, além da distância em que o Sol está da Terra. Essa distância, ao longo do ano, varia de $1,47 \times 10^8$ e $1,52 \times 10^8$ km. E como resultado disso, têm-se que a irradiação flutua entre 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 , com um valor médio igual a 1367 W/m^2 , chamado de constante solar (SILVA, 2016).

Vários tipos de radiação solar podem ocorrer. Em um dia sem nuvens, ao meio dia a radiação solar pode atingir valores em torno de 1000 W/m^2 na superfície terrestre. Em dias parcialmente nublados e ensolarados, ocorre a máxima insolação. Ao longo do ano, acrescentando o conteúdo energético da radiação solar, é possível obter o valor dessa radiação global anual em kWh/m^2 . Na Figura 3 pode-se visualizar a variação da radiação solar em cada região do globo (BORGES, 2009).

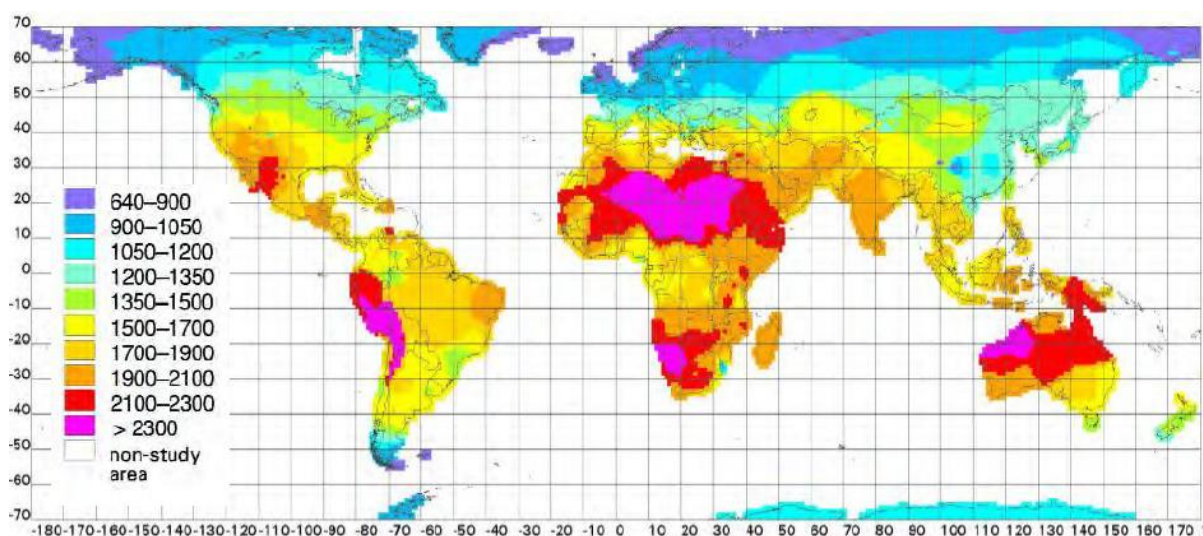


Figura 3 - Distribuição mundial de irradiação solar anual em kWh/m^2 .

Fonte: Figura extraída de (BORGES, 2009).

Existem dois tipos de radiação solar que incidem na superfície terrestre, a direta e a difusa. A radiação direta é aproximadamente 25% da radiação que incide diretamente na superfície terrestre, ou seja, não sofre nenhum desvio. Esse tipo de radiação tem valor nulo quando o Sol está totalmente encoberto pelas nuvens. A radiação difusa, alcança a superfície da Terra em todas as direções após a sua

incidência, sendo responsável pela claridade do céu durante o dia e por toda a iluminação de áreas que não recebem a radiação diretamente do Sol (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2018).

O Brasil possui um grande potencial solar por ter níveis de irradiação muito altos, com uma média mais alta por dia de 5,5 kWh/m² e por ano de 2000 kWh/m² para estados localizados nas regiões nordeste e norte do estado de Minas Gerais. E para médias mais baixas como 4,5 kWh/m² por dia e 1642 kWh/m² por ano em pequenos pontos para todo o território nacional, apresentado na Figura 4 (SILVA, 2016).

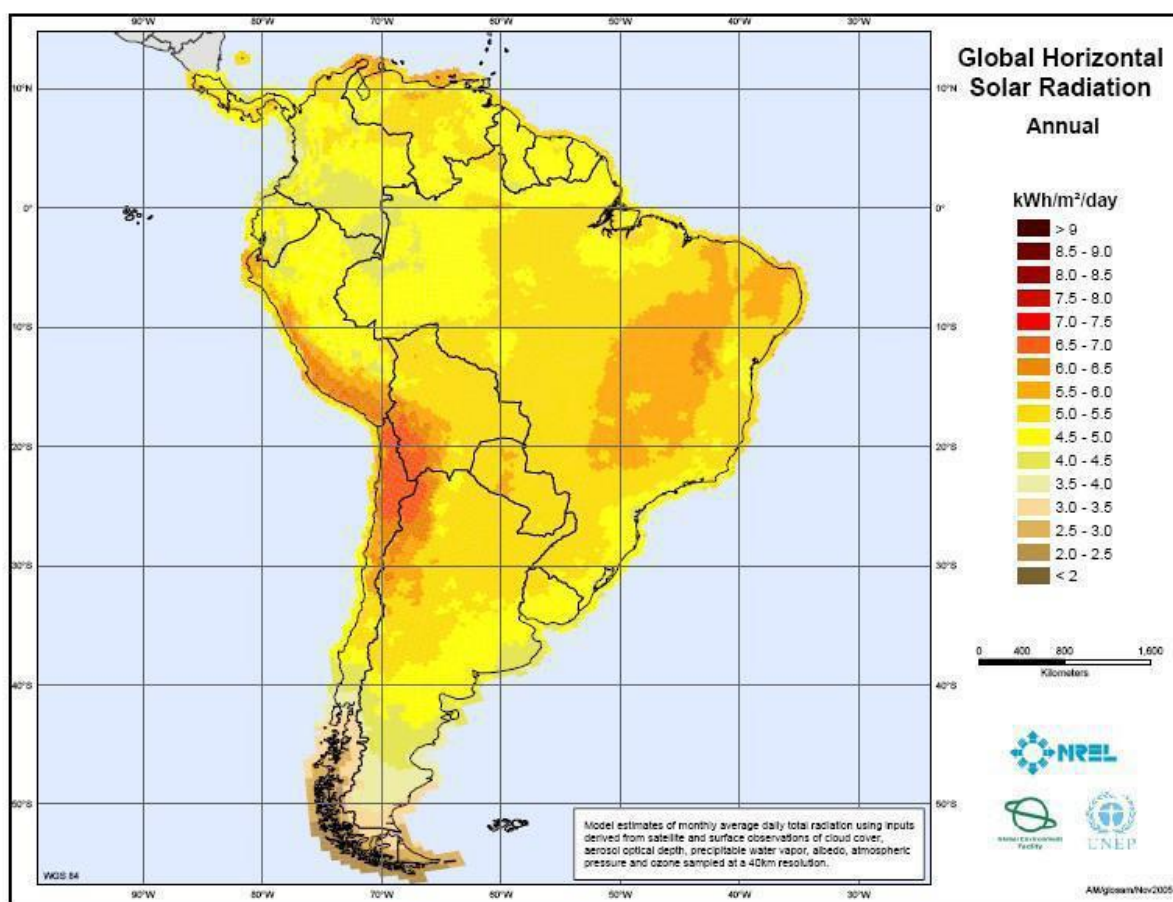


Figura 4 - Distribuição de radiação solar anual em kWh/m² no Brasil.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2016).

Minas Gerais é o estado com maior destaque na área de geração de energia solar fotovoltaica. Vários estados do Brasil possuem instalações dessa energia, porém Minas Gerais compreende um quinto de todas as instalações do país. A cidade que possui o maior número de placas fotovoltaicas é Uberlândia, mas existem outras que

também se destacam como Belo Horizonte, Sete Lagoas, Betim e Montes Claros (PORTAL SOLAR, 2016).

A cidade alvo nos exemplos de aplicação do presente trabalho é Formiga – MG, cujos valores de radiação solar média diária em função dos meses do ano podem ser visualizados na Figura 5 (CRESESB, 2018).

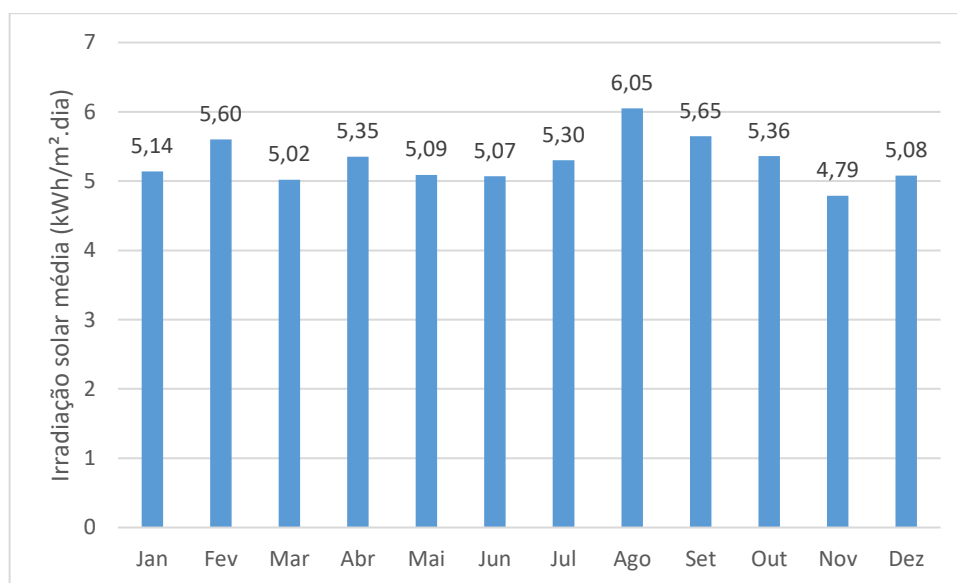


Figura 5 - Irradiação Solar no Plano Horizontal da cidade de Formiga/MG.

Fonte: Figura adaptada de (CRESESB, 2018).

Analisando a Figura 5, pode-se verificar que o município de Formiga apresenta uma irradiação solar média diária em torno de 5,29 kWh/m², indicando um grande potencial na geração da energia de origem fotovoltaica, em relação as demais localidades no Brasil e no mundo, conforme pode ser visualizado na Figura 4 (CRESESB, 2018).

Desse modo, a utilização da energia solar está impulsionando a geração fotovoltaica, e daqui alguns anos, esta será a principal fonte de energia. A mesma oferece vantagens financeiras aos consumidores que possuem a instalação das placas fotovoltaicas, reduzindo impactos ambientais e emissões de carbono na atmosfera (PORTAL SOLAR, 2016).

Na próxima subseção é apresentado uma breve explicação teórica do funcionamento do efeito fotovoltaico.

2.2 Efeito Fotovoltaico

No ano de 1839, físico francês, Edmund Becquerel, descobriu que algumas placas metálicas quando mergulhadas em eletrólitos e expostas à luz, gerava uma diferença de potencial. Porém, esse efeito só era possível se as placas fossem de prata ou platina. Isto é, alguns materiais ao serem expostos à luz são capazes de produzir corrente elétrica e seu valor era dependente da intensidade da luz que era incidida (SILVA, 2014).

As primeiras células fotovoltaicas foram produzidas para conversão solar, a partir dos anos 1950. Tais células apresentavam uma eficiência em torno de 6%, uma potência máxima de 5 mW e uma área de 2 cm². Elas foram confeccionadas com lâminas de silício no Bell Labs, nos Estados Unidos, as mesmas são frutos de diversas pesquisas tecnológicas realizadas na época pelo mesmo laboratório, o que impulsionou o desenvolvimento de diversos dispositivos semicondutores (PINHO; GALDINO, 2014). Em 1958, a NASA utiliza essa tecnologia em forma de painel interligado a um satélite, como fonte de redundância. Após esse ocorrido, o avanço da tecnologia nas células fotovoltaicas foi crescendo rapidamente no mercado (MACHADO; CORREA, 2015).

Atualmente o semicondutor mais utilizado para fabricar as células fotovoltaicas é o silício, por ser uma matéria prima barata e abundante no mundo. Porém não é considerada a mais eficiente. Mesmo assim, os investimentos para o uso dessa energia e a qualidade das tecnologias utilizadas vêm crescendo de forma muito rápida, principalmente porque as evidências de maiores alterações climáticas estão aumentando (MACHADO; CORREA, 2015).

O silício possui uma rede cristalina formada pelos seus átomos com quatro elétrons de ligação. O átomo de fósforo, dopante tipo n, que possui cinco elétrons de ligação, pode ser adicionado ao átomo de silício, porém um elétron de fósforo ficará livre e este irá para a banda de condução, isso ocorre devido à pouca energia térmica existente. Entretanto, quando o silício é dopado, tipo p, com um semicondutor que possui apenas três elétrons para ligação, como por exemplo o boro, terá falta de elétrons, denominando este fenômeno de lacuna ou buraco. Existirá, também, pouca energia térmica e por isso algum elétron vizinho pode passar para a posição que está ausente permitindo que a lacuna se desloque (SANTANA, 2014). Esses dois fenômenos podem ser observados na Figura 6.

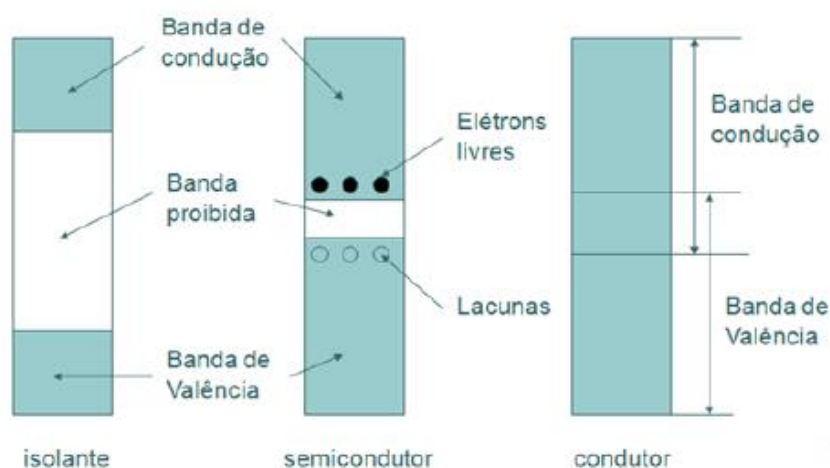


Figura 6 - Bandas de energia entre os materiais.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014).

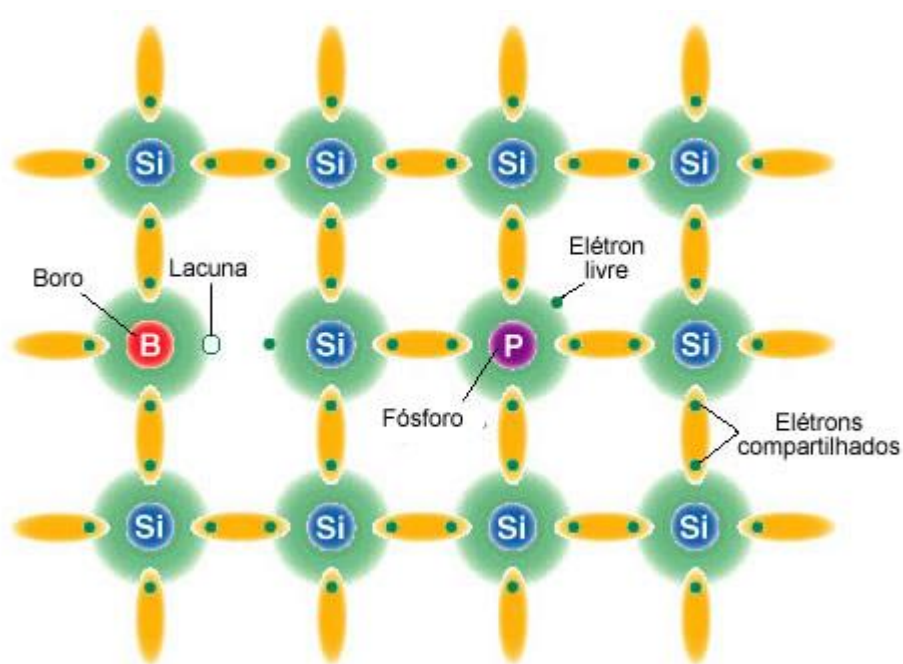


Figura 7 – Representação esquemática de uma junção pn.

Fonte: Figura extraída de (INFOESCOLA, 2018).

Assim, a partir do silício puro, adicionando em uma face do silício átomos de boro, e em outra face, átomos de fósforo, forma-se a junção pn, no qual elétrons livres começam a preencher as lacunas. Essas lacunas serão preenchidas de modo que os elétrons livres do tipo n passem para o lado do tipo p, transformando o lado p carregado negativamente por causa dos elétrons livres e o lado n carregado positivamente devido ao acúmulo de lacunas. Após essas cargas estiverem totalmente em seus devidos lados, um campo elétrico permanente irá se formar

dificultando, assim, a passagem de outros elétrons do lado n para o lado p (SANTANA, 2014). A junção pn é apresentada na Figura 7.

Estas cargas podem ser aceleradas se o campo elétrico formado for diferente de zero, gerando uma corrente através da junção. Isto ocorre caso a junção pn for exposta a fótons com energia maior que a energia de *gap*, acarretando na geração de pares elétrons-lacunas (SANTANA, 2014). Esse *gap* é a quantidade de energia necessária para que o elétron efetue uma transição. De acordo com MACHADO; CORREA, (2015), a energia do fóton é dada pela Equação 1,

$$E_f = h \cdot f \quad (1)$$

onde E_f é a energia do fóton (J), h é a constante de Planck ($6,62607004 \times 10^{-34}$ J.s) e f é a frequência do fóton.

Este processo pode ser chamado de efeito fotovoltaico, pois ao deslocar as cargas uma diferença de potencial é criada. Conectando as extremidades do silício a um fio, ocorrerá uma circulação de corrente, como visto na Figura 8.

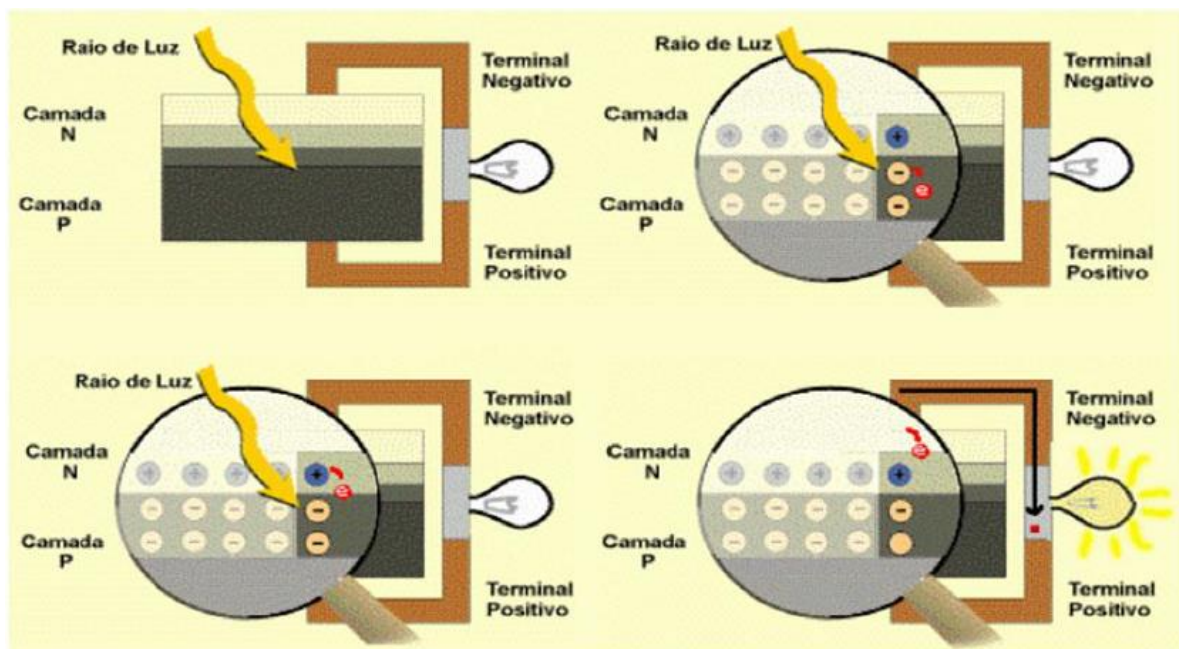


Figura 8 - Ilustração do efeito fotovoltaico.

Fonte: Figura extraída de (SANTANA, 2014).

Na próxima subseção é apresentando uma definição sobre as células fotovoltaicas e sua estrutura.

2.3 Células Fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos capazes de transformar energia solar em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico, utilizando materiais semicondutores (ALVES, 2016).

Na Figura 9 é possível observar a estrutura de uma célula que possui duas camadas de material semicondutor n e p, uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior. A base metálica e a grade de coletores são extremidades elétricas que coletam a corrente elétrica produzida através da ação do sol. A parte superior da célula é a que recebe a luz e precisa ser translúcida para que os contatos elétricos construídos se tornem uma fina grade metálica impressa na célula. A parte inferior é uma película de alumínio ou de prata (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Essas camadas são formadas por diversos materiais, porém 95% das células fabricadas no mundo são de silício, por ser considerado um material barato e abundante. Uma das tecnologias de fabricação mais utilizada para essas células são as de silício monocristalino (*m-Si*), silício policristalino (*p-Si*) e filme fino ou silício amorfo (*a-Si*) (FERREIRA, 2016).

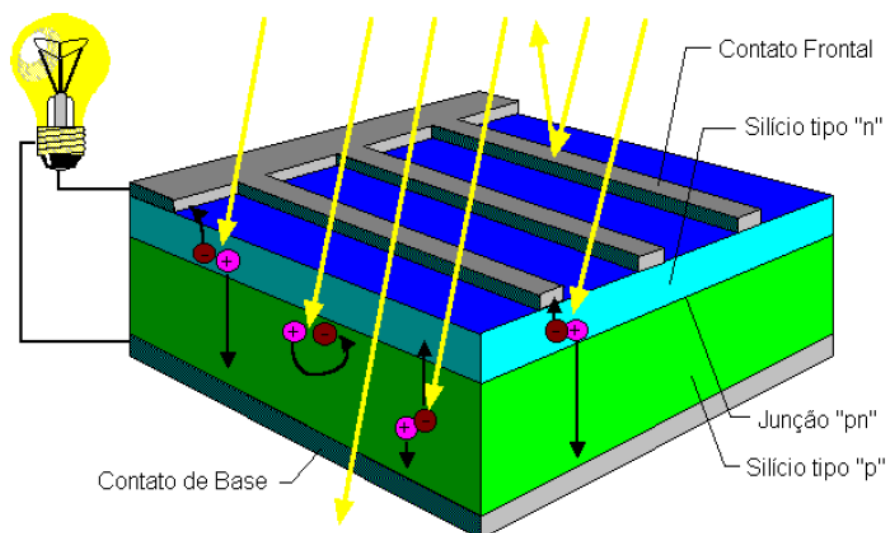


Figura 9 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Figura extraída de (NIEDZIALKOSKI, 2013).

Nos últimos 60 anos, muitas tecnologias envolvendo a fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas e atualmente dominam o mercado mundial. Algumas outras tecnologias que são comercializadas, do mesmo modo, estão

baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (α -Si:H), silício microcristalino (μ c-Si) e silício crescido em fitas (Si-fitas). Estão sendo desenvolvidas, também, células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC - *Dye Sensitized Cells*) ou polímeros (PINHO; GALDINO, 2014).

É por meio dessas diferentes tecnologias e dos diversos materiais utilizados na fabricação das células fotovoltaicas, que se obtém as células e módulos fotovoltaicos com uma maior ou menor eficiência. O custo de algumas dessas tecnologias é menor do que outras e por isso a eficiência de conversão da energia solar para a energia elétrica, também, é menor. Decorrente disso, a área de instalação será maior para produzir energia. Essa comparação pode ser observada na Tabela 1, onde mostra as células e os módulos de silício mono e policristalino, restringindo as células híbridas, pois são as que apresentam maiores eficiências de conversão nos laboratórios e comercialmente (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Tabela 1 - Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas.

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório (%)	Eficiência da célula comercial (%)	Eficiência dos módulos comerciais (%)
Silício monocristalino	24,7	18	14
Silício policristalino	19,8	15	13
Silício amorfo	15	10,5	7,5
Célula solar híbrida	20,1	17,3	15,2
CIS, CIGS	18,8	14	10
Telureto de cádmio	16,4	10	9

Fonte: Tabela adaptada de (BLUESOL, 2017).

Atualmente, existem várias tecnologias para fabricar células e módulos fotovoltaicos, porém as mais comuns são silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de silício ou silício amorfo.

O silício utilizado para fabricar as células fotovoltaicas é retirado do mineral quartzo e o Brasil é um dos principais produtores desse minério, porém a purificação do semicondutor e a fabricação das células é feita em outro país. (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Na Figura 10 é possível observar um cristal de quartzo bruto e um bloco de silício ultrapuro que podem ser aproveitados na indústria de eletrônicos semicondutores e, principalmente, na fabricação de células fotovoltaicas (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

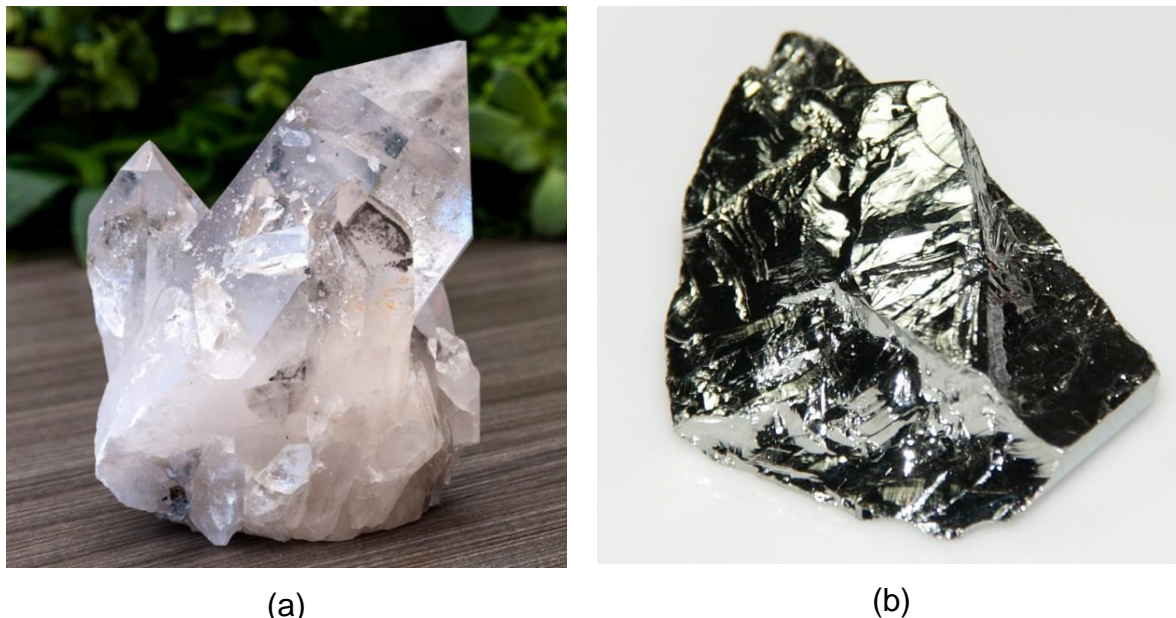


Figura 10 - (a) Cristal de quartzo e (b) bloco de silício ultrapuro.
Fonte: Figuras extraídas de (CRYSTAL MAGIC e VTM, 2018).

Após descrever a célula fotovoltaica, na próxima subseção, é apresentado o funcionamento do painel fotovoltaico, focando nos dois tipos de painéis mais utilizados de silício mono e policristalino.

2.4 Painel fotovoltaico

O painel ou módulo fotovoltaico é composto por várias células fotovoltaicas agrupadas. A quantidade de células depende da tensão e da corrente utilizadas no sistema. É preciso ter muita atenção na hora de selecionar as células a serem agrupadas na fabricação do módulo devido às suas características elétricas. Elas podem ser agrupadas em série ou em paralelo, levando em conta a corrente e tensão desejadas para o sistema (SILVA, 2014). Na Figura 11 é apresentada a relação corrente e tensão, bem como os parâmetros elétricos que caracterizam os painéis: corrente de curto-circuito (I_{sc}), corrente para máxima potência (I_{max}), tensão para máxima potência (V_{max}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Na Figura 12 é possível

visualizar a potência máxima (P_{mpp}) para um painel genérico. Todos esses parâmetros são fornecidos pelos fabricantes dos painéis.

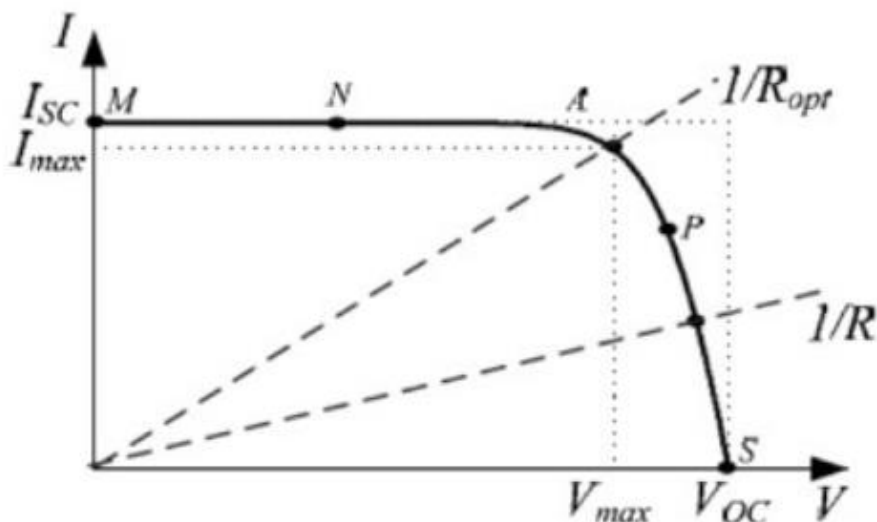


Figura 11 - Curva I-V de um painel genérico.
Fonte: Figura extraída de (PAGINASPE, 2008).

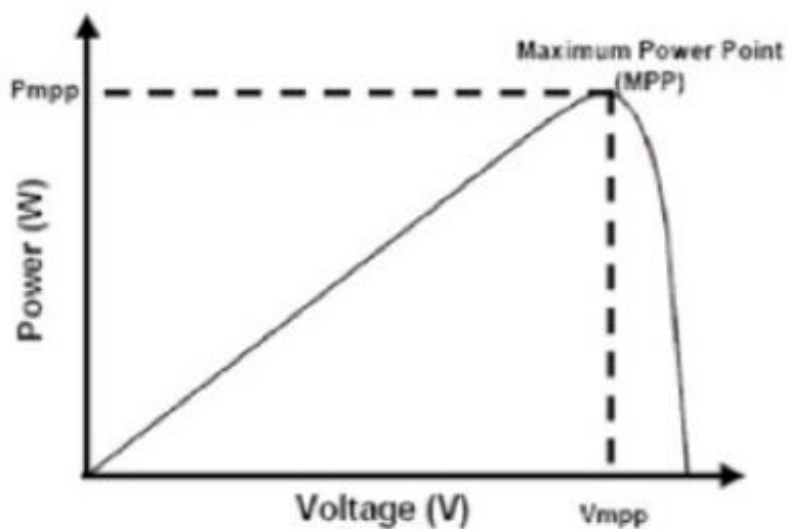


Figura 12 - Curva P-V de um painel genérico.
Fonte: Figura extraída de (PAGINASPE, 2008).

Para conexões feitas em série, conforme ilustrado na Figura 13, a tensão resultante é a soma das tensões de cada célula presente no sistema, entretanto a corrente permanece a mesma.

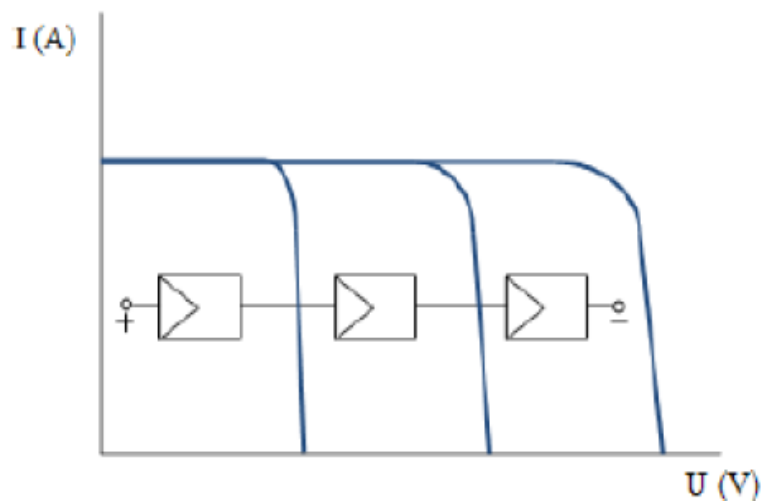


Figura 13 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em série.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014).

A tensão resultante para as ligações em paralelo, conforme ilustrado na Figura 14, permanece a mesma, contudo a corrente resultante é a soma de todas as correntes de cada célula individualmente.

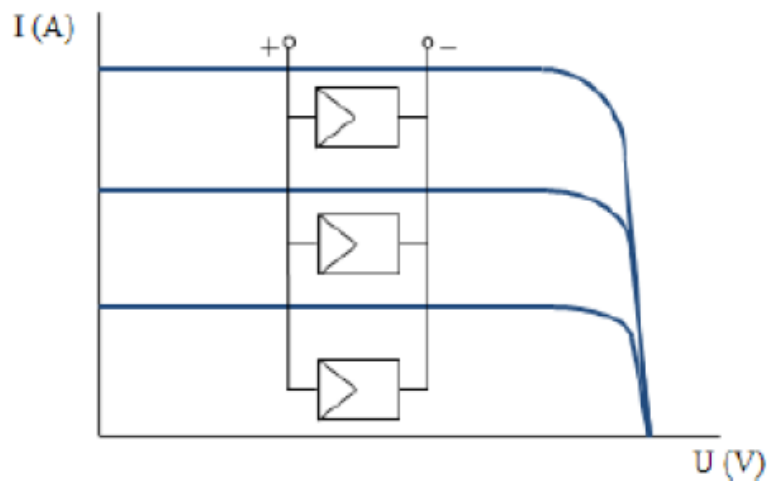


Figura 14 - Curva característica corrente-tensão de células conectadas em paralelo.

Fonte: Figura extraída de (SILVA, 2014).

As células fotovoltaicas são ligadas em série para quando se quer aumentar a tensão do sistema fotovoltaico. Para isso elas precisam ter a mesma corrente. Tem-se que quanto maior for a tensão, menor as perdas de energia na instalação (MPPTSOLAR, 2018).

Para as células fotovoltaicas ligadas em paralelo, é possível um aumento da produção de corrente e elas podem ter a mesma tensão. Porém é preciso tomar

cuidado com o valor da soma das correntes, pois caso chegue a ser maior que 70 A, os painéis solares podem sofrer danos e problemas relacionados a corrente (MPPTSOLAR, 2018).

Nas próximas subseções serão apresentados dois tipos de painel solar fotovoltaico, o silício monocristalino e o silício policristalino.

2.4.1 Painel fotovoltaico de silício monocristalino

As vantagens ao utilizar o painel solar fotovoltaico monocristalino é que possuem eficiência alta, entre 15 e 22%, porém é uma tecnologia mais antiga. Necessitam de menos espaço para gerar a mesma quantidade de energia elétrica. Possuem uma garantia de 25 anos e sua vida útil é maior que 30 anos. Sua tendência é ter um melhor funcionamento do que os painéis solares policristalinos em condições de pouca radiação. Contudo, suas desvantagens, são que a eficiência de suas células fotovoltaicas individuais é maior que o painel solar como um todo e são considerados os mais caros (PORTAL SOLAR, 2018).

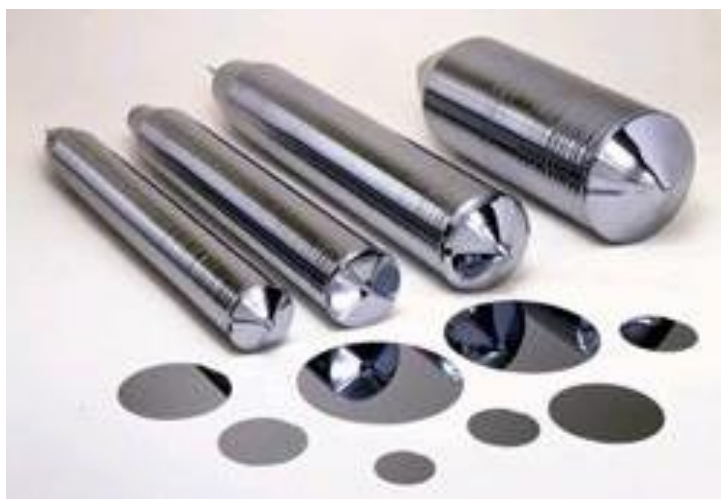


Figura 15 - Lingotes de silício monocristalino.

Fonte: Figura extraída de (NEW HOME, 2018).

O silício passa por um processo de formação de cristal após ser aquecido a altas temperaturas, aproximadamente 1000°C , chamado método de Czochralski, desenvolvido pelo químico polonês Jan Czochralski. Ele é fundido com, normalmente, uma quantidade pequena de boro do tipo p formando um cilindro de silício monocristalino, como ilustrado na Figura 15, chamado lingote (CRESESB, 2008). O

lingote de silício monocristalino possui uma estrutura cristalina única e organização molecular homogênea, por isso o aspecto brilhante e uniforme (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Em seguida corta-se o cilindro em fatias finas de aproximadamente 0,3 mm, chamadas de *wafers*, como ilustrado na Figura 16, e limpa-se todas as impurezas dessas fatias. Esses *wafers* são feitos através de uma difusão expondo ao vapor de fósforo em um forno com a temperatura variando entre 800 e 900°C e não possuem as características de uma célula fotovoltaica (BLUESOL, 2017).



Figura 16 - *Wafer* de silício monocristalino.
Fonte: Figura extraída de (INDIAMART,2018).

Eles são, então, sujeitos a processos químicos onde recebem impurezas nas duas faces e, assim, formam as camadas de silício p e n, que compõem a base para o funcionamento da célula fotovoltaica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

E por fim, a célula recebe uma camada de material antirreflexivo na face que incide a luz. Suas laterais são cortadas para remover qualquer causador de um curto-circuito (BLUESOL, 2017). Após todo esse processo, a célula fotovoltaica monocristalina encontra-se pronta para confeccionar o painel. A célula final pode ser visualizada na Figura 17.



Figura 17 - Célula fotovoltaica de silício monocristalino.
Fonte: Figura extraída de (THE UNITED SOLAR, 2018).

Após o término de fabricação da célula, a mesma apresenta uma aparência uniforme e normalmente azulado escuro ou preto. Mas pode ser que tenha alguma coloração diferente, pois depende do tipo de tratamento antirreflexivo que recebe (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A célula é considerada a vida do painel, pois é ela que transforma a luz solar em energia elétrica através de uma reação físico-química. As células são interconectadas e colocadas sobre o vidro, formando o módulo solar fotovoltaico. São as células que correspondem mais de 50% do custo do painel (PORTAL SOLAR, 2018).

2.4.2 Painel fotovoltaico de silício policristalino

Ao escolher o painel solar fotovoltaico policristalino, suas vantagens é que possuem a mesma vida útil que os painéis solares monocristalino. Geram uma quantidade de resíduos bem menor durante o procedimento de corte das células fotovoltaicas e são mais baratos que os painéis monocristalinos. Porém possuem desvantagens como uma eficiência menor, entre 14 e 20%, devido a uma pureza menor do polisilício. Ocupam uma área maior para gerar a mesma quantidade de energia dos painéis monocristalinos, porém não significa que o mono é melhor que o policristalino (PORTAL SOLAR, 2018).

A fabricação do silício policristalino é mais barato, porém é muito parecida com a do silício monocristalino. O silício é cortado em lingotes ou fitas, mostrado na Figura 18 (CRESESB, 2008). Em seguida, os lingotes são cortados em wafers e posteriormente, repete-se os passos da célula monocristalina, obtendo a célula fotovoltaica policristalina. Sua aparência é heterogênea com uma coloração azulada quando possui antirreflexo e cinza prateado quando não possui antirreflexo (SILVA, 2016). A célula fotovoltaica policristalina confeccionada como painel fotovoltaico pode ser visualizada na Figura 19.



Figura 18 - Lingote de silício policristalino.
Fonte: Figura extraída de (NAUKAS, 2011).



Figura 19 - Células fotovoltaicas de silício policristalino.
Fonte: Figura extraída de (SISTEL, 2016).

Após descrever os dois principais tipos de painéis solares fotovoltaicos, será apresentado na próxima subseção a influência da temperatura nos painéis.

2.5 Influência da temperatura no painel fotovoltaico

A geração de energia fotovoltaica pode ser influenciada por vários fatores, um deles é a temperatura. Alguns estudos estão sendo feitos para que a eficiência do painel aumente levando em conta esse fator e seja possível escolher o módulo fotovoltaico adequado para a situação real em que se encontra. Porém, ainda é difícil determinar a temperatura que o painel vai operar, pois vai depender da localização que está e das diferentes instalações (SILVA, 2016).

A influência da temperatura está na tensão que a placa fornece em seus terminais e na potência máxima para operação. Quando se tem variações de temperaturas, a tensão de saída varia drasticamente, já a corrente apresenta uma variação muito pequena (CANTOR, 2017). Essas variações podem ser visualizadas na Figura 20.

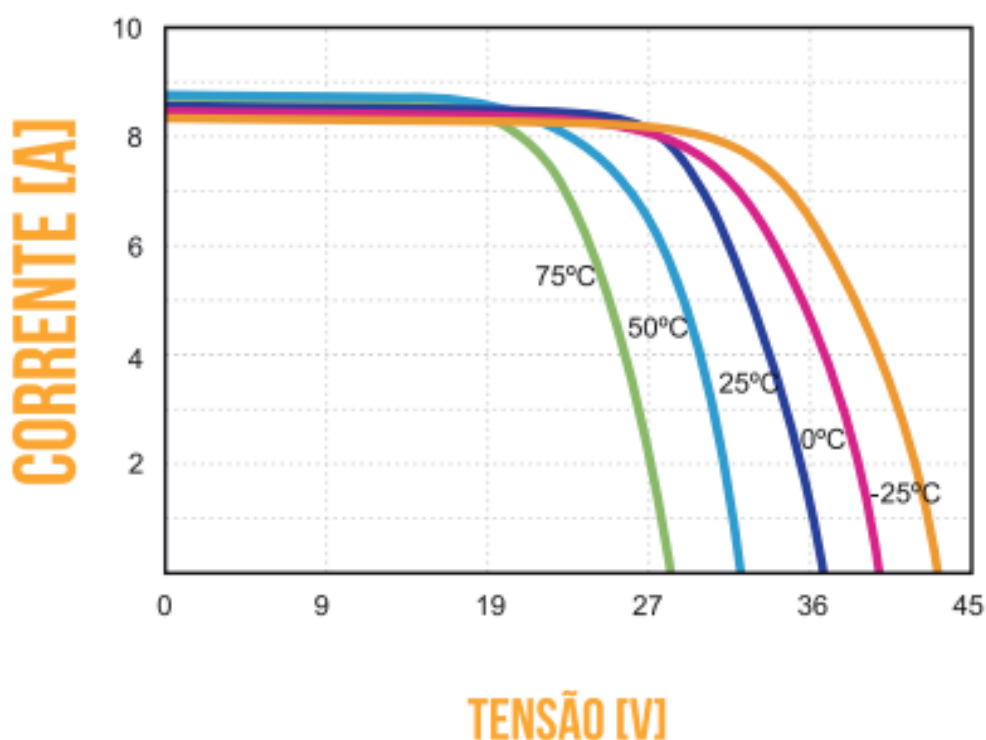


Figura 20 - Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico policristalino HMF60P.

Fonte: Figura extraída de (HELIUS, 2018).

Devido a diminuição do *gap*, mais fótons possuem energia suficiente para criar pares elétrons-lacunas e por isso a corrente de curto-circuito varia bem pouco quando a temperatura aumenta (CANTOR, 2017).

Na próxima subseção será descrito a influência da radiação solar nos painéis solares fotovoltaicos.

2.6 Influência da radiação solar no painel fotovoltaico

Um dos principais fatores que influencia a produção de energia nos sistemas fotovoltaicos é a radiação solar. O painel fotovoltaico fornece uma corrente elétrica que depende diretamente da intensidade da radiação solar incidente sobre as células. Por isso quanto maior a radiação solar incidindo nos painéis, o número de horas de sol e menor a massa de ar, maior será a energia de radiação disponível implicando em uma maior corrente elétrica produzida (CANTOR, 2017). A corrente máxima é fornecida quando a irradiância solar atinge 1000 W/m^2 , aproximadamente à uma temperatura de 25°C (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

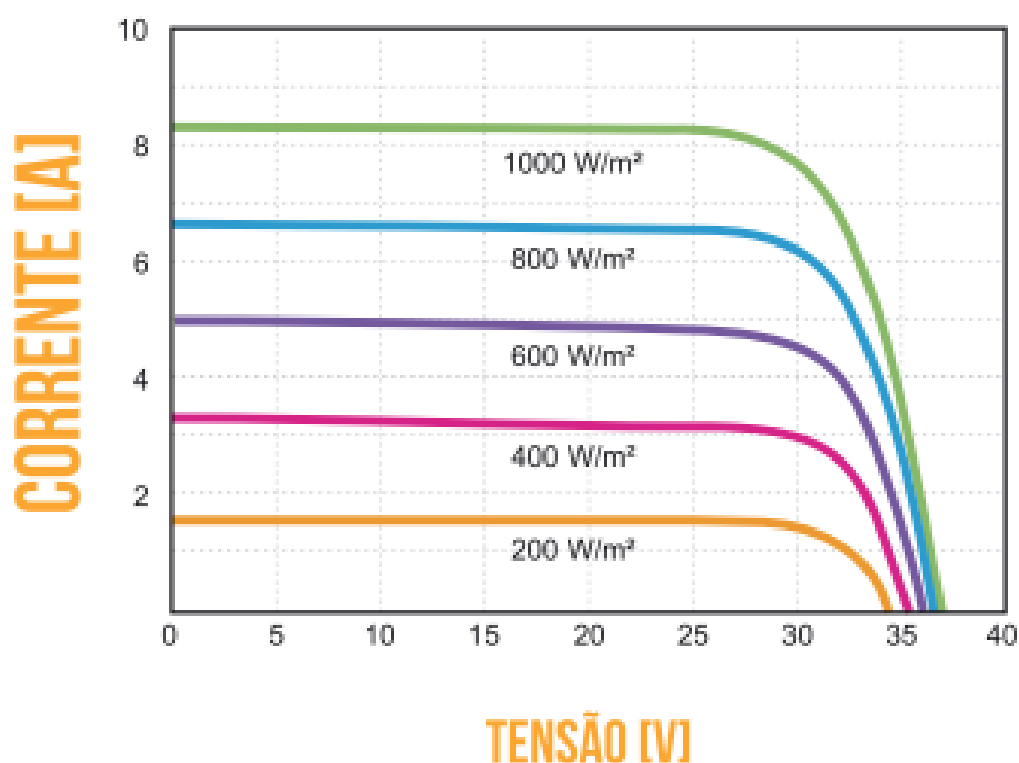


Figura 21 - Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico policristalino HMF60P

Fonte: Figura extraída de (HELIUS, 2018).

Quando se tem pouca luz, o painel fornece uma corrente muito pequena e a capacidade de gerar energia é reduzida. Por consequência disso, a corrente máxima que o painel pode fornecer varia proporcionalmente à irradiância (VILLALVA; GAZOLI, 2012). A Figura 21 mostra a intensidade da luz atuando na curva I-V do painel fotovoltaico.

Após a apresentação dos conceitos necessários para a compreensão da energia solar, bem como a conversão da radiação em energia elétrica utilizando um painel fotovoltaico. No próximo capítulo é exposta a metodologia desenvolvida para a modelagem de um painel fotovoltaico considerando os efeitos de radiação e temperatura de operação.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Neste capítulo é apresentado a metodologia desenvolvida para a modelagem elétrica de painéis fotovoltaicos em função da radiação solar e da temperatura de operação. A simulação foi implementada no *software* Matlab/Simulink.

3.1 Modelo elétrico do painel fotovoltaico

Após analisar os aspectos físicos que compõem um painel fotovoltaico, é possível explicá-lo de forma geral como um circuito elétrico, contendo uma fonte de corrente controlada pela radiação solar em paralelo com o diodo para que a modelagem da junção pn seja feita nas características do painel fotovoltaico. O esquema do circuito pode ser visualizado na Figura 22 (SILVA, 2016).

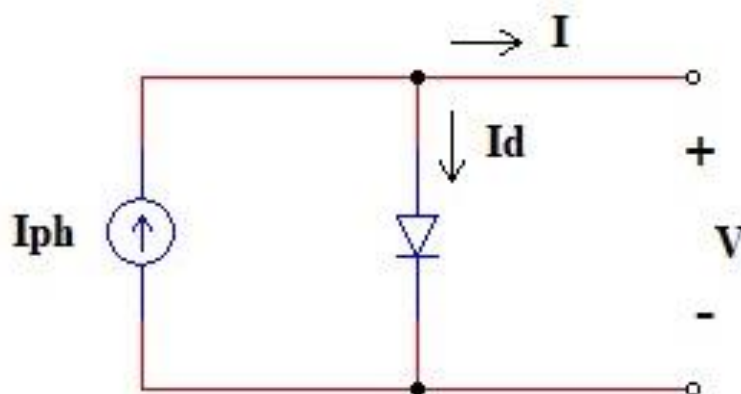


Figura 22 - Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico ideal.

Fonte: Figura adaptada de (SILVA, 2016).

O circuito do painel representado na Figura 22 não possui as resistências série e *shunt* (em paralelo), isto é, este circuito é considerado um circuito ideal, não leva em conta as perdas associadas aos fios e demais efeitos que aparecem na confecção do painel. Como forma de deixar o circuito elétrico do painel mais próximo do real, na Figura 23 tem-se a inclusão dos dois resistores R_s e R_{sh} .

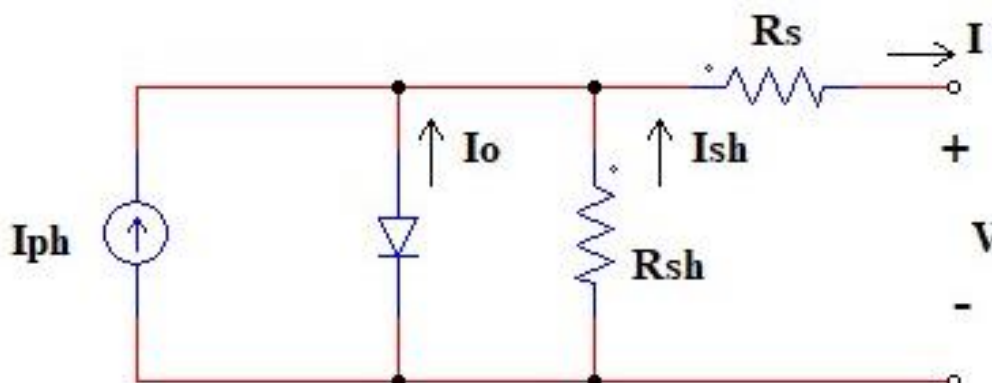


Figura 23 - Circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico, incluindo os resistores R_s e R_{sh} .

Fonte: Figura adaptada de (SILVA, 2016).

A fotocorrente, I_{ph} , representada no circuito da Figura 23, é uma fonte de corrente que altera de acordo com a variação da temperatura e da radiação solar encontradas no painel. Para simular o comportamento não-linear dependente da temperatura do painel e sua condição de funcionamento foi inserido um diodo em paralelo com essa fonte de corrente. E as duas resistências caracterizam a corrente de fuga, R_s , na saída e as perdas de condução, R_{sh} , em paralelo com o diodo (SILVA, 2016). A metodologia desenvolvida aqui baseou-se nos trabalhos de (PINTO, 2016) e (FRANCO, 2018).

3.2 Fonte de Corrente Dependente (I_{ph})

A fotocorrente, I_{ph} , é uma fonte de corrente que varia de acordo com a temperatura e a radiação solar identificada no painel. Essa corrente é representada pela Equação 2,

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i(T - 298)] \frac{G}{G_{ref}}, \quad (2)$$

em que I_{ph} é a fotocorrente (A), I_{sc} é a corrente de curto circuito (A), k_i é o coeficiente de temperatura encontrada nos *datasheets* dos painéis fotovoltaicos, T é a temperatura de operação do painel (K), G é a radiação solar (W/m^2) e G_{ref} é a radiação solar a uma temperatura de $25^\circ C$, que equivale a $1000 W/m^2$ (FRANCO, 2018).

3.3 Corrente de saturação (I_0)

A corrente de saturação é representada pela variável I_0 , e corresponde a corrente reversa do diodo. Ela sofre alterações de acordo com a variação da temperatura, como visto na Equação 3,

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 e^{\frac{qE_{g0}}{nK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}, \quad (3)$$

em que I_0 é a corrente de saturação (A), I_{rs} é a corrente de saturação reversa (A), T_n é a temperatura nominal (25 °C), q é a carga do elétron ($1,602 \times 10^{-19}$ C), E_{g0} é a energia de *gap* (1,12 eV para o semicondutor silício), n é o fator de idealidade do diodo, o qual depende do material e da constituição física do diodo; e K é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) (FRANCO, 2018).

A corrente de saturação reversa, I_{rs} , é uma constante que possui características do painel fotovoltaico, como mostra a Equação 4,

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{qV_{oc}}{nN_sKT} \right)} - 1}, \quad (4)$$

em que V_{oc} é a tensão de circuito aberto e N_s é o número de células conectadas em série (FRANCO, 2018).

O diodo em paralelo com a fonte apresenta um comportamento não-linear devido a influência da temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a corrente. A Equação 5 mostra a equação associada ao diodo,

$$I_d = I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nN_sKT}} - 1 \right]. \quad (5)$$

3.4 Corrente de saída (I)

A corrente de saída depende de muitos fatores, incluindo, também, a temperatura de operação e a radiação incidente no painel, como visto na Equação 6,

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{nN_sKT}} - 1 \right] - I_{sh}. \quad (6)$$

A corrente I_{sh} , é a corrente que passa pelo resistor *shunt* e pode ser calculada pela Equação 7, no qual é necessário saber o valor do resistor *shunt* e do resistor série.

$$I_{sh} = \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right). \quad (7)$$

em que R_s é a resistência série e R_{sh} é a resistência *shunt*. A Equação 6 representa o comportamento elétrico do painel fotovoltaico e para obter sua curva I-V é necessário resolver esta equação. Entretanto, a mesma é um tipo de equação transcendental, e não possui uma solução analítica definida. Assim, torna-se necessário a utilização de métodos numéricos para simular o comportamento elétrico do painel fotovoltaico. Desse modo, decidiu-se neste trabalho, implementar a simulação no *software* Matlab/Simulink visando a resolução da Equação 6. Os passos utilizados na obtenção do circuito elétrico do painel, via *software*, são apresentados na próxima seção.

3.5 Implementação do painel fotovoltaico em Matlab/Simulink

De posse das equações apresentadas, pode-se implementar o comportamento elétrico do painel fotovoltaico no *software* Matlab/Simulink. A partir da simulação é possível obter os gráficos de tensão-corrente (I-V) e potência-tensão (P-V) considerando os valores de radiação solar e de temperatura de operação do painel.

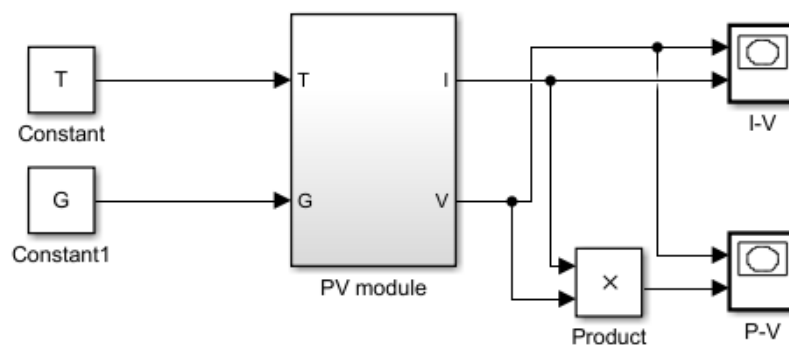


Figura 24 - Painel fotovoltaico implementado no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Na Figura 24 pode-se visualizar o painel fotovoltaico implementado no *software* Matlab/Simulink. O PV *module* possui subsistemas com as expressões matemáticas apresentadas nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4.

Na Figura 25 observa-se os subsistemas de cada equação, I_{ph} , I_0 , I_{rs} , I_{sh} e I que são necessárias para a simulação do funcionamento do painel fotovoltaico. Ele recebe temperatura e radiação solar como parâmetro.

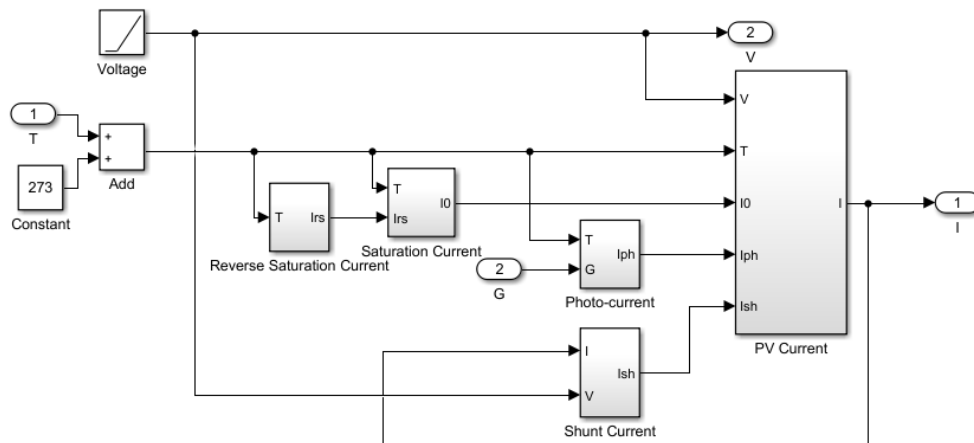


Figura 25 - Subsistemas do PV *module*.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

A Figura 26 apresenta a equação da corrente de saturação reversa implementada, Equação 4. Ela possui a temperatura como parâmetro de entrada e as variáveis q , V_{oc} , n , N_s , K que são definidas como constantes.

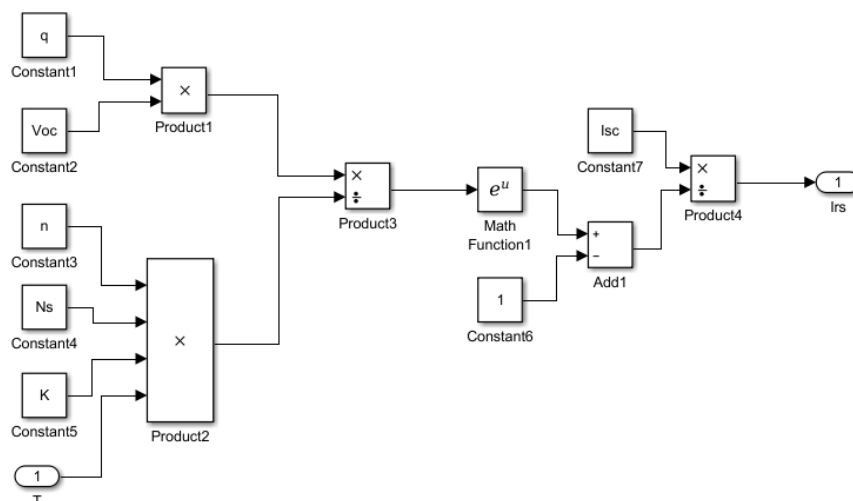


Figura 26 - Equação 4 da corrente de saturação reversa implementada no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Na Figura 27 foi implementada a equação da corrente de saturação, Equação 3. Ela recebe o valor da temperatura do painel como parâmetro.

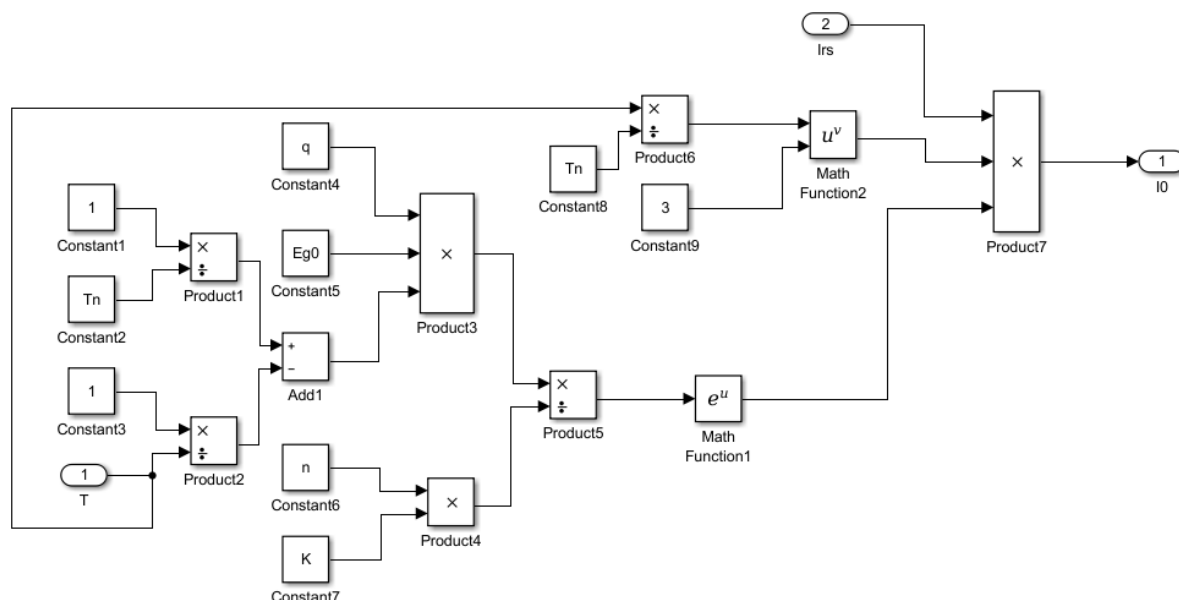


Figura 27 - Equação 3 da corrente de saturação implementada no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

A fonte de corrente dependente é modelada pelo esquema mostrado na Figura 28 e recebe como parâmetro a temperatura do painel dada em Kelvin.

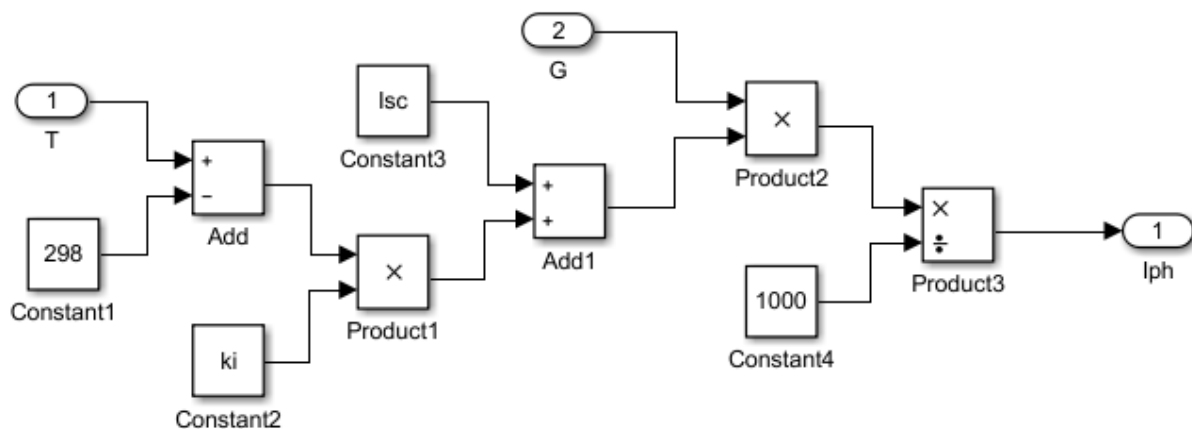


Figura 28 - Equação 2 da foto corrente implementada no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

A equação da corrente *shunt* que depende do resistor *shunt*, R_{sh} , foi implementada como pode ser visualizado na Figura 29.

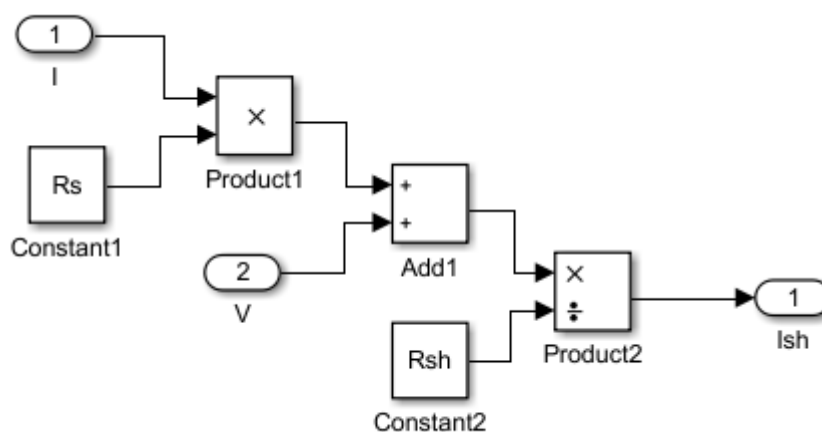


Figura 29 - Equação 7 da corrente *shunt* implementada no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

A Figura 30 mostra como a equação da corrente de saída foi implementada no *software*.

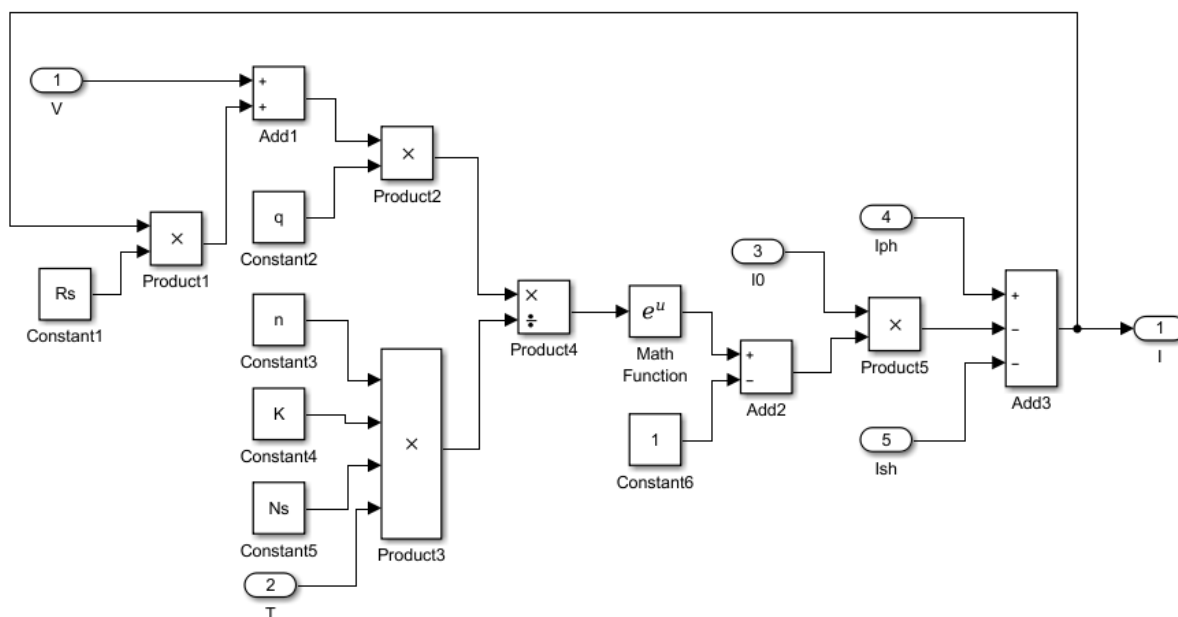


Figura 30 - Equação 6 da corrente de saída implementada no *software* Matlab/Simulink.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Após a implementação do painel fotovoltaico no *software* Matlab/Simulink foi possível simular as curvas de I-V e P-V utilizando os valores apresentados na Tabela 2 do painel fotovoltaico monocristalino CN-200S fabricado pela Xuzhou Superenergy.

Tabela 2 - Valores do painel fotovoltaico CN-200S da Xuzhou Superenergy.

Parâmetros	Valores
Potência máxima	200 W
Tensão para potência máxima	26,4 V
Corrente para potência máxima	7,58 A
Tensão de circuito aberto	33,2 V
Corrente de curto circuito	8,02 A
Eficiência do painel	13,6 %
Número total de células em série	54
Coefficiente de temperatura da corrente	0,0032 A/°C
Fator de idealidade do diodo	1,3
Resistência série	221 mΩ
Resistência <i>shunt</i>	415,4 Ω

Fonte: Tabela adaptada de (ENFSOLAR, 2018).

Na Figura 31 pode-se visualizar o comportamento da curva I-V do painel fotovoltaico CN-200S para diferentes valores de temperatura: 5°C, 25°C, 45°C e 65°C, mantendo a radiação solar constante, 1000 W/m². Verificou-se que para valores maiores de temperatura tem-se uma diminuição no valor da tensão, enquanto a corrente sofre um ligeiro aumento, implicando assim em uma redução da potência de operação do painel, conforme pode ser visualizado na Figura 32.

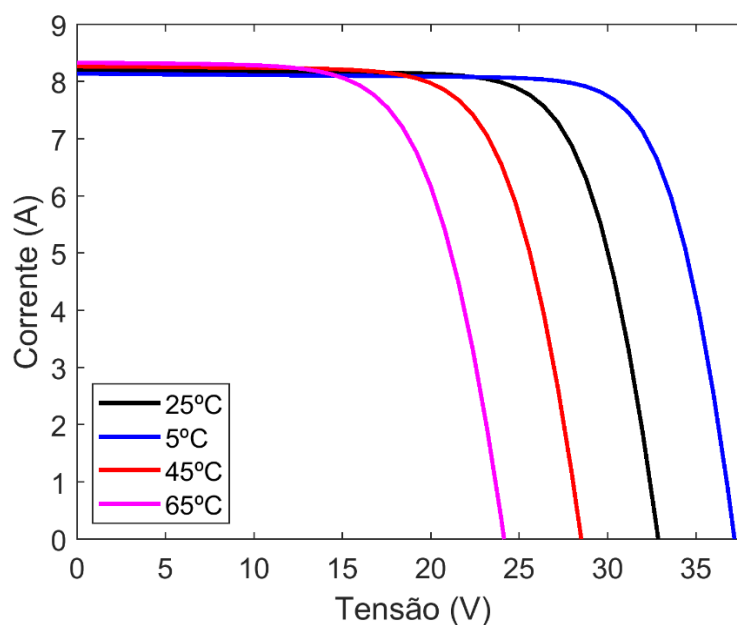


Figura 31 - Curvas I-V do painel CN-200S para diferentes valores de temperatura, 5°C, 25°C, 45°C e 65°C, mantendo a radiação solar constante, 1000 W/m².

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

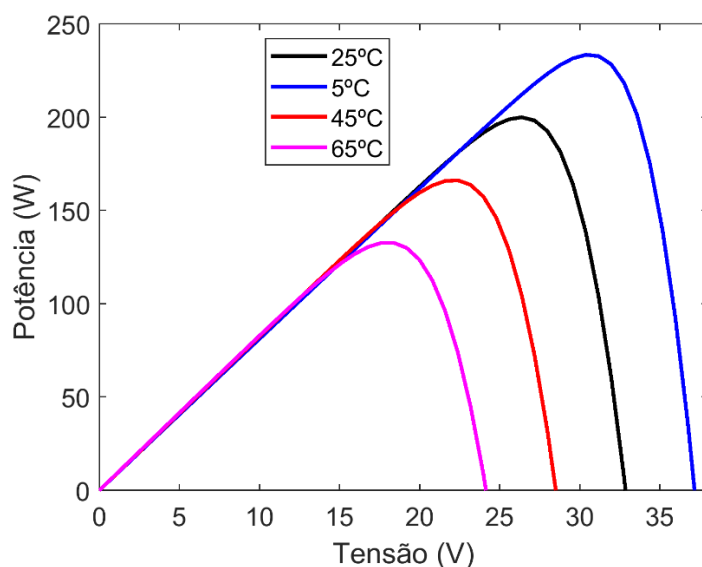


Figura 32 - Curvas P-V do painel CN-200S para diferentes valores de temperatura, 5°C, 25°C, 45°C e 65°C, mantendo a radiação solar constante, 1000 W/m².

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Na Figura 33 pode-se verificar a influência da radiação solar na curva I-V do painel fotovoltaico CN-200S, mantendo o valor da temperatura constante em 25°C. Diminuindo a intensidade da radiação solar nota-se uma redução mais drástica na corrente, e uma pequena redução na tensão. Implicando assim, em uma redução na potência de operação do painel, comportamento que pode ser visualizado na Figura 34.

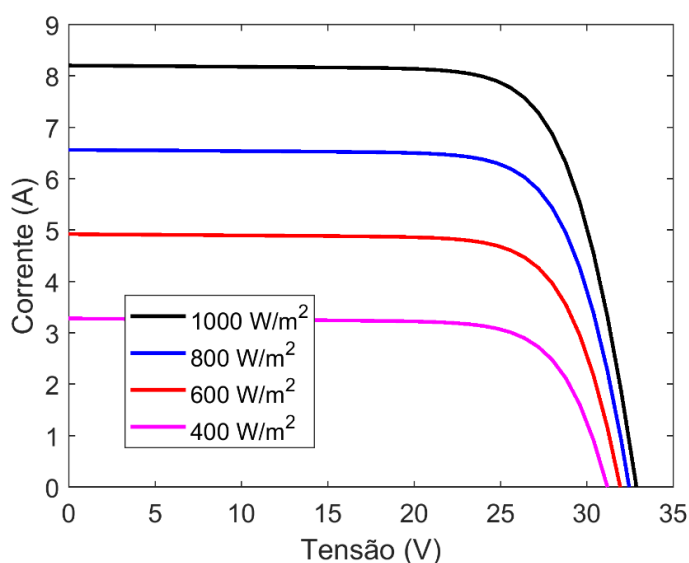


Figura 33 - Curvas I-V do painel CN-200S para diferentes valores de irradiação solar, 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m² e 400 W/m², mantendo a temperatura constante, 25°C.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Na Figura 35 pode-se verificar a curva I-V juntamente com a curva P-V, cujo procedimento é utilizado para obter o valor da potência máxima (P_m) de operação do painel, isto é, para o valor da tensão máxima (V_m) de operação tem-se a corrente máxima (I_m) do sistema. Esse procedimento é repetido, sempre que é necessário determinar a potência de operação do sistema.

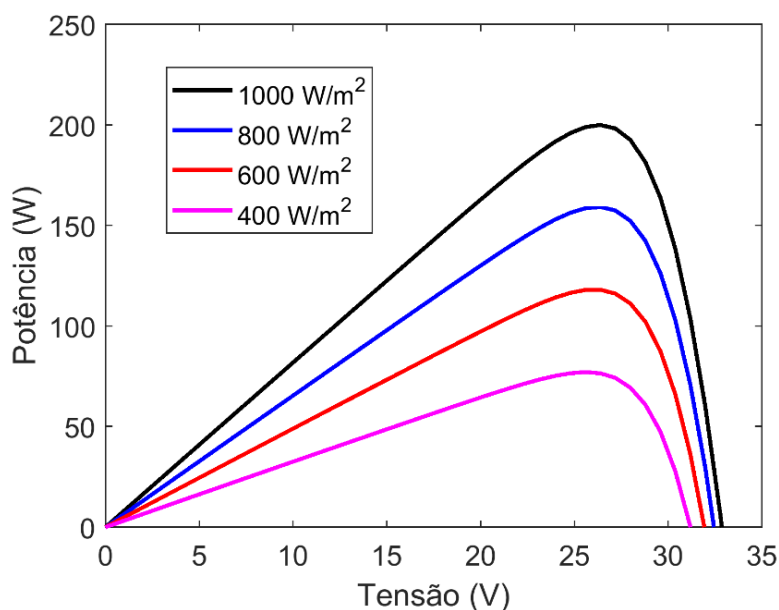


Figura 34 - Curvas P-V do painel CN-200S para diferentes valores de irradiação solar, 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m² e 400 W/m², mantendo a temperatura constante, 25°C.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

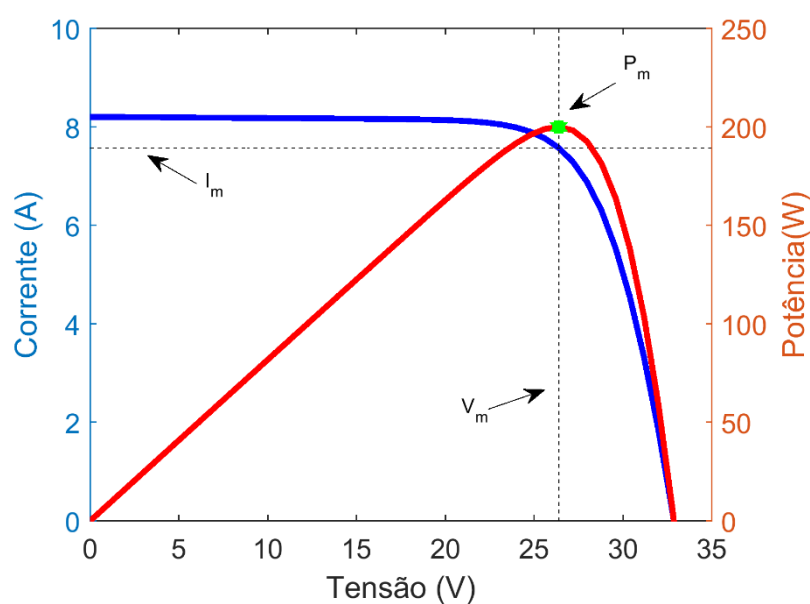


Figura 35 - Curva de obtenção da corrente, tensão e potência máximas.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Assim, apresentou-se neste capítulo a metodologia desenvolvida para a modelagem de painéis fotovoltaicos, levando em conta a influência da radiação solar e da temperatura. No próximo capítulo são apresentados os resultados e suas discussões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação do painel fotovoltaico implementado no *software* Matlab/Simulink. Primeiramente, verificou-se a validação da modelagem comparando as curvas obtidas pela simulação com as curvas do painel fotovoltaico policristalino CS6U-330P da Canadian Solar. Posteriormente, são apresentados dois exemplos de aplicação envolvendo os fatores radiação solar e temperatura.

4.1 Validação da metodologia desenvolvida para modelagem do painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico utilizado no trabalho para fins de validação da metodologia é CS6U-330P da Canadian Solar, que é um material que possui uma potência nominal de 330 W e sua tecnologia é o silício policristalino. As principais características utilizadas na simulação encontram-se na Tabela 3, e foram retiradas do *datasheet* do painel fabricado (ANEXO A).

Tabela 3 - Características do módulo fotovoltaico escolhido.

Fabricante	Canadian Solar
Modelo	CS6U-330P
Tecnologia	Policristalino
Eficiência	16,97%
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	45,6 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,45 A
Potência nominal (P_m)	330 W
Tensão para potência máxima (V_m)	37,2
Corrente para potência máxima (I_m)	8,88
Número de células em série (N_s)	72
Coefficiente de temperatura da corrente (k_i)	0,05 A/°C

Fonte: Tabela adaptada de (CANADIANSOLAR, 2018).

Tabela 4 - Parâmetros da modelagem do painel considerados na simulação.

Parâmetros	Valores
Energia de gap do silício (E_{g0})	1,12 eV
Fator de idealidade do diodo (n)	1,2
Resistência de <i>shunt</i> (R_{sh})	1000 Ω
Resistência série (R_s)	3 m Ω

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Com forma de validar a modelagem do painel fotovoltaico implementada utilizando o *software* Matlab/Simulink, comparou-se as curvas simuladas com as curvas I-V disponibilizados pelo fabricante Canadian Solar (ANEXO A), utilizando os valores apresentados na Tabela 3 e 4. A Tabela 4 mostra os valores utilizados na simulação, tais valores foram considerados após rodadas de simulações, isto é, os valores de n , R_{sh} e R_s foram ajustados para a simulação do painel em questão. Ressalta-se que não foi utilizado nenhuma heurística de otimização no cálculo destes parâmetros.

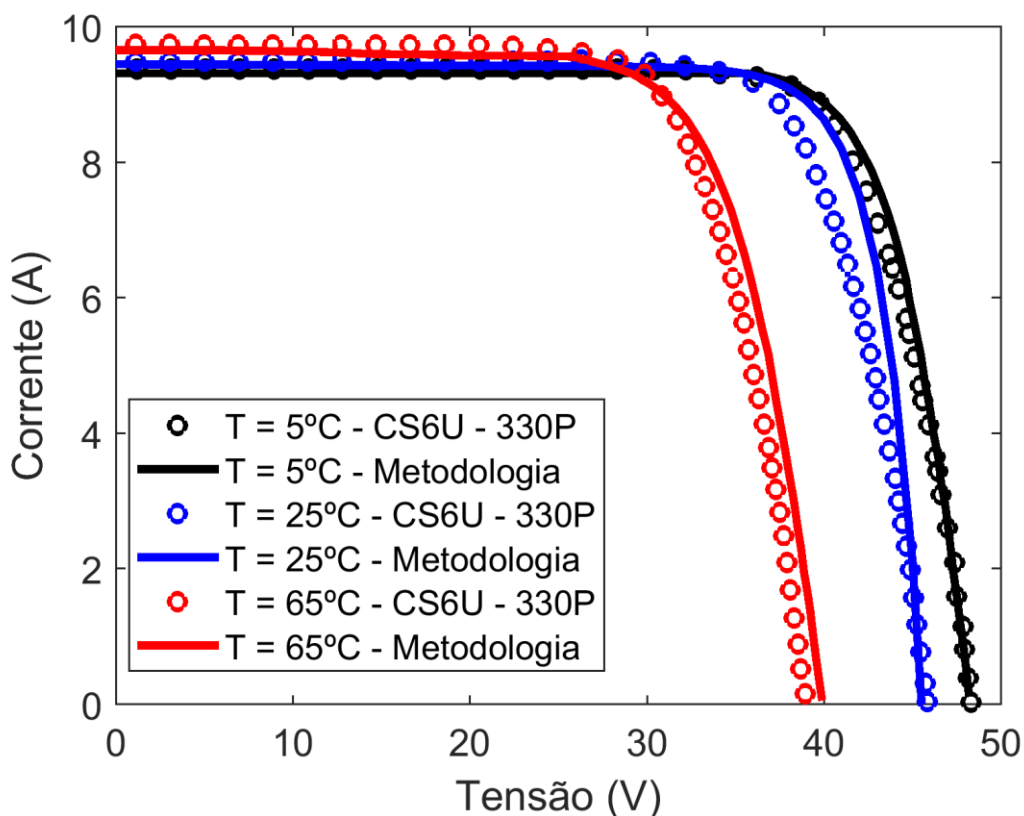


Figura 36 - Comparação entre as curvas I-V simulada (linha contínua) e experimental (círculos) para diferentes temperaturas, 5°C, 25°C e 65°C, mantendo a radiação solar em 1000 W/m².

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

O primeiro conjunto de curvas comparadas pode ser visualizado na Figura 36, e corresponde as curvas I-V para três valores distintos de temperatura, 5°C, 25°C e 65°C, mantendo o valor constante da radiação solar em 1000 W/m².

O fabricante disponibiliza também as curvas I-V para diferentes valores de radiação, 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m² e 400 W/m², mantendo a temperatura constante em 25°C, e a comparação entre as curvas simuladas e experimentais pode ser visualizada na Figura 37.

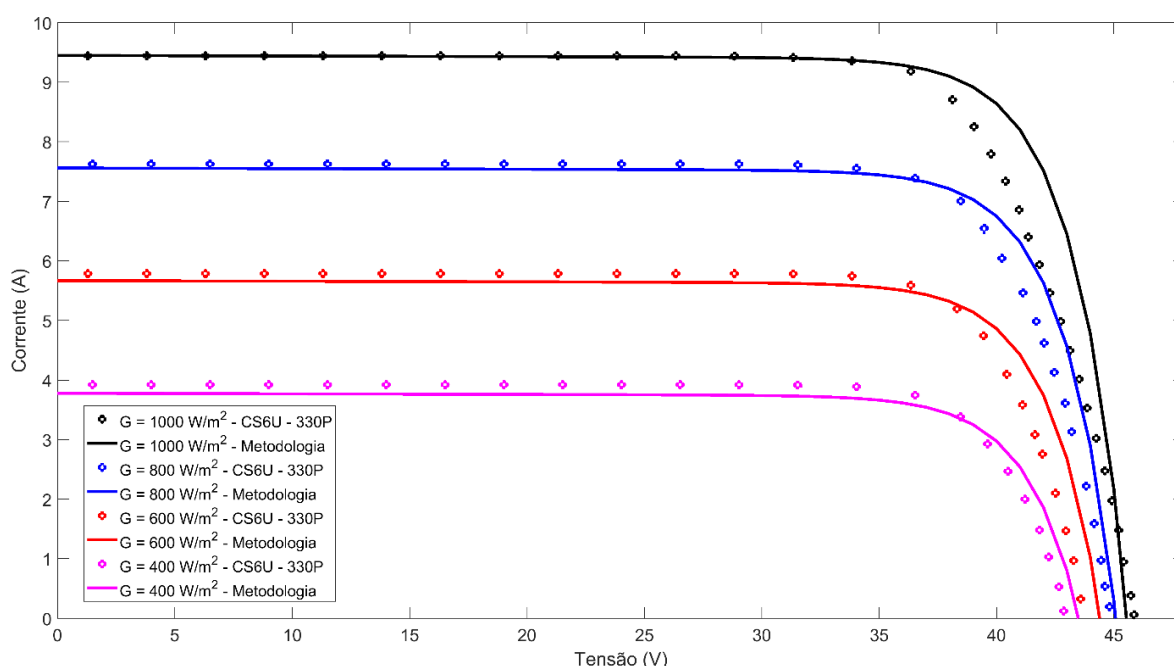


Figura 37 - Comparação entre as curvas I-V simulada (linha contínua) e experimental (círculos) para diferentes valores de radiação solar, 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m² e 400 W/m², mantendo a temperatura em 25°C.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Analisando as Figuras 36 e 37, pode-se verificar que as curvas simuladas se aproximam das curvas experimentais fornecidas pela fabricante. Visualmente, nota-se uma pequena diferença entre as curvas, isto deve-se a limitação da modelagem implementada. De acordo com Yahfdhou *et al.* (2016), uma forma de melhorar a modelagem do painel fotovoltaico é considerar o circuito elétrico composto por dois diodos em paralelo, incluindo algumas expressões mais completas para descrever os fenômenos físicos do painel fotovoltaico. Entretanto, a diferença nas curvas não impacta tanto no resultado final do painel, uma vez que o projetista deve utilizar os

valores de potência máxima do painel em função da temperatura e da radiação. Assim, nas Tabelas 5 e 6 são mostrados os valores de concordância obtidos entre as curvas simuladas e experimentais ilustradas nas Figuras 36 e 37.

Tabela 5 - Dados de concordância entre as características do manual e da simulação variando a temperatura.

Temperaturas para $G = 1000 \text{ W/m}^2$	Parâmetros	Datasheet CS6U – 330P	Simulado	Concordância (%)
5°C	I_{sc} (A)	9,38	9,32	99,4
	V_{oc} (V)	48,33	48,21	99,7
	I_m (A)	8,55	8,67	98,6
	V_m (A)	40,65	40,89	99,4
	P_m (W)	347,55	354,51	98,0
25°C	I_{sc} (A)	9,45	9,44	99,9
	V_{oc} (V)	45,6	45,5	99,8
	I_m (A)	8,89	9,19	96,7
	V_m (A)	37,4	36,02	96,3
	P_m (W)	332,53	331,02	99,5
65°C	I_{sc} (A)	9,74	9,66	99,2
	V_{oc} (V)	39,92	39,0	97,7
	I_m (A)	8,89	8,63	97,1
	V_m (A)	31,66	31,73	99,8
	P_m (W)	281,32	273,83	97,3

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Tabela 6 - Dados de concordância entre as características do manual e da simulação variando a radiação solar.

Irradiância para $T = 25^\circ\text{C}$	Parâmetros	Datasheet CS6U – 330P	Simulado	Concordância (%)
800 W/m^2	I_{sc} (A)	7,63	7,56	99,1
	V_{oc} (V)	44,8	45,0	99,6
	I_m (A)	7,12	7,32	97,3
	V_m (A)	37,27	37,0	99,3
	P_m (W)	265,23	270,84	97,9
600 W/m^2	I_{sc} (A)	5,79	5,67	97,9
	V_{oc} (V)	43,6	44,1	98,9
	I_m (A)	5,34	5,5	97,1
	V_m (A)	37,01	37,1	99,8
	P_m (W)	197,55	204,05	96,8
400 W/m^2	I_{sc} (A)	3,92	3,8	96,9
	V_{oc} (V)	42,86	43,2	99,2
	I_m (A)	3,56	3,53	99,2
	V_m (A)	36,5	36,6	99,7
	P_m (W)	129,86	129,2	99,5

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Como visto nas Tabelas 5 e 6, a menor concordância obtida foi de 96,3% e 96,8%, respectivamente. A partir destes resultados, pode-se concluir que a metodologia foi validada de forma satisfatória.

Após a validação da metodologia desenvolvida, nas próximas seções, são apresentadas aplicações do painel fotovoltaico implementado.

4.2 Exemplos de Aplicação

Nesta seção são apresentados dois exemplos de aplicação do painel fotovoltaico simulado. Lembrando que o painel considerado nesta parte do trabalho é o mesmo utilizado na validação da metodologia, o painel CS6U-330P da Canadian Solar.

Para o desenvolvimento dos exemplos de aplicação é necessário calcular a energia gerada pelo painel fotovoltaico e a temperatura de operação do módulo fotovoltaico.

A equação utilizada para estimar a geração de energia diária de um painel fotovoltaico considerando as perdas do sistema, é

$$E_g = HSP \cdot \frac{P_{op}(G, T_{op})}{1000} \cdot TD(1 - \rho), \quad (8)$$

onde: E_g é a energia gerada por um painel em um dia, considerando as perdas [kWh], HSP é a hora de Sol pleno diário médio [h/dia], P_{op} é a potência de operação [W] que é função da radiação G [W/m^2] e da temperatura de operação T_{op} do painel [$^{\circ}C$], este valor pode ser obtido utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3, TD é a taxa de desempenho do sistema [%], neste trabalho considerou-se o valor igual a 80% (SILVA E CALDAS, 2016), ρ é a perda percentual do sistema [%]. As perdas são geradas por diversas razões, tais como sujeira nos módulos, sombreamento, dados incorretos de placa, dentre outros. Aqui, considerou-se a perda do sistema igual a 18% (MIRANDA, 2014).

De acordo com o trabalho de Chenni et al. (2007), pode-se obter a temperatura de operação do painel fotovoltaico em função da temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar, por meio da seguinte expressão,

$$T_{op} = 0,943T_{amb} + 0,028G - 1,528WS + 4,3, \quad (9)$$

onde, T_{amb} é a temperatura ambiente [°C], G é a irradiância [W/m²] e WS é a velocidade do vento [m/s]. A seguir é apresentado o primeiro exemplo de aplicação.

4.2.1 Exemplo de Aplicação 1

Neste exemplo aplicou-se a modelagem do painel fotovoltaico em uma residência localizada na cidade de Formiga/MG, que possui um arranjo de 36 painéis CS6U-330P da Canadian Solar já instalados. Dessa forma, a unidade consumidora informou alguns valores lidos em instrumentos do sistema fotovoltaico conectado à rede. Assim, pode-se verificar a validade da metodologia desenvolvida neste trabalho, comparando os valores obtidos na simulação, com os valores disponibilizados pelo sistema. As informações disponibilizadas pelo sistema são: potência nominal instalada, potência efetiva média por dia e eficiência de geração de energia média do painel por dia.

Tabela 7 - Valores de irradiação solar diária, temperaturas mínima, máxima e média mensal da cidade de Formiga/MG.

Cálculo Plano Inclinado				
Meses	HSP (kWh/m².dia)	Temp. mínima (°C)	Temp. máxima (°C)	Temp. média (°C)
Jan	5,14	19	25	22
Fev	5,6	18	25	21,5
Mar	5,02	18	25	21,5
Abr	5,35	16	24	20
Mai	5,09	13	22	17,5
Jun	5,07	13	22	17,5
Jul	5,3	13	23	18
Ago	6,05	14	26	20
Set	5,65	16	27	21,5
Out	5,36	18	28	23
Nov	4,79	18	26	22
Dez	5,08	18	26	22
Média	5,29	-	-	-

Fonte: Tabela adaptada de (CRESESB, 2018).

Assim, 36 painéis instalados de 330 W de potência nominal, totaliza um sistema fotovoltaico conectado à rede de 11,88 kW. Entretanto, este valor não é sempre obtido na geração de energia elétrica durante o ano nesta residência. Para validar a metodologia desenvolvida aqui, com os valores obtidos pelo sistema, tem-se que considerar, primeiramente, os dados apresentados na Tabela 7, que apresentam a HSP, temperatura mínima, máxima e média para a cidade de Formiga/MG.

Para realizar os cálculos necessários considerou-se as seguintes informações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Informações da cidade de Formiga/MG utilizadas nos cálculos de geração de energia.

Mês de Outubro	
Temperatura ambiente	24°C
Velocidade do vento (WS)	2.5 m/s
Radiação solar (G)	1000 W/m ²
HSP	5,36 kWh/m ² .dia
TD	80%
ρ	18%

Fonte: Tabela adaptada de (FERREIRA, 2016); (CRESESB, 2018) e (CLIMATEMPO, 2018).

Primeiramente calculou-se a temperatura de operação do módulo, para que posteriormente fosse possível a extração do valor de potência máxima utilizando a metodologia apresentada no Capítulo 3. Utilizando os valores da Tabela 8, e substituindo na Equação 9, pode-se calcular a temperatura de operação do módulo,

$$T_{op} = 0,943(24) + 0,028(1000) - 1,528(2,5) + 4,3,$$

$$T_{op} = 51,112^{\circ}\text{C}.$$

Para essa temperatura de operação, a potência máxima obtida no painel foi de 299,24 W. Assim, é possível obter a energia gerada por dia pelo painel para as condições de operação,

$$E_g = 5,36 \cdot \frac{299,24}{1000} \cdot 0,8(1 - 0,18),$$

$$E_g = 1,052 \text{ kWh/dia}.$$

De posse do valor de energia gerada por dia pelo painel, pode-se comparar com o mesmo valor fornecido pelo sistema instalado que é de 3,18 kWh/kW/dia para o dia 24 de outubro de 2018. Não foi incluído as imagens do aplicativo que indicam estas informações, por possuírem informações pessoais do proprietário da unidade consumidora. Para calcular a eficiência da energia gerada é preciso dividir o valor da potência gerada pela potência máxima obtida pela simulação no *software* Matlab/Simulink,

$$Eficiência = \frac{1,052 \times 10^3}{299,24} = 3,51 \text{ kWh/kW/dia.}$$

Comparando o valor simulado com o valor obtido pela residência, tem-se uma concordância de 90,6% para a eficiência da energia gerada pelo painel. Outra forma de validar a metodologia, é calcular a potência média disponibilizada pelo painel, 271 W com o valor obtido pela simulação, 299,24 W, que dá uma concordância de 90,6%.

Na próxima subseção aplicou-se a modelagem do painel fotovoltaico em outro exemplo.

4.2.2 Exemplo de Aplicação 2

Nesta seção é aplicado a modelagem do painel fotovoltaico com influência da temperatura e da radiação solar no trabalho desenvolvido por Eduardo (2018). Seu trabalho foi um estudo comparativo entre o potencial de geração fotovoltaica da cidade de Formiga/MG com três cidades localizadas em países referências: China, Japão e Alemanha. As quatro cidades selecionadas no trabalho foram Formiga no Brasil, Guiyang na China, Shimogou no Japão e Göttingen na Alemanha e podem ser visualizadas na Figura 38.



Figura 38 - Localização das cidades analisadas.

Fonte: Figura extraída de (EDUARDO, 2018).

No trabalho de (EDUARDO, 2018), o autor não levou em consideração a alteração na potência do painel em função da temperatura e da radiação, utilizando assim o valor nominal da potência do painel. Como neste trabalho, a validação da metodologia foi no painel CS6U-330P da Canadian Solar, considerou-se o mesmo para a realização dos cálculos.

Tabela 9 - Dados obtidos da cidade de Formiga – Brasil.

Meses	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{nominal} (W)	$E_{g,\text{nominal}}$ (kWh/mês)
Jan	31	5,65	330	37,4425161
Fev	28	6,21	330	37,1710231
Mar	31	5,13	330	33,9964792
Abr	30	4,83	330	30,9758526
Mai	31	4,52	330	29,9540129
Jun	30	4,43	330	28,4105646
Jul	31	4,65	330	30,8155221
Ago	31	5,45	330	36,1171173
Set	30	5,53	330	35,4651066
Out	31	5,48	330	36,3159271
Nov	30	5,27	330	33,7976694
Dez	31	5,32	330	35,2556081

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Nas Tabelas 9, 10, 11 e 12 são apresentados os valores de potência nominal do painel (330 W), HSP, a quantidade de dia em cada mês do ano e o valor de energia gerada pelo painel nominal utilizando a Equação 8, para as cidades de Formiga/Brasil, Göttingen/Alemanha, Guiyang/China e Shimogou/Japão respectivamente. Considerou-se o valor de TD igual a 80%, o valor de p igual a 18%, o valor de radiação solar (G) igual a 1000 W/m² e o WS foi de 2,5 m/s.

Tabela 10 - Dados obtidos da cidade de Göttingen – Alemanha.

Meses	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{nominal} (W)	E_{g,nominal} (kWh/mês)
Jan	31	0,65	330	4,3075461
Fev	28	1,36	330	8,14051392
Mar	31	2,39	330	15,83851566
Abr	30	3,77	330	24,1778394
Mai	31	4,65	330	30,8155221
Jun	30	5,07	330	32,5150254
Jul	31	4,97	330	32,93616018
Ago	31	4,16	330	27,56829504
Set	30	2,83	330	18,1494126
Out	31	1,61	330	10,66946034
Nov	30	0,73	330	4,6816506
Dez	31	0,45	330	2,9821473

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Tabela 11 - Dados obtidos da cidade de Guiyang – China.

Meses	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{nominal} (W)	E_{g,nominal} (kWh/mês)
Jan	31	1,77	330	11,72977938
Fev	28	2,21	330	13,22833512
Mar	31	2,42	330	16,03732548
Abr	30	3,03	330	19,4320566
Mai	31	3,68	330	24,38733792
Jun	30	3,63	330	23,2799886

Jul	31	4,23	330	28,03218462
Ago	31	4,42	330	29,29131348
Set	30	3,97	330	25,4604834
Out	31	3,13	330	20,74249122
Nov	30	2,77	330	17,7646194
Dez	31	2,13	330	14,11549722

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Tabela 12 - Dados obtidos da cidade de Shimogou – Japão.

Meses	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{nominal} (W)	E_{g,nominal} (kWh/mês)
Jan	31	2,39	330	15,8385157
Fev	28	3,32	330	19,872431
Mar	31	3,94	330	26,1103564
Abr	30	4,70	330	30,142134
Mai	31	4,81	330	31,8758411
Jun	30	4,27	330	27,3844494
Jul	31	4,55	330	30,1528227
Ago	31	4,32	330	28,6286141
Set	30	3,43	330	21,9973446
Out	31	2,84	330	18,820663
Nov	30	2,43	330	15,5841246
Dez	31	2,13	330	14,1154972

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Após a análise das Tabelas 9, 10, 11 e 12, somou-se a energia gerada nominal em cada mês ao longo do ano, obtendo a energia gerada nominal total anual para as quatro cidades, conforme mostrado na Tabela 13.

Em seguida, foi levado em conta a temperatura de operação, Equação 9, para obter o valor da potência do painel simulado neste trabalho, frisando que a potência difere da potência nominal (330 W) utilizada nas Tabelas 9, 10, 11 e 12. Foram feitos, então, novos cálculos, para calcular a energia gerada de operação. Assim, precisou-se de informações como a temperatura ambiente média ($T_{ambiente}$), a temperatura de operação média (T_{op}), HSP, para calcular a potência de operação (P_{op}) e a energia

gerada de operação ($E_{g,op}$). Os valores de TD, G e WS foram mantidos. As informações obtidas são apresentadas nas Tabelas 14, 15, 16 e 17 para as localidades em questão.

Tabela 13 - Energia gerada nominal total anual para as quatro cidades.

Localidades	$E_{g,nominal}$ (kWh/ano)
Formiga/Brasil	405,717399
Göttingen/Alemanha	212,7820886
Guiyang/China	243,5014124
Shimogou/Japão	280,522794

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Tabela 14 - Dados obtidos da cidade de Formiga – Brasil.

Meses	$T_{ambiente}$ (°C)	T_{op} (°C)	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{op} (W)	$E_{g,op}$ (kWh/mês)
Jan	23	50,169	31	5,65	300,45	34,089709
Fev	24	51,112	28	6,21	299,24	33,7062332
Mar	23	50,169	31	5,13	300,45	30,952249
Abr	22	49,226	30	4,83	301,66	28,3156839
Mai	20	47,34	31	4,52	304,08	27,6012613
Jun	18	45,454	30	4,43	306,5	26,387388
Jul	18	45,454	31	4,65	306,5	28,6210834
Ago	20	47,34	31	5,45	304,08	33,2802819
Set	21	48,283	30	5,53	302,87	32,549445
Out	23	50,169	31	5,48	300,45	33,0640009
Nov	22	49,226	30	5,27	301,66	30,8951665
Dez	21	48,283	31	5,32	302,87	32,3571698

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Tabela 15 - Dados obtidos da cidade de Göttingen – Alemanha.

Meses	$T_{ambiente}$ (°C)	T_{op} (°C)	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{op} (W)	$E_{g,op}$ (kWh/mês)
Jan	1	29,423	31	0,65	326,94	4,2676034
Fev	1	29,423	28	1,36	326,94	8,0650292

Mar	5	33,195	31	2,39	322,15	15,461751
Abr	8	36,024	30	3,77	318,55	23,338942
Mai	13	40,739	31	4,65	312,53	29,184167
Jun	15	42,625	30	5,07	310,12	30,556241
Jul	18	45,454	31	4,97	306,5	30,590706
Ago	18	45,454	31	4,16	306,5	25,605098
Set	14	41,682	30	2,83	311,33	17,122596
Out	10	37,91	31	1,61	316,14	10,221343
Nov	5	33,195	30	0,73	322,15	4,5702841
Dez	3	31,309	31	0,45	324,54	2,9328063

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Tabela 16 - Dados obtidos da cidade de Guiyang – China.

Meses	T_{ambiente} (°C)	T_{op} (°C)	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{op} (W)	E_{g, op} (kWh/mês)
Jan	8	36,024	31	1,77	318,55	11,322792
Fev	11	38,853	28	2,21	314,94	12,624642
Mar	15	42,625	31	2,42	310,12	15,071198
Abr	20	47,34	30	3,03	304,08	17,905757
Mai	24	51,112	31	3,68	299,24	22,114142
Jun	26	52,998	30	3,63	296,81	20,938586
Jul	28	54,884	31	4,23	294,39	25,007257
Ago	27	53,941	31	4,42	295,6	26,237916
Set	24	51,112	30	3,97	299,24	23,087258
Out	20	47,34	31	3,13	304,08	19,113263
Nov	15	42,625	30	2,77	310,12	16,694436
Dez	9	36,967	31	2,13	317,35	13,574403

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Tabela 17 - Dados obtidos da cidade de Shimogou – Japão.

Meses	T_{ambiente} (°C)	T_{op} (°C)	Quantidade de dias	HSP (h/dia)	P_{op} (W)	E_{g, op} (kWh/mês)
Jan	1	29,423	31	2,39	326,94	15,691649

Fev	2	30,366	28	3,32	325,74	19,615896
Mar	5	33,195	31	3,94	322,15	25,489246
Abr	10	37,91	30	4,7	316,14	28,876164
Mai	15	42,625	31	4,81	310,12	29,955563
Jun	19	46,397	30	4,27	305,29	25,333935
Jul	23	50,169	31	4,55	300,45	27,452774
Ago	24	51,112	31	4,32	299,24	25,96008
Set	19	46,397	30	3,43	305,29	20,35021
Out	14	41,682	31	2,84	311,33	17,75587
Nov	8	36,024	30	2,43	318,55	15,043403
Dez	3	31,309	31	2,13	324,54	13,88195

Fonte: (Acervo do autor, 2018) e tabela adaptada de (EDUARDO, 2018).

Analisando as Tabelas 14, 15, 16 e 17, somou-se a energia gerada de operação em cada mês ao longo do ano, obtendo assim a energia gerada de operação total anual para as quatro cidades, conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 - Energia gerada de operação total anual para as quatro cidades.

Localidades	E_{g, op} (kWh/ano)
Formiga/Brasil	371,819672
Göttingen/Alemanha	201,91657
Guiyang/China	223,69165
Shimogou/Japão	265,40674

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Com os dados apresentados das Tabelas 13 e 18, foi possível observar na Figura 39, a diferença da energia gerada de operação, quando se leva em conta a temperatura de operação do módulo em função da temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar em comparação com a energia nominal, para cada localidade. Ressaltando que para a realização destes cálculos, considerou-se apenas um painel fotovoltaico.

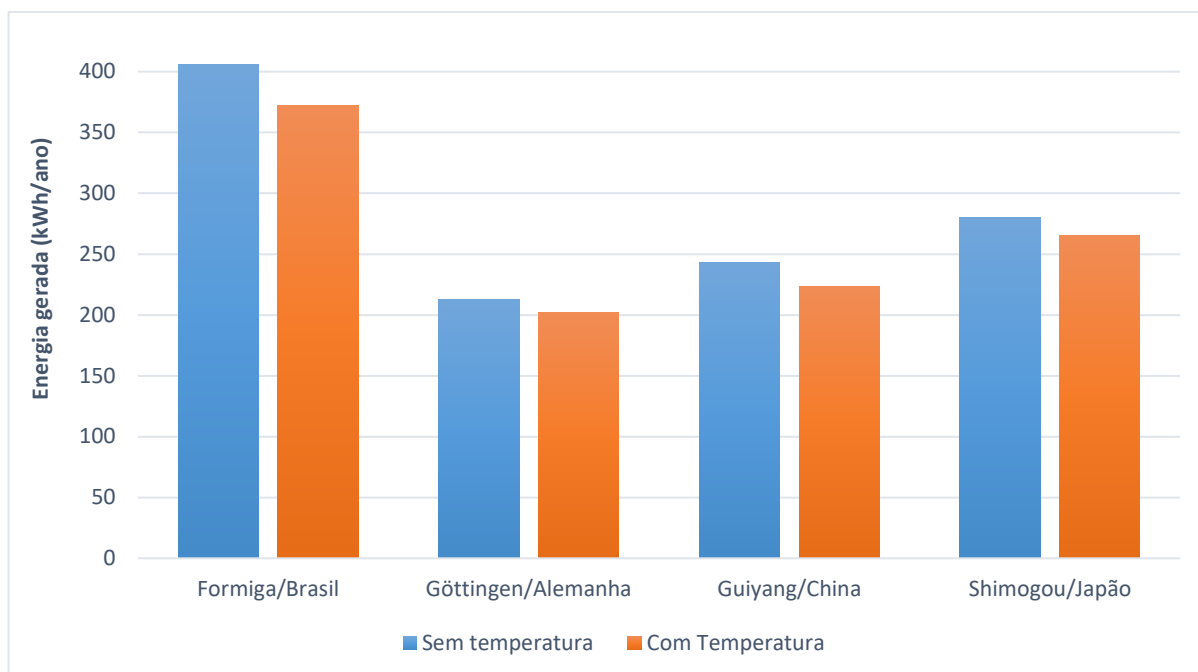


Figura 39 - Comparação entre a energia gerada nominal por ano (sem temperatura) e a energia gerada de operação (com temperatura) por ano em cada localidade.

Fonte: (Acervo do autor, 2018).

Analisando a Figura 39 pode-se verificar que houve uma redução na geração de energia em cada localidade quando incluiu a potência calculada por meio da simulação proposta neste trabalho. As reduções para Formiga (Brasil), Göttingen (Alemanha), Guiyang (China) e Shimogou (Japão) foram de 8,35%, 5,37%, 8,85% e 5,69%, respectivamente. Tais resultados, continuam evidenciando o potencial de geração de energia fotovoltaica na cidade de Formiga/MG em relação as demais localidades.

5 CONCLUSÕES

A principal fonte de geração de energia elétrica é as usinas hidrelétricas. Porém, com a diminuição das chuvas nos últimos tempos, é necessário procurar outras fontes de energia para ser utilizada pela população. As usinas termelétricas foram um refúgio para a sociedade, entretanto, os impactos ambientais e o custo por kWh gerado aumentaram excessivamente. Por isso, as energias renováveis estão sendo cada vez mais visadas como uma fonte alternativa para diminuir impactos ambientais e socioeconômicos.

Entre essas fontes de energia renováveis existentes, a energia solar é uma das que oferece vários benefícios tanto na parte elétrica quanto ambiental e socioeconômica. É uma energia mais barata e de fácil instalação quando relacionada a outras fontes renováveis. Nos próximos anos a energia solar fotovoltaica será utilizada pela maior parte da população mundial.

A energia solar fotovoltaica é o aproveitamento da energia solar que incide no sistema fotovoltaico, composto por materiais semicondutores, gerando a energia elétrica. Isso ocorre por meio do efeito fotovoltaico.

Assim, neste trabalho realizou-se um estudo sobre os conceitos de geração de energia elétrica por conversão de energia solar. Ao analisar o painel solar policristalino foi possível verificar a necessidade de se trabalhar com fatores que influenciam a geração de energia pelos painéis, como a radiação solar e a temperatura de operação.

Com isso, desenvolveu-se a modelagem do circuito elétrico que representa o painel fotovoltaico utilizando o *software* Matlab/Simulink, considerando a radiação e a temperatura de operação no cálculo da potência de operação do painel. Após a implementação, validou-se a metodologia comparando as curvas de tensão-corrente em função da temperatura e da radiação com as curvas do painel CS6U-330P da Canadian Solar, disponibilizadas pelo fabricante. A metodologia foi validada satisfatoriamente, ressaltando que o menor valor de concordância entre os parâmetros simulados e experimentais foi de 96,3%. Posteriormente, objetivando a utilização prática do painel implementado, aplicou-se a metodologia em dois exemplos.

No primeiro exemplo de aplicação desenvolveu-se os cálculos de potência efetiva média por dia e eficiência de geração de energia média do painel por dia,

utilizando a modelagem do painel implementada, aplicando-a em uma residência localizada na cidade de Formiga/MG, que possui um arranjo de 36 painéis CS6U-330P da Canadian Solar já instalados. Em relação a eficiência de geração de energia média do painel por dia, tem-se uma concordância de 90,6% entre o valor simulado, 3,51 kWh/kW/dia, e o valor obtido na residência, 3,18 kWh/kW/dia, para o dia 24 de outubro de 2018. A potência efetiva média por dia simulada, 294,94 W, em comparação com o valor obtido na residência, 278 kW, apresentando uma concordância de 94,3%. Assim, pode-se verificar a validação da metodologia em uma aplicação prática.

Por fim, no segundo exemplo de aplicação, implementou-se a modelagem do painel fotovoltaico em função da radiação e da temperatura de operação, no trabalho desenvolvido por Eduardo (2018). Realizou-se um estudo comparativo entre o potencial de geração fotovoltaica da cidade de Formiga/MG com três cidades localizadas em países referências: Guiyang na China, Shimogou no Japão e Göttingen na Alemanha. Com a aplicação da modelagem, pode-se calcular a energia gerada de operação por um painel (CS6U-330P da Canadian Solar), levando em conta a radiação solar e a temperatura de operação, e pode-se comparar com a energia gerada nominal. Pode-se concluir que a cidade de Formiga/MG ainda apresenta um potencial de geração fotovoltaico superior as demais cidades.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, a partir do presente trabalho, pode-se citar as seguintes possibilidades:

- Implementação do circuito elétrico do painel fotovoltaico com dois diodos em paralelo;
- Desenvolvimento de método heurístico de otimização para obter os parâmetros como: n , R_{sh} e R_s ;
- Realizar um estudo dos parâmetros de operação do painel fotovoltaico para obter a geração de energia por um painel fotovoltaico;
- Incluir outros parâmetros de perdas na modelagem do painel fotovoltaico, tais como umidade, sombreamento, cabeamento, dentre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL): **Matriz de Energia Elétrica**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 26 out. 2018.
- ALMEIDA, Ana Bárbara de. **Análise econômica da geração fotovoltaica de uma residência na cidade de Divinópolis-MG**. 2018. 67 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – IFMG. Formiga, 2018.
- ALVES, Guilherme Henrique. **Projeto e análise da viabilidade econômica da instalação de painéis fotovoltaicos no setor industrial**. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.
- ARAUJO, Ana Júlia Nunes de; RANK, Narah luata; BUENO, Talita Bezerra de Araujo. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2016. 86 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- BLUESOL. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. 2017. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em: 26 out. 2018.
- BORGES, Bruno Augusto Fernandes. **Implementação de um conversor para painel fotovoltaico – Proposta de um modelo matemático**. 2009. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2009.
- CANADIAN SOLAR. **Maxpower CS6U-325/330/335P**. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/en/new/2018-4-12-v5.562/Canadian_Solar-Datasheet-MaxPower_CS6U-P_v5.562_EN.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.
- CANTOR, Guillermo Andrés Rodríguez. **Influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical**. 2017. 177 p. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2017.
- CHENNI, R. et al. A detailed modeling method for photovoltaic cells. **Energy**, v. 32, n. 9, p.1724-1730, set. 2007.

CLIMATEMPO. **Previsão do tempo**. 2018. Disponível em:
<<https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/735/formiga-mg>>.
Acesso em: 29 out. 2018.

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito - Potencial Solar - SunData v3.0**. 2018. Disponível em:
<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 26 out. 2018.

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – Energia Solar Fotovoltaica**. 2008. Disponível em:
<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=321>.

CRYSTAL MAGYC. **Clear Quartz Cluster**. Disponível em:
<https://www.crystalmagic.com/Clear-Quartz-Cluster-113_p_148.html>. Acesso em:
30 ago. 2018.

EDUARDO, Pedro Henrique. **Estudo comparativo entre o potencial de geração fotovoltaica da cidade de Formiga/MG com três cidades localizadas em países referências: China, Japão e Alemanha**. 2018. 74 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. Formiga, 2018.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Glossário - Radiação direta**. Disponível em:
<<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/glossario/radiacao-direta>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

_____. **Glossário - Radiação difusa**. Disponível em:
<<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/glossario/radiacao-difusa>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

ENFSOLAR. CN-108S-CN-210S. Disponível em:
<<https://www.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/2541>>. Acesso em: 02 nov. 2018.

FERREIRA, Raísa Micaelle. **Estudo de viabilidade para implantação de geração fotovoltaica em escola municipal de Abaeté/MG**. 2016. 70 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Instituto Federal de Minas Gerais. Formiga, 2016.

FRANCO, R. A. P. et al . **Estimação de Parâmetros de Modelo de Sistemas Fotovoltaicos utilizando Algoritmo de Levenberg-Marquardt Modificado**. TEMA (São Carlos), São Carlos , v. 19, n. 1, p. 79-92, Jan. 2018.

HELIUS. Datasheet: Módulo poli cristalino HMF60P. Disponível em:
<https://www.heliusenergy.com.br/wp-content/uploads/2018/08/HMF60P_250a270.pdf>. Acesso em: 30 out. 2018.

INFOESCOLA. **Dopagem Eletrônica**. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/quimica/dopagem-eletronica/>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

INDIAMART. **Monocrystalline Silicon Wafer**. Disponível em: <<https://www.indiamart.com/proddetail/monocrystalline-silicon-wafer-12434799833.html>>. Acesso em 30 ago. 2018.

MACHADO, Karla Suzane Van-Dall; CORREA, Nicoli. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2015. 64 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Miranda. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. 2014. 98 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2014.

MPPTSOLAR. **Ligação em série de mais painéis solares**. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

_____. **Ligação em série de mais painéis solares**. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

NAUKAS. **Cuestión de impurezas**. 2011. Disponível em: <<https://naukas.com/2011/12/13/cuestion-de-impurezas/>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

NEVES, Guilherme Marques. **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos**. 2016. 240 p. (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

NEW HOME. **Processo de Fabricação das Células Fotovoltaicas**. Disponível em: <http://www.newhome.com.br/htmls/ekohome/Solar/Fotovoltaico/Cristalino/fabrica_fotvolt.htm>. Acesso em: 30 ago. 2018.

NIEDZIALKOSKI, Rosana Krauss. **Desempenho de painéis solares mono e policristalinos em um sistema de bombeamento de água**. 2013. 57 p. Dissertação (Pós-Graduação em Energia da Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2013.

PAGINASFE. **Painéis Fotovoltaicos: Curvas de funcionamento.** Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html>. Acesso em: 25 nov. 2018.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2014.

PORTAL SOLAR. **Minas Gerais tem o maior número de instalações de placas solares do Brasil.** 2016. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/minas-gerais-tem-o-maior-numero-de-instalacoes-de-placas-solares-do-brasil.html>>. Acesso em: 25 ago. 2018.

PORTAL SOLAR. **Passo a passo da fabricação do painel solar.** Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em 03 nov. 2018.

PORTAL SOLAR. **Tipos de Painel Solar Fotovoltaico.** 2018. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 26 out. 2018.

PINTO, Cláudia Sofia Benvindo Soares. **Validação experimental do modelo cinco parâmetros e um diodo de painéis fotovoltaicos.** 2016. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Universidade de Lisboa. Lisboa, 2016.

SANTANA, Felipe Souza. **Projeto de um sistema de geração fotovoltaica para a UFRJ.** 2014. 116 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

SILVA E CALDAS, H. H. **Geração Fotovoltaica Distribuída: Estudo de Caso para Consumidores Residenciais de Salvador – Ba.** 2016. 58 f. Artigo (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia- IFBA. Bahia, 2016.

SILVA, André Nelson Matias e. **Sistema de conversão de energia solar fotovoltaica.** 2008. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, [S.l.], 2008.

SILVA, Jarlan Soares da. **Análise da influência da temperatura na geração de energia utilizando painéis fotovoltaicos monocristalino e policristalinos.** 2016. 64 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2016.

SILVA, Rodrigo Guedes da. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico para atender uma demanda de iluminação**. 2014. 104 p. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2014.

SISTEL. **Conheça os tipos de painéis solares e as suas vantagens**. 2016. Disponível em: <<http://sistelengenharia.com.br/conheca-os-tipos-de-paineis-solares-e-as-suas-vantagens/>>. Acesso em 30 ago. 2018.

THE UNITED SOLAR. **Photovoltaic Cell Basics**. Disponível em: <<http://www.theunitedsolar.com/main/photovoltaic-cell-basics>>. Acesso em 30 ago. 2018.

TINOCO, Henrique de Lacerda et al. **Investigação Experimental da Influência da Temperatura de Operação e da Irradiação Solar em um Painel Fotovoltaico**. VII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, p. 1-9, dez. 2017.

VILLALVA, Marcelo Grandella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica - Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

VTM. **Germanium nahradí křemík v čípech dříve než grafen**. Disponível em: <<http://vtm.e15.cz/germanium-nahradi-kremik-v-cipecch-drive-nez-grafen>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

YAHFDHOU, Ahmed; MAHMOUD, Abdel Kader; YOUM, Issakha. **Evaluation and determination of seven and five parameters of a photovoltaic generator by an iterative method**, e-Print: arXiv:1601.03257. 2016. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/arXiv:1601.03257>>. Acesso em: 04 nov. 2018.

ANEXO A – Dados do painel CS6U-330P da Canadian Solar



MAXPOWER CS6U-325 | 330 | 335P

Canadian Solar's modules use the latest innovative cell technology, increasing module power output and system reliability, ensured by 17 years of experience in module manufacturing, well-engineered module design, stringent BOM quality testing, an automated manufacturing process and 100% EL testing.

KEY FEATURES

-  Excellent module efficiency of up to: 17.23 %
-  High PTC High PTC rating of up to: 92.18 %
-  IP68 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 5400 Pa, wind load up to 3600 Pa*

25 years linear power output warranty

10 years product warranty on materials and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES*

ISO 9001:2015 / Quality management system
ISO 14001:2015 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES*

IEC 61215 / IEC 61730: VDE / CE / MCS / INMETRO / CDC AU / KEMCO / ISI
UL 1700 / IEC 61215 performance: CDC listed (US) / PSEI (US Florida)
UL 1702: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE
UL9177 Reaction to Fire: Class 1 / IEC 60068-2-68: SGS

Take-a-way



* We can provide this product with special BOM specifically certified with salt, mist, ammonia and sand blowing tests. Please refer to our local technical sales representatives to get your customized solutions.

CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. No. 1 module supplier for quality and performance/price ratio in IHS Module Customer Insight Survey. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 30 GW deployed around the world since 2001.

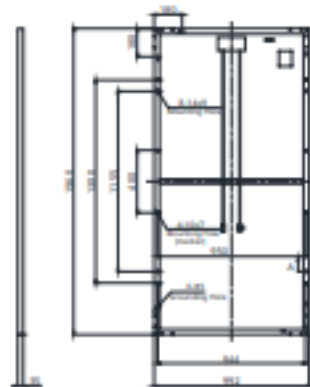
*For detail information, please refer to Installation Manual.

CANADIAN SOLAR INC.

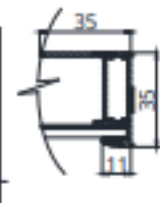
545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

ENGINEERING DRAWING (mm)

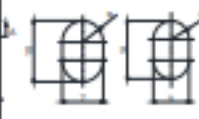
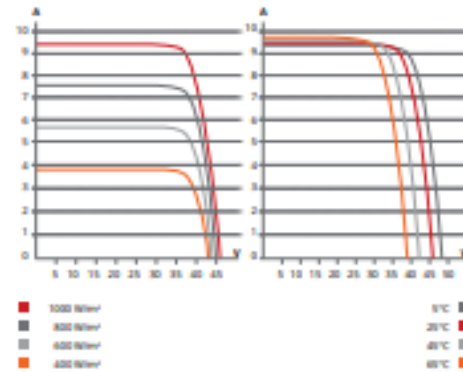
Rear View



Frame Cross Section A-A



Mounting Hole

**CS6U-330P / I-V CURVES****ELECTRICAL DATA | STC***

CS6U	325P	330P	335P
Nominal Max. Power (Pmax)	325 W	330 W	335 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.0 V	37.2 V	37.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.78 A	8.88 A	8.96 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.5 V	45.6 V	45.8 V
Short Circuit Current (Isc)	9.34 A	9.45 A	9.54 A
Module Efficiency	16.72%	16.97%	17.23%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC/UL) or 1500 V (IEC/UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)		
Max. Series Fuse Rating	15 A		
Application Classification	Class A		
Power Tolerance	0 ~ + 5 W		

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

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	325P	330P	335P
Nominal Max. Power (Pmax)	239 W	243 W	247 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	34.0 V	34.2 V	34.4 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.03 A	7.10 A	7.17 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.4 V	42.5 V	42.6 V
Short Circuit Current (Isc)	7.54 A	7.63 A	7.70 A

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

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Outstanding performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 96.0 % for irradiances between 200 W/m² and 1000 W/m² (AM 1.5, 25°C).

* The specifications and key features contained in this datasheet may deviate slightly from our actual products due to the on-going innovation and product enhancement. Canadian Solar Inc. reserves the right to make necessary adjustment to the information described herein at any time without further notice.

CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6 × 12)
Dimensions	1960 × 992 × 35 mm (77.2 × 39.1 × 1.38 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4.0 mm ² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	720 pieces

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.40 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 3 °C

PARTNER SECTION