



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

Projeto de Graduação

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Lucas de Vargas Ferreira

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2018

Lucas de Vargas Ferreira

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do(a) aluno(a) **Lucas de Vargas Ferreira**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista

VITÓRIA – ES
DEZEMBRO/2018

Lucas de Vargas Ferreira

ANÁLISE COMPUTACIONAL DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Parte manuscrita de Projeto de Graduação do(a) aluno(a) **Lucas de Vargas Ferreira**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 07 de dezembro de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D. Sc. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

MSc. Mariana Altoé Mendes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

MSc. Luiz Guilherme Riva Tonini
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais.

Agradecimentos

Agradeço à minha família por me proporcionar a oportunidade de chegar onde cheguei. Agradeço também à minha namorada, que sempre me apoiou em minha jornada e me tornou uma pessoa melhor.

Aos meus amigos do curso, por toda ajuda e pelos ótimos momentos que passamos e que ficarão para sempre na minha memória, tornando essa caminhada um pouco mais leve e agradável.

Agradeço também ao meu orientador pelo direcionamento e suporte dado, assim como a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica por me ajudarem em cada etapa do curso.

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.
(Winston Churchill)

Resumo

Este estudo teve como objetivo realizar uma análise dos fatores que influenciam a eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica em painéis fotovoltaicos. Foi utilizado um programa computacional para simular um painel conectado a um circuito composto por uma bateria e uma carga resistiva em paralelo, controlados por um controlador de carga. Foram obtidas as curvas características do painel e as curvas de eficiência da conversão energética durante um dia de operação, a partir de dados de temperatura e radiação solar da cidade de Vitória - ES. Do estudo, foi possível concluir que a variação de irradiância exerce uma influência maior na eficiência que a temperatura devido à sua maior amplitude de variação e que a eficiência sofre um pequeno aumento durante as horas de sol-pico.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico, temperatura, irradiação solar, simulação.

Abstract

This study had the objective to perform an analysis of the factors that influence the efficiency of the conversion of solar energy into electric energy in photovoltaic panels. A computer program was used to simulate a panel connected to a circuit composed of a battery and a resistive load in parallel, controlled by a load controller. The characteristic curves of the panel and the efficiency curves of the energy conversion during one day of operation were obtained using data of temperature and solar radiation in the city of Vitória - ES. From the study, it was possible to conclude that the variation of irradiance exerts a greater influence on the conversion efficiency than the temperature due to its greater amplitude of variation and that the efficiency undergoes a small increase during peak sun-hours.

Keywords: Photovoltaic module. Temperature. Solar Irradiance. Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Mapa global da irradiação solar horizontal	26
Figura 2 – Estrutura das bandas de energia em diferentes materiais	30
Figura 3 – Representação de uma junção P-N em célula fotovoltaica	31
Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	32
Figura 5 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício	33
Figura 6 – Curvas I-V de um módulo de 72 células submetido a diferentes irradiâncias	35
Figura 7 – Curvas I-V de um módulo de 72 células submetido a diferentes tempe- raturas	36
Figura 8 – Curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício	36
Figura 9 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino	37
Figura 10 – Células de silício monocristalino e policristalino	37
Figura 11 – Células de filmes finos	38
Figura 12 – Representação esquemática da associação de células fotovoltaicas	39
Figura 13 – Símbolo de um módulo fotovoltaico	39
Figura 14 – Símbolo de um inversor	41
Figura 15 – Exemplos de sistemas utilizando SPPM	42
Figura 16 – Resultados do programa SunData para Vitória - ES	44
Figura 17 – Interface inicial do programa RADIASOL 2	45
Figura 18 – Interface do RADIASOL com os dados inseridos	46
Figura 19 – Gráfico de irradiância horária para Vitória - ES	47
Figura 20 – Gráfico de temperatura horária para Vitória - ES	48
Figura 21 – Circuito de simulação para obtenção de curvas I-V e P-V	49
Figura 22 – Características do módulo no Simulink	50
Figura 23 – Valores inseridos no bloco do módulo fotovoltaico no Simulink	51
Figura 24 – Curvas I-V obtidas para diferentes valores de irradiância	51
Figura 25 – Curvas P-V obtidas para diferentes valores de irradiância	52
Figura 26 – Curvas I-V obtidas para diferentes valores de temperatura	53
Figura 27 – Curvas P-V obtidas para diferentes valores de temperatura	53
Figura 28 – Curvas I-V fornecidas no <i>datasheet</i> do módulo CS5A-200M	54
Figura 29 – Circuito de simulação do funcionamento do módulo	55
Figura 30 – Características da bateria no Simulink	56
Figura 31 – Variação da irradiância em função do tempo	57
Figura 32 – Variação da temperatura em função do tempo	58
Figura 33 – Variação da carga da bateria em função do tempo	58
Figura 34 – Variação da potência fornecida pelo módulo em função do tempo	59
Figura 35 – Variação da eficiência do módulo em função do tempo no primeiro cenário	60

Figura 36 – Variação da eficiência do módulo em função do tempo no segundo cenário 61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica no mundo . . .	26
Tabela 2 – Instalações solares no Brasil	27
Tabela 3 – Características do módulo fotovoltaico	50
Tabela 4 – Potência máxima fornecida para diferentes valores de irradiância	52
Tabela 5 – Potência máxima fornecida para diferentes valores de temperatura . . .	54

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si:H	Silício Amorfo Hidrogenado
CdTe	Telureto de Cádmio
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio de Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
DIE	Departamento de Informações e Estudos Energéticos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
IEA	<i>International Energy Agency</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SOC	<i>State of Charge</i>
SPPM	Seguimento do Ponto de Potência Máxima
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

Lista de símbolos

η	Letra grega minúscula Eta
θ	Letra grega minúscula Teta
α	Letra grega minúscula Alfa
β	Letra grega minúscula Beta
Ω	Letra grega maiúscula Ômega
∞	Símbolo do infinito
B	Boro
Si	Silício
P	Fósforo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Contextualização	25
1.2	Justificativa	25
1.3	Objetivos	27
1.3.1	Objetivos Gerais	27
1.3.2	Objetivos Específicos	28
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	29
2.1	Efeito Fotovoltaico	29
2.2	Células Fotovoltaicas	31
2.2.1	Circuito Equivalente	31
2.2.2	Curva I-V	32
2.2.2.1	Influência da Irradiância Solar na Curva I-V	34
2.2.2.2	Influência da Temperatura na Curva I-V	35
2.2.3	Curva P-V	36
2.2.4	Principais Tecnologias de Fabricação	37
2.2.4.1	Silício Cristalino	37
2.2.4.2	Células de Filmes Finos	38
2.3	Módulos Fotovoltaicos	38
2.4	Controlador de Carga	40
2.5	Inversor	41
2.6	Seguimento de Ponto de Potência Máxima (SPPM)	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Base de Dados	43
3.1.1	Programas Utilizados	43
3.1.1.1	SunData	43
3.1.1.2	RADIASOL 2	44
3.2	Simulação	48
3.2.1	Programa Utilizado	48
3.2.2	Caracterização do Módulo	49
3.2.3	Simulação do Módulo Conectado à uma Bateria e uma Carga	55
4	RESULTADOS	57
5	CONCLUSÃO	63

5.1	Comentários Acerca dos Resultados	63
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	63
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICES	67
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE MATLAB DO CONTROLA- DOR DE CARGA DO CIRCUITO	69
	ANEXOS	71
	ANEXO A – <i>DATASHEET</i> DO MÓDULO FOTOVOLTAICO CS5A-200M	73

1 Introdução

1.1 Contextualização

A energia solar fotovoltaica é a energia gerada pela conversão da luz por meio do efeito fotoelétrico, caracterizado como a emissão de elétrons por um material, tipicamente metálico, quando este recebe radiação eletromagnética. Neste processo de conversão de energia, a unidade fundamental é a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor (CEPEL, 2014).

Um conjunto de células fotovoltaicas associadas é denominado painel fotovoltaico ou módulo fotovoltaico, dispositivo que compõe, junto com inversores de frequência, os principais elementos de uma estrutura de geração solar fotovoltaica (CEPEL, 2014). Outros dispositivos eventualmente podem ser adicionados à estrutura com o propósito de melhorar sua capacidade de fornecimento de energia e a eficiência do processo de geração como um todo, tais como baterias, controladores de cargas e sistemas de supervisão e controle.

As primeiras aplicações de geração fotovoltaica foram utilizadas como alternativa às baterias químicas na indústria espacial, aproveitando a irradiação solar para assegurar maior vida útil aos satélites lançados em órbita. O satélite Vanguard 1, de fabricação norte-americana, foi lançado em 1958 e seu projeto incluiu painéis solares acoplados ao seu corpo, o que o possibilitou continuar transmitindo informações durante anos ao invés de semanas, caso fosse abastecido somente pelas baterias (GREEN; LOMASK, 1970).

Os custos de fabricação das células fotovoltaicas, por serem muito elevados, somente permitiam o emprego dessa tecnologia em aplicações especiais, como na indústria aeroespacial (NASCIMENTO, 2004). Entretanto, após extensa aplicação nesta indústria começaram a surgir aplicações da geração de energia fotovoltaica no âmbito terrestre, com instalações comerciais fazendo uso painéis solares para suprirem suas demandas energéticas.

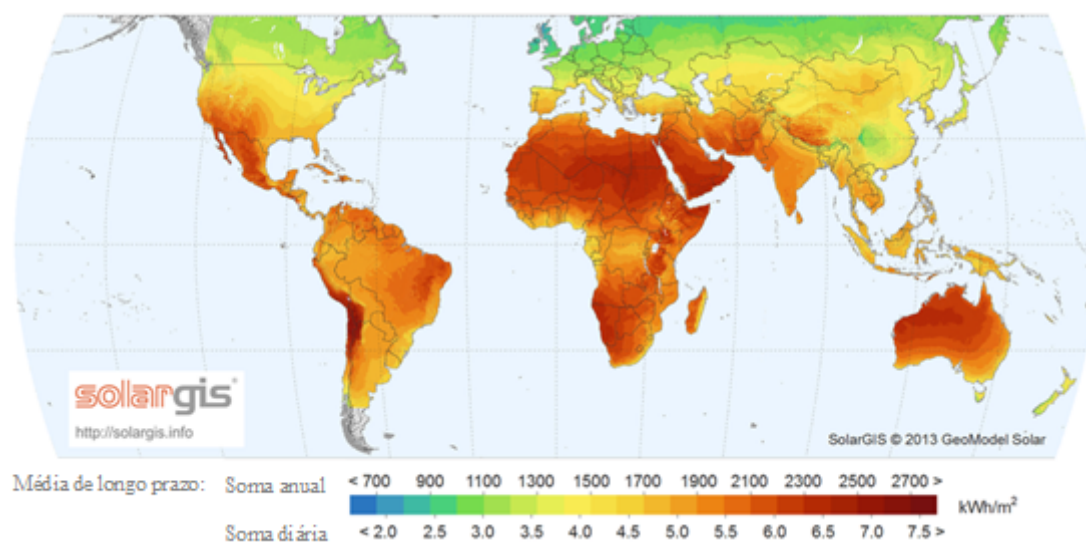
Com o desenvolvimento contínuo da tecnologia e a crescente demanda por fontes de energia alternativas, aos poucos o custo da geração foi diminuindo e o total de energia solar fotovoltaica gerada no mundo alcançou o montante de 247 TWh (Terawatt-hora) no ano de 2015, um crescimento de 243 TWh em relação ao ano de 2005 (IEA, 2017).

1.2 Justificativa

A energia solar está amplamente disponível para ser utilizada, embora seja pouco aproveitada para geração de energia elétrica na maioria dos países. Tal fato é percebido

analisando as estimativas de disponibilidade energética em diferentes países e comparando com as estatísticas da geração de energia solar fotovoltaica disponíveis. A Figura 1 apresenta um mapa onde se verifica a irradiação solar distribuída ao redor do mundo, no ano de 2013.

Figura 1 – Mapa global da irradiação solar horizontal



Fonte: SOLARGIS (2013) (traduzida pelo autor).

Em comparação, a Tabela 1 traz a capacidade instalada de geração de energia elétrica fotovoltaica em determinados países, além do total instalado no mundo, no ano de 2015.

Tabela 1 – Capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica no mundo

País	Capacidade Instalada (GWh)
China	43,2
Alemanha	39,8
Japão	34,2
Estados Unidos	21,7
Itália	18,9
Reino Unido	9,2
França	6,8
Índia	5,1
Espanha	4,9
Austrália	4,4
Resto do Mundo	32,0
Mundo Inteiro	220,2

Fonte: IEA (2017) (modificada pelo autor).

Analisando-se os dados da Figura 1 e da Tabela 1, percebe-se que os países que concentram a maior irradiação solar não fazem uso do potencial energético disponível. Um dos fatores determinantes para este baixo aproveitamento é o custo das células fotovoltaicas. Nos países mais desenvolvidos, entretanto, há maior aproveitamento devido a políticas de incentivo, assim como nos mercados da Ásia — China e Índia, por exemplo —, o que resulta na redução do preço de módulos fotovoltaicos e maior capacidade de geração de energia (CEPEL, 2014). No território brasileiro, apesar da baixa capacidade instalada, a geração de energia fotovoltaica tem crescido substancialmente nos últimos anos, como se verifica na Tabela 2.

Tabela 2 – Instalações solares no Brasil

Tipo de registro na ANEEL	2015	MW 2016*	2017**
Outorga e registro na ANEEL	21,2	23,0	311,7
Distribuída (telhado)***	10,8	61,7	126,6
Total	32,0	84,7	438,3

Fonte: DIE (2017).

*: Dados de 30/12/2016.

**: Dados de 09/10/2017.

***: Informação das distribuidoras.

Entre as causas deste crescimento, estão a adoção de políticas de incentivo por parte dos governos federal e estaduais, tais como isenções ou reduções de impostos que atingem os componentes e equipamentos de sistemas de geração distribuída fotovoltaica (GD) (DIE, 2017). Consoante com o aumento da demanda, a maximização da eficiência energética destes sistemas reduzirá ainda mais o custo do kWh de energia produzida, facilitando assim o acesso da população a essa tecnologia e incentivando seu uso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

O objetivo geral do trabalho a ser desenvolvido é mensurar a influência da irradiação solar e da temperatura na eficiência da conversão de energia realizada por um módulo fotovoltaico. Esta tarefa será realizada por meio de uma simulação em computador de um sistema de geração fotovoltaica. Como consequência, serão apresentadas alternativas para aumentar a eficiência da conversão energética que possam ser utilizadas em sistemas de geração residenciais ou em outras aplicações de pequena escala

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes objetivos específicos deverão ser cumpridos:

- a) estudar os conceitos envolvidos na geração solar fotovoltaica, compreendendo seu funcionamento;
- b) entender a influência da temperatura e da irradiação solar na eficiência da conversão energética do módulo fotovoltaico;
- c) simular em um programa a conversão energética de um módulo fotovoltaico com diferentes valores de irradiação e temperatura;
- d) analisar os dados e propor medidas a serem implementadas para maximizar a eficiência da geração de energia.

2 Embasamento Teórico

2.1 Efeito Fotovoltaico

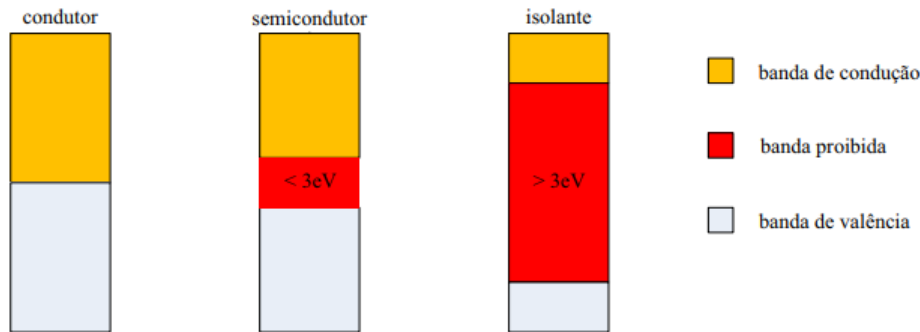
O efeito fotovoltaico é a denominação dada ao surgimento de tensão e corrente elétrica em um material, tipicamente um semicondutor, após sua exposição à radiação solar (BÜHLER, 2007). Esse efeito foi observado pela primeira vez por Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, quando notou o surgimento de uma diferença de potencial elétrico entre eletrodos imersos em uma solução ácida recebendo luz (NASCIMENTO, 2004). Em 1876, W. G. Adams e R. E. Ray observaram comportamento semelhante em um material sólido constituído de selênio. Com o avanço da tecnologia na área de dispositivos semicondutores, em 1950 foram fabricadas as primeiras células fotovoltaicas feitas de silício cristalino nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos (CEPEL, 2014).

Os semicondutores são sólidos que possuem condutividade elétrica intermediária entre os condutores e os isolantes. A condutividade de um semicondutor é diretamente relacionada à fatores ambientais, como a temperatura à que estão expostos. Esses materiais possuem a banda de valência completamente preenchida por elétrons em temperaturas muito baixas (próximas de 0 K), consequentemente comportando-se como isolantes (BÜHLER, 2007). Quando expostos à temperatura ambiente, alguns elétrons são excitados e movem-se para a banda de condução, permitindo ao material a capacidade de conduzir eletricidade (CEPEL, 2014).

O que diferencia os semicondutores dos condutores e isolantes é quantidade de energia necessária para que um elétron consiga superar a separação entre a banda de valência e a banda de condução. Esta separação, denominada de banda proibida ou E_g , pode ser da ordem de até 3 eV (elétron-volt) para os semicondutores, enquanto nos isolantes a banda proibida supera este valor (CEPEL, 2014).

A Figura 2 exemplifica a separação entre das bandas para os diferentes tipos de materiais, definidas como banda de condução, banda proibida e banda de valência. Essas bandas de energia conferem aos semicondutores a capacidade de aumentar sua condutividade com o aumento da temperatura. Isso ocorre pois os elétrons da banda de valência, ao receberem energia térmica em quantidade suficiente, são excitados e passam a ocupar a banda de condução, deixando lacunas na banda de valência que se comportam como carga positiva (CASTRO, 2007).

Figura 2 – Estrutura das bandas de energia em diferentes materiais



Fonte: CEPEL (2014).

Além da excitação por energia térmica, outra forma de criar estes pares elétron-lacuna dá-se por meio da incidência de fótons no material. Ao absorver fótons com energia superior a E_g , os elétrons também mudam de banda e o excesso de energia absorvida dissipa-se no material na forma de calor (CEPEL, 2014).

Esses elétrons e lacunas movem-se dentro do material e resultam no aumento de sua condutividade elétrica. Porém, a fim de aproveitar a corrente e tensão elétrica é necessário que haja um campo elétrico para separar os portadores de cargas (CASTRO, 2007). Para isso, utiliza-se a chamada junção P-N.

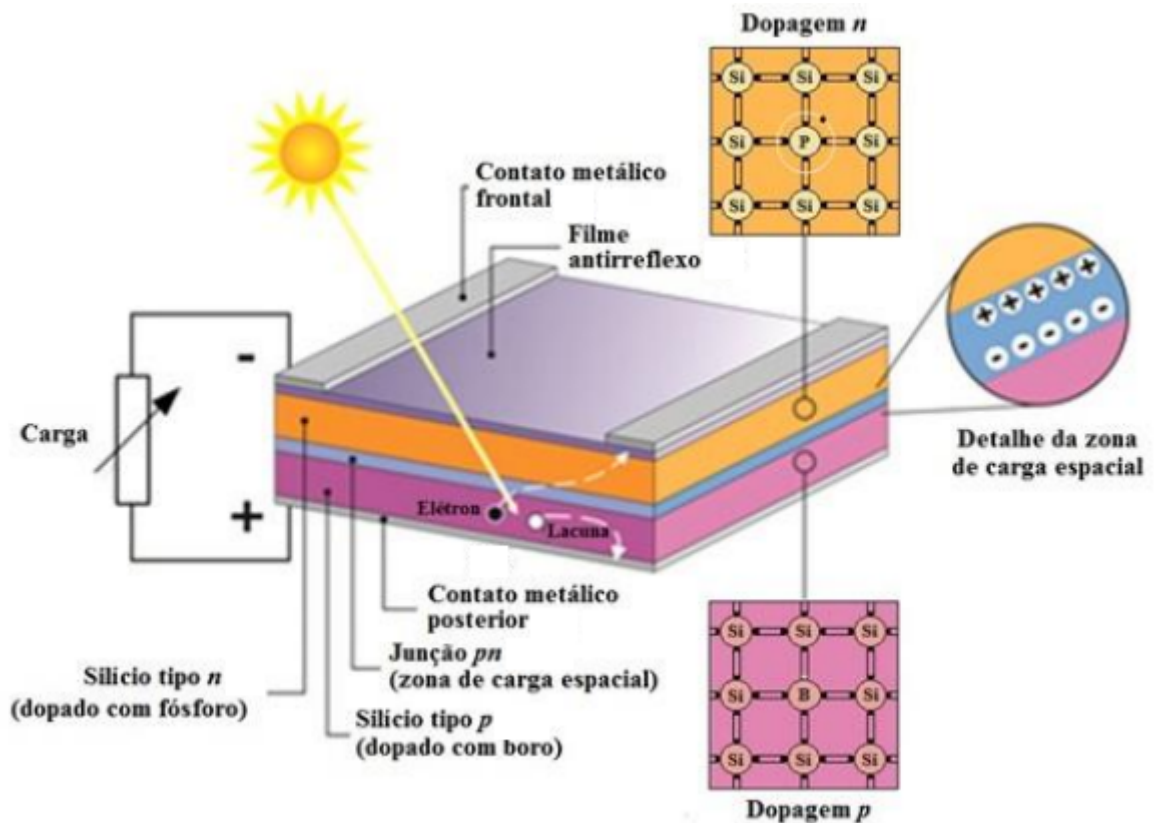
O silício (Si) é o elemento mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas (SILVA, 2017). Seus átomos são tetravalentes, ou seja, conseguem formar quatro ligações covalentes com os átomos próximos, constituindo cristais de Si que não possuem elétrons livres, não sendo portanto bons condutores elétricos (BÜHLER, 2007). Para modificar isto, realiza-se um processo chamado de dopagem, em que são inseridos outros elementos na estrutura cristalina (NASCIMENTO, 2004).

Ao inserir átomos pentavalentes na estrutura, a ligação resultante possuirá um elétron em excesso que estará fracamente ligado a seu átomo de origem, de forma que, à temperatura ambiente, o elétron saltará para a banda de condução e o material será portador de carga negativa. Este material é então caracterizado como tipo N. Em contrapartida, inserir átomos trivalentes na estrutura resultará em uma falta de elétrons para completar as ligações e o material será portador de carga positiva, caracterizado como do tipo P (NASCIMENTO, 2004). Os elementos comumente utilizados na dopagem são o fósforo (P) e o Boro (B) para materiais do tipo P e N, respectivamente (CASTRO, 2007).

Unindo ambas as estruturas de silício dopado, gera-se um campo elétrico na região P-N devido aos elétrons livres do material tipo N ocupando os espaços vazios da estrutura tipo P. Assim, com a incidência de luz em uma célula fotovoltaica, o campo elétrico da junção P-N direcionará o fluxo de elétrons da camada P para a camada N

caso estejam ligadas por um condutor externo, efetivamente gerando corrente elétrica. Nestas condições, temos a conversão da energia luminosa em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico (NASCIMENTO, 2004). A Figura 3 demonstra em detalhe a junção P-N presente em uma célula fotovoltaica, exemplificando o processo descrito acima.

Figura 3 – Representação de uma junção P-N em célula fotovoltaica



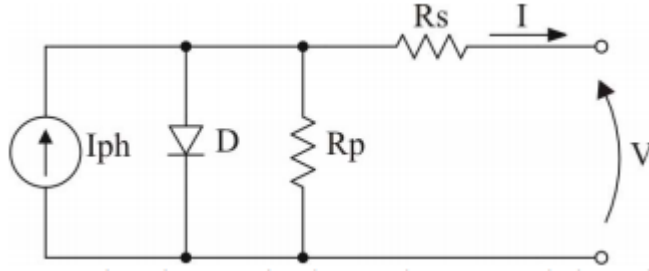
Fonte: CEPEL (2014).

2.2 Células Fotovoltaicas

2.2.1 Circuito Equivalente

Para facilitar a compreensão do funcionamento de células fotovoltaicas, utiliza-se um modelo de circuito equivalente. O circuito mais simples utilizado é a associação de uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e as resistências série e paralela, trazendo a representação mais próxima da realidade (CASARO; MARTINS, 2008). Esse circuito é representado na Figura 4.

Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Casaro e Martins (2008).

Equacionando o circuito da Figura 4, obtemos a seguinte equação (CASARO; MARTINS, 2008):

$$I = I_{PH} - I_R \times \left[e^{q \times (V + I \times R_S) / n \times k \times T} - 1 \right] - \frac{V + I \times R_S}{R_P} \quad (2.1)$$

Onde:

V, I - Tensão e corrente nos terminais da célula.

I_{PH} - Corrente fotogerada.

I_R - Corrente de saturação reversa da célula.

R_S , R_P - Resistências série e paralela da célula.

q - Carga do elétron, $1,6 \times 10^{-19}$ C.

n - Fator de qualidade da junção P-N.

k - Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K.

T - Temperatura ambiente, em K.

A Equação 2.1 é derivada da equação de um diodo ideal (CEPEL, 2014). Sua solução resulta na curva característica I-V de uma célula fotovoltaica. Entretanto, esta solução não é feita algebricamente, visto que a corrente I não pode ser isolada, e não compõe o escopo deste estudo (CASARO; MARTINS, 2008).

2.2.2 Curva I-V

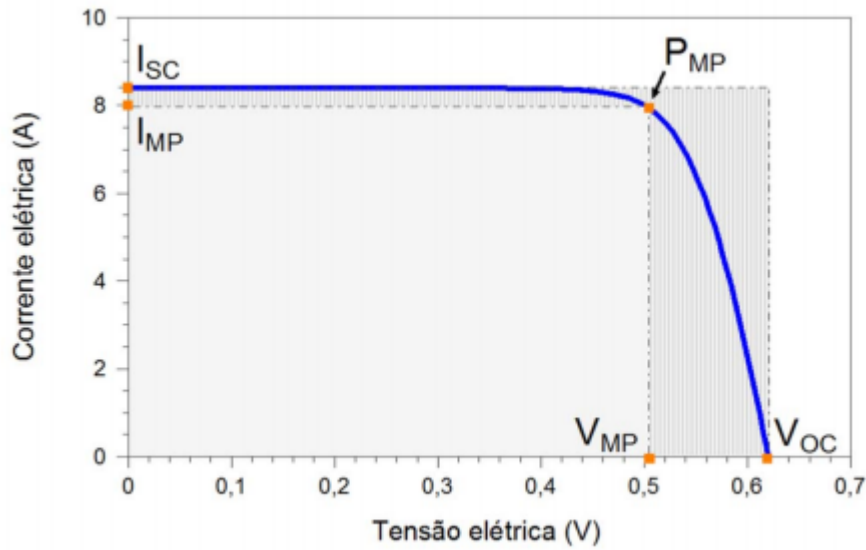
A curva característica corrente-tensão, também chamada de curva I-V, representa a corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica sob condições-padrão de ensaio, conhecidas por sua sigla em inglês STC - *Standard Test Conditions* (CASTRO, 2007). As condições são dadas por: irradiância de 1.000 W/m^2 , espectro solar AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C (IEC, 2008).

O valor de ensaio da irradiância é a densidade de potência padrão da radiação solar, observada ao meio dia sob a linha do Equador em dia de equinócio, com céu claro. Já o espectro solar é a referência de radiação de massa de ar e representa a quantidade de atmosfera atravessada pela luz do sol. Pode ser aproximado calculando-se o valor de $1/\cos(\theta)$, onde θ é a inclinação do sol em relação a linha perpendicular à superfície (CASARO; MARTINS, 2008).

A determinação desta curva é de suma importância na caracterização de uma célula ou módulo fotovoltaico, pois é possível extrair dela informações sobre o desempenho elétrico do gerador fotovoltaico (BÜHLER, 2007).

A Figura 5 representa a corrente elétrica em função da diferença de potencial de uma célula fotovoltaica de silício sob condições-padrão de ensaio, com destaque para os principais parâmetros elétricos. V_{OC} é a tensão e circuito aberto, I_{SC} é a corrente elétrica de curto-circuito e P_{MP} é a potência máxima fornecida (também conhecida como potência de pico), enquanto V_{MP} e I_{MP} representam a tensão e a corrente no ponto de potência máxima, respectivamente (ABNT, 2013).

Figura 5 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica de silício



Fonte: CEPEL (2014).

A tensão de circuito aberto é a tensão máxima alcançável por uma célula fotovoltaica, quando seus terminais estão em aberto e não há circulação de corrente. Sua medição pode ser realizada simplesmente conectando um voltímetro aos terminais da célula. O valor de V_{OC} é dado pela Equação 2.2, também derivada da equação do diodo (CEPEL, 2014):

$$V_{OC} = \frac{k \times T}{q} \times \ln\left(\frac{I_{PH}}{I_R} + 1\right) \quad (2.2)$$

Analisando a Equação 2.2, nota-se que V_{OC} depende das correntes de saturação (I_R) e fotogerada (I_{PH}), além da temperatura. Logo, seu valor pode variar a depender da tecnologia utilizada na confecção da célula, o que será discutido mais adiante.

A corrente de curto-circuito é medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais da célula e é o valor máximo de corrente que pode ser produzido. I_{SC} depende da área da célula fotovoltaica, da irradiância solar e sua distribuição espectral, além de fatores relacionados à tecnologia empregada, como as propriedades ópticas e a probabilidade de coleta dos pares elétron-lacunas formados (CEPEL, 2014).

O quociente entre a potência máxima da célula e o produto entre I_{SC} e V_{OC} resulta no Fator de Forma (FF), que representa a aproximação da curva I-V com o formato retangular e é influenciado pelas resistências série e paralelo, dependendo da tecnologia utilizada. É dado pela equação:

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (2.3)$$

Outro parâmetro importante é a eficiência do processo de conversão da energia solar em energia elétrica. Representada pela letra grega η , é dada pela relação entre a potência elétrica produzida pela célula e a potência da energia solar incidente, assim equacionada (ABNT, 2013):

$$\eta(\%) = \frac{P_{MP}}{A_{CT} \times G_{TOT}} \times 100\% \quad (2.4)$$

Onde:

A_{CT} - Área total da célula fotovoltaica, dada em m^2 .

G_{TOT} - Irradiância total, dada em W/m^2 .

O fator de qualidade da junção P-N (representado pela letra n na Equação 2.1), também conhecido como fator de idealidade do diodo, é um parâmetro adimensional associado ao formato da curva I-V na região do joelho. Esse fator é adicionado na modelagem da célula fotovoltaica para representar o comportamento real da operação do diodo, assumindo valores entre 1 e 2. Se o diodo presente em uma célula fosse ideal, a relação I-V seria perfeitamente logarítmica, porém não é o que se verifica na realidade. Este fator deve então ser obtido experimentalmente (BÜHLER, 2007).

2.2.2.1 Influência da Irradiância Solar na Curva I-V

A corrente elétrica gerada por uma célula ou módulo fotovoltaico é linearmente proporcional à intensidade da irradiância solar incidente, caso a temperatura se mante-

nha constante (CASTRO, 2007). Por outro lado, V_{OC} varia de forma logarítmica (ver Equação 2.2).

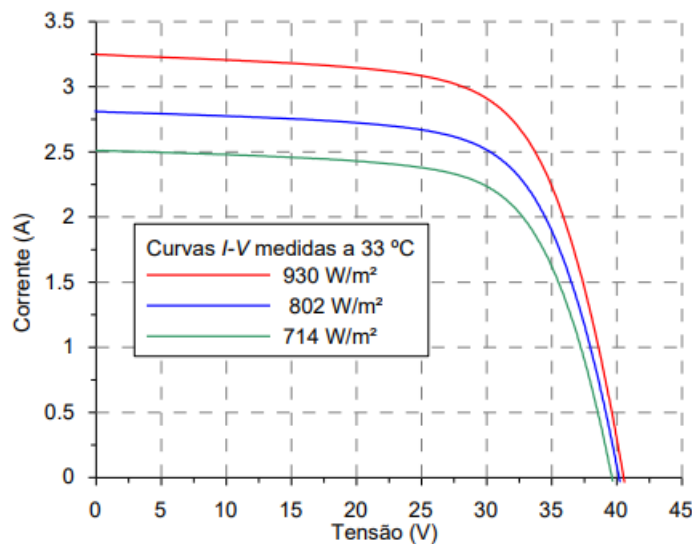
É possível relacionar I_{SC} à irradiância incidente na célula com a Equação 2.5:

$$I_{SC} = I_{SC_{STC}} \times \frac{G}{1000} \quad (2.5)$$

Onde $I_{SC_{STC}}$ é a corrente de curto circuito da célula e 1000 é o valor da irradiância nas STC.

A Figura 6 mostra a variação linear da corrente em um módulo submetido a diferentes intensidades de irradiância solar.

Figura 6 – Curvas I-V de um módulo de 72 células submetido a diferentes irradiâncias

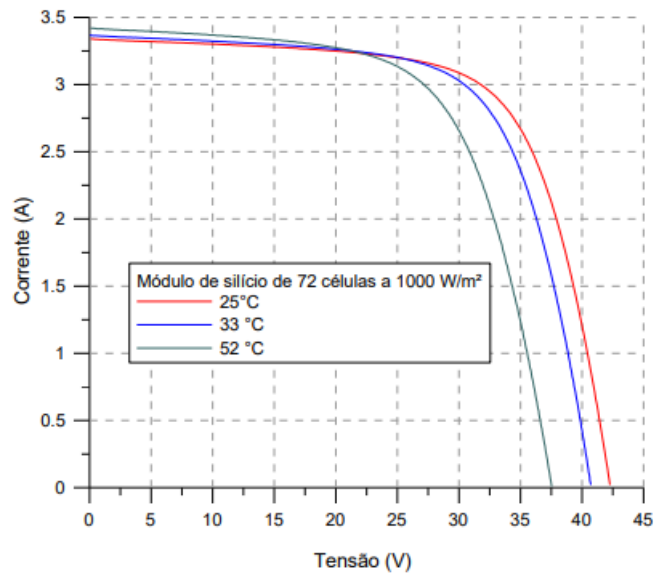


Fonte: Bühler (2007).

2.2.2.2 Influência da Temperatura na Curva I-V

O aumento da temperatura da célula leva a uma diminuição da potência de saída. O coeficiente de variação de I_{SC} , representado pela letra α , expressa a variação desta corrente em função da variação da temperatura da célula, com valor típico de +0,004 mA/cm².°C ou +0,01%/°C para o silício monocristalino. Por outro lado, V_{OC} apresenta um coeficiente de variação (β) linear da ordem de -2,3 mV/°C (ou -0,37%/°C) por célula para silício monocristalino (CEPEL, 2014). A Figura 7 demonstra a influência da temperatura na curva I-V de uma célula fotovoltaica.

Figura 7 – Curvas I-V de um módulo de 72 células submetido a diferentes temperaturas

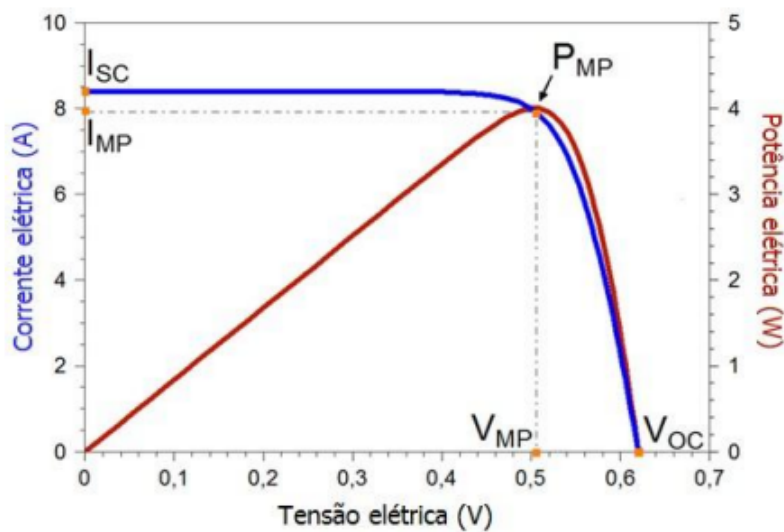


Fonte: Bühler (2007).

2.2.3 Curva P-V

Com os dados obtidos da curva I-V é possível traçar uma outra curva, denominada P-V. Essa representa a potência entregue pela célula fotovoltaica em função da variação da tensão na célula e permite uma melhor análise sobre o ponto de operação de máxima potência (P_{MP}).

Figura 8 – Curvas I-V e P-V de uma célula fotovoltaica de silício



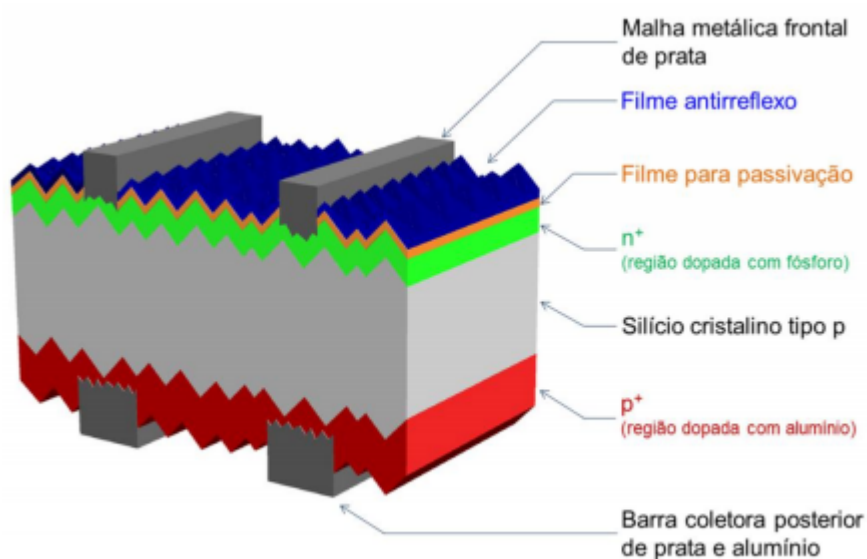
Fonte: CEPEL (2014).

2.2.4 Principais Tecnologias de Fabricação

2.2.4.1 Silício Cristalino

O silício cristalino é o componente mais utilizado nas células fotovoltaicas no mercado mundial (EPE, 2012). As células fabricadas com este material são divididas em dois grupos: o silício monocristalino (m-Si) e o policristalino (p-Si). Apesar de passarem por processos de fabricação distintos, suas estruturas finais são semelhantes e são exemplificadas pela Figura 9.

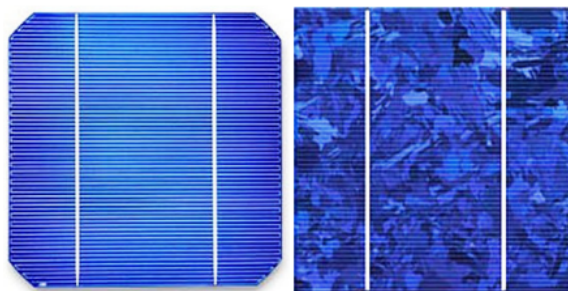
Figura 9 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino



Fonte: CEPEL (2014).

A Figura 10 mostra duas células fotovoltaicas, sendo a da esquerda uma célula de silício monocristalino e a da direita uma de silício policristalino.

Figura 10 – Células de silício monocristalino e policristalino



Fonte: EPE (2012).

Para fabricação de células de m-Si utilizam-se barras cilíndricas desse material produzidas em fornos especiais, que são cortadas em pastilhas da ordem de 0,2 mm de espessura. A eficiência média destas células chega a aproximadamente 16,5% (CEPEL, 2014).

Já as células de p-Si são obtidas a partir de blocos de silício formados pela fusão de silício puro em moldes especiais. Durante a solidificação são formados vários cristais da ordem de centímetros, e o material passa por um procedimento de corte para se obter as células. Neste processo, a eficiência resultante costuma variar de 14% a 16% (CEPEL, 2014).

2.2.4.2 Células de Filmes Finos

Estas células recebem este nome pois seu processo de fabricação envolve o depósito de camadas de materiais semicondutores da ordem de micrômetros (μm) sobre superfícies que podem ser de vidro ou de metal (NASCIMENTO, 2004). Essa técnica resulta em menor custo de energia e material e possibilita a produção de células de variados formatos, ampliando o espectro de utilização das mesmas. Os materiais mais utilizados neste processo são o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Os módulos comerciais de a-Si:H atingem uma eficiência de até 10% (CEPEL, 2014). A Figura 11 mostra células fotovoltaicas fabricadas por meio desse processo.

Figura 11 – Células de filmes finos



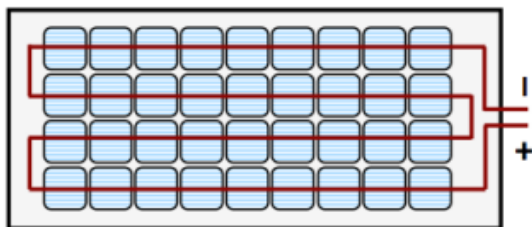
Fonte: EPE (2012).

2.3 Módulos Fotovoltaicos

Em geral, a potência máxima alcançada por uma única célula fotovoltaica é limitada em 3 W, o que não é suficiente para alimentar as necessidades energéticas de aplicações reais (CARNEIRO, 2010). Assim, para se alcançar os níveis adequados de fornecimento de

energia e de tensão, as células são conectadas em série formando um módulo fotovoltaico, conforme representado na Figura 12.

Figura 12 – Representação esquemática da associação de células fotovoltaicas

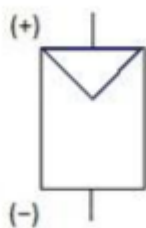


Fonte: Carneiro (2010).

A quantidade de células que serão associadas dependerá da tensão e da corrente elétrica que se deseja obter com os módulos. Módulos compostos por 36 células em série são comuns por conta da necessidade de se carregar baterias de 12 V. Porém, em sistemas conectados à rede ou de bombeamento de água, os níveis de tensão necessários são bastante variáveis, requerendo a associação de diferentes módulos em série para que seja possível suprir a necessidade energética. Por conta disso, é possível encontrar no mercado módulos com as mais variadas tensões nominais (CARNEIRO, 2010).

A Figura 13 mostra o símbolo utilizado para representar módulos fotovoltaicos em circuitos elétricos.

Figura 13 – Símbolo de um módulo fotovoltaico



Fonte: ABNT (2013).

Existem módulos rígidos e flexíveis, a depender da tecnologia utilizada na fabricação da célula fotovoltaica (conforme descrito na subseção 2.2.4). Os módulos rígidos utilizam lâminas de vidro temperado para prover resistência mecânica sem trazer prejuízo à irradiância e podem ser emoldurados por alumínio, facilitando sua instalação em painéis, ou utilizados sem moldura em partes de construções ou revestimentos. Os módulos flexíveis,

por sua vez, são fabricados comumente utilizando-se filmes finos sobre um polímero que permita uma certa deformação mecânica (CEPEL, 2014).

O alto nível de automação do processo de fabricação de módulos permite a produção em série de grande quantidade, mantendo elevada a qualidade dos produtos (CEPEL, 2014). Como consequência disto, os preços dos módulos fotovoltaicos têm reduzido nos últimos anos, reduzindo o custo total da geração fotovoltaica.

Os módulos podem ser caracterizados de forma semelhante às células fotovoltaicas, obtendo-se os valores de P_{MP} , V_{MP} , I_{MP} , V_{OC} , I_{SC} e calculando-se o Fator de Forma e a eficiência com equações idênticas à Equação 2.3 e à Equação 2.4 com os dados encontrados. A irradiância e a temperatura também afetarão as características elétricas dos módulos da mesma forma como afetam as células (CASTRO, 2007).

Assim como as células, os módulos também podem ser associados entre si, em série ou em paralelo. Uma associação de módulos forma o que se denomina painel fotovoltaico (ABNT, 2013). Esta associação visa compatibilizar as tensões e correntes especificadas em um projeto ao mesmo tempo em que se eleva a potência do conjunto.

Conectando-se em série, as tensões dos módulos são somadas e a corrente permanece a mesma (para módulos iguais). Caso as características sejam diferentes, a corrente será limitada pelo módulo de menor corrente individual. Portanto, é preferível associar módulos de características idênticas sob as mesmas condições de radiação e temperatura (CARNEIRO, 2010).

Na conexão em paralelo, as correntes são somadas e as tensões permanecem iguais. Assim como na associação em série, sugere-se a conexão de módulos com características idênticas para que não haja desbalanceamento do conjunto (CARNEIRO, 2010).

2.4 Controlador de Carga

Controladores de carga são componentes habitualmente presentes em sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), ou seja, que não são ligados diretamente à rede de energia elétrica. Sua função é principalmente proteger as baterias contra cargas e descargas em excesso, desconectando o banco de baterias quando esse estiver plenamente carregado e interromper o fornecimento de energia pela bateria quando a mesma atingir um nível mínimo predefinido (CEPEL, 2014).

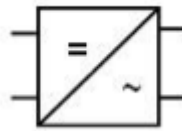
Os controladores mais simples encontrados no mercado funcionam com um sistema de liga-desliga. O controle é realizado com base no valor da tensão nos terminais da bateria. Quando a tensão atinge um limite inferior predefinido, o controlador desconecta a carga da bateria por supor que a mesma está descarregada; quando atinge um limite superior, a bateria é desconectada do arranjo fotovoltaico, supondo-se que foi totalmente carregada

(CEPEL, 2014).

2.5 Inversor

Em sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), é indispensável a presença de um inversor para entregar à rede a energia elétrica gerada pelo sistema. Pode também ser utilizado em sistemas isolados que necessitem alimentar uma carga de corrente alternada (CASTRO, 2007). O inversor é responsável por converter a corrente contínua (c.c.) proveniente dos painéis fotovoltaicos em corrente alternada (c.a.) que será injetada na rede. Inversores modernos são capazes de atingir uma eficiência de até 99% na conversão (CEPEL, 2014). Sua representação gráfica em circuitos elétricos é mostrada na Figura 14.

Figura 14 – Símbolo de um inversor



Fonte: CEPEL (2014).

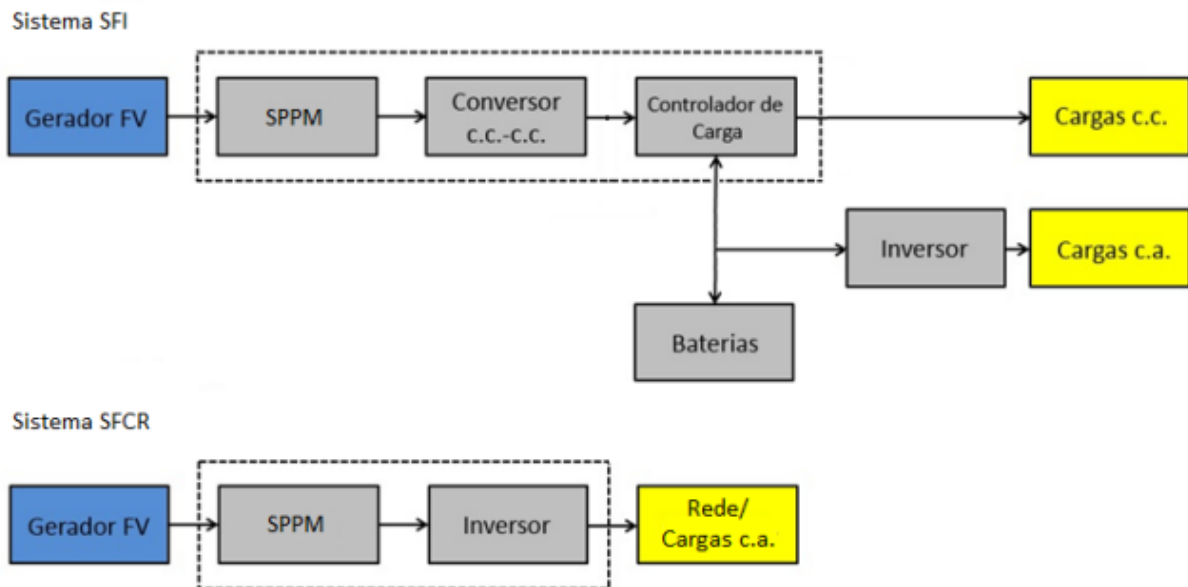
2.6 Seguimento de Ponto de Potência Máxima (SPPM)

Segundo a ABNT (2013), o SPPM é uma “estratégia de controle utilizada para maximizar a potência fornecida pelo gerador fotovoltaico em função das condições de operação”.

Naturalmente, é desejável que o sistema fotovoltaico forneça o máximo de potência possível à carga. Como as condições ambientais (temperatura e radiação solar) não são constantes, durante o dia haverá uma variação do ponto onde a operação ocorrerá da forma mais vantajosa. Buscando manter o módulo operando no ponto correspondente à máxima potência, foram desenvolvidos dispositivos de controle eletrônico que observam as mudanças nas características da curva I-V e atuam sobre os conversores e/ou inversores do sistema, maximizando a transferência de potência do gerador fotovoltaico à carga.

A Figura 15 exemplifica a utilização do SPPM em sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede.

Figura 15 – Exemplos de sistemas utilizando SPPM



Fonte: CEPEL (2014).

O bloco de controle de um dispositivo SPPM recebe como entrada, em geral, dados instantâneos de tensão e corrente do gerador fotovoltaico, podendo também receber parâmetros como a temperatura de operação e a irradiância solar. Os algoritmos do dispositivo então acionam os chaveamentos dos outros componentes conectados a fim de ajustar os valores de tensão e corrente para o ponto de máxima transferência de potência (CEPEL, 2014).

3 Metodologia

3.1 Base de Dados

3.1.1 Programas Utilizados

Para obtenção da base de dados de temperatura e irradiância a serem utilizados na análise computacional, foram utilizados dois programas: o SunData, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) e utilizado como apoio para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pois apresenta dados mensais de irradiação no plano horizontal para planos inclinados em determinadas coordenadas geográficas; e o RADIASOL 2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (Labsol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que apresenta em gráficos os dados horários de irradiação solar e de temperatura de uma cidade, podendo ainda selecionar a inclinação do plano.

3.1.1.1 SunData

Este programa pode ser acessado diretamente pela página da internet do Cepel, através do endereço www.cresesb.cepel.br. Sua base de dados utiliza as informações constantes do Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2017) e o mesmo fornece valores de irradiação solar convertidos do plano horizontal para planos inclinados em três diferentes ângulos como sugestões para instalação de painéis, a saber:

- a) ângulo igual à latitude;
- b) ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação; e
- c) ângulo que fornece o maior valor mínimo diário anual de irradiação.

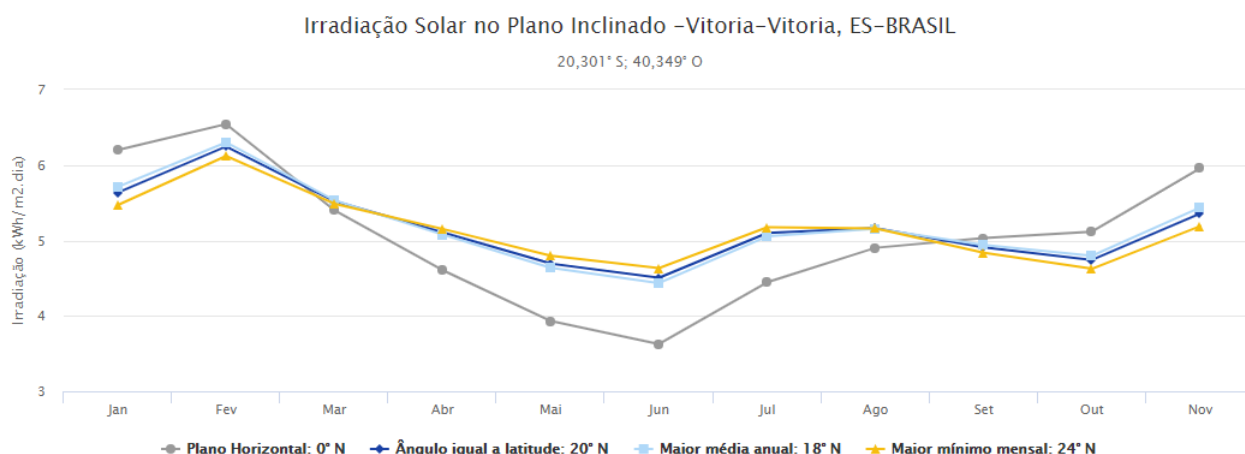
Inserindo como entrada as coordenadas geográficas da localidade desejada, o programa então apresenta em quadros e gráficos a irradiação solar diária média para todos os meses do ano em localidades próximas, além da irradiação diária média anual (mostrada na coluna Média) e da diferença entre a máxima e a mínima (mostrada na coluna Delta). Na Figura 16 são expostos os resultados para a cidade de Vitória - ES, cidade em que foi realizado este estudo.

Figura 16 – Resultados do programa SunData para Vitória - ES

Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Vitória
 Município: Vitória, ES - BRASIL
 Latitude: 20,301° S
 Longitude: 40,349° O
 Distância do ponto de ref. (20,272687° S; 40,3067° O): 5,4 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	6,20	6,54	5,40	4,61	3,93	3,63	3,72	4,45	4,90	5,03	5,12	5,96	4,96	2,92
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	20° N	5,64	6,24	5,52	5,11	4,69	4,51	4,54	5,10	5,16	4,91	4,74	5,36	5,13	1,74
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	5,71	6,30	5,53	5,08	4,64	4,44	4,48	5,05	5,16	4,94	4,80	5,44	5,13	1,86
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	24° N	5,47	6,12	5,49	5,15	4,80	4,63	4,65	5,17	5,16	4,84	4,62	5,19	5,11	1,50



Fonte: www.cresesb.cepel.br.

Segundo CEPEL (2014), o ângulo em que o módulo fotovoltaico deve ser posicionado para geração máxima de energia durante o ano deve ser igual à latitude do local onde será instalado. Tal fato é corroborado a partir da análise dos dados da Figura 16, onde percebe-se que a média anual da irradiação solar no ângulo igual à latitude é a mesma que a média no ângulo de maior média anual, porém a diferença entre a máxima e mínima é menor. Assim, foi escolhido o ângulo de 20° como base para obtenção dos dados de irradiação horária através do outro programa, o RADIASOL 2.

3.1.1.2 RADIASOL 2

O RADIASOL 2 é um programa que pode ser baixado na página de internet do Labsol, através do endereço www.solar.ufrgs.br. Esse programa permite a seleção por estado e cidade de uma localização para se obter os dados desejados de irradiância, sendo possível determinar o ângulo de inclinação e o ângulo de orientação azimutal dos módulos fotovoltaicos, além do albedo local (radiação solar refletida pelo ambiente, como solo ou vegetação). O programa dispõe de uma base de dados que contempla o Atlas Solarimétrico do Brasil, documento elaborado pelo Cepel, além dos dados fornecidos pelo Programa *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), uma colaboração internacional

que visou disponibilizar informações sobre energias renováveis no mundo. Na Figura 17 é mostrada a interface inicial do programa. Também é possível utilizar a entrada manual de dados no RADIUSOL, caso o usuário disponha das informações de radiação diária, umidade e temperatura do local estudado.

Figura 17 – Interface inicial do programa RADIUSOL 2

RadiaSol 2 - Escolher Localidade

Desvio Azimutal: 0

Inclinação do Módulo: 45

Albedo Local: 20

Origem do Dados: ☒ Mapas (SWERA) ☐ Interpolação do Banco de Dados

Cidade: Interpolado

Opções:

Temperatura Média: 40, 30, 20, 10, 0 (JFMAMJJASOND)

Temperatura Mínima: 40, 30, 20, 10, 0 (JFMAMJJASOND)

Temperatura Máxima: 40, 30, 20, 10, 0 (JFMAMJJASOND)

Radiação: 7, 5,25, 3,5, 1,75, 0 (JFMAMJJASOND)

Radiação Inclinada: 7, 5,25, 3,5, 1,75, 0 (JFMAMJJASOND)

Umidade Relativa: 100, 75, 50, 25, 0 (JFMAMJJASOND)

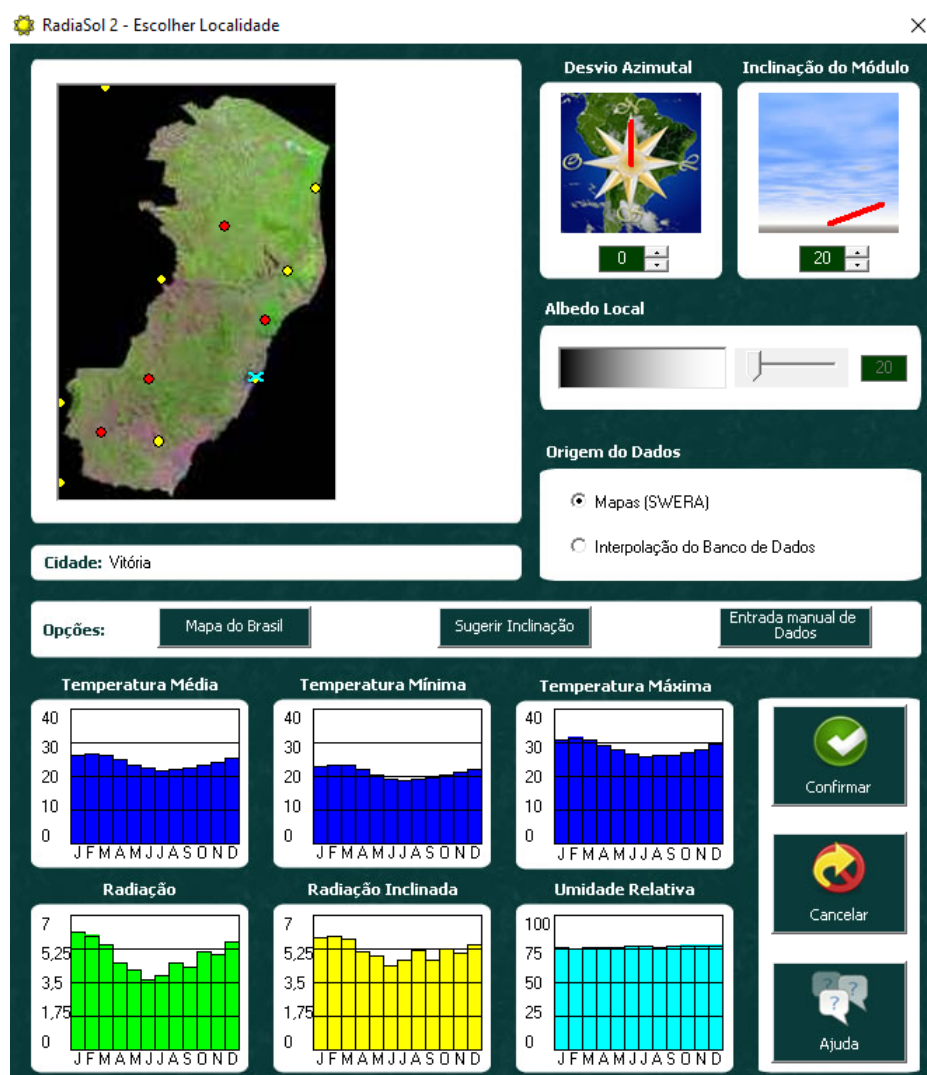
Botões de Ação: Confirmar, Cancelar, Ajuda

Fonte: o autor.

Com os parâmetros de entrada, o programa realiza os cálculos de intensidade da radiação solar em superfície inclinada e retorna com dados horários de irradiação, além das temperaturas médias e mínimas e informações de umidade relativa. Os dados podem ser separados em radiação global horizontal, que seria a radiação com inclinação nula, ou em radiação inclinada, com suas componentes: inclinada direta, que incide diretamente na superfície; inclinada difusa, que sofre espalhamento na atmosfera antes de atingir a superfície; e inclinada, que considera ambas as variações (CEPEL, 2014).

A inclinação do módulo foi definida em 20° , como mencionado anteriormente, e o desvio azimutal mantido nulo, pois representa o melhor ângulo de desvio para a maximização da geração na posição geográfica escolhida (módulo voltado em direção ao Norte) (CEPEL, 2014). O albedo foi mantido em 20, valor padrão do programa, por não haver informações mais precisas disponíveis acerca desse parâmetro. A Figura 18 mostra a interface do programa já com a cidade escolhida em Vitória - ES e os demais dados inseridos.

Figura 18 – Interface do RADIASOL com os dados inseridos

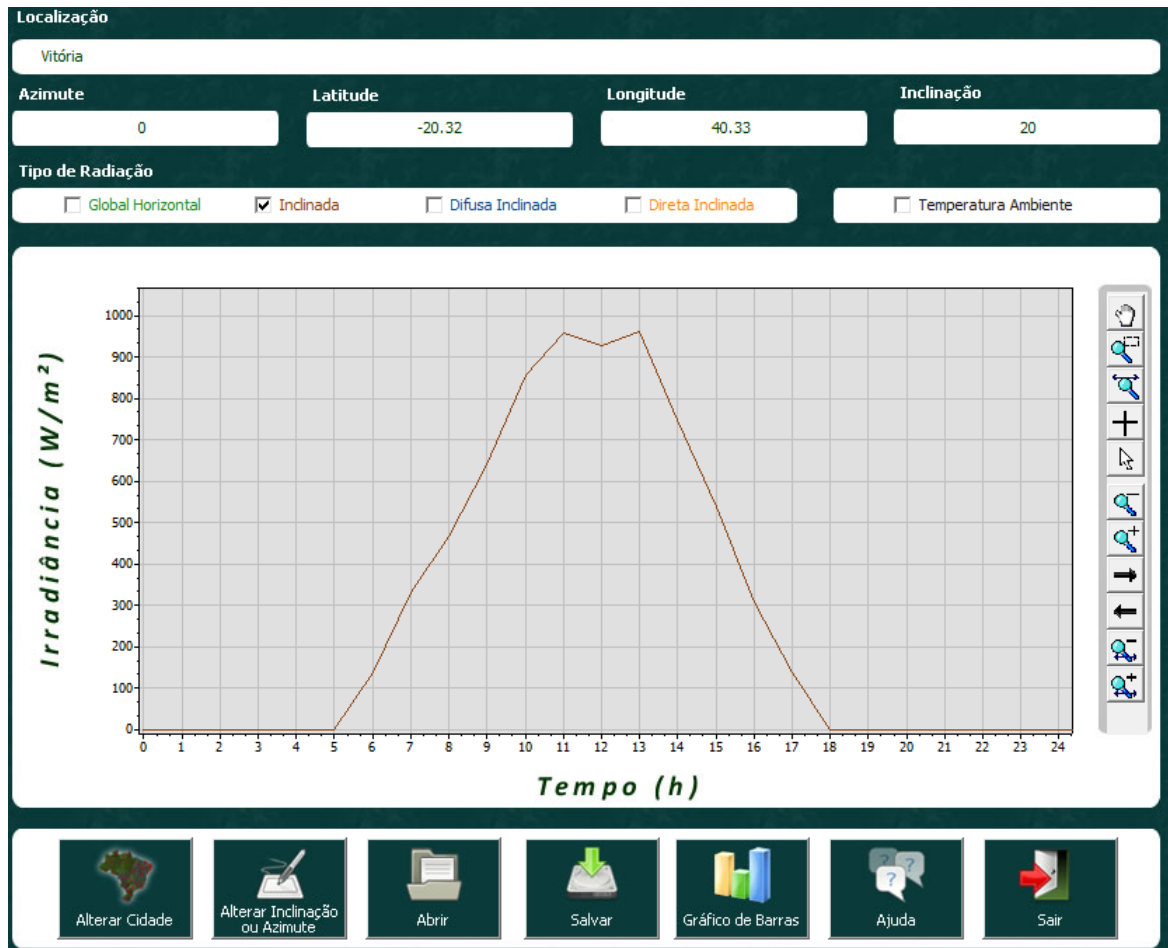


Fonte: o autor.

Após clicar no botão “Confirmar”, são gerados gráficos com os valores horários para a irradiância e temperatura para a localidade escolhida. Os gráficos contemplam o intervalo de um ano de informações em intervalos de hora em hora, que podem ser salvos em um arquivo. Este arquivo pode ser visualizado utilizando-se o editor Bloco de Notas do Windows, que permite que sejam encontrados os valores exatos utilizados para

a elaboração dos gráficos pelo RADIUSOL, organizados em uma matriz. A Figura 19 mostra o resultado do programa para o primeiro dia da base de dados em Vitória - ES, considerando a radiação total inclinada.

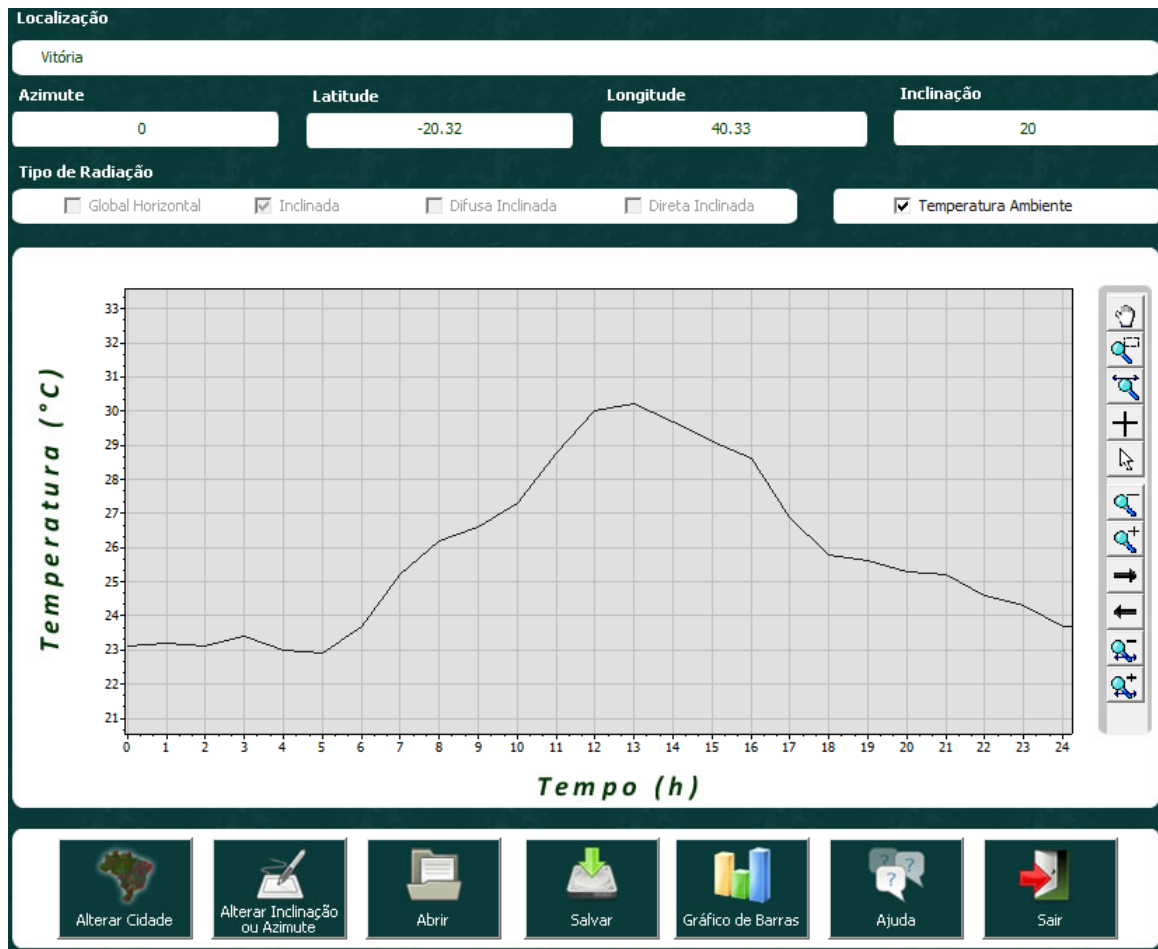
Figura 19 – Gráfico de irradiância horária para Vitória - ES



Fonte: o autor.

A irradiância máxima encontrada neste dia foi próxima do valor de 1000 W/m^2 . Durante o ano todo, o comportamento é semelhante nos outros dias, com pequenas variações para cima ou para baixo dependendo do clima. O valor máximo registrado no ano foi de aproximadamente 1200 W/m^2 . Na Figura 20 vemos o resultado do programa para a temperatura da cidade de Vitória, no mesmo dia selecionado.

Figura 20 – Gráfico de temperatura horária para Vitória - ES



Fonte: o autor.

Assim, os valores escolhidos de temperatura e irradiância para simular a operação do módulo fotovoltaico foram definidos de acordo com os dados selecionados e extraídos do arquivo gerado pelo programa. Esses dados representam a variação a cada hora da temperatura e da irradiância, durante um dia, a que o módulo foi submetido na simulação computacional.

3.2 Simulação

3.2.1 Programa Utilizado

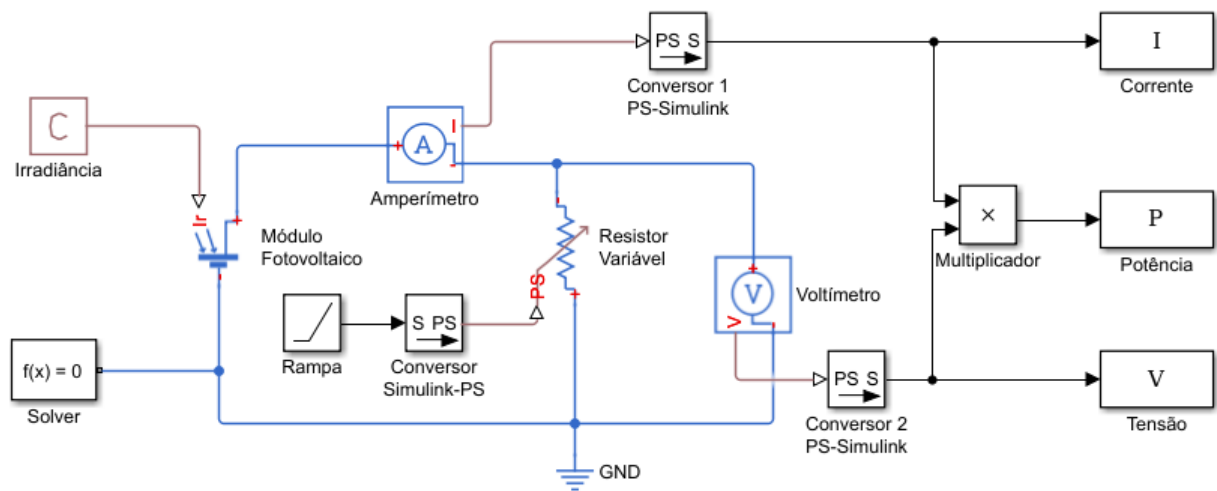
A plataforma utilizada para simulação do módulo fotovoltaico foi o Simulink, uma ferramenta integrada ao programa MATLAB, desenvolvido pela empresa MathWorks. O Simulink permite a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos por meio de uma interface gráfica em que são criados diagramas de blocos (COELHO; PINHO, 2015). O programa fornece uma biblioteca com grande variedade de blocos predefinidos para

representar porções de sistemas, mas também permite ao utilizador a criação de blocos próprios com parâmetros específicos. A versão utilizada foi a presente na versão R2017a do MATLAB.

3.2.2 Caracterização do Módulo

Para a caracterização de um módulo fotovoltaico, foi elaborado um circuito no Simulink para obtenção das curvas I-V e P-V do módulo em diferentes condições de operação, mostrado na Figura 21. O circuito utilizou a biblioteca Simscape, que modela vários sistemas existentes em blocos, em conjunto com a biblioteca padrão do Simulink.

Figura 21 – Circuito de simulação para obtenção de curvas I-V e P-V



Fonte: o autor.

O circuito é adaptado do trabalho de Shah e Biate (2016), e consiste basicamente em um módulo fotovoltaico conectado a um resistor variável, com um amperímetro em série e um voltímetro em paralelo. O módulo recebe como entrada a irradiância solar, e pode ter sua temperatura de operação modificada em suas configurações. O resistor variável recebe como entrada uma rampa e representa o início da simulação em curto-circuito ($R = 0$) e o fim em circuito aberto ($R = \infty$).

Os conversores presentes no circuito têm como objetivo permitir a comunicação entre blocos de diferentes bibliotecas do Simulink, enquanto o bloco “Solver” é necessário para todas as simulações que utilizam modelos Simscape e não representa nenhuma parte física do circuito, apenas especifica as opções de simulação.

Neste trabalho utilizou-se um módulo fotovoltaico modelo CS5A-200M da fabricante Canadian Solar, multinacional que desenvolve dispositivos para sistemas fotovoltaicos e

está presente no mercado brasileiro. As especificações do módulo são apresentadas na Tabela 3, retiradas do *datasheet* fornecido pelo fabricante (encontra-se em anexo).

Tabela 3 – Características do módulo fotovoltaico

Característica	CS5A-200M
Potência Máxima Nominal*	200 W
Tensão de Curto-circuito*	45,3 V
Corrente de Circuito Aberto*	5,71 A
Eficiência do Módulo*	15,65 %
Número de Células	72
Dimensões	1595 x 801 x 40 mm
Tipo de Célula	Silício Monocristalino

Fonte: *datasheet* do módulo (modificada pelo autor).

*: dados obtidos sob STC.

O próprio Simulink possui, em sua base de dados, informações sobre módulos fotovoltaicos, incluindo o CS5A-200M, como ilustrado na Figura 22. Tal fato permitiu extrair outras informações necessárias ao modelo, como o fator de idealidade dos diodos das células ($n = 1.0386$) e sua resistência série ($R_s = 0.40944 \Omega$).

Figura 22 – Características do módulo no Simulink

Module data

Module: Canadian Solar CS5A-200M

Maximum Power (W) 200.09
Cells per module (Ncell) 72

Open circuit voltage Voc (V) 45.3
Short-circuit current Isc (A) 5.71

Voltage at maximum power point Vmp (V) 37.4
Current at maximum power point Imp (A) 5.35

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) -0.374
Temperature coefficient of Isc (%/deg.C) 0.089002

Model parameters

Light-generated current IL (A) 5.7151

Diode saturation current IO (A) 3.2403e-10

Diode ideality factor 1.0386

Shunt resistance Rsh (ohms) 513.1124

Series resistance Rs (ohms) 0.40944

Fonte: o autor.

Os dados foram introduzidos no bloco referente ao módulo fotovoltaico no circuito elaborado. As informações de entrada do mesmo são referentes à uma única célula, portanto os valores de I_{SC} e V_{OC} obtidos foram divididos pelo número de células presentes no módulo

(72), resultando nos valores mostrados na Figura 23 (as demais configurações não foram alteradas). A temperatura de operação foi mantida em 25°C.

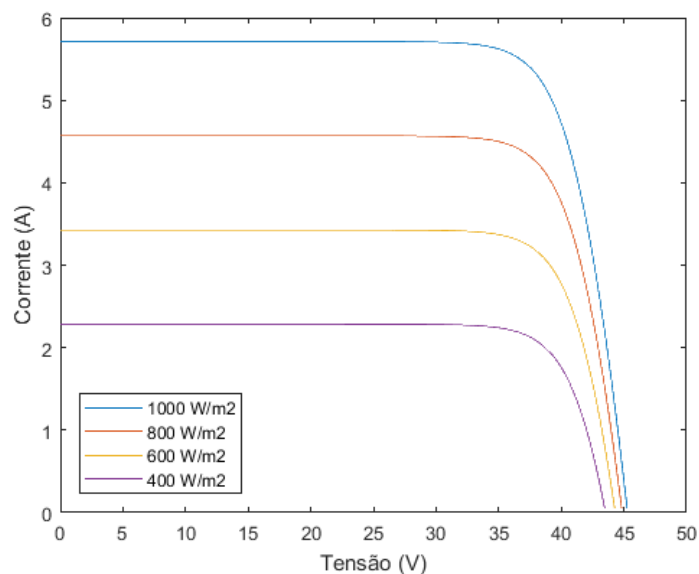
Figura 23 – Valores inseridos no bloco do módulo fotovoltaico no Simulink

Parameter	Value	Unit
Short-circuit current, Isc:	5.71	A
Open-circuit voltage, Voc:	0.62917	V
Irradiance used for measurements, Ir0:	1000	W/m ²
Quality factor, N:	1.0386	
Series resistance, Rs:	0.00568667	Ohm

Fonte: o autor.

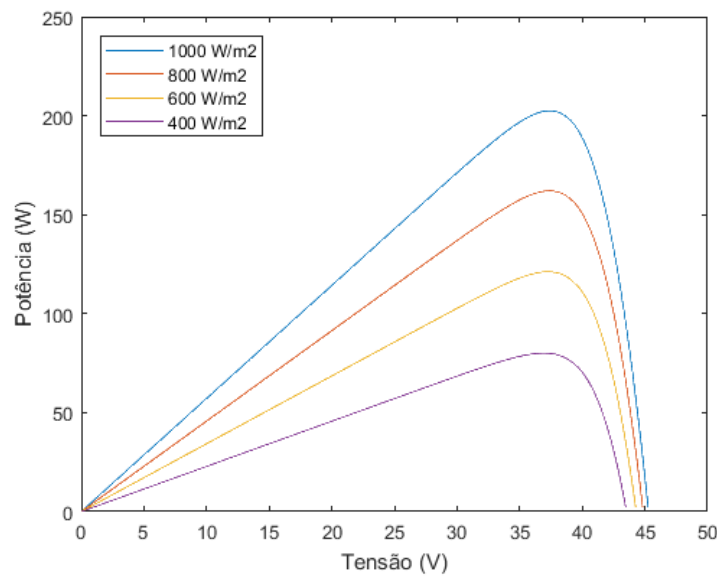
Em seguida, foram executadas várias simulações variando-se o valor da irradiância solar incidente no módulo. Através do MATLAB, foi possível obter os valores de corrente, potência e tensão gerados na simulação pelo Simulink e, em seguida, representar graficamente as curvas I-V e P-V do módulo analisado utilizando o comando *plot*, ilustradas na Figura 24 e Figura 25, respectivamente.

Figura 24 – Curvas I-V obtidas para diferentes valores de irradiância



Fonte: o autor.

Figura 25 – Curvas P-V obtidas para diferentes valores de irradiância



Fonte: o autor.

Usando a função $\max(x)$ do MATLAB, onde “x” é uma variável escolhida pelo usuário, é possível encontrar o valor máximo de potência entregue à carga em cada situação de operação. Neste caso, a variável analisada foi o vetor “P”, que armazenou os valores de potência do módulo. Estes valores são expostos na Tabela 4.

Tabela 4 – Potência máxima fornecida para diferentes valores de irradiância

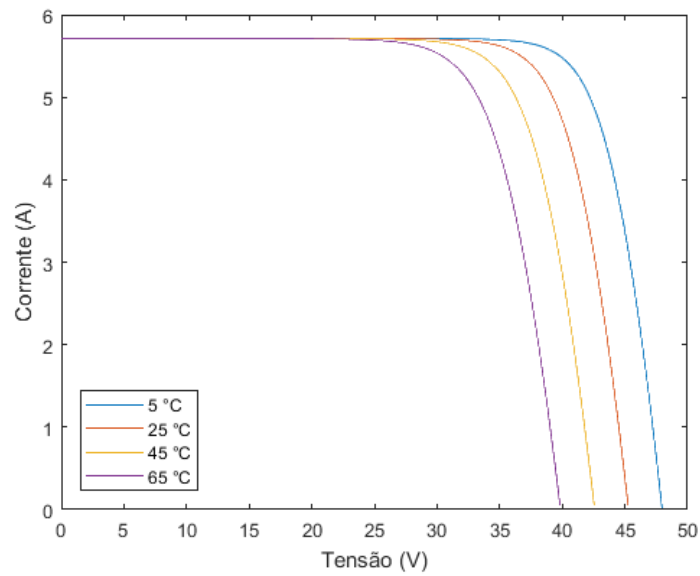
Irradiância (W/m^2)	Potência Máxima P_{MP} (W)
1000	202,47
800	162,04
600	121,18
400	80,06

Fonte: o autor.

Apesar do valor de potência encontrado na simulação de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ de irradiância ser superior ao valor nominal, a diferença é de aproximadamente 1%, o que encontra-se dentro de um intervalo razoável de erro quando comparado com a aplicação real, não invalidando assim a simulação.

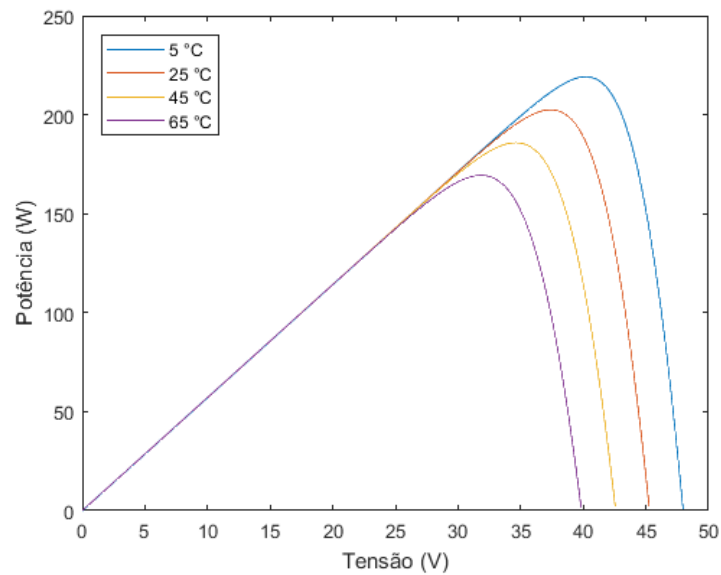
Posteriormente, foram executadas novas simulações no programa, desta vez mantendo o valor de irradiância constante e variando-se a temperatura de operação do módulo. Novamente, os dados obtidos foram utilizados para gerar novas curvas I-V e P-V para o módulo, exibidas na Figura 26 e na Figura 27.

Figura 26 – Curvas I-V obtidas para diferentes valores de temperatura



Fonte: o autor.

Figura 27 – Curvas P-V obtidas para diferentes valores de temperatura



Fonte: o autor.

Novamente, foi utilizado o comando $\max(x)$ do MATLAB para encontrar o valor máximo de potência nas simulações de diferentes temperaturas de operação, exibidos na Tabela 5.

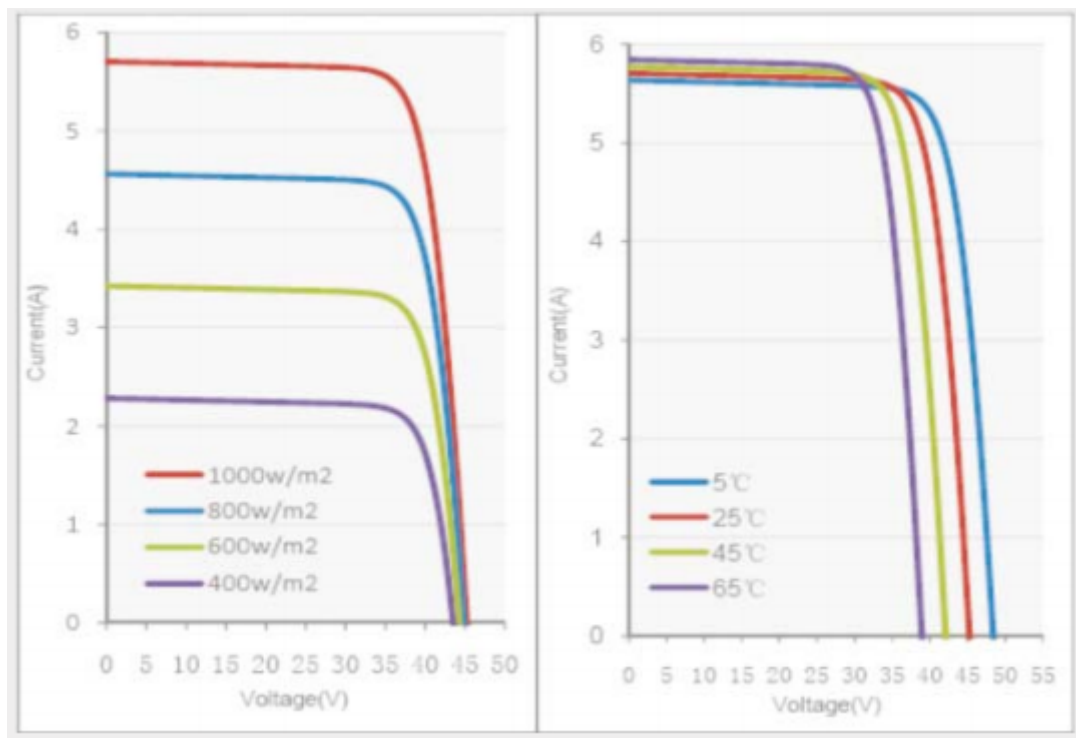
Tabela 5 – Potência máxima fornecida para diferentes valores de temperatura

Temperatura (°C)	Potência Máxima P_{MP} (W)
5	219,16
25	202,47
45	185,86
65	169,37

Fonte: o autor.

As curvas I-V obtidas nas simulações podem ser comparadas com as curvas fornecidas pelo fornecedor no *datasheet* do módulo fotovoltaico. Na Figura 28 são reproduzidas estas curvas.

Figura 28 – Curvas I-V fornecidas no *datasheet* do módulo CS5A-200M



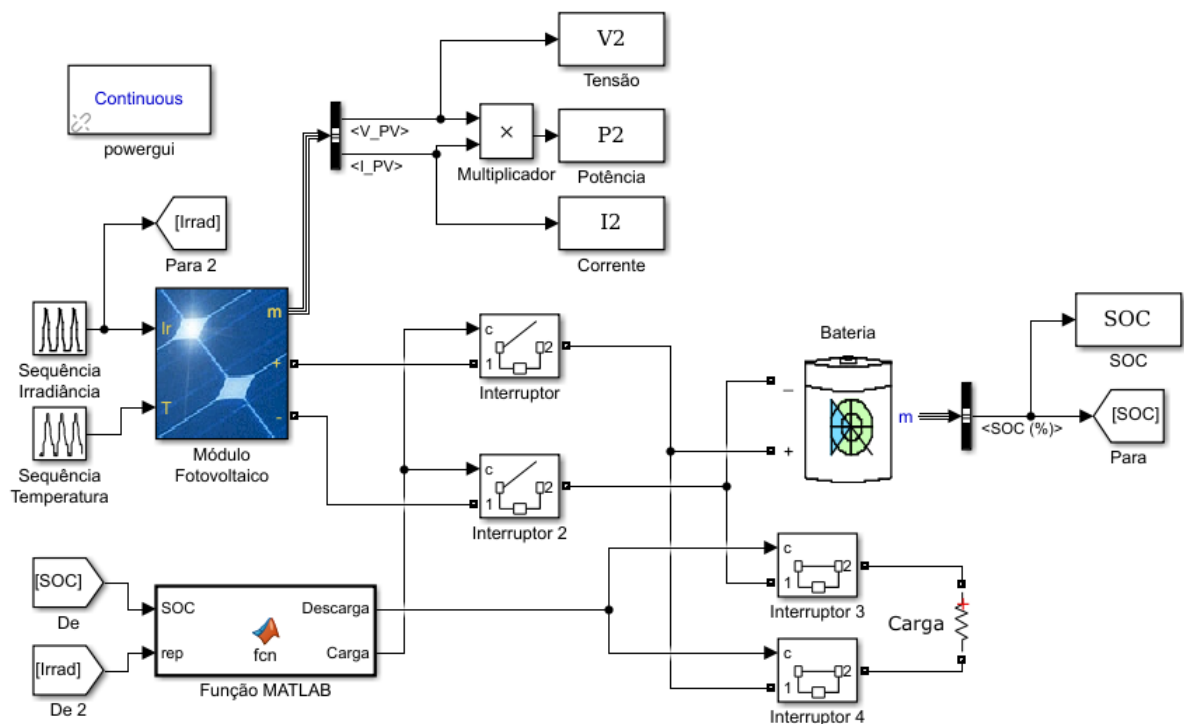
Fonte: *datasheet* do módulo.

Analisando-se as curvas I-V para diferentes temperaturas e irradiâncias obtidas através da simulação e comparando-as com as curvas fornecidas no *datasheet*, é possível atestar a fidelidade do modelo de módulo fotovoltaico criado no Simulink em relação ao produto real, pois as curvas apresentam mesmo formato e valores de V_{OC} e I_{SC} que os fornecidos no documento.

3.2.3 Simulação do Módulo Conectado à uma Bateria e uma Carga

A fim de estudar o módulo em operação normal e verificar sua eficiência, um novo circuito foi elaborado utilizando componenetes da biblioteca padrão do Simulink. Este circuito é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Circuito de simulação do funcionamento do módulo



Fonte: o autor.

O circuito consiste em um módulo fotovoltaico conectado, através de interruptores, a uma bateria, que por sua vez está conectada em paralelo à uma carga resistiva, também por meio de interruptores. Estes interruptores são acionados por um controlador de carga básico, representado por uma função do MATLAB (ver Apêndice A). Ao detectar um nível percentual de carga baixo na bateria, (representado pela sigla SOC no circuito, do inglês *State of Charge*), neste caso 20%, o controlador aciona os interruptores, desconectando a bateria da carga e conectando-a ao módulo fotovoltaico para que seja carregada. O inverso ocorre quando a bateria está em um alto nível de carga (80% neste caso), quando o controlador então desconecta a bateria do módulo e a conecta à carga. O controlador também desconecta o módulo caso não haja geração de energia, ou seja, nenhuma irradiância.

A bateria utilizada foi a padrão fornecida na biblioteca do Simulink, com tensão nominal de 7,2 V. Em um teste da simulação, utilizando-se uma carga puramente resistiva

de 1 k Ω , a descarga da bateria se mostrou muito lenta por conta da pequena corrente fornecida à carga, efetivamente descarregando aproximadamente 0,01% durante 10 minutos de simulação executados. Assim, visto que o foco do trabalho é a eficiência do módulo em função de suas entradas, a carga foi reduzida a um valor próximo da tensão nominal, definido em 7 Ω . Isso permitiu que a descarga da bateria fosse observada em tempo menor, de cerca de 1% a cada 10 minutos, sem prejuízo às informações coletadas do módulo fotovoltaico, otimizando o tempo de simulação.

O valor de SOC inicial foi então definido como 20,10%, para que fosse possível perceber a descarga inicial da bateria e consequente carregamento após ultrapassar o limiar definido no controlador durante a simulação. As características da bateria do modelo são mostradas na Figura 30.

Figura 30 – Características da bateria no Simulink

The figure displays two screenshots of the Simulink Battery block parameter interface. The left screenshot shows the 'Parameters' tab with 'Lithium-Ion' selected. The right screenshot shows the 'Discharge' tab with various parameters set.

Parameter	Value
Type	Lithium-Ion
Temperature	<input type="checkbox"/> Simulate temperature effects
Aging	<input type="checkbox"/> Simulate aging effects
Nominal voltage (V)	7.2
Rated capacity (Ah)	5.4
Initial state-of-charge (%)	20.10
Battery response time (s)	30
Determined from the nominal parameters of the battery	<input type="checkbox"/>
Maximum capacity (Ah)	5.4
Cut-off Voltage (V)	5.4
Fully charged voltage (V)	8.3807
Nominal discharge current (A)	2.3478
Internal resistance (Ohms)	0.013333
Capacity (Ah) at nominal voltage	4.8835
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]	[7.7788 0.2653]

Fonte: o autor.

As características inseridas no bloco referente ao módulo fotovoltaico foram exatamente as mesmas mostradas na Figura 22, para que o mesmo represente o CS5A-200M. Do bloco são extraídas as informações de corrente, tensão e potência entregue à bateria.

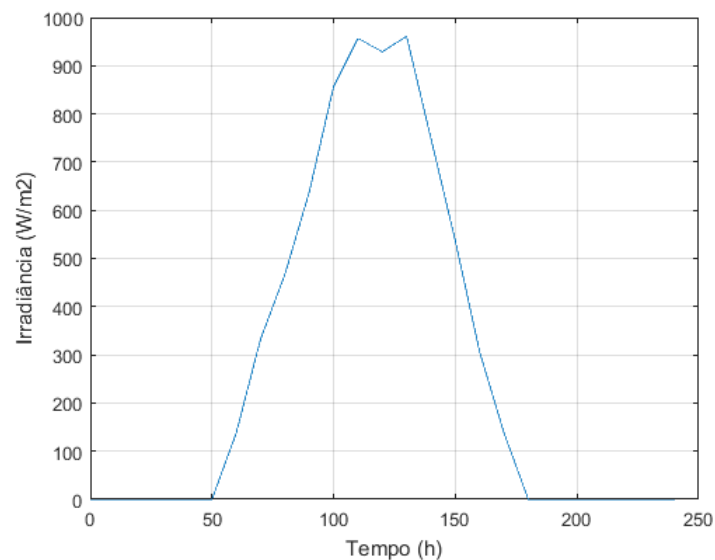
O bloco de sequência é responsável por replicar uma sequência predefinida. Na simulação, foram utilizados dois blocos, um representando a variação da irradiância e outro a da temperatura, conforme os gráficos mostrados na Figura 19 e na Figura 20, respectivamente. Com o circuito montado e caracterizado, foram iniciadas as simulações do módulo.

4 Resultados

A simulação foi realizada em função da variação da irradiância e temperatura, de acordo com os valores demonstrados no Capítulo 3. Para isso, utilizou-se um bloco que simulava uma sequência predefinida na entrada da irradiância e da temperatura do módulo.

Em seguida, através do MATLAB foram representadas as curvas com os valores da irradiância, da temperatura, da carga da bateria e da potência fornecida à bateria, todas em função do tempo.

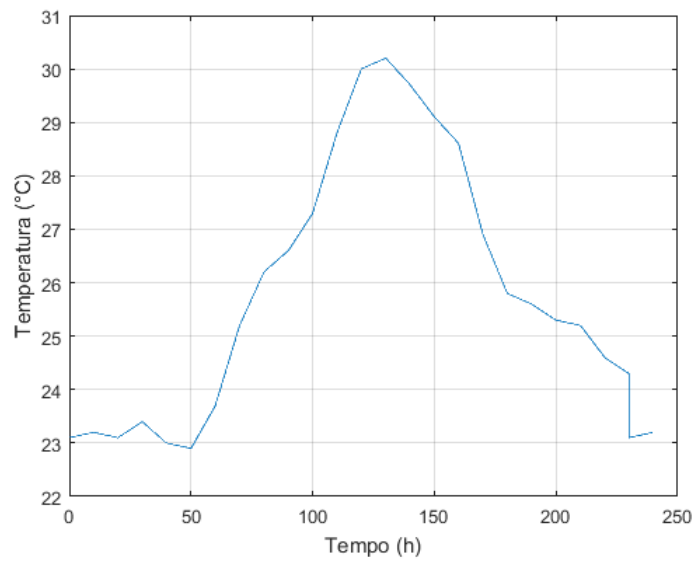
Figura 31 – Variação da irradiância em função do tempo



Fonte: o autor.

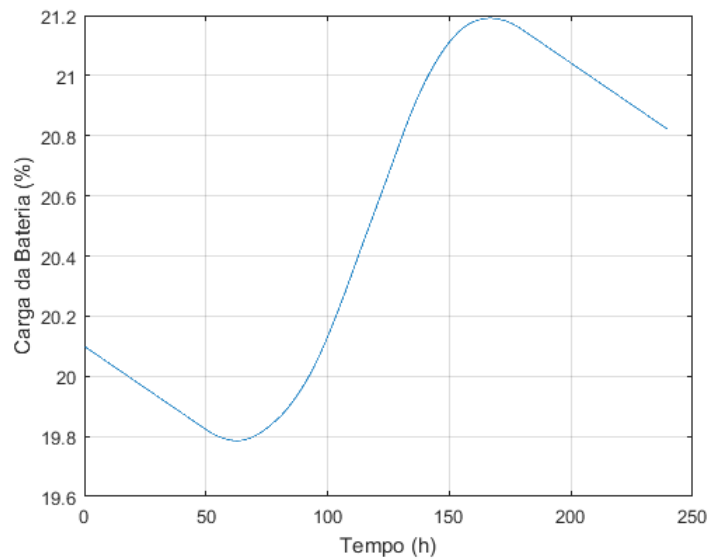
A Figura 31 confirma a semelhança dos dados de entrada de temperatura com os dados do programa RADIASOL 2. Situação idêntica ocorre na Figura 32, neste caso para os dados de entrada de temperatura no módulo.

Figura 32 – Variação da temperatura em função do tempo



Fonte: o autor.

Figura 33 – Variação da carga da bateria em função do tempo



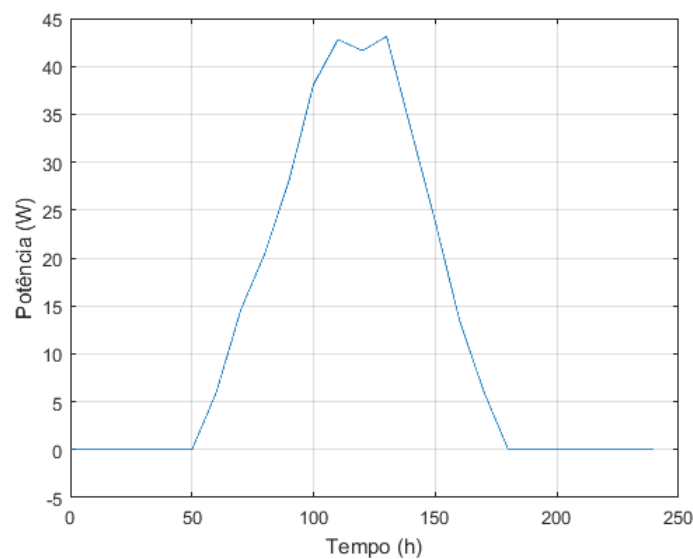
Fonte: o autor.

Na Figura 33, percebemos que a bateria está descarregando durante a madrugada. Como não há geração de energia por parte do módulo, pois a irradiação ainda é nula, a bateria descarrega um pouco mais do que o valor delimitado no controlador. Entretanto, quando o módulo começa a receber radiação solar, o controlador atua para que a bateria seja então carregada, conectando a mesma ao módulo. Essa situação se mantém até a

irradiação atingir o zero novamente e o módulo não ser capaz de carregar a bateria, quando o controlador desconecta o módulo e conecta a carga à bateria.

Os valores de temperatura e irradiância extraídos da base de dados variaram de hora em hora. Entretanto, a bateria selecionada possui uma velocidade de carga e descarga que não corresponde fielmente ao tempo do dia em horas, e sim ao tempo de simulação. Para que a bateria fosse carregada consideravelmente, a ponto do controlador atuar e desconectar o módulo fotovoltaico, a simulação deveria se estender por aproximadamente 3 horas e meia.

Figura 34 – Variação da potência fornecida pelo módulo em função do tempo



Fonte: o autor.

Analisando a Figura 34, vemos a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico à bateria durante o dia. A curva possui bastante semelhança com a curva de irradiação diária, sofrendo pequena influência da temperatura de operação do módulo.

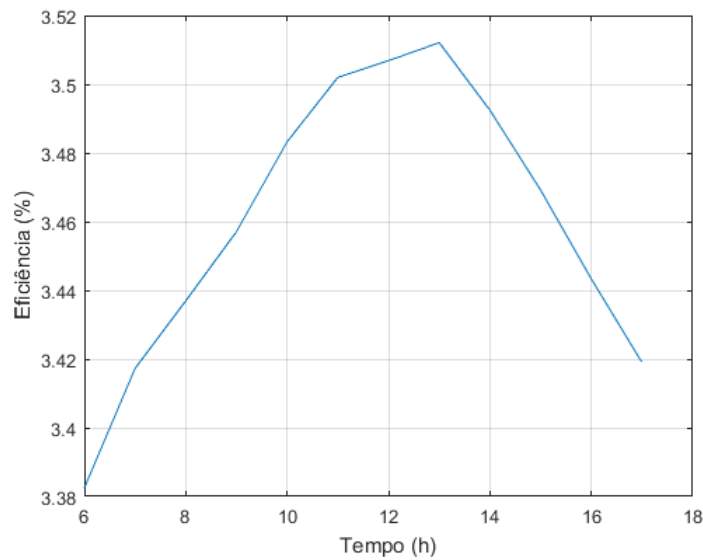
Quando comparados os valores de P_{MP} expostos na Tabela 4 e na Tabela 5, vemos que uma variação na irradiância de 400 a 1000 W/m² exerce uma influência consideravelmente maior na potência do que uma variação na temperatura de 23 a 30°C. Um aumento da irradiância em 200 W/m² corresponde a um aumento de aproximadamente 40 W na potência máxima capaz de ser entregue pelo módulo, enquanto um incremento de 20°C na temperatura resulta em decréscimo de aproximadamente 17 W. Assim, a variação de apenas 7°C, como ocorreu durante o dia, provocaria uma redução máxima de 6 W na potência fornecida pelo módulo à bateria, correspondente à 14% da potência máxima encontrada no cenário simulado (42,92 W).

Com os dados de largura e comprimento da Tabela 3, calculou-se a área efetiva

(parte que recebe radiação solar) do módulo como sendo igual $A = 1,277595 \text{ m}^2$. Assim, utilizando-se uma equação idêntica à Equação 2.4, porém com a área do módulo no lugar da área da célula, foi calculada a eficiência do módulo em função do tempo.

O primeiro cálculo considerou o valor da potência instantânea no lugar de P_{MP} . Assim, no tempo de simulação que correspondia a cada hora do dia foi verificada a potência que estava sendo fornecida pelo equipamento à bateria e, novamente através de equação idêntica à Equação 2.4, comparado o valor de potência com a irradiância recebida no instante. Esse resultado é exibido Figura 35.

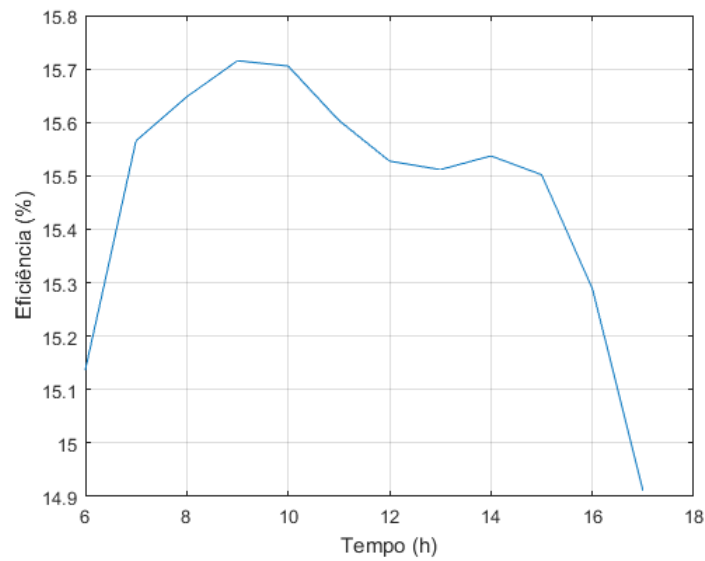
Figura 35 – Variação da eficiência do módulo em função do tempo no primeiro cenário



Fonte: o autor.

Em outro cenário, foi considerado que o módulo estaria operando em seu ponto de potência máxima a cada hora do dia. Para obter os dados decorrentes desse caso, foi utilizado novamente o circuito de caracterização do painel, mostrado na Figura 21. Os valores de irradiância e temperatura da célula utilizados foram os mesmos do primeiro cenário, porém o valor de P_{MP} foi encontrado a cada hora através da função $\max(x)$ do MATLAB.

Figura 36 – Variação da eficiência do módulo em função do tempo no segundo cenário



Fonte: o autor.

Como o valor de irradiância é nulo das 17 horas às 5 horas, o resultado da equação tende a infinito quando considerados estes pontos. Portanto, o MATLAB desconsiderou estes resultados na representação do gráfico da Figura 35 e da Figura 36.

Esses gráficos mostram que o módulo operou com uma eficiência quase constante durante o dia na simulação, com uma variação de apenas 0,12% no primeiro cenário e de 0.8% na operação em condições ideais. Como não foram alterados padrões construtivos do mesmo, como as resistências série e paralelo, é de se esperar que o mesmo opere sem grandes variações na eficiência de sua conversão.

5 Conclusão

5.1 Comentários Acerca dos Resultados

Através do Simulink e com auxílio do MATLAB, foi possível criar um circuito para caracterização de um módulo fotovoltaico através de simulação computacional. A fidelidade do painel simulado com o painel real foi confirmada, pois as curvas características I-V simuladas foram semelhantes às fornecidas pelo fabricante no *datasheet* do componente.

O mesmo programa permitiu a simulação da operação do módulo em um circuito simples, conectado a uma bateria através de um controlador de carga básico. Assim, foi possível analisar computacionalmente o comportamento do módulo em funcionamento, observando as alterações na potência fornecida pelo equipamento em resposta às variações de temperatura e irradiância que ocorrem naturalmente durante determinado dia.

A velocidade de carga e descarga da bateria não correspondeu fielmente ao tempo do dia em horas utilizado na simulação, e sim ao tempo decorrido da mesma. Isso significou uma carga de apenas 1,4% na bateria numa simulação que representou um dia completo, o que não corresponde à realidade. Portanto, seu comportamento foi analisado através do percentual de carga (SOC) apenas de forma didática, a fim de visualizar o correto funcionamento do circuito simulado, com a correta atuação do controlador de carga e a capacidade de carregamento da bateria pelo painel fotovoltaico.

Analisando a Figura 34, é notável a forte influência da irradiância na potência entregue pelo módulo. O formato da curva aproxima-se bastante da curva de irradiância, porém também sofre influência da temperatura, cujo comportamento é semelhante ao da irradiância nos horários de pico do sol (próximo ao meio-dia). Portanto, para que haja maior geração de energia em um sistema fotovoltaico, será mais vantajoso aumentar sua exposição à irradiância solar do que tentar reduzir sua temperatura de operação.

As curvas de eficiência geradas demonstraram que a variação da eficiência do módulo durante o dia é menor do que 1% mesmo no caso em que o mesmo opera em condições ideais, visto que o componente foi fabricado para operar em um certo nível de eficiência independente das mudanças nas condições ambientais.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

A simulação pode ser modificada de algumas formas, objetivando um estudo de uma estrutura de magnitude maior. A quantidade de painéis pode ser acrescida, com conexões em série e paralelo dos mesmos, a fim de representar um sistema de geração

fotovoltaico residencial. Consequentemente, demais componentes podem ser inseridos na simulação para representar com maior fidelidade um sistema real e aumentar a eficiência de operação do mesmo, tais como um banco de baterias (no lugar de uma só), inversores, controladores mais sofisticados, dispositivos de SPPM, ou mesmo a conexão do sistema gerador à rede elétrica.

Outros estudos podem ser realizados para maximização da eficiência através do controle da irradiância e da temperatura do painel. Como exemplo, Silva (2017) demonstrou que um seguidor solar de baixo custo, desenvolvido com estrutura de canos PVC e controlado por meio de Arduino, foi capaz aumentar a eficiência real do sistema móvel em 24.01% em relação ao sistema fixo que alimentava lâmpadas LED.

A base de dados utilizada pode ser estendida para que a simulação consiga representar a eficiência durante todo o ano. Neste estudo, somente foi considerado um dia do verão. Porém, com uma base de dados anual também pode ser possível determinar a viabilidade de utilização de um sistema de geração fotovoltaica em determinada localidade.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10899*: Energia solar fotovoltaica — terminologia. Rio de Janeiro, 2013. 11 p. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 39, 40 e 41.

BÜHLER, A. J. Determinação de parâmetros fotovoltaicos a partir de ensaios de curvas características sem iluminação. 2007. Citado 6 vezes nas páginas 29, 30, 33, 34, 35 e 36.

CARNEIRO, J. A. O. Módulos fotovoltaicos: Características e associações. *Monografia*, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 40.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. *Eletrônica de Potência*, v. 13, n. 3, p. 141–146, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 33.

CASTRO, R. M. G. Introdução à energia fotovoltaica. *DEEC/Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa*, 2007. Citado 6 vezes nas páginas 29, 30, 32, 35, 40 e 41.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 30 out 2018. Citado 18 vezes nas páginas 25, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 41, 42, 44, 45 e 46.

COELHO, J. P.; PINHO, T. *Introdução ao Simulink*: Aplicações na engenharia. [S.l.], 2015. Citado na página 48.

DEPARTAMENTO DE INFORMAÇÕES E ESTUDOS ENERGÉTICOS. *Energia Solar no Brasil e no Mundo*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. 8 p. Citado na página 27.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira. *Nota Técnica da EPE*, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://jornalggn.com.br/sites/default/files/documentos/nt_energiasolar_2012.pdf>. Acesso em: 13 nov 2018. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

GREEN, C. M.; LOMASK, M. *Vanguard*: A history. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1970. 308 p. Disponível em: <<https://history.nasa.gov/SP-4202.pdf>>. Acesso em: 27 out 2018. Citado na página 25.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos, 2017. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acesso em: 02 dez 2018. Citado na página 43.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 60904-3*: Photovoltaic devices - part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic solar devices with reference spectral irradiance data. 2. ed. Genebra, 2008. Citado na página 32.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Key World Energy Statistics*. Paris, 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>. Acesso em: 30 out 2018. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- NASCIMENTO, C. A. do. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. *Diss. Universidade Federal de Lavras*, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 25, 29, 30, 31 e 38.
- SHAH, M. W.; BIATE, R. L. Design and simulation of solar pv model using matlab/simulink. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 7, n. 3, 2016. Citado na página 49.
- SILVA, T. V. da. *Análise de eficiência de um seguidor solar em sistema conectado à rede: viabilidade econômica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 64.
- SOLARGIS. *World Map of Global Horizontal Irradiation*. 2013. Disponível em: <<https://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview>>. Acesso em: 27 out 2018. Citado na página 26.

Apêndices

APÊNDICE A – Código de MATLAB do Controlador de Carga do Circuito

```
function[Descarga,Carga] = fcn(SOC)
```

```
    Descarga=1;
```

```
    Carga=0;
```

```
if (SOC>=80)
```

```
    Descarga=1;
```

```
    Carga=0;
```

```
end
```

```
if (SOC<20)
```

```
    Descarga=0;
```

```
    Carga=1;
```

```
end
```

```
if (Irrad==0)
```

```
    Descarga=1;
```

```
    Carga=0;
```

```
end
```


Anexos

ANEXO A – *Datasheet* do Módulo Fotovoltaico CS5A-200M



CS5A

185/190/195/200/205M



CS5A is a robust all-purpose solar module with 72 solar cells. These modules can be used for on-grid and off-grid solar applications. Our meticulous design and production techniques ensure a high-yield, long-term performance for every module produced. Our rigorous quality control and in-house testing facilities guarantee Canadian Solar's modules meet the highest quality standards possible.

Best Quality

- 235 quality control points in module production
- EL screening to eliminate product defects
- Current binning to improve system performance
- High PID Resistance
- Accredited Salt mist/Ammonia resistance
- Top performance by PVUSA Test Conditions (PTC) rating

Best Warranty Insurance

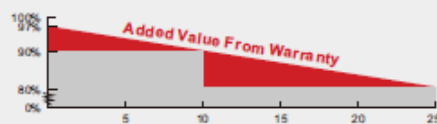
- 25 years worldwide coverage
- 100% warranty term coverage
- Providing third party bankruptcy rights
- Non-cancellable
- Immediate coverage
- Insured by 3 world top insurance companies

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC61730, IEC61701 ED2, UL 1703, IEC 62716, CEC Listed, JET, CE, MCS, KEMCO, CQC
- ISO9001: 2008: Quality Management System
- ISO/TS 16949:2009: The automotive quality management system
- ISO14001:2004: Standards for Environmental management system
- QC080000 HSPM: The Certification for Hazardous Substances Regulations
- OHSAS 18001:2007: International standards for occupational health and safety

Key Features

- High module efficiency up to 16.05%
- Positive power tolerance: 0 ~ +5W
- Robust frame to up to 5400 Pa load
- Self-cleaning surface
- Outstanding performance at low irradiance
- High energy yield at Low NOCT
- Backed By Our New 10/25 Linear Power Warranty Plus our added 25 year insurance coverage



- 10 year product warranty on materials and workmanship
- 25 year linear power output warranty



www.canadiansolar.com

Electrical Data

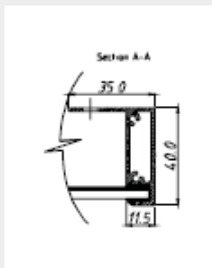
STC	CS5A-185M	CS5A-190M	CS5A-195M	CS5A-200M	CS5A-205M
Nominal Maximum Power (Pmax)	185W	190W	195W	200W	205W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	36.4V	36.6V	37.0V	37.4V	37.7V
Optimum Operating Current (Imp)	5.09A	5.19A	5.27A	5.35A	5.43A
Open Circuit Voltage (Voc)	44.6V	44.8V	45.0V	45.3V	45.4V
Short Circuit Current (Isc)	5.46A	5.52A	5.52A	5.71A	5.81A
Module Efficiency	14.48%	14.87%	15.26%	15.65%	16.06%
Operating Temperature	-40°C~+85°C				
Maximum System Voltage	1000V (IEC)/600V (UL)				
Maximum Series Fuse Rating	10A				
Application Classification	Class A				
Power Tolerance	0 ~ +5W				

Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m^2 , spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C

NOCT	CS5A-189M	CS5A-190M	CS5A-196M	CS5A-200M	CS5A-206M
Nominal Maximum Power (Pmax)	134W	137W	141W	144W	148W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	33.2V	33.4V	33.7V	34.1V	34.4V
Optimum Operating Current (Imp)	4.02A	4.11A	4.17A	4.23A	4.30A
Open Circuit Voltage (Voc)	40.9V	41.1V	41.3V	41.5V	41.6V
Short Circuit Current (Isc)	4.42A	4.47A	4.56A	4.62A	4.70A

Under Normal Operating Cell Temperature, irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20 °C, wind speed 1 m/s

Cell Type	Mono-crystalline 125 x 125mm, 2 Busbars
Cell Arrangement	72 (6 x 12)
Dimensions	1595 x 801 x 40mm (62.8 x 31.5 x 1.57in)
Weight	15.3kg (33.7 lbs)
Front Cover	3.2mm Tempered glass
Frame Material	Anodized aluminum alloy
J-BOX	IP65 or IP67, 3 diodes
Cable	4mm ² (IEC) / 12AWG (UL), 950mm
Connectors	MC4 or MC4 Comparable
Standard Packaging (Modules per Pallet)	24 pcs
Module Pieces per container (40 ft. Container)	672 pcs



*Specifications included in this datasheet are subject to change without prior notice.

Temperature Coefficient	Pmax	-0.45 %/°C
	Voc	-0.35 %/°C
	Isc	0.060 %/°C
Normal Operating Cell Temperature		45±2 °C

Industry leading performance at low irradiation environment, +95.5% module efficiency from an irradiance of 1000w/m² to 200w/m² (AM 1.5, 25 °C)

Canadian Solar Inc. is one of the world's largest solar companies. As a leading vertically-integrated manufacturer of ingots, wafers, cells, solar modules and solar systems, Canadian Solar delivers solar power products of uncompromising quality to worldwide customers. Canadian Solar's world class team of professionals works closely with our customers to provide them with solutions for all their solar needs.

Canadian Solar was founded in Canada in 2001 and was successfully listed on NASDAQ Exchange (symbol: CSIQ) in November 2006. Canadian Solar has cell manufacturing capacity of 1.5GW and module manufacturing capacity of 2.3GW.

Headquarters | 545 Speersdale Avenue West
Guelph | Ontario N1K 1E6 | Canada
Tel: +1 519 837 1881
Fax: +1 519 837 2550
inquire.ca@canadiansolar.com
www.canadiansolar.com