

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

**BRUNO CARNEIRO JUNQUEIRA
GABRIELLA CARNEIRO JUNQUEIRA**

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

**VOLTA REDONDA
2017**

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

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do UniFoa como requisito a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos:

Bruno Carneiro Junqueira

Gabriella Carneiro Junqueira

Orientador: Prof. D. Sc. Péricles Guedes Alves

Co-orientador: Prof. M. Sc. Edson de Paula Carvalho

VOLTA REDONDA

2017



Fundação Oswaldo Aranha



FOLHA DE APROVAÇÃO

Curso: Engenharia Elétrica

Acadêmico: Matrícula: Bruno Carneiro Junqueira 201311341 Gabriella Carneiro Junqueira 201311349

Título do TCC: Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

Aprovada em 11 de Novembro de 2017

Banca Avaliadora:

Professor Orientador

Pérciles Guedes Alves, Doutor, UniFOA

Professor Avaliador

Edson de Paula Carvalho, Mestre, UniFOA

Professor Avaliador

Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA

Dedicamos este trabalho aos nossos queridos pais que sempre nos apoiaram e acima de tudo acreditaram no nosso potencial. E a todos aqueles que cruzaram nossos caminhos, participando de alguma forma na construção e realização desta etapa de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ser autor do nosso destino e por nos proporcionar o prazer de concluir esta etapa de nossas vidas juntos

Aos nossos pais, nossos maiores exemplos. Agradecemos por cada incentivo e orientação, pela paciência e pelas orações ao nosso favor, vocês foram peças fundamentais para a concretização do nosso trabalho. A vocês expressamos o nosso maior agradecimento.

Agradecemos aos nossos companheiros, por todo amor, carinho e por terem nos apoiado e ficado do nosso lado nas horas que mais precisávamos.

Agradecemos aos nossos familiares que sempre nos apoiaram.

A todos os professores e em especial ao nosso orientador Péricles Guedes Alves. Agradecemos por transmitir seus conhecimentos e por fazer do nosso trabalho uma experiência positiva.

Não poderíamos deixar de agradecer aos nossos amigos da faculdade. Obrigado por todos os momentos em que fomos estudiosos, brincalhões, parceiros e cúmplices. Esta caminhada não seria a mesma sem vocês.

“Algumas pessoas marcam a nossa vida para sempre, umas porque nos vão ajudando na construção, outras porque nos apresentam projetos de sonho e outras ainda porque nos desafiam a construí-los”.

RESUMO

Dado o atual panorama energético nacional, torna-se cada vez mais necessário o estudo, disseminação e aplicação das fontes alternativas de energia, inserindo um conceito de Desenvolvimento Sustentável na geração de energia elétrica. O Brasil é um país tropical, garantindo ótimos níveis de irradiação solar ao longo do seu território, ou seja, com grande potencial para a produção de energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Por outro lado, a baixa eficiência da conversão de energia dos painéis fotovoltaicos ainda representa uma barreira para a larga utilização desta fonte de energia, sendo necessários estudos sobre maneiras de se maximizar a captação da radiação solar e otimizar a operação dos painéis fotovoltaicos. Este trabalho destina-se a apresentar um estudo sobre o aproveitamento da energia proveniente do sol, abordando o rastreamento do ponto de máxima potência em um painel fotovoltaico e o circuito equivalente de uma célula solar, verificando seu comportamento ao se adequar às variações de insolação e temperatura. No estudo do rastreamento do ponto de máxima potência, discuti-se o método de “perturbação e observação” baseado na variação da tensão e corrente de saída.

Palavras-chave: Energias renováveis, Sistema fotovoltaico, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivos Específicos	15
1.3	HIPÓTESES.....	15
1.4	METODOLOGIA.....	16
2	ENERGIA E ELETRICIDADE.....	17
2.1	FONTES RENOVÁVEIS	17
2.2	PANORAMA ENERGÉTICO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	17
2.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL E NO MUNDO	21
3	FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	23
3.1	ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	23
3.1.1	Radiação Solar	23
3.1.2	Massa de ar.....	24
3.1.3	Energia solar.....	26
3.1.3.1	Irradiância	26
3.1.3.2	Irradiância global	26
3.1.3.3	Insolação	27
3.1.4	Ângulo azimutal	28
3.1.5	Declinação solar	30
3.1.6	Altura solar.....	31
3.1.7	Escolha do ângulo de inclinação do módulo solar	33
3.2	ESTRUTURA FOTOVOLTAICA	35
3.2.1	Células fotovoltaicas.....	35
3.2.2	Módulo fotovoltaico.....	37
3.3	CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CÉLULAS E MÓDULOS.....	39
3.3.1	Efeito Fotovoltaico	39
3.3.2	Curvas características de corrente, tensão e potência	40
3.4	INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA E DA TEMPERATURA NAS CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS.....	43
3.4.1	Influência da Radiação Solar.....	43
3.4.2	Influência da Temperatura.....	45
3.5	MODELO EQUIVALENTE DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	46
3.6	RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....	52
3.7	PRINCIPAIS ALGORITMOS PARA RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....	54
3.7.1	Métodos Diretos	55
3.7.1.1	Perturba e Observa	55
3.7.1.2	Método da Diferenciação.....	56
3.7.1.3	Condutância Incremental.....	56
3.7.1.4	Capacitâncias Parasitas	57
3.7.1.5	Feedback de tensão ou corrente.....	57

3.7.1.6	Controladores de Lógica Fuzzy ou Nebulosa	58
3.7.1.7	Rede Neural Artificial.....	58
3.7.1.8	Varredura de Corrente.....	59
3.7.1.9	Controle de Correlação de Ripples	59
3.7.2	Métodos Indiretos	59
3.7.2.1	Método de verificação de tabelas.....	60
3.7.2.2	Corrente Constante	60
3.7.2.3	Tensão Constante	60
3.7.2.4	Ajuste de Curva	61
3.7.2.5	Método Beta	61
3.8	CONVERSORES CC-CC	62
3.8.1	Principais conversores CC/CC aplicados em sistemas fotovoltaicos	62
3.8.1.1	Conversor CC/CC boost.....	62
3.8.1.2	Conversor CC/CC boost entrelaçado	63
3.8.1.3	Conversor CC/CC boost quadrático	64
3.8.1.4	Conversor CC/CC reboost.....	64
3.8.1.5	Conversor CC/CC charge-pump-reboost	65
3.8.2	Modulação PWM	66
3.8.3	Região de operação do conversor	68
4	MÉTODOS E MATERIAIS.....	72
4.1	MODELAGEM DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	73
4.2	CURVAS REAIS DE IRRADIÂNCIA	79
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO PERTURBA E OBSERVA	81
5	RESULTADOS E ANÁLISES	83
5.1	CURVAS TÍPICAS GERADAS	83
5.2	VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO E TEMPERATURA.....	87
6	CONCLUSÕES	95
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
	ANEXO – DATASHEET DO MÓDULO CANADIAN SOLAR.....	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL E NO MUNDO.	18
FIGURA 2.2 – COMPARATIVO DA PARTICIPAÇÃO DAS MATRIZES ENERGÉTICAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO PAÍS NOS ANOS DE 2015 E 2014.	19
FIGURA 2.3 – COMPARATIVO DA PARTICIPAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E NO MUNDO.	20
FIGURA 2.4 – GERAÇÃO ELÉTRICA (GWh) NO BRASIL NOS ANOS DE 2015 E 2014.....	21
FIGURA 2.5 – INSOLAÇÃO MUNDIAL.....	22
FIGURA 3.1 – ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR INCLUINDO UM DETALHAMENTO DA FAIXA VISÍVEL HUMANA.	23
FIGURA 3.2 – EFEITO FOTOVOLTAICO E EFEITO FOTOELÉTRICO.....	24
FIGURA 3.3 – A MASSA DE AR DEPENDE DO ÂNGULO ZENITAL DO SOL.	25
FIGURA 3.4 – MAPA DE INSOLAÇÃO DO TERRITÓRIO BRASILEIRO.	28
FIGURA 3.5 – ESQUEMA DO ÂNGULO AZIMUTAL.	29
FIGURA 3.6 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ÂNGULO AZIMUTAL.	30
FIGURA 3.7 – ILUSTRAÇÃO DA POSIÇÃO DA TERRA EM SUA ÓRBITA EM TORNO DO SOL.....	30
FIGURA 3.8 – ESQUEMA ILUSTRATIVO DA DECLINAÇÃO SOLAR AO LONGO DO ANO.....	31
FIGURA 3.9 – TRAJETÓRIA DO MOVIMENTO APARENTE DO SOL.	32
FIGURA 3.10 – ESQUEMA REPRESENTANDO OS ÂNGULOS SOLARES.	32
FIGURA 3.11 – EFEITO DA INCLINAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO NA CAPTAÇÃO DE ENERGIA.	34
FIGURA 3.12 – EXEMPLOS DE CÉLULAS, MÓDULO E PAINEL FOTOVOLTAICOS.....	35
FIGURA 3.13 – POSSÍVEL LIGAÇÃO PARA UM DIODO BYPASS ENTRE CÉLULAS.	38
FIGURA 3.14 – DIODO DE BLOQUEIO.....	38
FIGURA 3.15 – CÉLULA FOTOVOLTAICA E O EFEITO FOTOVOLTAICO.....	39
FIGURA 3.16 – CURVA CARACTERÍSTICA $I - V$ DE CORRENTE E TENSÃO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.	41
FIGURA 3.17 – CURVA CARACTERÍSTICA $P - V$ DE POTÊNCIA E TENSÃO DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO.	42
FIGURA 3.18 – CURVAS $I \times V$ E $P \times V$ PARÂMETROS DE POTÊNCIA MÁXIMA.	42
FIGURA 3.19 – EFEITO CAUSADO PELA IRRADIÂNCIA NA CURVA CARACTERÍSTICA $I \times V$ NA TEMPERATURA DE 25°C.....	44

FIGURA 3.20 – INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR NA OPERAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.	45
FIGURA 3.21 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA OPERAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.	46
FIGURA 3.22 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	47
FIGURA 3.23 – CURVA V - I PARA A RESISTÊNCIA EM SÉRIE.	48
FIGURA 3.24 – CURVA V - I PARA A RESISTÊNCIA SHUNT.	48
FIGURA 3.25 – CIRCUITO PARA A TRANSFERÊNCIA MÁXIMA DE POTÊNCIA.....	52
FIGURA 3.26 – CONTROLADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA MPP.	55
FIGURA 3.27 – CURVA PxV NO MÉTODO DE INDUTÂNCIA INCREMENTAL.....	57
FIGURA 3.28 – ESQUEMA DO MÉTODO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL.....	59
FIGURA 3.29 – MÉTODO TENSÃO CONSTANTE.	61
FIGURA 3.30 – CONVERSOR CC/CC BOOST.	63
FIGURA 3.31 – CONVERSOR CC/CC BOOST ENTRELACADO.	64
FIGURA 3.32 – CONVERSOR CC/CC BOOST QUADRÁTICO.....	64
FIGURA 3.33 – CONVERSOR CC/CC REBOOST.	65
FIGURA 3.34 – CONVERSOR CC/CC CHARGE-PUMP-REBOOST.....	66
FIGURA 3.35 – CHAVEAMENTO DA TENSÃO V SOBRE UMA CARGA R.	66
FIGURA 3.36 – VARIAÇÃO DO CICLO DE TRABALHO.	68
FIGURA 3.37 – INTERSECÇÃO DA CURVA DE CARGA COM A CURVA DE GERAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	69
FIGURA 3.38 – MÓDULO FOTOVOLTAICO CONECTADO À CARGA POR MEIO DE UM CONVERSOR CC/CC.....	69
FIGURA 3.39 – REGIÃO DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR ELEVADOR EM FUNÇÃO DE θ_{Red}, R_{carga}	70
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA PARA A METODOLOGIA MPPT.....	72
FIGURA 4.2 – CIRCUITO EQUIVALENTE DO BLOCO DA CÉLULA SOLAR.	73
FIGURA 4.3 – AJUSTE PARA AS CARACTERÍSTICAS DA CÉLULA.....	75
FIGURA 4.4 – PARÂMETROS DE DEPENDÊNCIA DA TEMPERATURA.....	76
FIGURA 4.5 – CIRCUITO DE SIMULAÇÃO DA CÉLULA.	77
FIGURA 4.6 – CIRCUITO DE SIMULAÇÃO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO.....	79
FIGURA 4.7 – IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA PARA CACHOEIRA PAULISTA.	80
FIGURA 4.8 – IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA MÉDIA PARA NATAL.....	80
FIGURA 4.9 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO P&O.....	82

FIGURA 5.1 – CURVA I x V PARA A RADIAÇÃO DE 1000 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 25°C.....	84
FIGURA 5.2 – CURVA P x V PARA A RADIAÇÃO DE 1000 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 25°C.....	84
FIGURA 5.3 – CURVA I x V PARA A RADIAÇÃO DE 800 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 20°C.....	85
FIGURA 5.4 – CURVA P x V PARA A RADIAÇÃO DE 800 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 20°C.....	86
FIGURA 5.5 – RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O MÊS DE JANEIRO DE 2015.	87
FIGURA 5.6 – TEMPERATURA DO AR NA SUPERFÍCIE PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O MÊS DE JANEIRO DE 2015.	88
FIGURA 5.7 – RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O DIA 23 DE JANEIRO DE 2015.....	88
FIGURA 5.8 – TEMPERATURA DO AR NA SUPERFÍCIE PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O DIA 23 DE JANEIRO DE 2015.....	89
FIGURA 5.9 – CURVA I x V PARA A RADIAÇÃO DE 500 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 24,4°C.....	90
FIGURA 5.10 – CURVA P x V PARA A RADIAÇÃO DE 500 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 24,4°C.....	90
FIGURA 5.11 – RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O DIA 28 DE JANEIRO DE 2015.....	91
FIGURA 5.12 – TEMPERATURA DO AR NA SUPERFÍCIE PARA A CIDADE DE CACHOEIRA PAULISTA PARA O DIA 28 DE JANEIRO DE 2015.....	92
FIGURA 5.13 – CURVA I x V PARA A IRRADIAÇÃO DE 1507 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 30,6°C.....	92
FIGURA 5.14 – CURVA P x V PARA A IRRADIAÇÃO DE 1507 W/M ² EM UMA TEMPERATURA DE 30,6°C.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – ESPECIFICAÇÕES DA CÉLULA SOLAR.	74
TABELA 5.1 – COMPARAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS COM OS PARÂMETROS DO FABRICANTE (STC).....	85
TABELA 5.2 - COMPARAÇÃO DOS VALORES SIMULADOS COM OS PARÂMETROS DO FABRICANTE (NOCT).....	86
TABELA 5.3 – VALORES DE MPP SIMULADOS PARA O HORÁRIO DE 17:15 DO DIA 23 DE JANEIRO DE 2015.	91
TABELA 5.4 – VALORES DE MPP SIMULADOS PARA O HORÁRIO DE 15:15 DO DIA 28 DE JANEIRO DE 2015.	93

LISTA DE SIGLAS

BEN – Balanço Energético Nacional

CC – Corrente Contínua

IAE – International Energy Agency

MPP – Maximum Power Point

MPPT – Maximum Power Point Tracking

MME – Ministério de Minas e Energia

NOCT – Nominal Operating Conditions Test

STC – Standard Test Conditions

1 INTRODUÇÃO

A crescente destruição do meio ambiente e o aquecimento global são consequências da ampla utilização de fontes de energia poluentes e não renováveis. Além da questão relacionada ao problema ambiental, o crescente aumento da demanda de energia e a futura possibilidade de redução da oferta dos combustíveis tradicionais, como o gás natural e o petróleo, são aspectos que incentivam a pesquisa e o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis.

A principal fonte de energia do nosso planeta é o Sol. No decorrer de um ano, a superfície terrestre recebe uma quantidade de energia proveniente do sol, nas formas de luz e calor, suficiente para suprir 10.000 vezes às necessidades da população mundial durante esse mesmo período (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

O Brasil, por ser um país tropical, apresenta um alto índice de irradiação solar ao longo de toda sua extensão, assegurando um grande potencial para a produção de energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

Considerando este fato, pode-se perguntar o motivo da energia solar ter um aproveitamento limitado no Brasil e no restante do mundo.

Dentre os fatores que contribuem para esta reduzida utilização da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, destacam-se o alto custo de produção e instalação dos painéis fotovoltaicos se comparado ao custo de outras fontes de energia e também a variação da potência de saída dos painéis, de acordo com o dia, hora e condições climáticas.

No presente trabalho abordaremos o estudo de um modelo que contribui para um melhor aproveitamento da energia produzida, aumentando a eficiência dos painéis fotovoltaicos fixos.

A intensidade da radiação solar incidente nos painéis e a temperatura ambiente atuam diretamente na potência gerada pelos módulos fotovoltaicos. Como previsto, esses dois parâmetros se modificam constantemente, consequência da movimentação do sol no decorrer do dia e das condições meteorológicas, causando um comportamento não linear da corrente e tensão de saída.

De acordo com o teorema de Máxima Transferência de Potência, a potência do circuito será máxima quando a impedância da fonte estiver casada com a impedância da carga. Portanto, apenas nesse ponto haverá a máxima potência transferida da fonte a carga (CARVALHO, 2012).

Para que isto ocorra, será necessário um algoritmo que irá estabelecer essa regulação e obter a máxima potência, sendo este o ponto de operação, que será determinado pela intersecção da curva característica elétrica tensão-corrente da saída da fonte com a da entrada da carga.

Com o rastreamento do ponto de máxima potência, será possível obter uma maior eficiência no sistema fotovoltaico e, portanto, um maior retorno financeiro, aumentando a viabilidade da geração de energia solar.

1.1 Justificativa

A descoberta do efeito fotovoltaico e a foto produção de eletricidade são relativamente antigas. Porém, somente nos últimos anos teve uma eficiência e acessibilidade expressivas, passando a ser considerada uma forma de produção de energia muito promissora.

Porém, ainda não é o bastante para competir em igualdade com outras formas de produção de energia, sendo necessários aprimoramentos para se maximizar a captação da radiação solar e otimizar a operação dos módulos fotovoltaicos.

Neste trabalho apresentamos um circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, estudando seu comportamento sob as variações de radiação e temperatura ao longo do dia. Desta forma, as curvas características dos painéis fotovoltaicos são importantes para uma utilização apropriada e satisfatória.

Desta forma, o presente trabalho visa o estudo de um método que contribui para o aumento da eficiência energética de um sistema fotovoltaico através de um algoritmo que busca o ponto de máxima potência (MPP) de uma célula solar.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é fazer um estudo da geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico e sua respectiva modelagem matemática vinculada com as técnicas de rastreamento de ponto de máxima potência.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre a utilização da energia solar no Brasil e mundo e o funcionamento do sistema fotovoltaico.
- Apresentar um circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, estudando a interferência das variações de temperatura e insolação nas características elétricas das células solares.
- Fazer um estudo sobre os algoritmos utilizados no rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos e propor uma metodologia para a implementação de um algoritmo, baseando-se no estudo de controle da potência de saída do módulo fotovoltaico.

1.3 Hipóteses

A Potência de saída de um módulo fotovoltaico possui grandes variações em função das condições ambientais, gerando um comportamento não linear da corrente e tensão nas células fotovoltaicas. A corrente produzida em um módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento da energia solar incidente.

Por outro lado, o aumento crescente do nível de irradiação gera um aumento da temperatura da célula fotovoltaica, alcançando um ponto em que ocorre a saturação da corrente e conseqüentemente uma redução da eficiência do módulo.

Neste trabalho utilizaremos um algoritmo com variáveis baseadas no modelo elétrico equivalente do painel solar, onde serão simuladas variações nas condições atmosféricas a que estão submetidos os módulos solares, gerando gráficos das características elétricas do painel. Desta forma, ao comparar as curvas do fabricante com a do modelo proposto, espera-se encontrar uma resposta muito próxima a real.

Em um sistema fotovoltaico, o conversor age no rastreamento do ponto de máxima potência dos módulos, onde o sistema de rastreamento analisa as variáveis de entrada de tensão, corrente, temperatura e nível de irradiação para verificar o valor ideal do ciclo de trabalho. Através da programação de um algoritmo, serão simuladas perturbações na tensão de saída do painel. Para cada novo valor da tensão, encontramos um valor para a potência de saída que será comparada com o valor anterior. Deseja-se que os resultados encontrados com o algoritmo estejam próximo a de um controlador PWM, indicando uma viabilidade do modelo proposto.

1.4 Metodologia

Aborda-se no presente trabalho o estudo de um método para obtenção de maior eficiência e otimização da operação de uma placa fotovoltaica.

O estudo inicial se fundamenta em como funciona um sistema fotovoltaico, na influência das variações ambientais na conversão de radiação solar em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, nos métodos mais utilizados para o rastreamento do ponto de máxima potência em um módulo solar, explicando também o papel de um conversor para maximizar o potencial de geração de energia.

Depois de estabelecido os estudos iniciais, iremos propor uma metodologia para implementação de um algoritmo, utilizando o Matlab, que realiza o rastreamento do ponto de máxima potência de um painel fotovoltaico, baseando-se no método de “perturbação e observação”.

2 ENERGIA E ELETRICIDADE

2.1 Fontes renováveis

O sol dispõe de um grande potencial para geração de energia, sendo a mais significativa fonte de energia para o nosso planeta. A superfície terrestre recebe em um dia uma quantidade de energia, nas formas de luz e calor, capaz de alimentar nosso consumo elétrico durante um ano inteiro. Porém, somente uma pequena fração dessa energia é usufruída.

Uma fonte de energia é classificada como renovável quando considerada inesgotável para os moldes humanos de utilização. Ou seja, podemos utilizá-las constantemente e nunca se cessam, pois sempre se renovam. Como exemplos, podemos citar as energias solar, hidrelétrica, eólica, oceânica, geotérmica e de biomassa.

É possível contestar até que ponto uma fonte de energia é considerada inesgotável. De acordo com estudiosos, ainda podemos aproveitar a luz e o calor do sol durante cerca de 8 bilhões de anos, tempo suficiente para classificarmos como inesgotável essa fonte de energia, e outras que dela derivam (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

De forma generalizada, são consideradas renováveis as fontes de energia que não se apóiam em recursos que são reconhecidamente limitados e cujo uso não causa seu esgotamento. Por outro lado, as fontes de energia consideradas tradicionais, ou não renováveis, são aquelas que utilizam combustíveis fósseis ou recursos minerais que acabam a medida com que vão sendo explorados.

2.2 Panorama energético e geração de energia elétrica

O aquecimento global aliado a destruição do meio ambiente são decorrentes da ampla utilização de fontes de energia poluentes e não renováveis. Além deste cenário ambiental, o crescimento da demanda energética e expectativa de diminuição da oferta desses combustíveis tradicionais são motivos que incentivam a pesquisa e desenvolvimento de fontes energéticas renováveis.

De acordo com os resultados preliminares do balanço energético (BEN) de 2016, realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), tendo como base o ano de 2015, houve um progresso na atuação das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira de 74,6% para 75,5%, esclarecido pela queda da geração térmica a base de derivados de petróleo e ao desenvolvimento da geração a base de biomassa e eólica (Figura 2.1).

Se comparado com o restante do mundo, o Brasil apresenta uma utilização significativa de fontes renováveis em sua matriz. Levando em consideração a produção de energia elétrica em nível mundial, a Figura 2.1 ilustra a vasta utilização de fontes não renováveis, demonstrando que países industrializados possuem, de maneira geral, matrizes energéticas altamente poluentes.

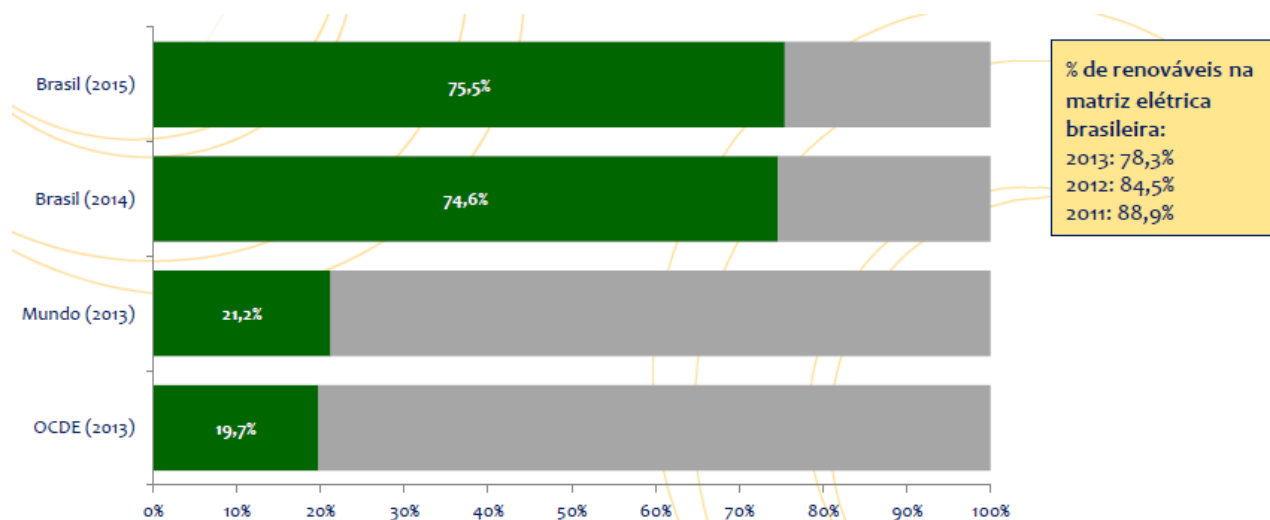


Figura 2.1 – Comparativo da utilização de fontes renováveis na produção de eletricidade no Brasil e no mundo.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2016.

Ao estabelecer uma comparação da atuação das matrizes energéticas na produção de energia elétrica no país nos anos de 2015 e 2014, observamos que a hidroeletricidade teve uma diminuição da sua participação em 1,8%, porém houve um aumento de 8,1% na energia gerada pela biomassa e um aumento de 75% na produção eólica (Figura 2.2).

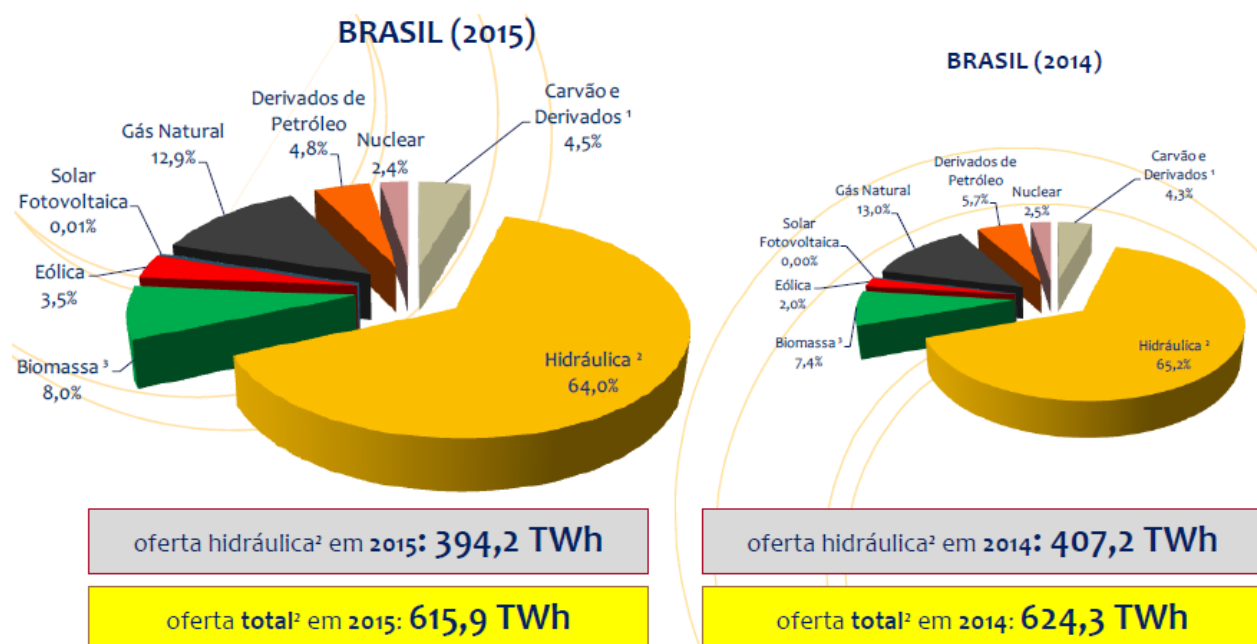


Figura 2.2 – Comparativo da participação das matrizes energéticas na geração de energia elétrica no país nos anos de 2015 e 2014.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2016.

A Figura 2.3 expõe um gráfico comparativo entre o uso de energias renováveis no Brasil e no mundo para a produção de eletricidade.

Em 2015, a atuação das fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira continuou entre as mais altas do mundo, podendo observar um sucinto crescimento em decorrência da queda da oferta interna de petróleo e derivados, conforme a Figura 2.3.

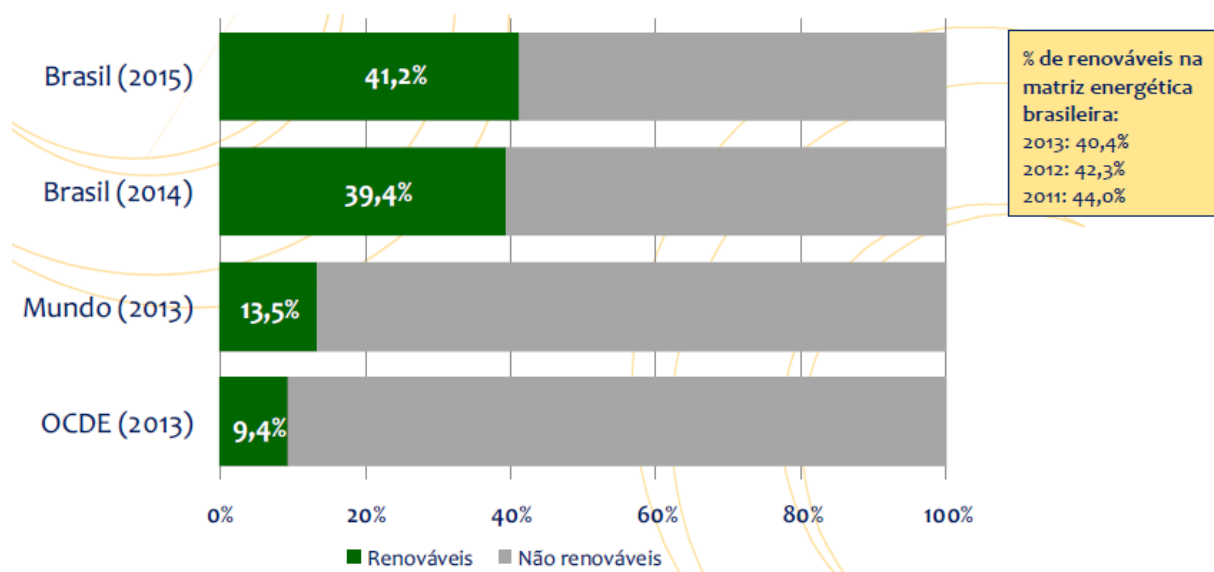


Figura 2.3 – Comparativo da participação de fontes renováveis na matriz Energética Brasileira e no mundo.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2016.

De acordo com a Figura 2.2, é possível analisar que a produção de energia elétrica gerada a partir das hidroelétricas possui predominância na matriz energética brasileira.

De acordo com Agência Internacional de Energia (IAE), no ano de 2030 o consumo de energia elétrica no mundo será de aproximadamente 30.000 TWh (Terawatts.hora), um consumo quase 2,5 maior se comparado com o consumo do ano de 2000, que era aproximadamente 12.000 TWh.

Com o crescimento da população e conseqüente aumento na demanda energética mundial, serão imprescindíveis grandes investimentos em modelos de produção de energia elétrica para sustentar e atender esse crescente aumento. Portanto, é necessário considerar o aumento de produção energética utilizando-se de fontes renováveis e limpas de energia, levando em consideração que não há perspectiva energética para a humanidade sem levar em consideração o uso de fontes energéticas sustentáveis como a energia eólica, solar, biomassa e até mesmo a energia das marés.

2.3 Energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo

A energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada, geralmente, em pequenos sistemas isolados ou autônomos instalados em áreas que não são atendidas pela rede elétrica. Ou seja, em regiões de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Apesar do grande potencial do território brasileiro em produzir energia através da radiação proveniente do sol, a energia solar possui uma maior regularidade se comparada com a energia eólica, porém esta apresenta uma participação mais significativa na Matriz Energética, como pode ser visto na Figura 2.4, confirmando a escassa contribuição da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira.

Geração Elétrica (GWh)		
Fonte	2015	2014
Hidrelétrica	359.743	373.439
Gás Natural	79.490	81.073
Biomassa	47.394	44.987
Derivados do Petróleo	25.662	31.529
Nuclear	14.734	15.378
Carvão Vapor	19.096	18.385
Eólica	21.625	12.210
Solar Fotovoltaica	59	16
Outras	13.682	13.524
Geração Total	581.486	590.542

Figura 2.4 – Geração Elétrica (GWh) no Brasil nos anos de 2015 e 2014.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2016.

A energia solar fotovoltaica registrou uma importante redução de preço nos últimos anos, visto que este tipo de tecnologia se tornou 80 % mais barata. O Brasil adotou, nos últimos anos, diversas políticas de incentivo à energia solar. No caso dos empreendimentos de geração centralizada, houve a realização, a partir de 2014, de leilões de compra de fonte solar, o estabelecimento de descontos nas tarifas de

uso de até 80% para os empreendimentos e a possibilidade de comercialização direta de energia com consumidores com carga instalada acima de 500 kW (Nascimento, 2017).

Desta forma, conforme observado na Figura 2.4, de 2014 para 2015 houve um aumento significativo da geração por energia solar.

Em nível de comparação, o Brasil apresenta índices de irradiação entre 4.500 e 6.000 Wh/m² (VILLALVA e GAZOLI, 2012), já a Alemanha, classificada como uma grande produtora de eletricidade gerada a partir da energia solar fotovoltaica, dispõe como melhor taxa de irradiação 3.500Wh/m², gerando cerca de 26GW de energia e suprindo 45,2% da demanda energética do país (CAMARGO, 2016).

Na Figura 2.5 pode-se comparar os níveis de insolação do Brasil com o mundo.

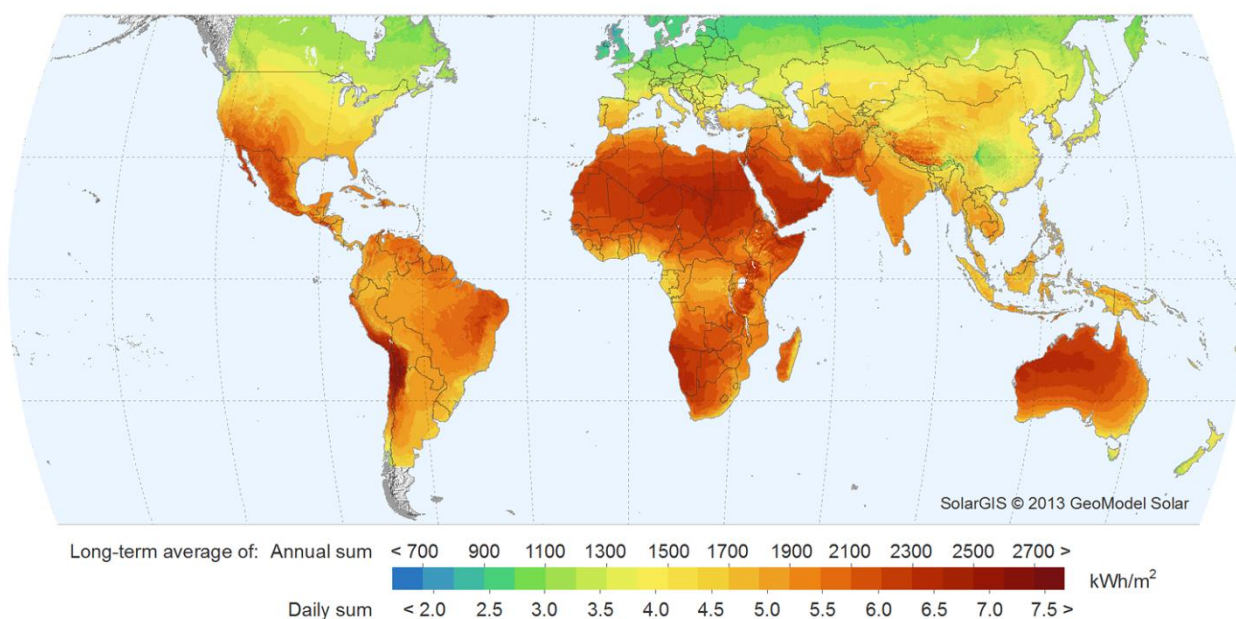


Figura 2.5 – Insolação mundial.

Fonte: CUSTOM GREEN.

O elevado custo da produção de energia fotovoltaica e a baixa eficiência energética deixam esta fonte em desvantagem em relação às outras fontes mais convencionais de geração de energia. Desta forma, a geração de energia proveniente da irradiação solar ainda necessita de aperfeiçoamento e desenvolvimento, visando maior competitividade no mercado energético.

3 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.1 Energia Fotovoltaica

3.1.1 Radiação Solar

A energia proveniente do sol chega à superfície terrestre através do espaço na forma de radiação eletromagnética. Possuindo frequências e comprimentos de onda diferentes.

Quanto maior a frequência, maior a energia transmitida, conforme a relação de Planck ou equação de Planck-Einstein que relaciona essas duas grandezas juntamente com uma constante física de proporcionalidade, chamada constante de Planck, que representa aproximadamente $6,636 \times 10^{-34}$ (expresso em joules vezes segundos [Jxs]) (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

As ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol produzem o conjunto de frequências chamado de espectro da radiação solar. Contendo luz visível e invisível pelo olho humano. Conforme mostrado na Figura 3.1.

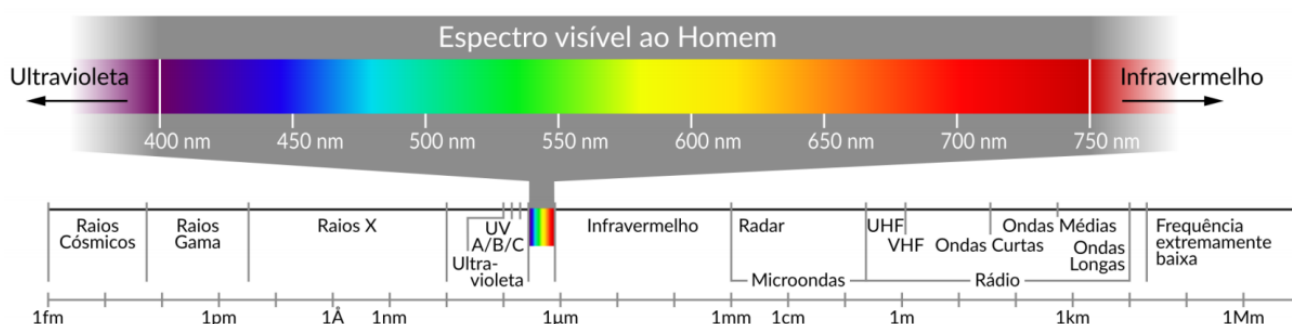


Figura 3.1 – Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.

Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – INPE, 2017.

A transformação da energia eletromagnética em energia térmica ocorre quando as ondas eletromagnéticas atingem um corpo capaz de absorver radiação. A energia eletromagnética é convertida em energia cinética, agitando as moléculas e átomos que constituem esse corpo, aumentando assim sua temperatura.

Ao atingir determinados materiais, as ondas eletromagnéticas, em vez de transmitir calor, podem promover alterações nas propriedades elétricas ou gerar

tensões e correntes elétricas. Os efeitos fotovoltaico e fotoelétrico, mostrados na Figura 3.2, são dois destes exemplos.

O efeito fotovoltaico ocorre em uma célula formada por uma junção de materiais semicondutores, normalmente de silício, dopando, um positivamente e outro negativamente. Incidindo a radiação eletromagnética solar, gera uma diferença de potencial. Se conectando dois eletrodos na célula, haverá tensão elétrica sobre eles. E colocando-se uma ligação entre esses dois eletrodos circulará uma corrente elétrica.

Já o efeito fotoelétrico acontece em materiais metálicos e não metálicos, em qualquer estado de matéria, exposto a uma radiação eletromagnética suficientemente alta, ocasionando a emissão de elétrons.

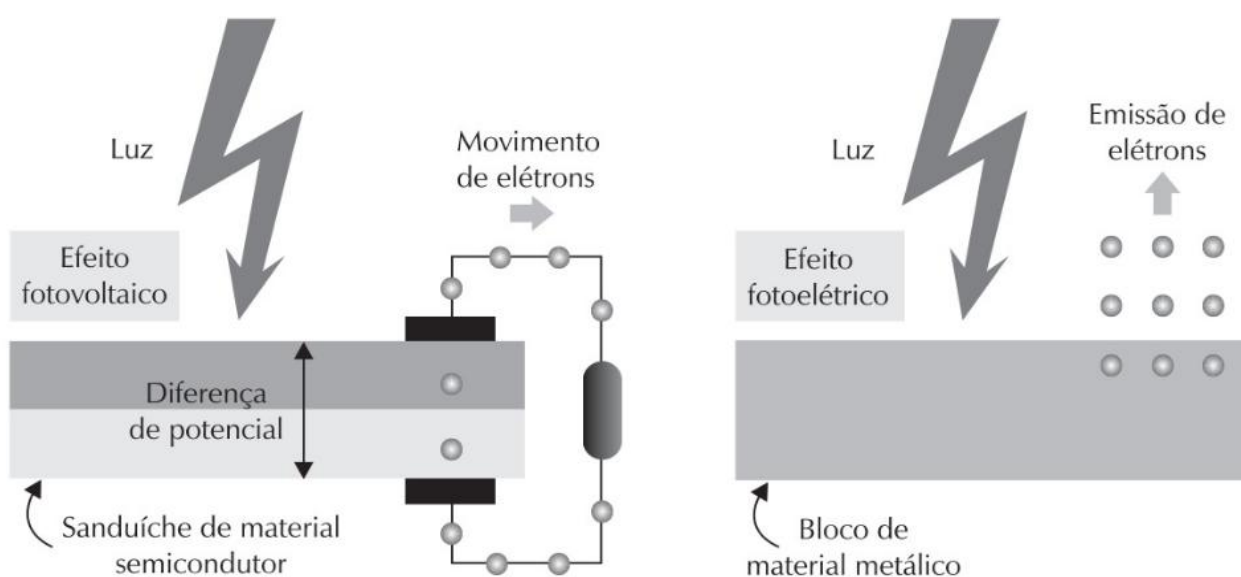


Figura 3.2 – Efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

3.1.2 Massa de ar

Ao passar pela atmosfera terrestre a radiação solar sofre várias alterações, sendo decorrentes, principalmente, da espessura da camada de ar e da composição da atmosfera, englobando o ar e os elementos suspensos, como poeira e vapor de água.

A espessura da camada de ar a qual os raios solares devem atravessar depende do ângulo de inclinação do sol com relação à linha do zênite. Onde o zênite corresponde a uma linha imaginária ortogonal ao solo.

A massa de ar, definida pela sigla AM, e θ_z , o ângulo zenital do Sol, é calculada a partir da Equação 3.1 (VILLALVA e GAZOLI, 2012):

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (3.1)$$

A Figura 3.3 ilustra como o trajeto dos raios solares depende do ângulo zenital do Sol. Um ângulo zenital maior condiz com uma camada de ar mais densa, ou seja, a trajetória da radiação solar na atmosfera terrestre será maior.

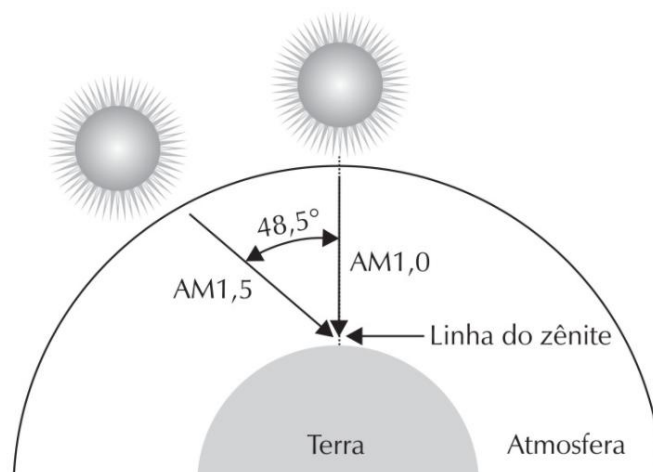


Figura 3.3 – A massa de ar depende do ângulo zenital do sol.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

No espaço, a radiação solar não sofre intervenção da atmosfera, apresentando o valor da massa de ar igual à zero ($MA=0$). O valor empregado como referência para ensaios em placas fotovoltaicas é o valor médio anual de países temperados do hemisfério norte, que corresponde a $MA=1,5$, correspondente para um ângulo zenital $\theta_z = 48,5^\circ$ (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Localização geográfica, hora do dia, dia do ano, condições climáticas, composição da atmosfera, altitude, entre outros, são fatores que afetam a distribuição da energia derivada do Sol. Sendo assim, cada localidade do planeta

possui um aspecto diferente de radiação. Territórios compreendidos na zona tropical, entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, apresentam interferências minimizadas das massas de ar, já que os raios solares atingem a superfície com ângulos zenitais menores. Isto esclarece o fato das áreas tropicais apresentarem maiores temperaturas e iluminação que o restante do planeta. Enquanto nos pólos terrestres ocorre o oposto, sendo mais frio e com uma iluminação reduzida, onde a iluminação solar é disponível somente durante metade do ano.

3.1.3 Energia solar

3.1.3.1 Irradiância

A irradiância, ou irradiação, é a grandeza empregada para dimensionar a radiação proveniente do sol, apresentada em W/m^2 (watt por metro quadrado). Corresponde à potência por área, determinando a densidade de energia na superfície.

A irradiância na superfície terrestre é geralmente por volta de $1000 W/m^2$. Enquanto no espaço, considerando a mesma distância da Terra, a irradiância é aproximadamente $1353 W/m^2$. Para testes em dispositivos fotovoltaicos, consideramos $1000 W/m^2$ o valor padrão para a irradiância (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

3.1.3.2 Irradiância global

A radiação solar sofre a influencia de diversas variáveis antes de chegar ao solo. Desta forma, a irradiância global, G , é a soma das radiações direta e difusa.

A radiação direta equivale aos raios solares que incidem diretamente no solo, tendo o ângulo zenital do Sol. E a radiação difusa corresponde aos raios solares que chegam indiretamente, por meio da difração na atmosfera e da reflexão da luz em partículas suspensas ou objetos.

A irradiância global G de um painel fotovoltaico pode ser expressa aproximadamente pela Equação 3.2 (CARVALHO, 2012):

$$G = B_0 \varepsilon_0 0,7^{AM^*} \quad (3.2)$$

Onde:

G : irradiância global em um PV [W/m^2];

B_0 : irradiação extraterrestre ou constante solar = $1,367\text{W}/\text{m}^2$;

ε_0 : fator de correção de excentricidade = $1 + 0,033 \cos \frac{360 \cdot d_n}{365}$, sendo:

d_n : dia do ano contado a partir de 1º de janeiro.

AM^* : $(AM)^{0,678}$

3.1.3.3 Insolação

A insolação é a grandeza utilizada para expressar a energia solar que atinge a superfície de uma área específica em um determinado tempo. A unidade que expressa a insolação é o Wh/m^2 (watt-hora por metro quadrado).

Essa grandeza é muito útil para fazer o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Duas ferramentas úteis para a obtenção de informações sobre a insolação são a calculadora solar, disponível na internet, e o mapa de insolação como mostrado na Figura 3.4.

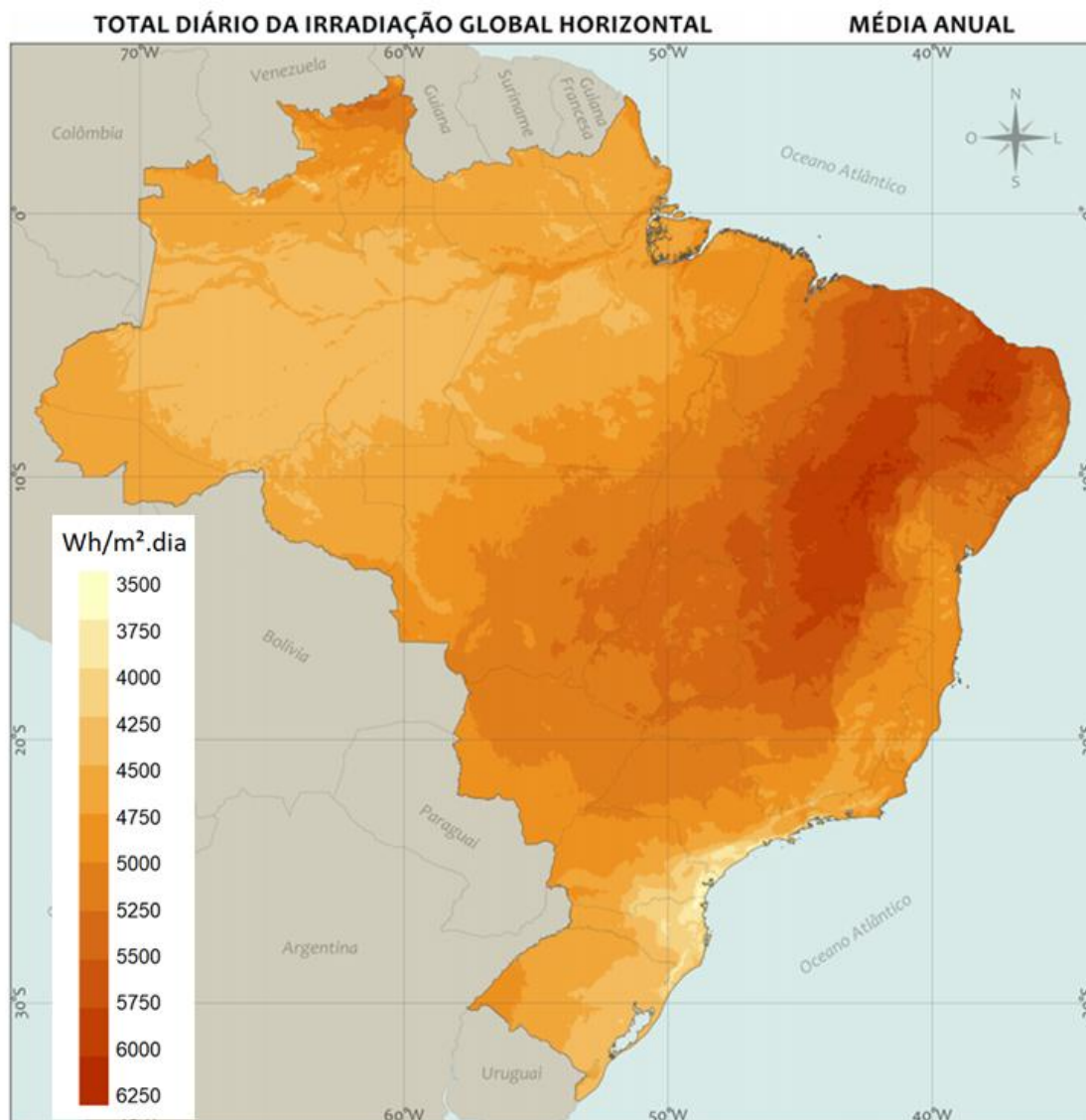


Figura 3.4 – Mapa de insolação do território brasileiro.

Fonte: ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – INPE, 2017.

3.1.4 Ângulo azimutal

O ângulo azimutal é o ângulo de orientação dos raios solares com relação ao norte geográfico, conforme ilustra a Figura 3.5.

A instalação correta de um módulo solar fotovoltaico deve considerar o movimento diário do sol.

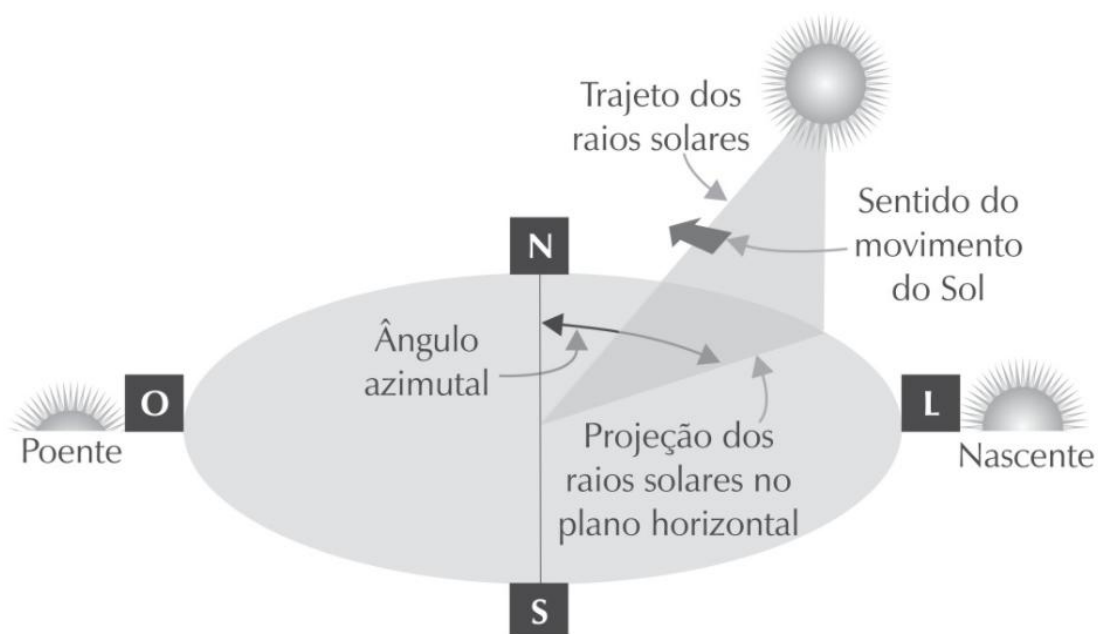


Figura 3.5 – Esquema do ângulo Azimutal.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

Conforme a Figura 3.6, o Sol nasce no Leste (nascente) e se põe no Oeste (Poente), desta forma, no decorrer de um dia diversos ângulos azimutais são descritos em consequência do movimento de rotação da Terra. Aproximadamente ao meio dia, quando o Sol está na metade de sua trajetória, o ângulo azimutal é nulo e coincide com o pólo norte, esta situação é conhecida como meio dia solar.

Analisando a orientação dos painéis fotovoltaicos, se eles fossem instalados com a sua face voltada para o Leste, apenas a energia solar do período antes do meio dia seria aproveitada, caso eles fossem instalados com a sua face direcionada para o oeste, apenas os raios solares do período da tarde seria aproveitado. Desta forma, o melhor direcionamento para os módulos fotovoltaicos fixos, sem um sistema de rastreamento solar, localizados no hemisfério Sul, seria voltado para o norte geográfico, visto que nesta situação tanto os raios solares matutinos quanto os vespertinos seriam aproveitados e ao meio dia solar os painéis teriam a maior incidência dos raios provenientes do sol. No caso do hemisfério Norte, a melhor maneira de aproveitar os raios incidentes no módulo seria voltá-los para o sul geográfico.

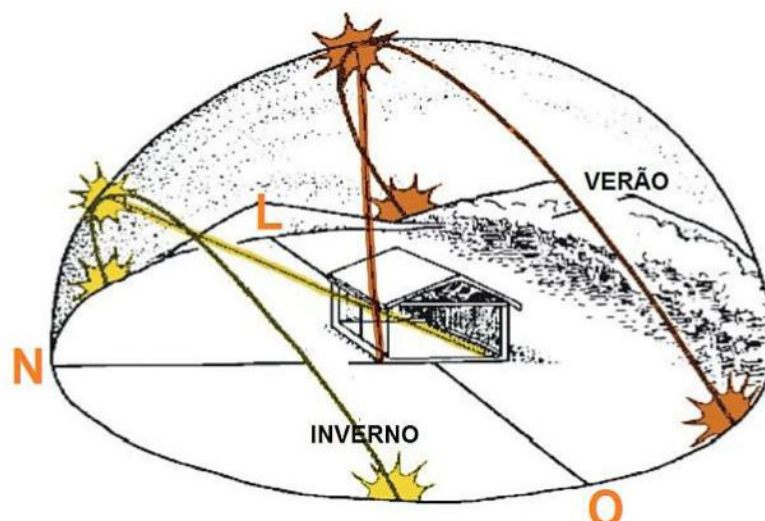


Figura 3.6 – Esquema representativo do ângulo azimutal.

Fonte: PORTAL SOLAR.

3.1.5 Declinação solar

A declinação solar é o ângulo dos raios solares com relação ao plano do equador. Esse ângulo é consequência da inclinação do eixo de rotação da terra e varia ao longo do ano em decorrência da variação da posição do sol, conforme a Figura 3.7 a seguir.

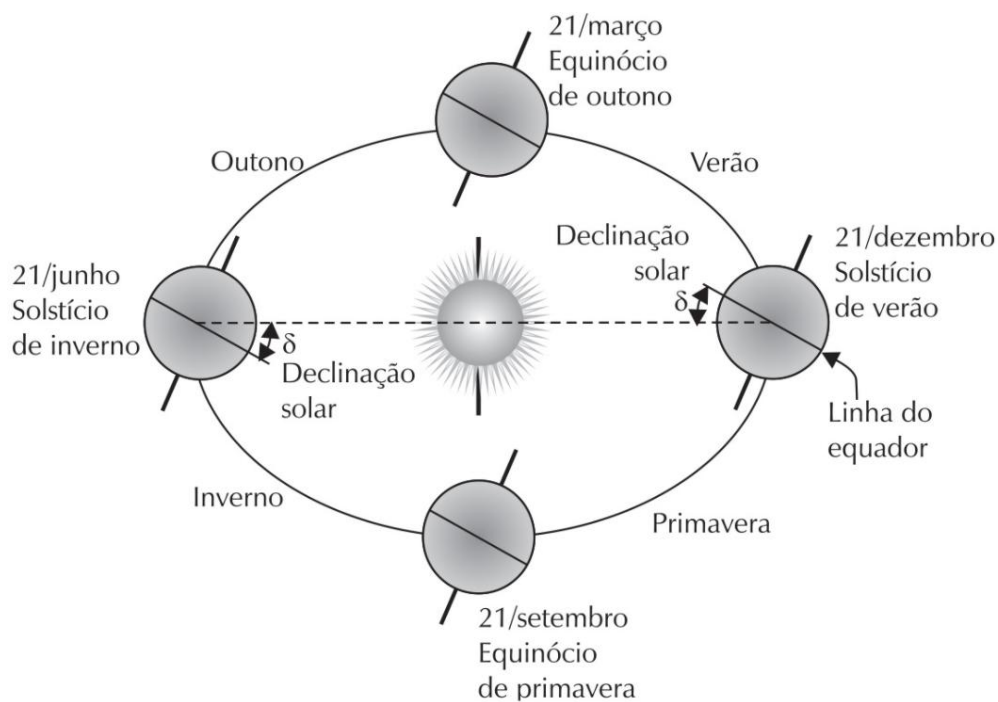


Figura 3.7 – Ilustração da posição da Terra em sua órbita em torno do Sol.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

Nos solstícios, que marcam o início do verão e do inverno, o ângulo de declinação solar é máximo. Nos equinócios, que marcam o início do outono e da primavera, o ângulo de declinação é zero, o que significa que os raios solares atingem a superfície paralelamente ao plano do equador (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

A Figura 3.8 a seguir ilustra o conceito de declinação solar, tendo a Terra como referência e mostrando a posição aparente do Sol.

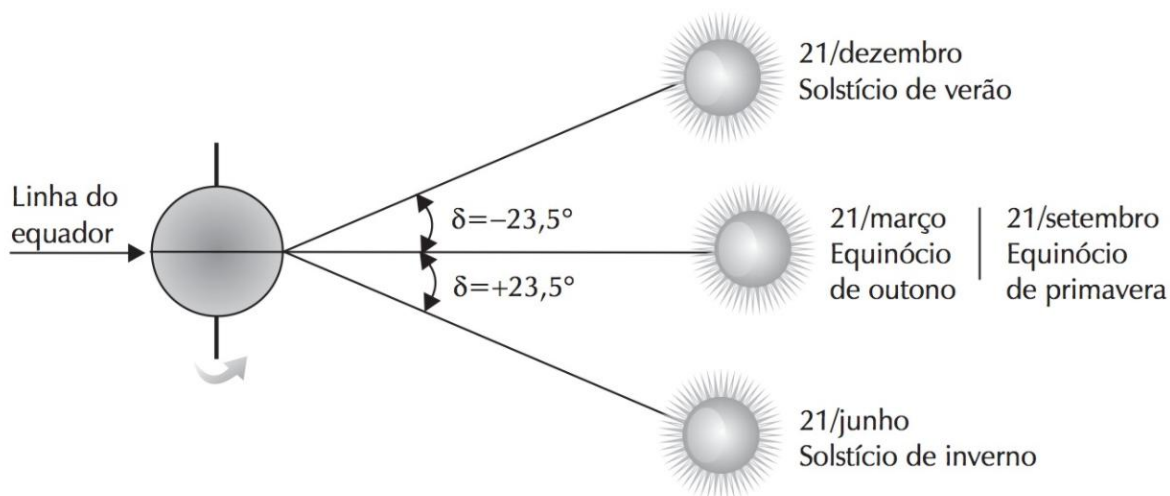


Figura 3.8 – Esquema ilustrativo da declinação solar ao longo do ano.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

3.1.6 Altura solar

Em decorrência da existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e traça uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano, como ilustra a Figura 3.9.

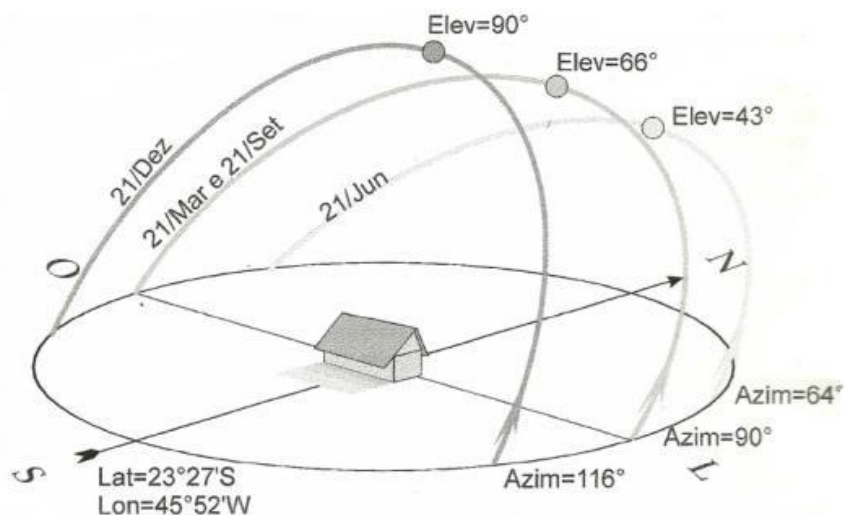


Figura 3.9 – Trajetória do movimento aparente do Sol.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

“O ângulo de inclinação da trajetória do Sol com o plano horizontal recebe o nome de ângulo da altura solar” (VILLALVA E GAZOLI, 2012, p. 56). A altura solar é decorrente da localização geográfica do observador e também do ângulo de declinação solar.

A Figura 3.10 ilustra a altura solar.

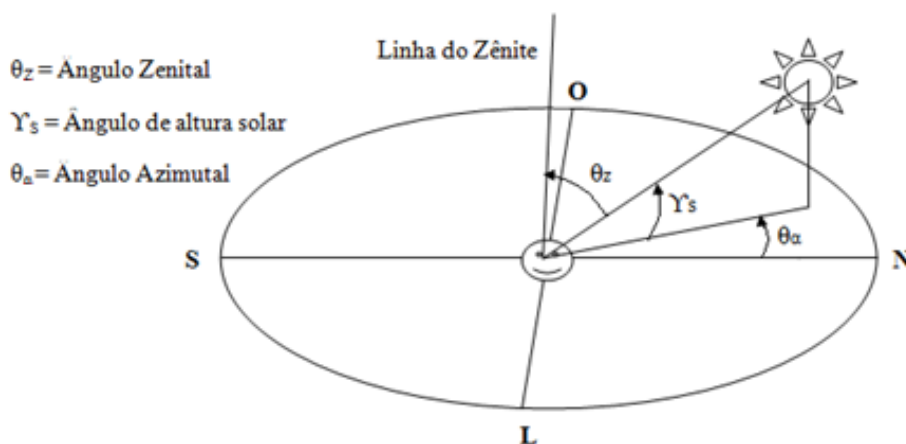


Figura 3.10 – Esquema representando os ângulos solares.

Fonte: Modificada de VILLALVA E GAZOLI, 2012.

O ângulo Zenital também é utilizado para fornecer a posição do Sol e está representado na Figura 3.10. O zênite é uma linha imaginária perpendicular ao solo e a sua angulação com os raios solares fornecem o ângulo zenital do Sol, desta forma quando o Sol se encontra acima do observador o seu ângulo Zenital é zero.

Um observador irá receber os raios solares durante o verão com um ângulo azimutal menor do que no inverno. No verão a altura do Sol no céu é maior do que nos dias de inverno, onde o Sol será visto mais próximo da linha do horizonte e, por isso, com um ângulo azimutal maior. A altura solar também resulta da localização geográfica do observador. Sendo que quanto mais próximo da linha do Equador maior será a altura solar, e à medida que ocorre uma aproximação aos pólos a altura solar diminui.

3.1.7 Escolha do ângulo de inclinação do módulo solar

Em grande parte dos sistemas fotovoltaicos o ângulo de inclinação é fixo. Desta forma, é de grande importância a escolha de um ângulo que proporcione um maior aproveitamento dos raios solares. A escolha errada do ângulo de inclinação do painel fixo gera uma redução da captação dos raios solares, comprometendo a produção de energia elétrica pela placa fotovoltaica.

A Figura 3.11 ilustra o aproveitamento dos raios solares em diferentes ângulos de inclinação com relação à superfície.

Como pode ser observado, o primeiro caso mostra um ângulo de inclinação α que maximiza a captação da radiação solar direta, onde os raios solares atingem perpendicularmente a superfície do painel fotovoltaico.

Nos demais casos mostrados na Figura 3.11 não ocorrem a maximização da captação solar, consequência do movimento de translação da Terra. Na posição vertical a produção de energia é maior no inverno e menor no verão. Por outro lado, na posição horizontal a captação dos raios solares é minimizada nos meses de inverno, quando a altura solar é menor, intensificada nos meses de verão, quando a altura solar é maior.

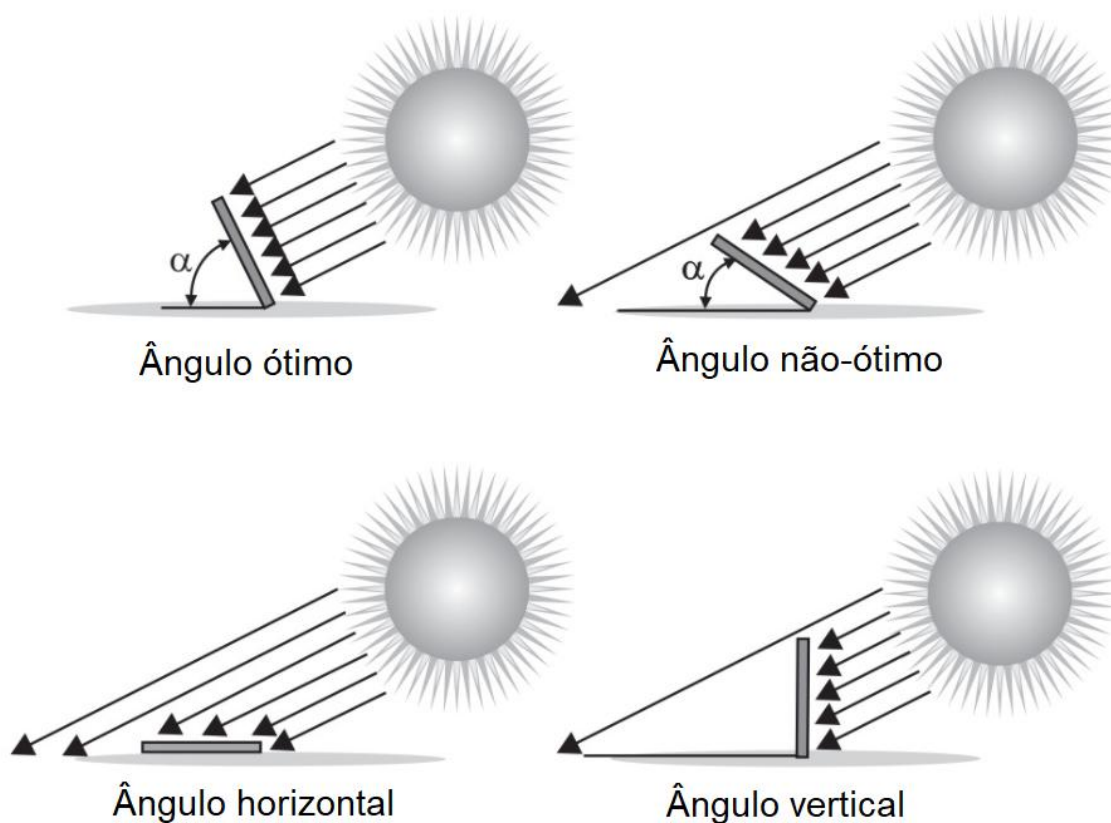


Figura 3.11 – Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

Os módulos fotovoltaicos com rastreamento automático da posição do sol maximizam o ângulo de incidência dos raios solares automaticamente de acordo com os movimentos de rotação e translação da Terra ao longo dos dias e do ano, respectivamente. Por outro lado, com os módulos que apresentam um ângulo de inclinação fixo não ocorre essa otimização de acordo com os movimentos terrestres, mas é possível escolher um ângulo que proporcione uma produção média de energia razoável ao longo do ano.

Uma alternativa adotada por muitos fabricantes de painéis fotovoltaicos é a escolha do ângulo de inclinação conforme a latitude da região onde o módulo será instalado. Assim, apesar de não haver um consenso geral sobre o melhor método para a escolha do ângulo de inclinação, a utilização da latitude para determinar o ângulo de inclinação possibilita uma boa produção média de energia e é recomendável e eficiente.

3.2 Estrutura Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são a base das placas fotovoltaicas, cada unidade é capaz de produzir uma tensão da ordem de 0,6V quando exposta a radiação solar. Associando-as em série, paralelo ou ambos, dependendo da aplicação, adquire-se o que denomina-se de módulo fotovoltaico. A associação dos módulos fotovoltaicos também em série, paralelo ou ambos, gera o painel fotovoltaico (GASPARIN, 2009). Conforme a Figura 3.12.

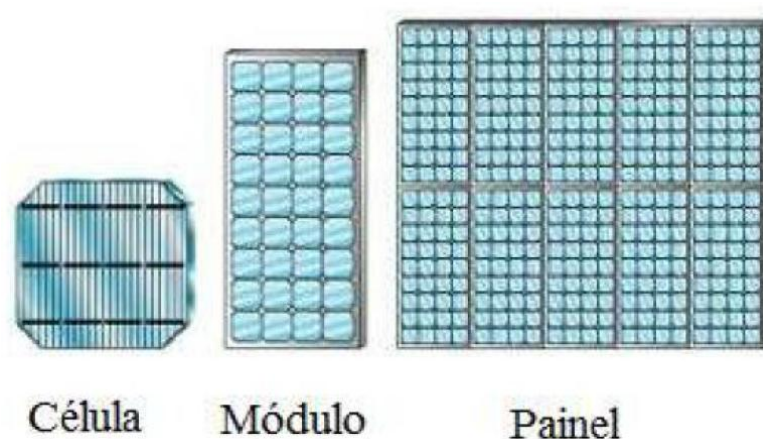


Figura 3.12 – Exemplos de células, módulo e painel fotovoltaicos.

Fonte: CARVALHO, 2012.

3.2.1 Células fotovoltaicas

As células fotovoltaicas são dispositivos elétricos que transformam a energia proveniente do sol diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, como será melhor explicado mais a frente.

Com o crescente desenvolvimento tecnológico e o aperfeiçoamento de processos industriais, vem ocorrendo um aumento significativo na eficiência das células fotovoltaicas. Em 2004, a conversão de radiação solar em eletricidade previsto para células de silício (Si) tinha seu limite teórico de 27% (CRESESB, 2008). Em 2011 a eficiência para uma célula solar com uma única junção era de 33,5%, na prática quase 28% (CARVALHO, 2012).

A seguir são indicados e explicados os principais tipos de células fotovoltaicas:

Células de silício monocristalino: Possuem alta eficiência e confiabilidade, porém seu custo também é elevado. São formadas a partir do aquecimento, em altas temperaturas, de blocos de silício ultrapuro.

Células de silício multicristalino: Também chamado de células de silício policristalino, possuem menor eficiência que as de silício monocristalino. Igualmente formadas por silício, se diferencia por não ser proveniente de um único bloco, e sim por um bloco composto de inúmeros pequenos cristais de silício. Possuindo, dessa forma, imperfeições no contorno dos cristais, o que diminui sua eficiência, porém também reduz seu custo.

Células de silício amorfo: Dentre as células de silício apresentam o menor custo e a menor eficiência. Diferente das outras células, possui uma estrutura cristalina com um elevado grau de desordem.

Células de arseneto de gálio (GaAs): O GaAs é um material que possui muitas propriedades próximas de ideais para aplicações em células solares. Por apresentar, se comparada com as demais placas, uma elevada eficiência e um custo maior, está limitada principalmente no uso da indústria espacial.

Células de telureto de cádmio (CdTe): Usada a algum tempo na forma de filmes finos principalmente em calculadoras, vem sendo aplicada em painéis fotovoltaicos nos últimos anos. Possui baixa eficiência e custo.

Células de disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2 ou CIS): Apresentam uma eficiência equivalente as do silício amorfo, com grandes perspectivas de desenvolvimento. Uma grande característica é sua resistência exposta à radiação solar não só terrestre como espacial.

Células solares fotovoltaicas orgânicas: São modelos de células solares de polímero, que se fundamentam na eletrônica orgânica. Possui baixo custo, mas poucas empresas a produzem em escala industrial.

Células de filme fino: Tem como fundamento de fabricação depositar uma ou mais camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato. Esse material fotovoltaico pode ser silício amorfo, arseneto de gálio, telureto de cádmio, disseleneto de cobre e índio e células solares fotovoltaicas orgânicas.

Células com concentradores: Se baseiam no princípio de concentração da radiação solar por meio de dispositivos ópticos (espelhos e/ou lentes) na célula fotovoltaica. Possibilitando uma maior captação de radiação em uma menor área com material fotovoltaico, gerando um aumento na eficiência do sistema.

3.2.2 Módulo fotovoltaico

Com o arranjo das células fotovoltaicas, compondo o módulo, há a produção de tensão e corrente o bastante para o emprego prático do sistema.

O arranjo pode ser em série e/ou paralelo, sabendo que em série proporcionará um aumento da tensão e, em paralelo um aumento da corrente para o circuito. Em que cada célula a tensão gira em torno 0,5 V e a corrente possui uma densidade da ordem de 30 mA/cm².

O numero de células, assim como o arranjo, depende da eficiência das células e da aplicação desejada.

O ideal é que as células empregadas no módulo possuam as mesmas características elétricas entre si. A incompatibilidade destas, leva a módulos inferiores, visto que as células de maior potência dissipam seu excesso nas de menor, gerando uma redução da eficiência global (CRESESB, 2008).

Devido ao efeito da temperatura e das perdas que ocorrem no sistema, deve-se produzir um valor de tensão acima do que será realmente utilizado.

No caso de uma célula fotovoltaica apresentar um determinado grau de bloqueio ou impedimento para captar a radiação solar por algum motivo, a potência de saída do módulo diminuirá drasticamente. Como os módulos são ligados em série, ocorrerá um comprometimento em todo o funcionamento das demais células do módulo. Para que esta situação não limite toda a corrente de um módulo, utiliza-se um diodo de passo ou de "bypass" (Figura 3.13). Este diodo tem a função de acesso alternativo para a corrente e limita a dissipação de calor na célula defeituosa. Normalmente o diodo bypass é utilizado em grupamentos de células, implicando uma redução de custo, não havendo a necessidade de se conectar um diodo em cada célula (CRESESB, 2008).

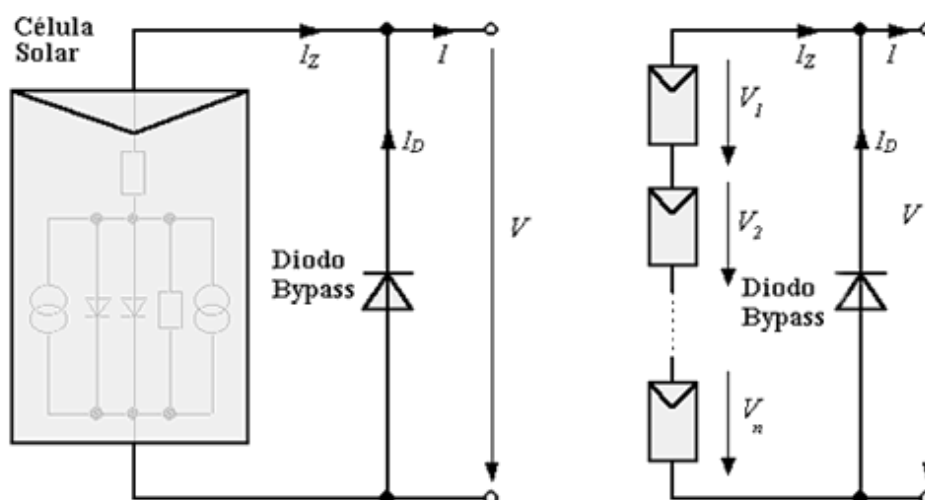


Figura 3.13 – Possível ligação para um diodo bypass entre células.

Fonte: CRESESB, 2008.

Outro problema que pode ocorrer é quando surge uma corrente reversa fluindo pelas células, onde o módulo ao invés de gerar corrente, passa a receber muito acima do que produz. Podendo gerar uma diminuição na eficiência das células e, em caso mais extremo, a célula pode ser desconecta do arranjo, impedindo o fluxo de energia do módulo. Para evitar esse problema, usa-se um diodo de bloqueio (Figura 3.14), impedindo correntes reversas que podem acontecer caso o módulo seja ligado diretamente em um acumulador ou bateria (CRESESB, 2008).

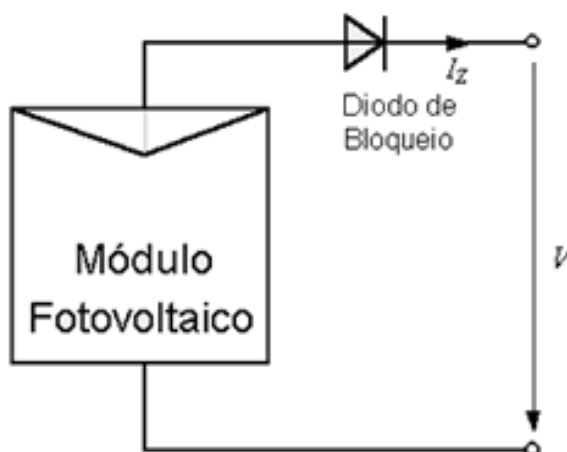


Figura 3.14 – Diodo de bloqueio.

Fonte: CRESESB, 2008.

3.3 Características Elétricas das células e módulos

3.3.1 Efeito Fotovoltaico

A célula solar é um componente eletrônico que é capaz de converter energia solar em eletricidade. A radiação proveniente do Sol faz a célula gerar tanto corrente quanto tensão para gerar energia elétrica. O processo requer, inicialmente, que o material escolhido tenha absorção de luz solar e de um o alto fluxo de energia da célula solar em seu circuito externo.

A variedade dos materiais e seu processo de fabricação possibilitam potencializar o rendimento para a conversão fotovoltaica, mas na prática todos os conversores de energia fotovoltaica utilizam semicondutores de materiais de junção tipo p e tipo n.

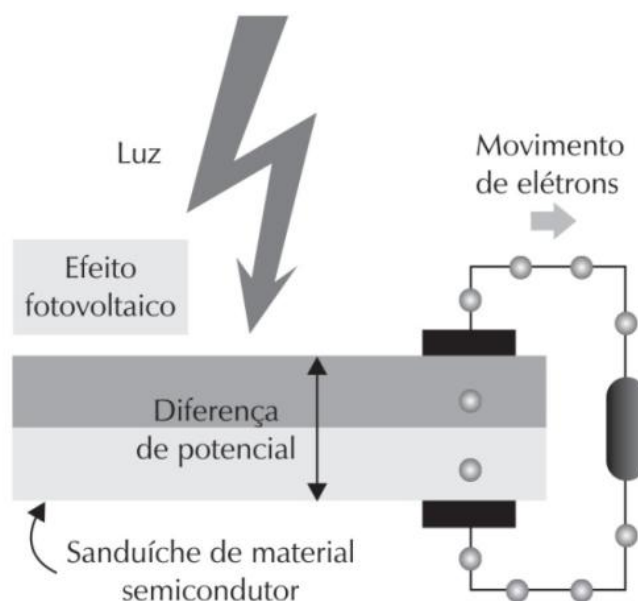


Figura 3.15 – Célula Fotovoltaica e o Efeito Fotovoltaico

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

A geração de corrente elétrica na célula solar, envolve dois processos chaves: O primeiro processo é a absorção da incidência de fótons para criar lacunas eletrônicas. O segundo processo é a recombinação usando as junções p e n para separar o elétron e a lacuna.

A célula fotovoltaica não acumula energia elétrica, apenas mantém o fluxo de elétrons enquanto houver incidência de raios solares. Apesar de ambos os materiais serem eletricamente neutros, o silício tipo n tem excesso de elétrons e tipo p tem lacunas em excesso. O encontro destes materiais cria uma junção PN em sua interface, criando um campo elétrico (BOYLESTAD, 2004).

O efeito fotovoltaico, que é o fundamento da produção de eletricidade em um sistema fotovoltaico, consiste na transformação da radiação eletromagnética proveniente do sol em energia elétrica pela geração de uma diferença de potencial, consequência do fluxo de elétrons e lacunas da união dos dois semicondutores, que passam a agir como uma bateria (Figura 3.15).

3.3.2 Curvas características de corrente, tensão e potência

“Um módulo fotovoltaico não se comporta como uma fonte elétrica convencional. O módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão elétrica depende da sua corrente e vice-versa” (VILLALVA e GAZOLI, 2012, p.76).

A escolha de um módulo fotovoltaico deve levar em consideração a corrente que será suprida pela carga do sistema. A corrente elétrica produzida por uma célula é proporcional a sua área e depende da quantidade de luz incidente na célula fotovoltaica.

Em um módulo solar o ponto de operação, ou seja, o valor da tensão e da corrente nos seus terminais, está vinculado a carga que será conectada ao sistema. Assim, a conexão de um aparelho que demanda muita corrente causa a diminuição da tensão de saída do módulo.

A Figura 3.16 ilustra a relação entre a tensão e a corrente de saída de um módulo solar.

A tensão medida na saída do módulo quando seus terminais não estão conectados a nenhuma carga é chamada de tensão de circuito aberto. Esta tensão é a máxima tensão que o módulo pode fornecer ao sistema.

No caso de um curto-circuito nos terminais do módulo, há a circulação de uma corrente máxima denominada de corrente de curto circuito. Nesta situação, a tensão elétrica correspondente é nula.

Conforme mostrado na Figura 3.16, existe um único ponto na curva $I \times V$ que se refere à condição na qual o painel fornece uma potência máxima ao sistema, chamado de ponto de máxima potência (MPP). Desta forma, é ideal que o módulo opere neste ponto, visto que nesta condição a geração de energia é maximizada.

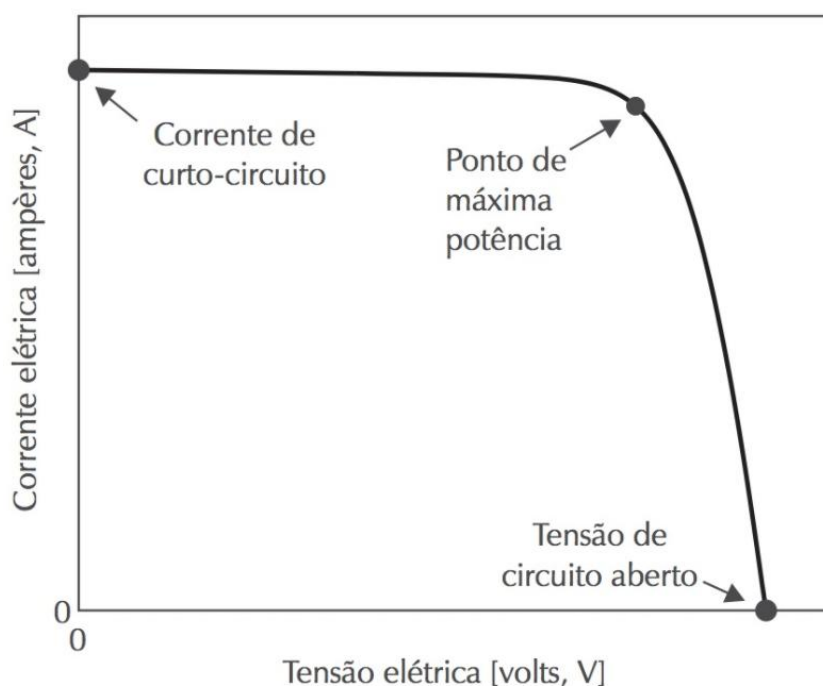


Figura 3.16 – Curva característica $I - V$ de corrente e tensão de um módulo fotovoltaico.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

Para cada curva de corrente x tensão existe uma curva $P \times V$ (Potência x Tensão) correspondente (Figura 3.17). Esta curva mostra a variação da potência de um módulo em função de sua tensão.

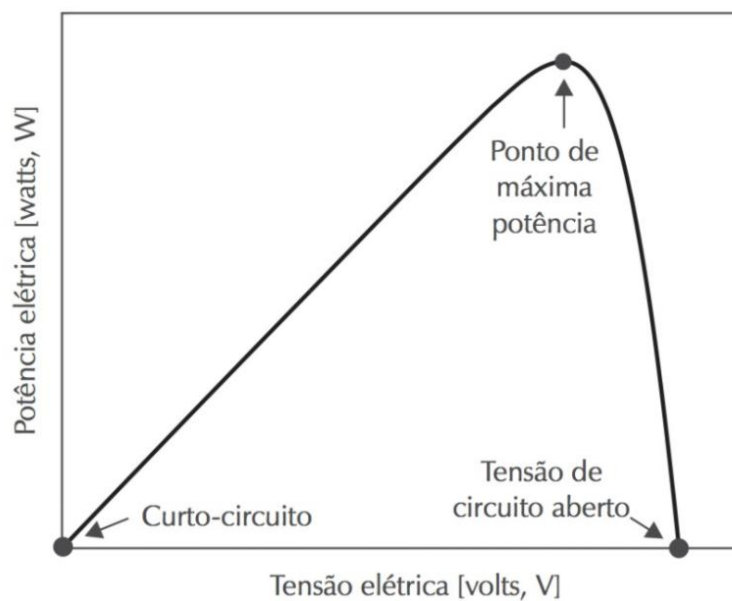


Figura 3.17 – Curva característica P – V de potência e tensão de um módulo fotovoltaico.
 Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

A Figura 3.18 mostra a curva característica I x V posicionada sobre a curva P x V.

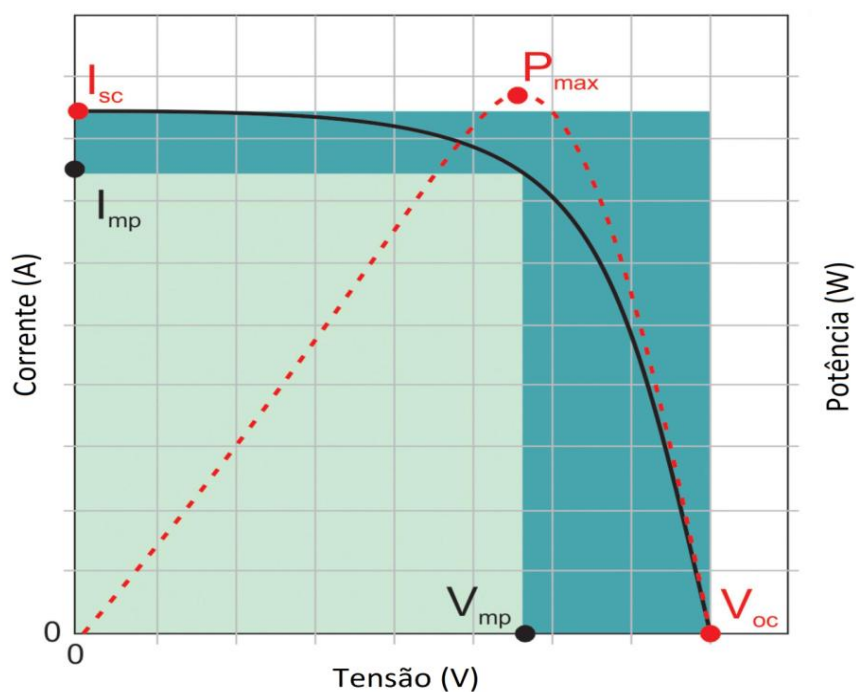


Figura 3.18 – Curvas I x V e P x V Parâmetros de potência máxima.
 Fonte: Modificada de SONAI, 2015.

No ponto de máxima potência (MPP), a potência máxima é dada pelo produto da tensão V_{mp} pela corrente I_{mp} . Os valores de MPP, V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} e I_{sc} estabelecem as características do painel solar para valores específicos de radiação e temperatura de operação (CARVALHO, 2012).

A eficiência que um módulo fotovoltaico possui de converter a energia proveniente do sol em energia elétrica pode ser calculada com a seguinte expressão:

$$\eta = \frac{I_{mp} \times V_{mp}}{A \times G} \quad (3.3)$$

Onde:

η : eficiência do painel;

I_{mp} : corrente de MPP [A];

V_{mp} : tensão do MPP [V];

A: área útil do módulo [m²];

G: irradiância no painel fotovoltaico [W/m²].

A eficiência de um módulo está diretamente relacionada à potência fornecida pelo mesmo. Logo, para uma mesma potência, ao aumentar-se a área do módulo e a incidência de irradiação, tem-se uma eficiência menor.

3.4 Influência da irradiância e da temperatura nas características dos módulos

3.4.1 Influência da Radiação Solar

A intensidade da radiação solar que incide sobre as células de um painel fotovoltaico está diretamente relacionada à corrente elétrica que pode ser fornecida ao sistema.

As curvas características dos módulos solares são estabelecidas levando em consideração o valor de irradiância de 1000 W/m^2 , correspondendo a situação onde o módulo é capaz de fornecer uma corrente máxima a uma temperatura de 25°C .

Desta forma, conforme mostra a Figura 3.19, a corrente máxima gerada pelo módulo aumenta proporcionalmente com o aumento da irradiância incidente sobre as células solares. Em um dia com pouca incidência de raios solares a corrente fornecida pela célula é muito pequena, ou seja, a eficácia para produção de energia elétrica fica drasticamente reduzida.

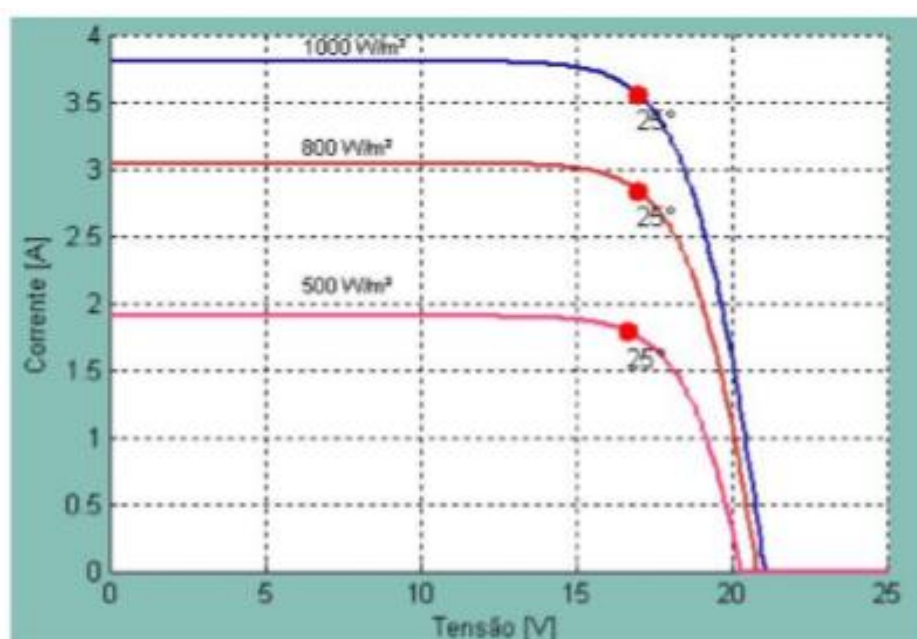


Figura 3.19 – Efeito causado pela irradiância na curva característica $I \times V$ na temperatura de 25°C .
Fonte: CARVALHO, 2012.

A Figura 3.20 ilustra a influência da intensidade da luz solar para com a curva característica $I \times V$ de um painel fotovoltaico.

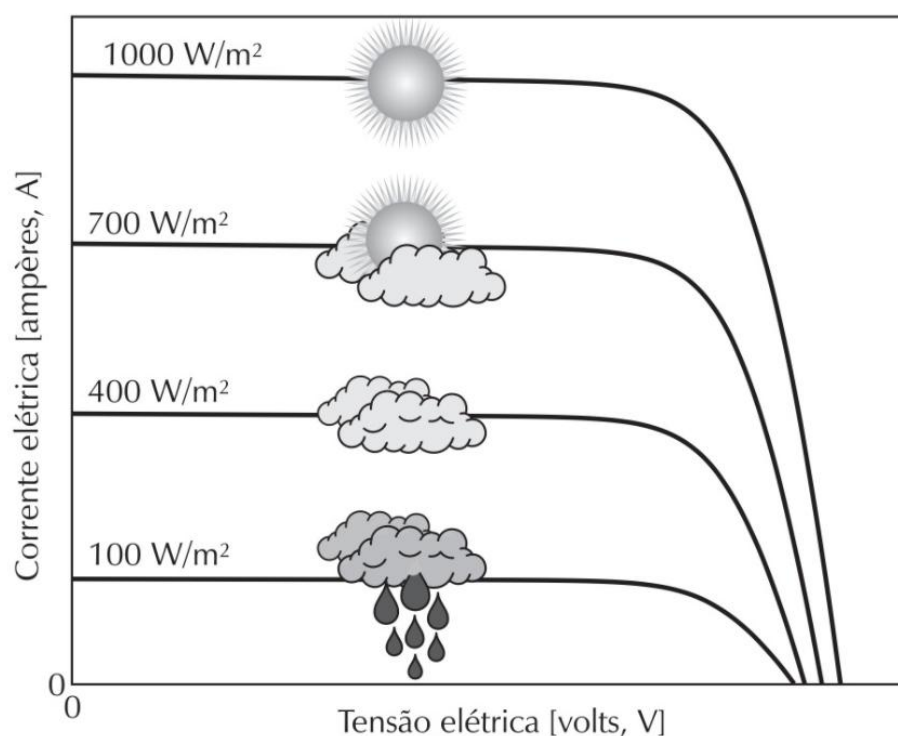


Figura 3.20 – Influência da radiação solar na operação do módulo fotovoltaico.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

3.4.2 Influência da Temperatura

A Figura 3.21 ilustra a curva característica $I \times V$ para diferentes temperaturas. Como observado, a temperatura interfere na tensão que o módulo fornece ao sistema e conseqüentemente, gera uma variação na potência fornecida aos terminais.

O aumento do nível de insolação causa um aumento da temperatura na célula, desta forma, em temperaturas baixas as tensões geradas pelos módulos são maiores e em temperaturas mais elevadas as tensões são menores.

O aumento da temperatura causa uma redução significativa na eficiência do módulo fotovoltaico. Isto se deve ao fato de que a tensão diminui de forma significativa com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre uma variação muito pequena, praticamente desprezível.

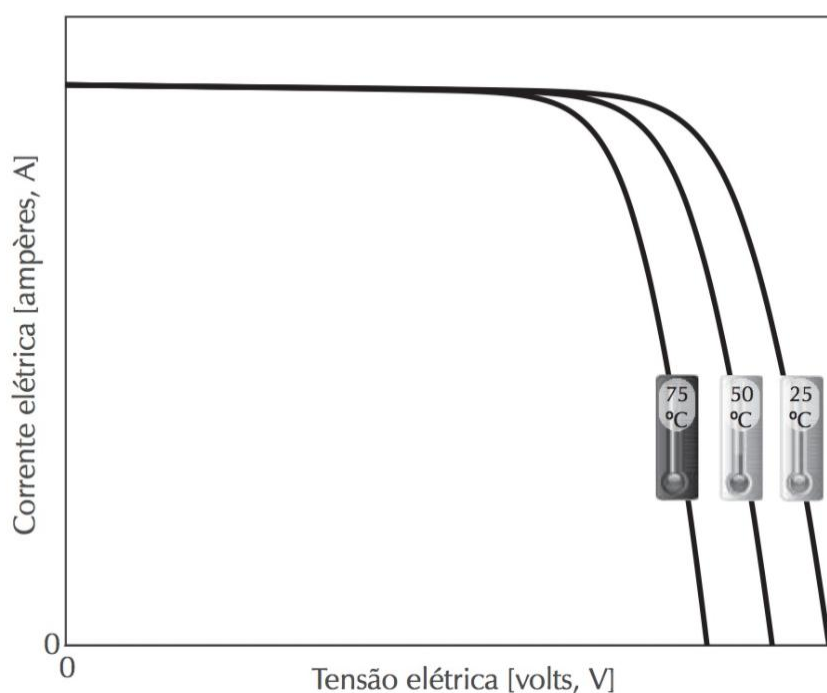


Figura 3.21 – Influência da temperatura na operação do módulo fotovoltaico.

Fonte: VILLALVA e GAZOLI, 2012.

3.5 Modelo equivalente do painel fotovoltaico

Conforme comentado anteriormente, as curvas características dos painéis fotovoltaicos são importantes para uma utilização apropriada e satisfatória. Ou seja, ao se traçar as curvas, levando-se em consideração os parâmetros ambientais do local a ser instalado o painel, é possível projetar a instalação a fim de proporcionar um aumento da eficiência dos módulos.

É possível representar uma célula fotovoltaica através de um circuito equivalente e determinar as equações que descrevem o seu comportamento.

O painel solar pode ser representado por três modelos de circuito equivalentes, dentre esses o ideal, o com duas resistências e um diodo e o modelo com dois diodos. Para determinar os parâmetros que estabelecem as equações do circuito equivalente neste trabalho, consideramos o modelo com um diodo ilustrado na Figura 3.22.

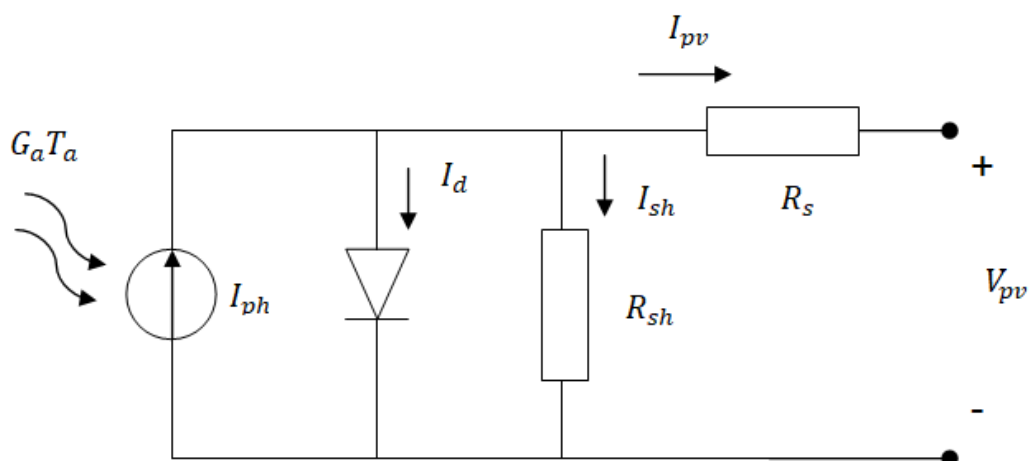


Figura 3.22 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

Fonte: OS AUTORES.

No circuito equivalente a fonte de corrente I_{ph} em paralelo com o diodo representa a corrente gerada em uma célula fotovoltaica e seu valor é proporcional ao nível de radiação solar incidente na célula e a temperatura do meio. O diodo refere-se ao material semicondutor.

A corrente I_{pv} corresponde à corrente de saída do painel, a tensão V_{pv} representa a tensão fornecida à carga que será conectada ao sistema. Devido à existência do diodo no modelo equivalente, I_{pv} e V_{pv} apresentam um comportamento não linear.

A resistência em série R_s corresponde à resistência interna à passagem da corrente e está relacionada ao material semicondutor utilizado na fabricação da célula solar. Valores mais baixos para a resistência em série possibilitam uma maior performance para o circuito, pois a queda de tensão causada pelo resistor será reduzida, diminuindo também as perdas, conforme pode ser visualizados na Figura 3.23.

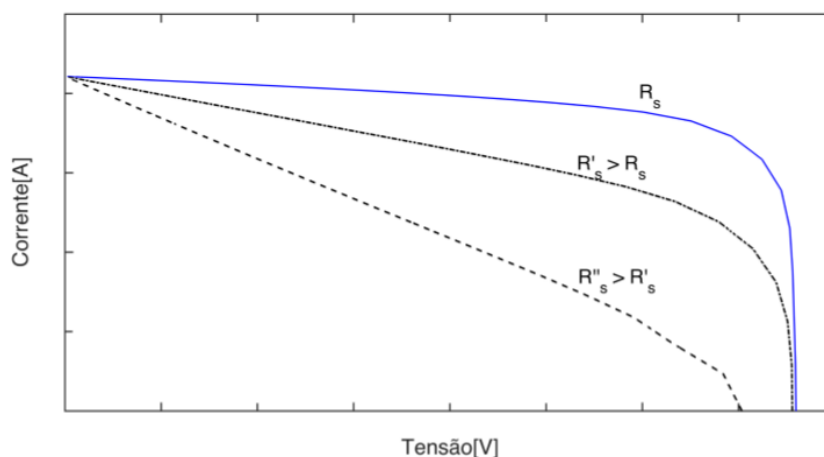


Figura 3.23 – Curva V - I para a resistência em série.

Fonte: SOUSA, 2016.

O resistor R_{sh} em paralelo regula as correntes de fuga na superfície do material, e para que o modelo se aproxime do ideal e não apresente perdas é apropriado que a resistência shunt tenha um valor alto. Desta forma, a corrente gerada pela incidência da radiação solar tende a seguir para a carga conectada, ocasionando uma diminuição de perdas no sistema. A Figura 3.24 ilustra a curva para a variação da resistência shunt.

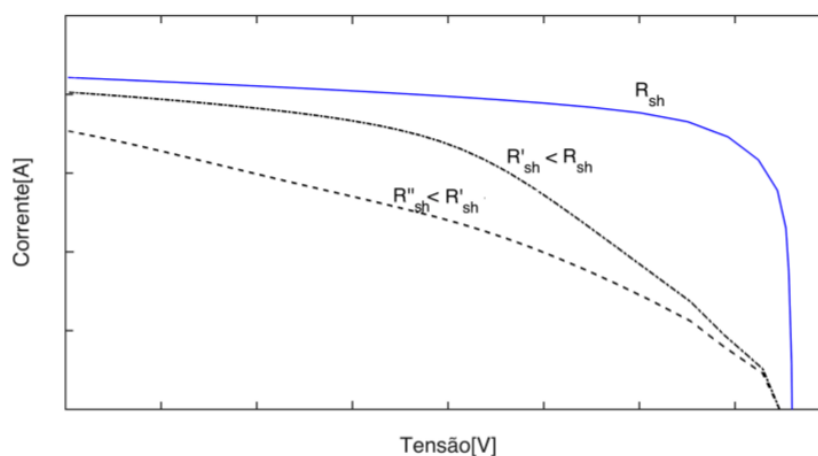


Figura 3.24 – Curva V - I para a resistência shunt.

Fonte: SOUZA, 2016.

As equações que determinam os fundamentos do circuito elétrico equivalente do painel fotovoltaico são retratadas a seguir.

De acordo com a lei dos nós de Kirchhoff, no circuito da Figura 3.22 temos que:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.4)$$

Onde:

I_{pv} = Corrente de saída da célula [A];

I_{ph} = Corrente gerada pela célula fotovoltaica [A];

I_d = Corrente no diodo semicondutor [A];

I_{sh} = Corrente de fuga do resistor em paralelo [A].

As características do diodo semicondutor podem ser determinadas pela seguinte equação:

$$I_d = I_o \cdot \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right) \quad (3.5)$$

Sendo:

I_o = Corrente de saturação reversa do diodo [A];

I_{pv} = Corrente de saída da célula fotovoltaica [A];

V_{pv} = Tensão de saída da célula fotovoltaica [V];

A = Área da célula [m²];

R_s = Resistência em série [Ω];

V_t = Tensão térmica [J/C].

A corrente de fuga do resistor pode ser expressa pela seguinte equação:

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Substituindo as equações (3.5) e (3.6) em (3.4) temos que:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.7)$$

O potencial térmico é dado pela Equação 3.8.

$$V_t = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \quad (3.8)$$

Onde:

n = Coeficiente de emissão;

K = Constante de Boltzmann [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K];

T = Temperatura [Kelvin];

q = Carga elétrica do elétron [$1,16 \times 10^{-19}$ C].

Substituindo a equação (3.8) em (3.7) encontramos a corrente I_{pv} na saída da placa solar em função da tensão de saída do painel V_{pv} .

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

Considerando a dependência da corrente I_{ph} com a temperatura, temos que:

$$I_{ph} = I_{ph}(T_r) + k_0(T - T_r) \quad (3.10)$$

Sendo:

T_r = Temperatura de referência [Kelvin];

$$I_{ph}(T_r) = I_{sc}(T_r) \cdot \frac{G}{G_r} \quad (3.11)$$

Onde:

$I_{sc}(T_r)$ = Corrente de curto-circuito na temperatura de referência [A];

G = Irradiância (Densidade de potência solar) [W/m^2];

G_r = Irradiância de referência [1000 W/m²].

$$k_0 = \frac{I_{sc}(T_c)I_{sc}(T_r)}{(T_c - T_r)} \quad (3.12)$$

Sendo:

$I_{sc}(T_c)$ = Corrente de curto-circuito em cada célula a temperatura de estudo [A];

$I_{sc}(T_r)$ = Corrente de curto-circuito na temperatura de referência [A];

A corrente de saturação reversa I_o do diodo é expressa pela seguinte equação:

$$I_o = I_o(T_r) \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^{\frac{3}{n}} \cdot e^{\frac{q \cdot V_g(T_r)}{n \cdot K \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)}} \quad (3.13)$$

Onde:

$I_o(T_r)$ = Corrente inversa máxima de saturação do diodo na referência [A];

T = Temperatura ambiente [K];

T_r = Temperatura de referência [K];

V_g = Energia necessária para o elétron mudar a banda de condução [1,12 eV];

A corrente inversa máxima de saturação do diodo na referência é dada pela Equação a seguir.

$$I_o(T_r) = \frac{I_{sc}(T_r)}{\frac{q \cdot V_{oc}(T_r)}{e^{n \cdot K \cdot T_r - 1}}} \quad (3.14)$$

Sendo:

$I_{sc}(T_r)$ = Corrente de curto-circuito de referência [A];

$V_{oc}(T_r)$ = Tensão de circuito aberto em cada célula na temperatura de referência [V].

O modelo leva em consideração a resistência em série R_s representando a resistência em série de cada célula solar:

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{Voc}} - \frac{1}{X_v} \quad (3.15)$$

$$X_v = I_0(T_r) \cdot \frac{q}{n \cdot k \cdot T_r} e^{\frac{qV_{oc}(T_r)}{n \cdot k \cdot T_r}} - \frac{1}{X_v} \quad (3.16)$$

3.6 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

Em 1968 iniciou-se o desenvolvimento dos controladores de Ponto de Máxima Potência, com a intenção de melhorar o desempenho de sistemas constituídos por uma fonte não linear e uma carga arbitrária (CARVALHO, 2012).

O ponto de máxima potência se baseia na transferência máxima de potência média. Onde há a impedância da fonte (Z_{TH}) e a impedância da carga (Z_L), alimentadas por uma tensão (V_{OC}) e com uma corrente (I_L). Conforme a Figura 3.25.

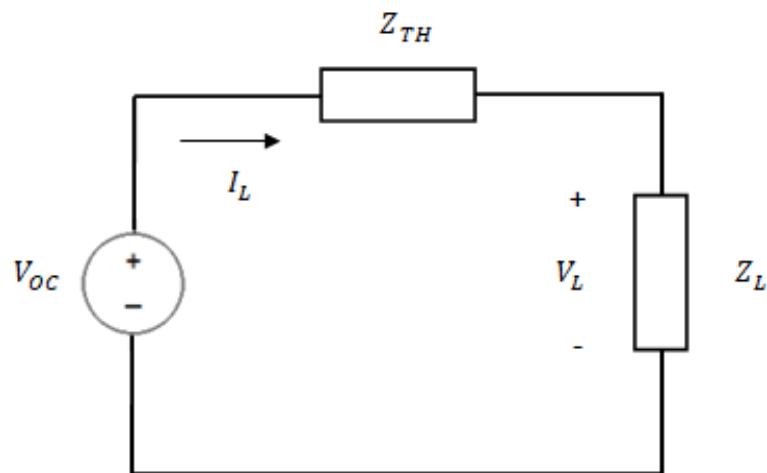


Figura 3.25 – Circuito para a transferência máxima de potência.

Fonte: OS AUTORES.

Note que o circuito lembra o equivalente de Thevenin. Dessa forma, para haver uma transferência máxima de potência, o valor da impedância Z_L terá que ser igual à Z_{TH}^* (conjugado).

De acordo com o circuito acima, encontramos os valores de I_L, V_L, Z_L, Z_{TH} e a impedância equivalente no circuito:

$$I_L = \frac{V_{OC}}{Z_{TH} + Z_L} \quad (3.17)$$

$$V_L = \frac{Z_L}{Z_{TH} + Z_L} \times V_{OC} \quad (3.18)$$

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (3.19)$$

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} \quad (3.20)$$

$$Z_{TH} + Z_L = (R_{TH} + R_L) + j(X_{TH} + X_L) \quad (3.21)$$

$$|I_L| = I_{LM} = \frac{V_{OCM}}{\sqrt{(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2}} \quad (3.22)$$

$$|V_L| = V_{LM} = \frac{\sqrt{R_L^2 + X_L^2} \times V_{OCM}}{\sqrt{(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2}} \quad (3.23)$$

$$P_L = \frac{1}{2} \times R_L \times (I_{LM})^2 \quad (3.24)$$

$$P_L = \frac{R_L \times V_{OCM}^2}{2[(R_{TH} + R_L)^2 + (X_{TH} + X_L)^2]} \quad (3.25)$$

Para maximizar P_L precisa-se apenas maximizar $\frac{R_L \times V_{OCM}^2}{2(R_{TH} + R_L)^2}$, pois X_{TH} e X_L , por serem reatâncias, não consomem potência média, dessa forma, elas podem ser eliminados da equação, ou seja, $X_{TH} + X_L = 0$, logo, $X_L = -X_{TH}$.

Então P_L será escrito como $P_L = \frac{R_L \times V_{OCM}^2}{2(R_{TH} + R_L)^2}$ e terá seu valor máximo quando

$$\frac{dP_L}{dR_L} = 0$$

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{V_{OCM}^2 \times 2(R_{TH} + R_L)^2 - V_{OCM}^2 \times R_L \times 4(R_{TH} + R_L)}{4 \times (R_{TH} + R_L)^4} = 0 \quad (3.26)$$

$$V_{OCM}^2 \times (R_{TH} + R_L) - V_{OCM}^2 \times R_L \times 2 = 0 \quad (3.27)$$

$$R_{TH} + R_L - 2R_L = 0 \quad (3.28)$$

$$R_L = R_{TH} \quad (3.29)$$

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (3.30)$$

$$Z_L = R_{TH} - jX_{TH} = Z_{TH}^* \quad (3.31)$$

Baseado neste conceito, pode-se, mais a frente, entender a atuação dos conversores no rastreamento do ponto de máxima potência em um sistema fotovoltaico. Neste caso, a impedância da fonte (Z_{TH}) equivale à impedância do painel fotovoltaico, sendo a idéia fundamentada no casamento das impedâncias.

3.7 Principais Algoritmos para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

Os Algoritmos de MPPT apresentam uma grande importância na otimização do desempenho de um sistema fotovoltaico, sendo a lógica desenvolvida para determinar o ponto de operação com a melhor transferência de energia para a carga instalada, considerando as variações repentinas da radiação e temperatura no ambiente.

Conforme ilustrado na Figura 3.26, o controlador é utilizado para fazer o módulo fotovoltaico operar sempre em seu ponto de máxima potência, aumentando a eficiência e o rendimento do sistema em torno de 15% a 30% (CARVALHO, 2012).

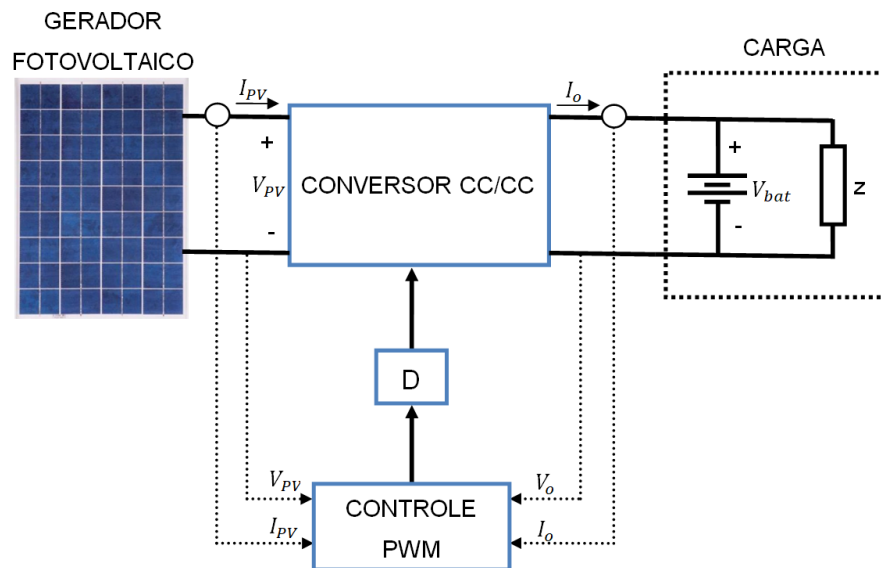


Figura 3.26 – Controlador do Ponto de máxima potência MPP.

Fonte: Modificada de CARVALHO, 2012.

3.7.1 Métodos Diretos

Nessa categoria de algoritmos, durante a operação do painel, o MPP é calculado a partir das medições contínuas de tensão e corrente em tempo real, permitindo a esses algoritmos reação às alterações nas condições de operação do painel.

3.7.1.1 Perturba e Observa

Este método opera a partir da “perturbação” da tensão de saída do painel. Com essa variação na tensão, analisa-se se ocorreu um aumento na potência de saída se comparado com o valor armazenado anteriormente, ou seja, se $\Delta P > 0$.

Desta forma, se a variação for positiva e houver um aumento da potência, o sistema de controle, o algoritmo, entende que a variação inicial ocorreu no sentido correto, portanto as variações continuarão a atuar neste sentido até que o ponto de máxima potência seja atingido (Equação 3.32), caso a variação ocorra no sentido contrário ($\Delta P < 0$), o algoritmo interpreta que o sentido da variação deve ser alterado (SOUZA, 2016). Dessa forma, o algoritmo de P&O faz com que a referência fique variando em valores próximos ao MPP.

Para que o algoritmo tenha uma boa eficiência é fundamental fazer uma escolha adequada para incremento da perturbação (dV). É importante que dV não assuma um valor muito pequeno, visto que nesta situação o algoritmo demora a encontrar o MPP. Por outro lado, dV também não deve assumir valores muito altos, pois resultará em grandes variações em torno do MPP.

Este método é muito utilizado devido a simplicidade de sua implementação, sendo necessário um sensor de tensão e corrente. A desvantagem deste método está na perda de eficiência quando o painel opera em níveis de irradiâncias muito baixos (CARVALHO, 2012).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3.32)$$

3.7.1.2 Método da Diferenciação

Sua base é a teoria de pontos críticos do cálculo, sendo a derivada em relação ao tempo no ponto zero, conforme a Equação 3.33 (SOUZA, 2016).

$$\frac{dP}{dt} = V \frac{dI}{dt} + I \frac{dV}{dt} = 0 \quad (3.33)$$

A maior dificuldade deste método está em resolver esta equação rapidamente, visto possuir uma considerável quantidade de parâmetros e ter a necessidade de ser em tempo real.

3.7.1.3 Condutância Incremental

Este método fundamenta-se no cálculo da derivada da curva de potência do painel fotovoltaico. Segundo Carvalho (2012, p.64) “quando o valor da derivada é positivo, significa que o ponto de operação encontra-se na subida da curva e na condição contrária, derivada negativa, o ponto de operação encontra-se na descida da curva.”

Como se pode observar na Figura 3.27, o coeficiente angular no ponto de máxima potência é nulo.

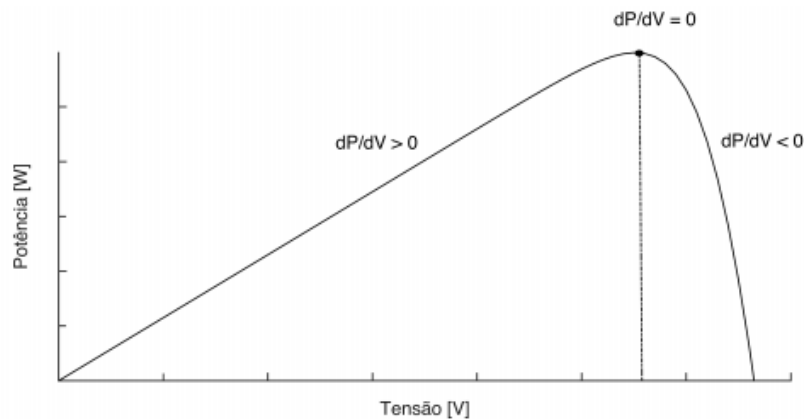


Figura 3.27 – Curva PxV no método de indutância incremental.

Fonte: SOUSA, 2016.

3.7.1.4 Capacitâncias Parasitas

Este método é uma adaptação do método anterior, sua diferença está em levar em consideração as capacitâncias parasitas, C_p , que estão inerentes aos sistemas fotovoltaicos devido ao armazenamento de carga que ocorre na junção p-n. São Representadas como um capacitor em paralelo com a célula. Desta forma, a Equação 3.34 é somada a um termo de corrente, I_{c_p} , relativo às capacitâncias parasitas (SOUZA, 2016).

$$I_{c_p} = C_p \frac{dV}{dt} \quad (3.34)$$

Sendo considerado este novo termo, este método opera de modo similar ao método da condutância incremental para calcular o MPP.

3.7.1.5 Feedback de tensão ou corrente

Neste modelo um sistema de controle estipula um ponto de operação similar ao ponto de máxima potência por meio de constantes variações na tensão ou na corrente intercaladas com o ciclo de trabalho do conversor CC-CC. Assim, o sistema é realimentado na forma de Loop com a corrente ou tensão mais satisfatória para se operar próximo ao ponto de máxima potência.

Este método apresenta limitações relacionadas a mudanças de irradiância e temperatura, além de não poder ser utilizado em conjunto com baterias pelo fato destas possuírem tensão fixada (SOUZA, 2016).

3.7.1.6 Controladores de Lógica Fuzzy ou Nebulosa

Controladores com a lógica fuzzy possuem a vantagem de não precisarem de um modelo matemático para a falta de linearidade do sistema. Sendo capazes de utilizar o valor de entrada do tipo crisp (exatos) e modifica-lo em valores do tipo fuzzy (difuso) para calcular o MPP. São três etapas: fuzzificação, avaliação de regra e desfuzzificação. Na primeira etapa é obtido um o valor exato e por meio de uma escala de graus de adesão, gera valores de entrada do tipo fuzzy. A segunda etapa define a ação dos controladores com base em cada valor de entrada em busca do MPP, resultando em uma saída para cada entrada. Na terceira e última etapa as saídas do tipo difusa são combinadas gerando um valor exato (SOUZA, 2016).

3.7.1.7 Rede Neural Artificial

Este método alcança o ponto de máxima potência através da simulação do funcionamento de uma rede de neurônios arranjado em três camadas: Entrada, Oculta e saída.

Os parâmetros de entrada podem ser a tensão V_{oc} , a corrente I_{sc} , a temperatura, a irradiância ou a associação destas. Já a saída poder ser composta por um ou mais sinais de controle.

Na rede Neural, o ponto inicial de operação necessita de um algoritmo de treinamento, ou seja, o reconhecimento do MPP é realizado por um processo de treinamento onde o módulo é testado por um longo período até se alcançar os padrões de entrada e saída desejados (CARVALHO, 2012).

Pelo fato de no mercado não existir um padrão de painel fotovoltaico, sendo que cada painel apresenta características diferentes, uma rede neural deve ser treinada de forma específica para cada modelo de painel.

A Figura 3.28 abaixo esquematiza o método da Rede Neural Artificial.

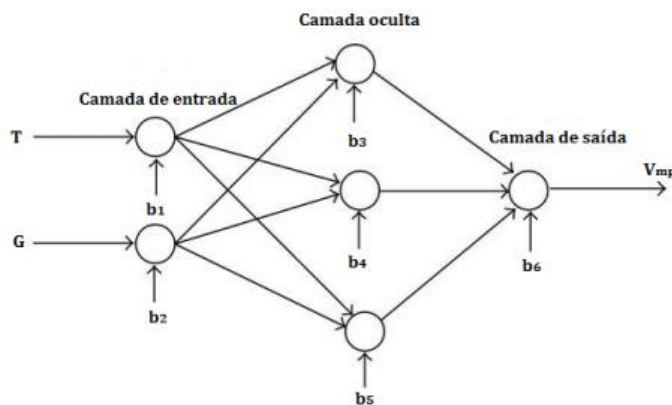


Figura 3.28 – Esquema do método de Rede Neural Artificial.

Fonte: SOUSA, 2016.

3.7.1.8 Varredura de Corrente

Este método cria uma onda de varredura periódica na corrente da célula. Através de medições de tensão e de corrente, estes parâmetros de saída da célula são direcionados para o MPP até a seguinte varredura, ocorrendo num intervalo de tempo por volta de 50 ms (SOUZA, 2016). Por demandar um tempo para ser executado, esse método gera uma perda de potência e necessita de uma certa estabilidade da irradiação incidente no painel.

3.7.1.9 Controle de Correlação de Ripples

Este método é baseado na máxima transferência de potência e utiliza as perturbações da potência, que ocorrem naturalmente quando o switch dos conversores é acionado pelo módulo, para determinar o ponto adequado para a operação do painel (CARVALHO, 2012).

3.7.2 Métodos Indiretos

Esta categoria de algoritmos possui uma base de dados previamente estabelecida para a operação no MPP levando em conta o comportamento típico do painel fotovoltaico perante as variações na tensão e temperatura.

3.7.2.1 Método de verificação de tabelas

Este método é baseado na comparação dos valores de tensão e corrente medidos com os dados obtidos em condições climáticas reais quando o painel está operando em máxima potência. Desta forma, este método apresenta limitações de memória para armazenamento e também não é possível que todas as condições climáticas sejam previamente conhecidas e comparadas.

3.7.2.2 Corrente Constante

Esta técnica faz a aproximação da corrente de máxima potência para um percentual da corrente de curto-circuito, devido ao fato da razão (k_1) entre a corrente de máxima potência e a corrente de curto circuito tender a constância. Então a corrente de curto circuito medida e a constante k_1 são utilizadas continuamente obtendo o MPP (SOUZA,2016).

$$I_{mp} \cong k_1 \times I_{sc} \quad (3.35)$$

3.7.2.3 Tensão Constante

O método da tensão constante fundamenta-se na razão entre a tensão de máxima potência e a tensão de circuito aberto (V_{oc}) para o valor padrão de irradiação solar. Considerando que nos diversos pontos de MPP a tensão nos terminais é praticamente constante mesmo com a variação da intensidade da irradiação incidente, o circuito de controle consegue operar muito próximo ao MPP (CARVALHO, 2012).

Este método é implementado por uma malha fechada de tensão onde o valor de referência (V_{ref}) é ajustado para ficar próximo ao valor de V_{oc} (Figura 3.29).

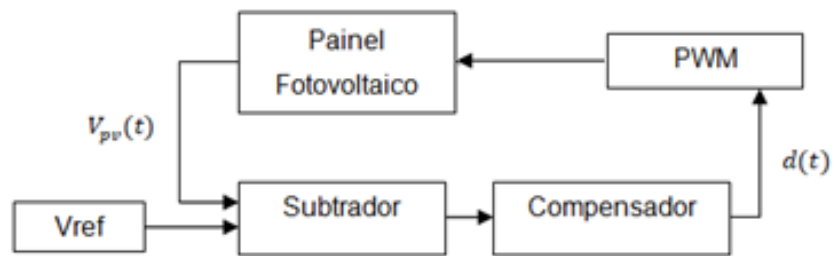


Figura 3.29 – Método Tensão Constante.

Fonte: Modificada de CARVALHO, 2012.

3.7.2.4 Ajuste de Curva

Esta técnica utiliza equações de modelos equivalentes e todos os dados e características do painel são previamente conhecidas para propor uma equação para uma curva ajustada que modele o comportamento da potência e da tensão de saída do painel, conforme as equações a seguir (SOUZA, 2016).

$$P_{pv} = wV_{pv}^3 + uV_{pv}^2 + zV_{pv} + d \quad (3.36)$$

$$V_{mp} = \frac{-u\sqrt{u^2 - 3wz}}{3a} \quad (3.37)$$

3.7.2.5 Método Beta

O método Beta utiliza a tensão e a corrente de saída do painel para calcular periodicamente o PMM através da seguinte expressão (CARVALHO,2012).

$$\beta = \ln\left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}}\right) - cV_{pv} \quad (3.38)$$

Onde:

I_{pv} = Corrente de saída do painel [A];

V_{pv} = Tensão de saída do painel [V];

c = Dado por 34.

$$c = \left(\frac{q}{n \cdot k \cdot T \cdot N_s} \right) \quad (3.39)$$

Sendo:

q = Carga do elétron [$1,6 \times 10^{-19}$ C];

n = Fator de qualidade da junção do painel;

k = Constante de Boltzman [$1,38 \times 10^{-23}$ J/K];

T = Temperatura [Kelvin];

N_s = Quantidade de células fotovoltaicas em série.

3.8 Conversores CC-CC

Os conversores CC/CC convertem a tensão de uma fonte de corrente contínua para outro nível de tensão através do seu circuito eletrônico. Pelo fato dos painéis fotovoltaicos não possuírem alta eficiência de conversão de energia, principalmente devido às variações de radiação, temperatura e de carga, os algoritmos MPPT definem na curva $I \times V$ o ponto em que o painel deve operar para obter o máximo de eficiência. Pra assegurar que o painel opere no MPP, recorre-se aos conversores CC/CC.

3.8.1 Principais conversores CC/CC aplicados em sistemas fotovoltaicos

3.8.1.1 Conversor CC/CC boost

Também chamado de step-up, é o mais usual conversor CC/CC elevador de tensão, por sua simplicidade e baixas perdas condutivas. É muito eficiente para baixos ganhos de tensão, porém insuficientes para ganhos mais elevados. A Figura 3.30 ilustra seu circuito, contendo um indutor L_1 , um capacitor C_0 , um diodo D_1 e uma chave S_1 de alta frequência. Com uma tensão de entrada V_{in} , obtém-se uma tensão de saída V_0 , sendo esta sempre superior ou igual à tensão de entrada.

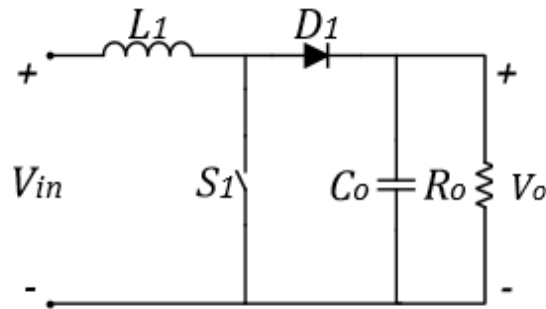


Figura 3.30 – Conversor CC/CC boost.

Fonte: OLIVEIRA, 2015.

O ganho de tensão do conversor boost no modo de condução contínua está apresentado na Equação (3.40). Onde d representa a razão entre o tempo no qual a chave se encontra ligada (T_{on}) e o tempo total do período (T_s), ou seja, $d = T_{on}/T_s$.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-d} \quad (3.40)$$

Nota-se que, teoricamente, à medida que a razão cíclica tende a um, o ganho de tensão tende ao infinito. Em prática, o ganho é limitado pelas perdas associadas aos elementos passivos de filtragem (indutor e capacitor), e semicondutores (chave de potência e diodo). Para elevar a razão cíclica, eleva-se o tempo no qual a chave permanece fechada, conseqüentemente aumenta-se as ondulações de corrente nos componentes e perdas na chave e no diodo (OLIVEIRA, 2015). Uma vez que o diodo retificador conduza por um período excessivamente curto, este pode sofrer sérios problemas de recuperação reversa (OLIVEIRA, 2015). Portanto, uma elevada razão cíclica degradará drasticamente a eficiência do conversor, devendo ser evitada.

3.8.1.2 Conversor CC/CC boost entrelaçado

O modelo entrelaçado baseia-se no conversor boost convencional, acrescentando uma ou mais células boost em paralelo, aumentando a potência que pode ser entregue pelo conversor, permitindo adquirir um ganho maior de tensão pela redução dos esforços de corrente (ALVES, 2013). Também possuem como vantagens a minimização da ondulação de corrente, a redução do tamanho dos componentes passivos, um menor aquecimento pela distribuição da corrente entre

células e a melhora da resposta transitória (OLIVEIRA, 2015). Seu circuito com duas células está exibido na Figura 3.31 abaixo.

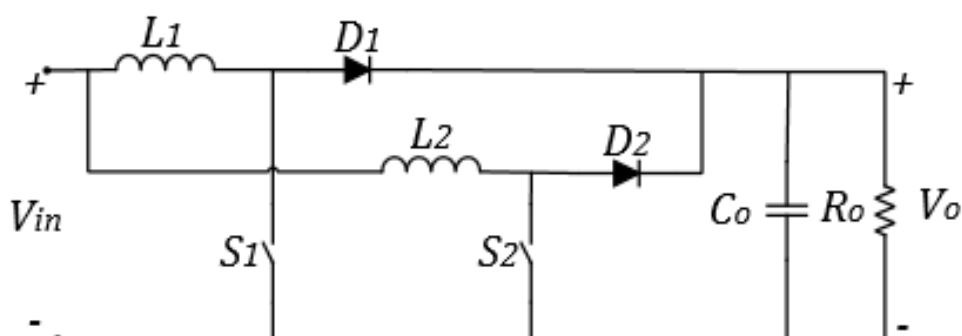


Figura 3.31 – Conversor CC/CC boost entrelaçado.

Fonte: OLIVEIRA, 2015.

3.8.1.3 Conversor CC/CC boost quadrático

Também denominado de conversor boost em cascata de dois estágios, é uma forma para obter elevados ganhos sem necessitar trabalhar com razões cíclicas elevadas. Conseguindo um ganho de tensão igual ao quadrado do ganho boost clássico, ocorrendo em progressão geométrica conforme o número de estágios inseridos. Seu circuito está expresso na Figura 3.32.

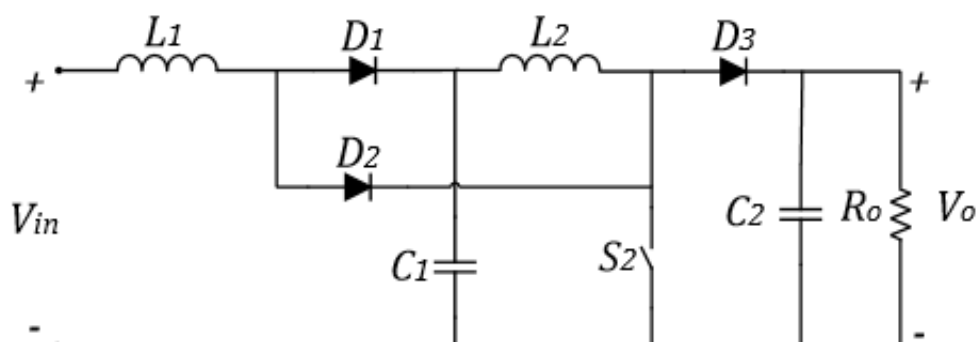


Figura 3.32 – Conversor CC/CC boost quadrático.

Fonte: OLIVEIRA, 2015.

3.8.1.4 Conversor CC/CC reboost

O conversor reboost é derivado do conversor CC/CC isolado flyback, podendo obter altos níveis de ganhos de tensão. O conversor flyback apresenta baixa

eficiência devido a indutância de dispersão do transformador. Toda a energia entregue à saída circula inevitavelmente pelo transformador, gerando perdas e esforços extras nas chaves semicondutoras (Alves, 2013).

O reboost foi concebido com a finalidade de melhorar esse requisito. Criando um caminho de fluxo de energia direto da entrada para a saída, evitando que parte da energia circule pelo transformador. Ou seja, reciclando a energia antes perdida pela indutância de dispersão. Seu circuito está exibido na Figura 3.33.

O capacitor C_c suprime os eventuais picos de tensão na chave S durante o período transitório do chaveamento.

O transformador, a chave S e o diodo de saída D_o formam o conversor flyback, enquanto que o primário do transformador, a chave S e o diodo D_c constituem o boost. Por essa razão, o conversor reboost é conhecido como boost-flyback. Além disso, o capacitor da saída C_o não sendo conectado à referência e sim ao terminal do secundário do transformador, não modifica o ganho do conversor, permitindo a utilização de um capacitor menor (OLIVEIRA, 2015).

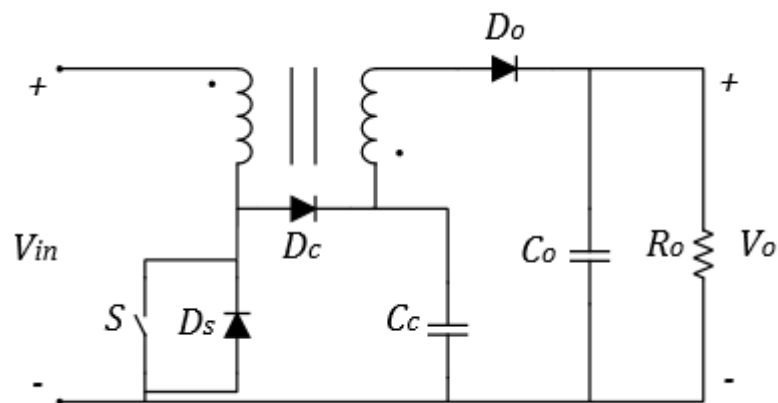


Figura 3.33 – Conversor CC/CC reboost.

Fonte: OLIVEIRA, 2015.

3.8.1.5 Conversor CC/CC charge-pump-reboost

Devido a estrutura Reboost apresentar a corrente de entrada descontínua, indesejável para aplicações com painéis fotovoltaicos em decorrência do alto volume capacitivo de desacoplamento, adicionou-se com poucas modificações um circuito

chamado de charge-pump, permitindo que a corrente de entrada tenha continuidade (ALVES, 2013).

Logo, foi possível manter um elevado ganho estático e reduzir esforços nos elementos semicondutores. Porém, na energização inicial do circuito é exigido correntes elevadas, podendo ser prejudicial ao conversor (ALVES, 2013). Seu circuito é exibido na Figura 3.34.

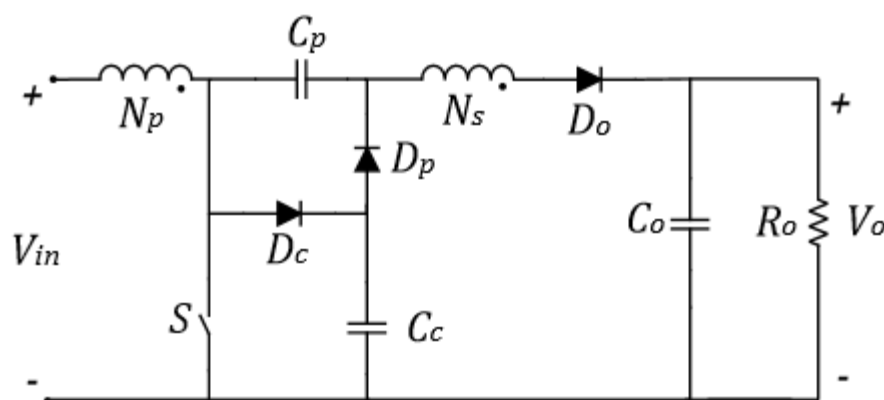


Figura 3.34 – Conversor CC/CC charge-pump-reboost.

Fonte: OLIVEIRA, 2015.

3.8.2 Modulação PWM

Todos os conversores CC/CC, independentemente de sua topologia, apresentam sua saída diretamente proporcional ao ciclo de trabalho (d) do circuito de chaveamento. Alterando o ciclo de trabalho consegue-se controlar a tensão média V_0 , a corrente média I_0 e a potência média P_0 fornecidas à carga. A Figura 3.35 demonstra um exemplo de um circuito e um gráfico para esse ciclo.

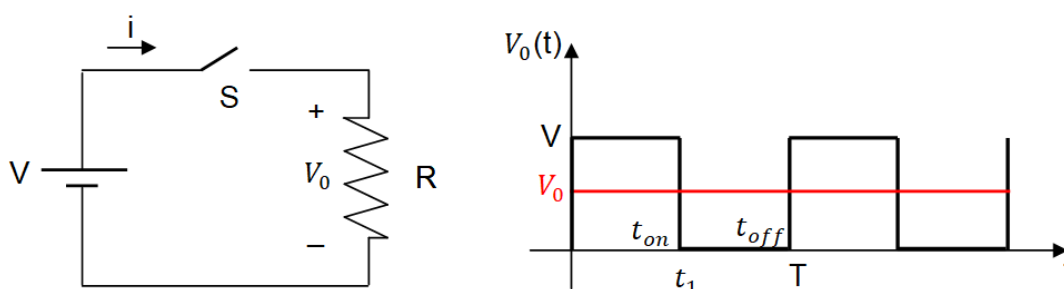


Figura 3.35 – Chaveamento da tensão V sobre uma carga R .

Fonte: OS AUTORES.

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0(t) dt = \frac{t_1}{T} V = t_1 f V = dV \quad (3.41)$$

Onde:

d: ciclo de serviço = t_1/T , $0 < d < 1$ [adimensional];

t_1 : tempo em que saída está ON [s];

T: período do sinal de chaveamento [s];

f: frequência do sinal de chaveamento [Hz].

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{dV}{R} = d \frac{V}{R} \quad (3.42)$$

$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_0 i_0 dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} \frac{V_0^2}{R} dt = d \frac{V^2}{R} \quad (3.43)$$

O conversor CC/CC é “visto” pela fonte de tensão de entrada V como uma resistência de entrada variável R_i inversamente proporcional ao d, conforme a Equação 3.44.

$$R_i = \frac{V}{I_0} = \frac{V}{dV/R} = \frac{R}{d} \quad (3.44)$$

Onde:

R_i : resistência de entrada do conversor CC/CC [Ω];

R: resistência da carga do conversor CC/CC [Ω].

Então conforme enunciado pelo teorema da máxima transferência de potência, o circuito de rastreamento de MPP deve fazer o casamento da impedância da fonte com a impedância da carga.

O chaveamento é obtido pelo método de modulação por largura de pulso (PWM – pulse-width modulation). Onde a largura de pulso varia enquanto o período

de chaveamento total é constante. A Figura 3.36 mostra as formas de onda relacionando ao ciclo de trabalho.

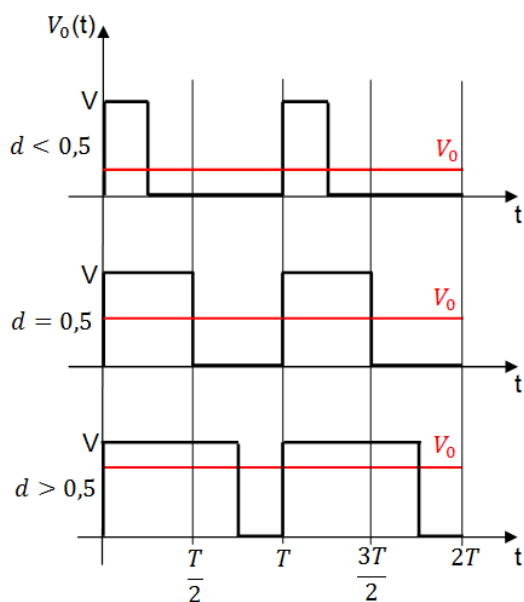


Figura 3.36 – Variação do ciclo de trabalho.

Fonte: OS AUTORES.

3.8.3 Região de operação do conversor

Ao se conectar um módulo fotovoltaico com uma carga, a intersecção das curvas de carga e de geração será o ponto de operação. Somente em uma situação as duas curvas se interceptaram no MPP, conforme mostrado na Figura 3.37. Deste modo, para garantir que o sistema trabalhe no ponto de operação definido pelo MPPT, é utilizado um conversor CC/CC.

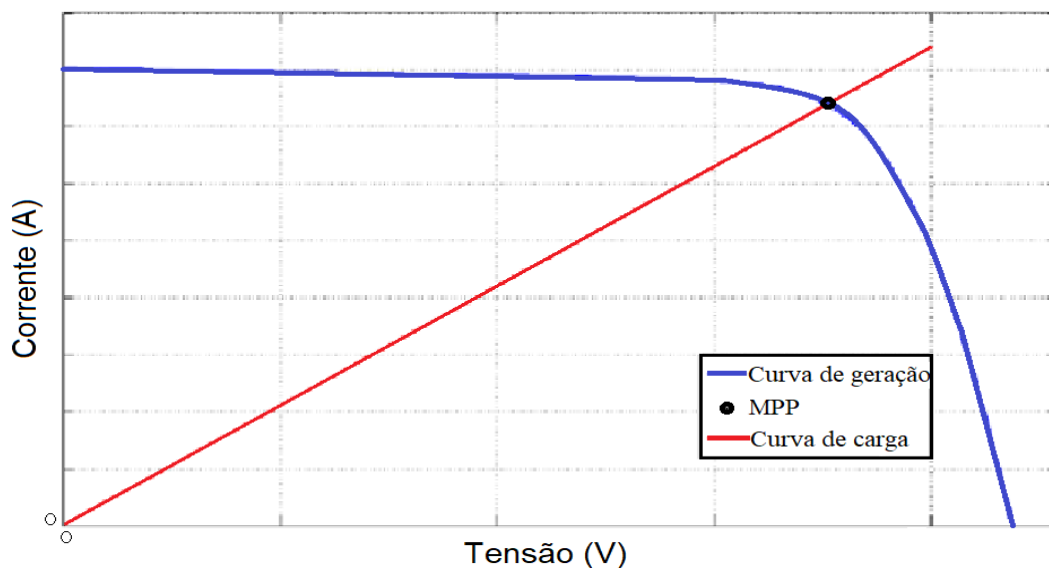


Figura 3.37 – Intersecção da curva de carga com a curva de geração do módulo fotovoltaico.

Fonte: Modificada de ROQUE, 2014.

Conforme mostrado na Figura 3.38, independentemente do conversor utilizado, a tensão na carga é expressa por:

$$V_{carga} = R_{carga} I_{carga} \quad (3.45)$$

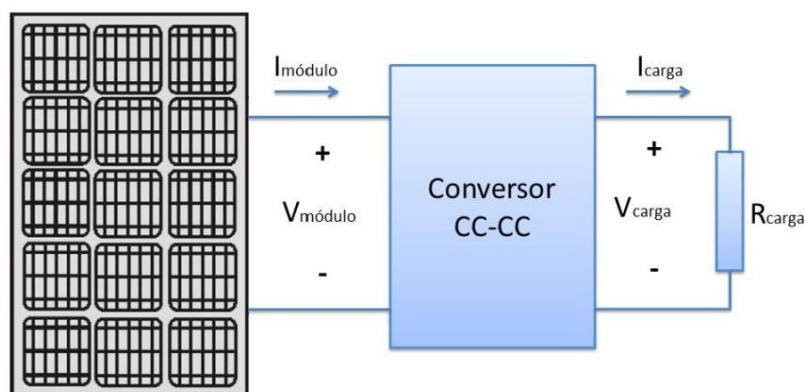


Figura 3.38 – Módulo fotovoltaico conectado à carga por meio de um conversor CC/CC.

Fonte: ROQUE, 2014.

Utilizando o conversor CC/CC elevador boost tem-se que:

$$V_{carga} = \frac{V_{módulo}}{1 - d} \quad (3.46)$$

$$I_{carga} = (1 - d)I_{módulo} \quad (3.47)$$

Substituindo as Equações (3.46) e (3.47) na equação (3.45), obtemos:

$$R_e(d, R_{carga}) = \frac{V_{módulo}}{I_{módulo}} = (1 - d)^2 R_{carga} \quad (3.48)$$

Onde $R_e(d, R_{carga})$ caracteriza a resistência de carga efetiva “vista” pelo painel fotovoltaico. Como a curva que representa a carga resistiva $R_e(d, R_{carga})$ é uma reta, o ângulo de inclinação pode ser representado por:

$$\theta_{Re}(d, R_{carga}) = \arctan\left(\frac{1}{(1 - d)^2 \cdot R_{carga}}\right) \quad (3.49)$$

Como os valores do ciclo de trabalho se restringem entre zero e um, ou seja, $0 < d < 1$, então os valores de $\theta_{Re}(d, R_{carga})$ também serão limitados por:

$$\arctan\left(\frac{1}{R_{carga}}\right) < \theta_{Re} < 90^\circ \quad (3.50)$$

Pode-se verificar de forma gráfica esta condição na Figura 3.39. Dependendo da carga na saída, o conversor elevador pode desenvolver problemas para atingir o MPP em valores reduzidos de radiação solar caso a resistência da carga seja baixa.



Figura 3.39 – Região de operação do conversor elevador em função de $\theta_{Re}(d, R_{carga})$.

Fonte: ROQUE, 2014.

Para se escolher a resistência R_{carga} devem-se levar em consideração as regiões de operação do conversor. Ao se definir um valor mais elevado para a resistência da carga, tem-se a garantia de que o conversor realize o rastreamento mesmo em baixo nível de radiação (ROQUE, 2014).

4 MÉTODOS E MATERIAIS

Neste capítulo iremos apresentar a metodologia utilizada para simulação de um sistema fotovoltaico operando com o algoritmo P&O para obter o rastreamento do ponto de máxima potência. O fluxograma a seguir apresenta as etapas fundamentais para a implementação do processo no software Matlab/Simulink.

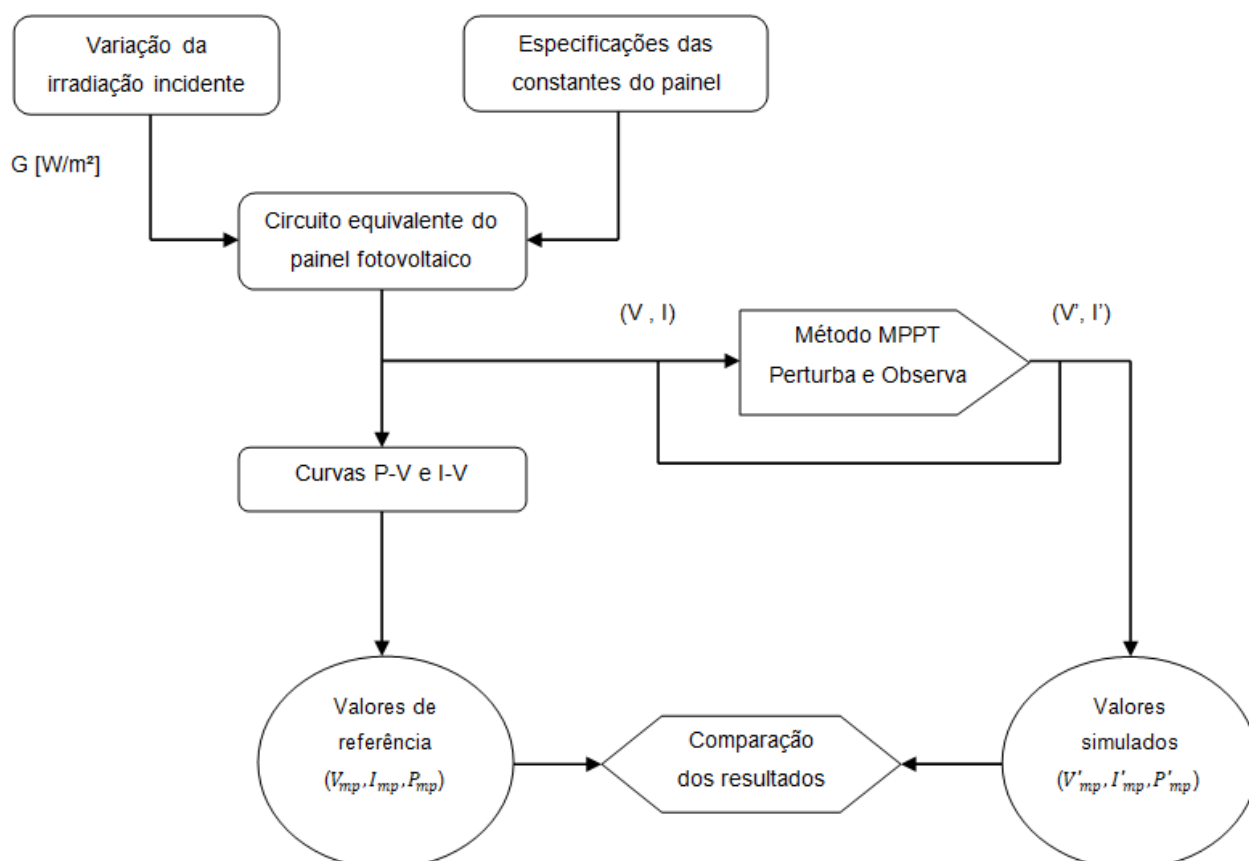


Figura 4.1 – Fluxograma para a metodologia MPPT.

Fonte: OS AUTORES.

Conforme a Figura 4.1, a primeira etapa do processo consiste em listar as especificações do painel solar fornecidas pelo fabricante e realizar teste com o painel em diversos níveis de irradiação incidente.

A irradiação é um parâmetro de entrada que irá variar a fim de gerar curvas características para diferentes níveis de irradiância.

Na segunda etapa ocorre a modelagem do circuito equivalente, onde são utilizadas as fórmulas citadas no item 3.5 deste trabalho. Os valores da corrente e

tensão de saída da célula são utilizados para gerar as curvas P-V e I-V características do painel e também são entradas para o algoritmo que apresenta a função de manter o sistema operando sempre no MPP.

Desta forma, os valores de V_{mp} , I_{mp} e P_{mp} encontrados em cada curva característica são utilizados como referência em caso de variação da irradiância. De modo conjunto, o algoritmo recebe os valores de potência e tensão do circuito e através de seu sistema de controle, atua no sentido para buscar o ponto de máxima potência, obtendo os valores V'_{mp} , I'_{mp} e P'_{mp} .

A eficácia do método *P&O* pode ser verificada comparando os resultados gerados pelo algoritmo com os valores de referência armazenados.

4.1 Modelagem do circuito equivalente do painel fotovoltaico

Para a simulação do sistema fotovoltaico foi utilizado a célula solar do Matlab/simulink (Solar Cell). O bloco que representa a célula solar tem como circuito equivalente uma fonte de corrente, relativa a corrente produzida pela radiação solar incidente, dois diodos, uma resistência em paralelo e uma resistência em série, conforme a Figura 4.2. Este modelo equivalente da célula solar é considerado o mais completo.

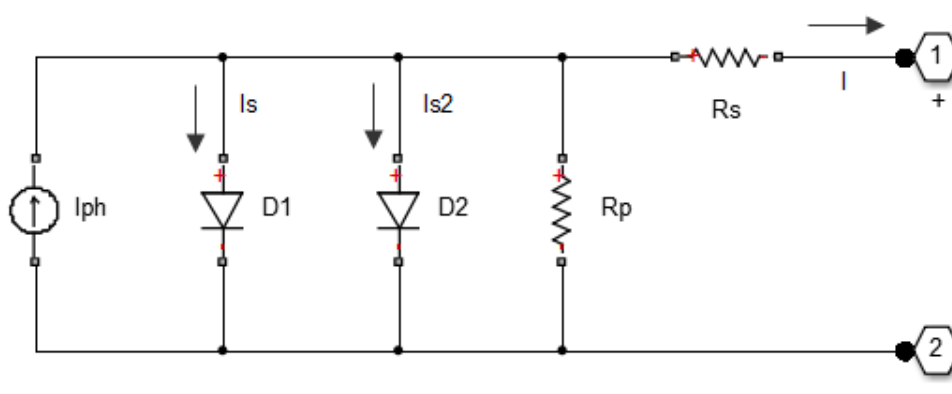


Figura 4.2 – Circuito equivalente do bloco da célula solar.

Fonte: MATLAB/SIMULINK.

As fórmulas estão especificadas no programa de ajuda do próprio Matlab/Simulink, juntamente com muitas outras informações sobre o bloco. Assim, os parâmetros utilizados na construção do circuito foram retirados do datasheet do

módulo CS6P-265W (Anexo) fornecido pela Canadian Solar. A Tabela 4.1 ilustra os parâmetros utilizados no Simulink.

Parâmetros da célula	Valor
Constante de Boltzmann	$1.38 \times 10^{23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Carga do elétron	$1.6 \times 10^{19} \text{ C}$
Gap Band do Silício	1.12 eV
Corrente de curto circuito (STC)	9.23 A
Tensão de circuito aberto (STC)	37.7 V
Tensão de Máxima Potência (STC)	30.6 V
Corrente de Máxima Potência (STC)	8.66 A
Corrente de curto circuito (NOCT)	7.48 A
Tensão de circuito aberto (NOCT)	34.7 V
Tensão de Máxima Potência (NOCT)	27.9 V
Corrente de Máxima Potência (NOCT)	6.88 A
Temperatura de Referência	298 K
Temperatura de Operação (NOCT)	293 K
Fator de idealidade da célula	1.2
Número de células em série	60
Número de células em paralelo	1
Resistência Shunt (R_{sh})	Inf Ω
Resistência Série (R_s)	0 Ω

Tabela 4.1 – Especificações da célula solar.

Fonte: OS AUTORES.

Desta forma, foram utilizados os parâmetros de operação em STC (Standard Test Conditions) e NOCT (Nominal Operating Conditions Test) fornecidos pelo fabricante do módulo para simular as curvas características e estabelecer uma comparação com o ponto de máxima potência encontrado em cada um dos casos.

A partir das especificações fornecidas pelo fabricante, foi possível modelar o bloco solar cell no Simulink para os parâmetros desejados. A Figura 4.3 ilustra as características da célula, sendo a irradiação de referência 1000 W/m².

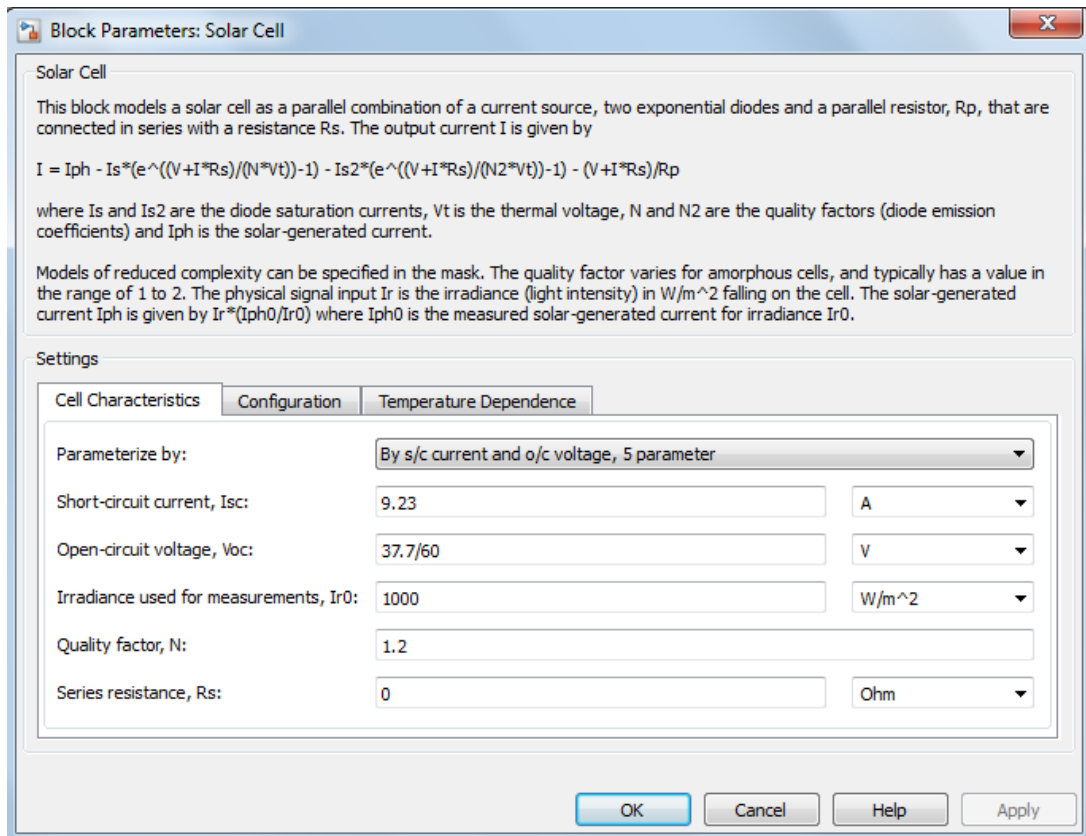


Figura 4.3 – Ajuste para as características da célula.

Fonte: MATLAB/SIMULINK.

Como visto no capítulo anterior, além da irradiação, a temperatura também influencia a curva característica do painel fotovoltaico, logo, no simulador do Simulink é possível ajustar a temperatura de operação da célula (Figura 4.4).

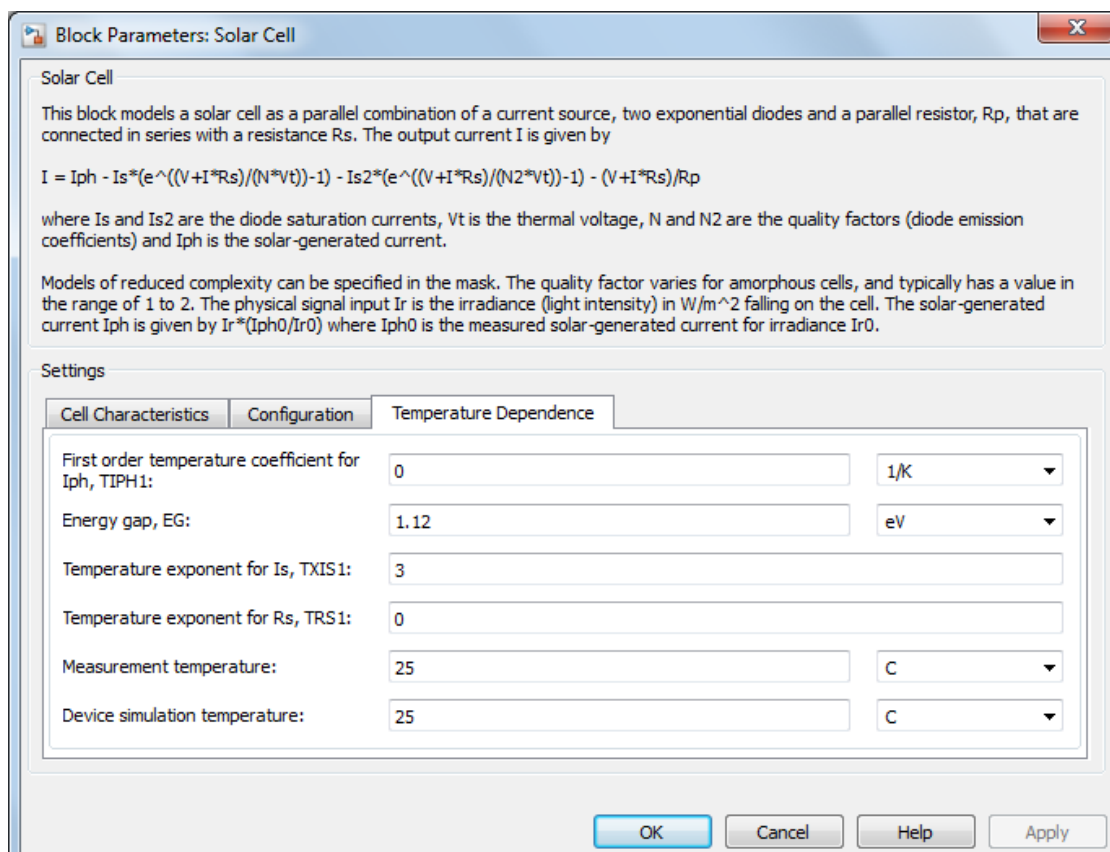


Figura 4.4 – Parâmetros de dependência da temperatura.

Fonte: MATLAB/SIMULINK.

Para a utilização do bloco e geração das curvas é necessário a construção de um circuito, conforme a Figura 4.5. A seguir será explicado cada bloco conectado ao bloco *solar cell* utilizado na modelagem do sistema.

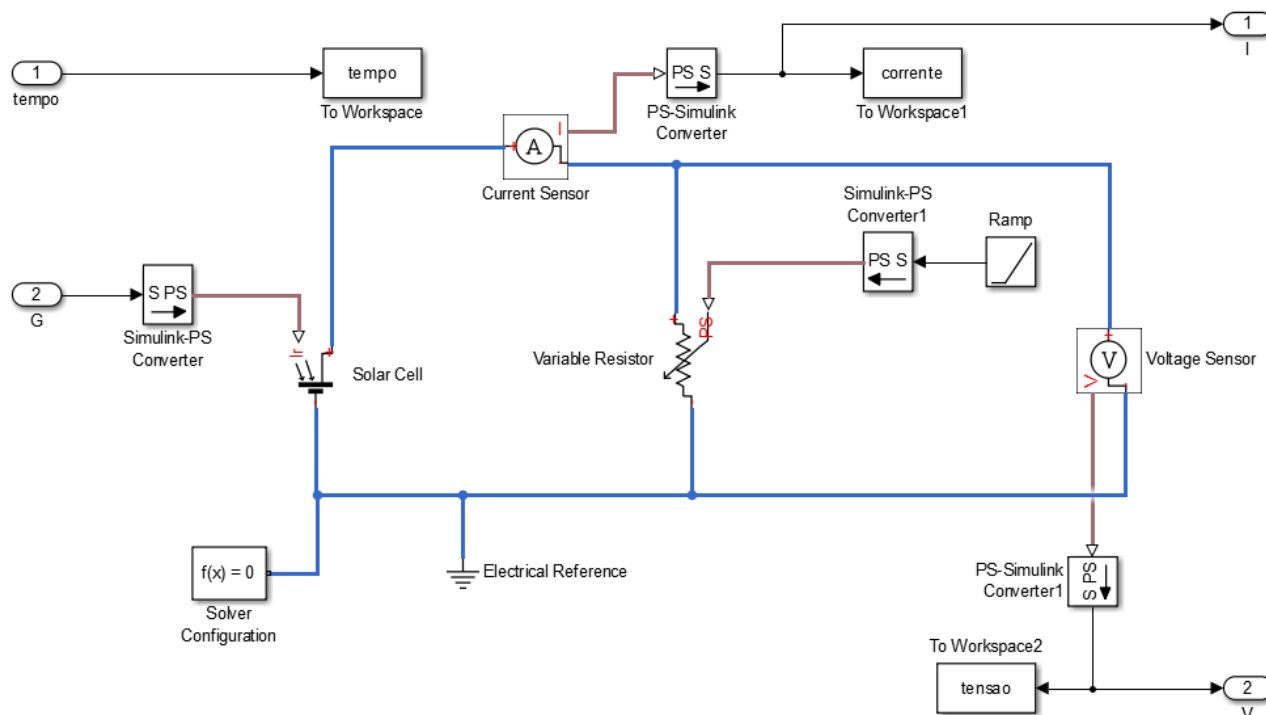


Figura 4.5 – Circuito de simulação da célula.

Fonte: OS AUTORES.

- To Workspace – Este bloco insere um sinal e grava os dados de sinal no espaço de trabalho do Matlab. Durante a simulação, o bloco grava dados em um buffer interno e quando a simulação é completada ou pausada, esses dados são gravados no espaço de trabalho.
- PS-Simulink Converter – Este bloco atua convertendo um sinal físico em um sinal de saída para o Simulink. Desta forma, este bloco foi usado para conectar saídas de um diagrama de rede física para escopos Simulink ou outros blocos.
- Simulink-PS Converter – Este bloco atua no sentido contrário do anterior, convertendo o sinal Simulink de entrada em um sinal físico.
- Solver Configuration - Cada rede física representada por um diagrama de bloco Simscape conectado requer informações de configurações do solucionador para simulação. O bloco Solve Configuration especifica os parâmetros do solucionador que o modelo precisa antes de iniciar a simulação.

- Electrical Reference – Este bloco representa um aterramento elétrico.
- Current Sensor – Este bloco representa um sensor de corrente ideal, ou seja, um dispositivo que converte a corrente medida em qualquer ramo elétrico em um sinal físico proporcional à corrente. Sendo um amperímetro, este bloco deve ser conectado em série com a célula solar.
- Voltage Sensor - Este bloco representa um sensor de tensão ideal, ou seja, um dispositivo que converte a tensão medida entre dois pontos de um circuito elétrico em um sinal físico proporcional à tensão. Sendo um voltímetro, este bloco deve ser conectado em paralelo com a célula.
- Variable Resistor – Este bloco modela um resistor variável linear, representando a carga conectada ao sistema.
- Ramp – Este bloco gera um sinal que começa em um tempo e valor especificados e muda por uma taxa especificada. Os parâmetros Slope, Start time e Initial output do bloco determinam as características do sinal de saída. Todos devem ter as mesmas dimensões após a expansão escalar.
- Clock – Este bloco produz o tempo de simulação atual em cada etapa da simulação. Está representado na Figura 4.6.

Depois de montado o circuito equivalente da célula solar, este foi colocado no bloco Célula Solar, sendo necessário adicionar as entradas de tempo e irradiação e os blocos para geração dos gráficos a partir das saídas de tensão e corrente do módulo (Figura 4.6).

Como estamos querendo a saída do painel, não da célula, foi colocado um ganho para a tensão representando o número de células presentes no painel, já que as células estão todas em série. Conseqüentemente a corrente não precisa desse ganho já que é a mesma para o sistema em série.

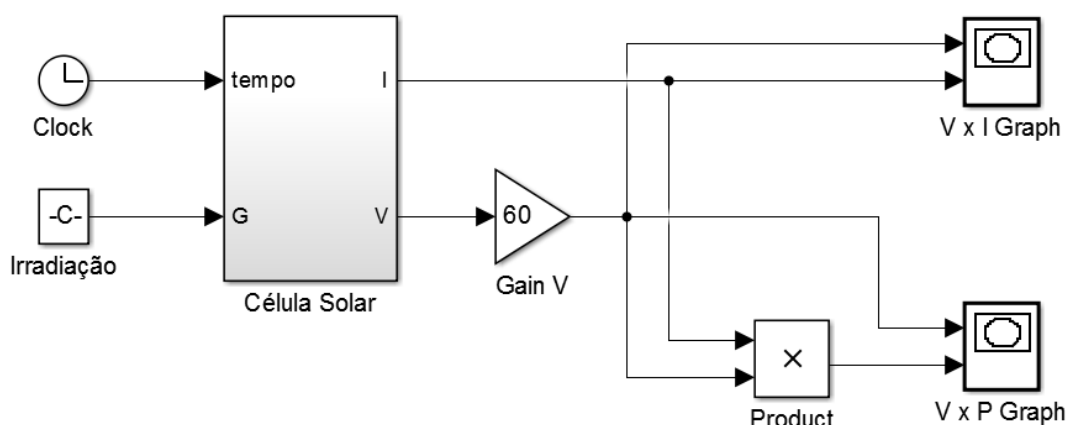


Figura 4.6 – Circuito de simulação das curvas características do módulo.

Fonte: OS AUTORES

4.2 Curvas reais de irradiância

Conforme visto anteriormente, o nível de irradiação incidente no painel fotovoltaico influencia diretamente a corrente gerada em cada célula solar. Desta forma, para verificar a ocorrência da variação da radiação incidente são apresentados valores reais de irradiâncias obtidas através da base de dados solarimétricos do Centro de Referências para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESEB/CEPEL, 2014) e do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA/INPE, 2016), referentes à cidade de Cachoeira Paulista.

Para efeito de comparação também foi colocado os dados da irradiação diária média mensal para a cidade de Natal.

A escolha de Cachoeira Paulista se deve ao fato desta apresentar uma estação meteorológica e estar localizada no Vale do Paraíba, apresentando índices de irradiação parecidos com a cidade de Volta Redonda. Por outro lado, Natal está localizado no Nordeste, região com os maiores índices de irradiação do Brasil. Desta forma, será possível estabelecer uma comparação entre essas regiões.

As informações de radiação do site da CRESEB são fornecidas em kWh/m².dia no plano horizontal, correspondendo a uma média diária mensal para todos os meses do ano conforme as Figuras 4.7 e 4.8.

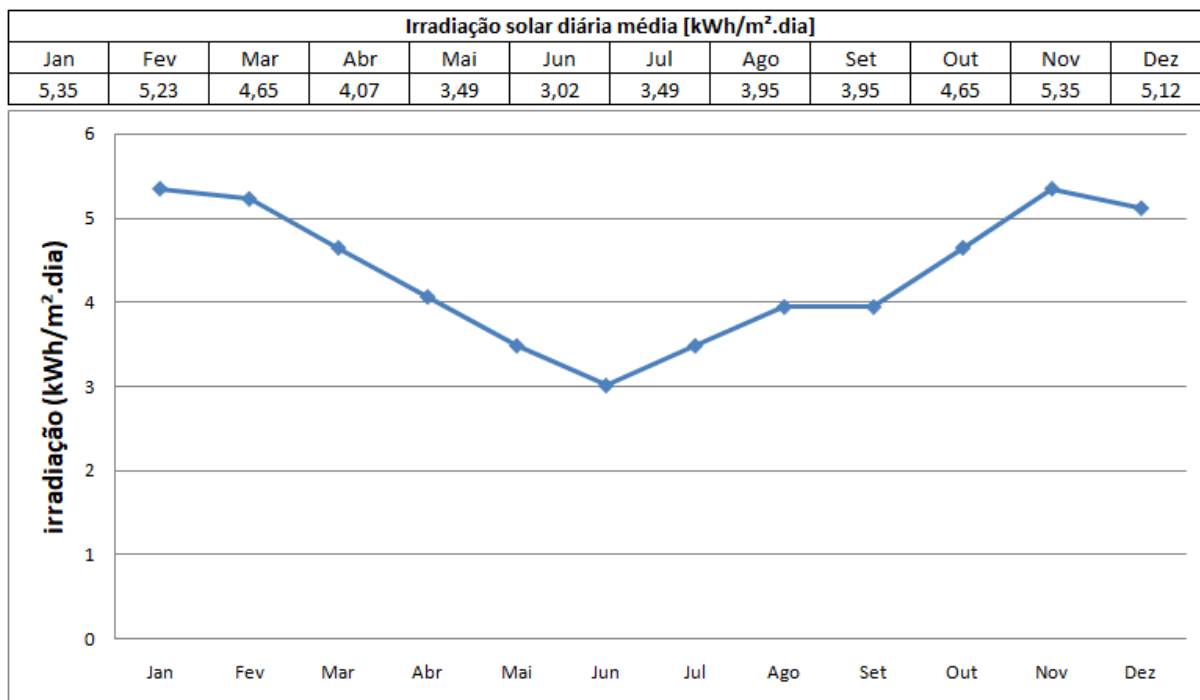


Figura 4.7 – Irradiação solar diária média para Cachoeira Paulista.

Fonte: OS AUTORES.

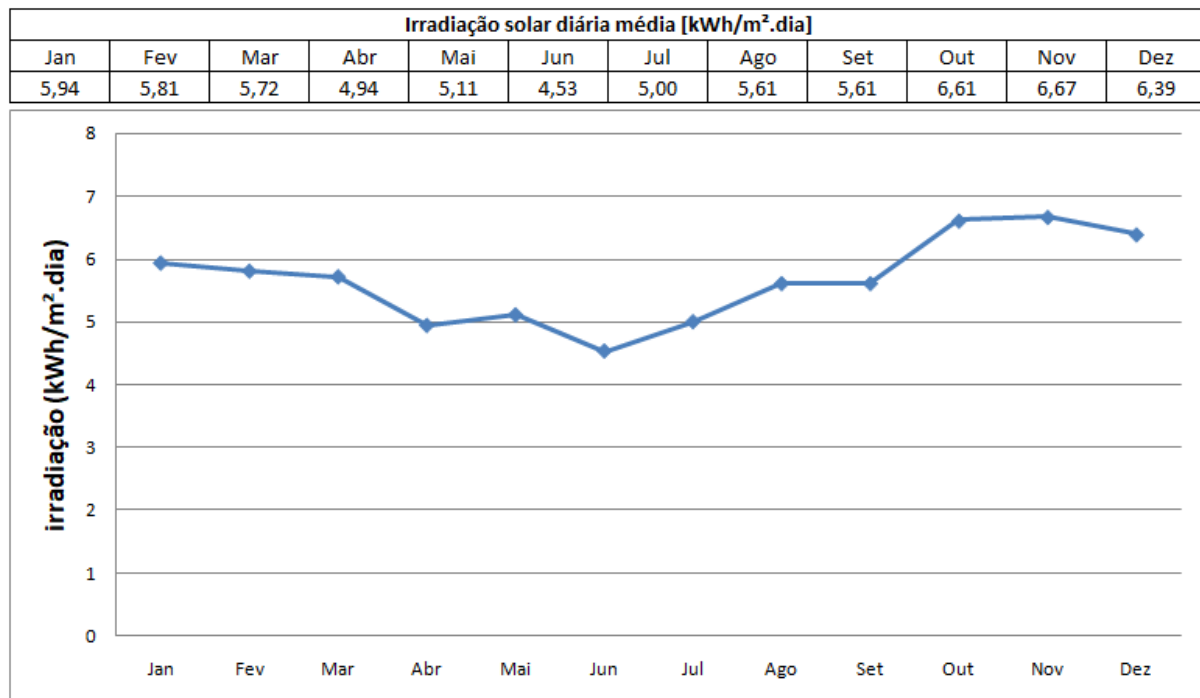


Figura 4.8 – Irradiação solar diária média para Natal.

Fonte: OS AUTORES.

Como se pode observar, a média diária de irradiação para a cidade de Natal é consideravelmente superior se comparada à cidade de Cachoeira Paulista, sendo que esta apresenta índices de irradiação com um grande potencial para geração a partir da energia solar. Desta forma, pode-se verificar que o Brasil apresenta uma grande capacidade para produção de energia fotovoltaica.

As informações do site do SONDA/INPE serão descritas no capítulo Resultados e Análises, onde serão geradas curvas a partir das mesmas.

4.3 Implementação do algoritmo Perturba e Observa

Conforme mostrado no capítulo anterior, o método P&O atua “perturbando” periodicamente a tensão de saída do painel, causando, conseqüentemente, uma variação positiva ou negativa na potência de saída. Desta forma, o novo valor da potência é comparado com o valor de referência anteriormente armazenado.

A seguir, conforme observado na Figura 4.9, serão explicadas as condições possíveis para o ajuste da tensão, visando alcançar o ponto de máxima potência.

1º caso: Se a variação da potência (ΔP) e da tensão (ΔV) forem menor que zero, o sistema deve atuar aumentando a tensão de referência, iniciando novamente a comparação.

2º caso: Se a variação da potência (ΔP) for menor que zero e a tensão (ΔV) for maior que zero, o sistema deve atuar diminuindo a tensão de referência, iniciando novamente a comparação.

3º caso: Se a variação da potência (ΔP) e da tensão (ΔV) forem maior que zero, o sistema deve atuar aumentando a tensão de referência, iniciando novamente a comparação.

4º caso: Se a variação da potência (ΔP) for maior que zero e a tensão (ΔV) for menor que zero, o sistema deve atuar diminuindo a tensão de referência, iniciando novamente a comparação.

5º caso: Se a variação de potência (ΔP) for igual a zero, a situação é satisfatória e o sistema vai iniciar os testes novamente.

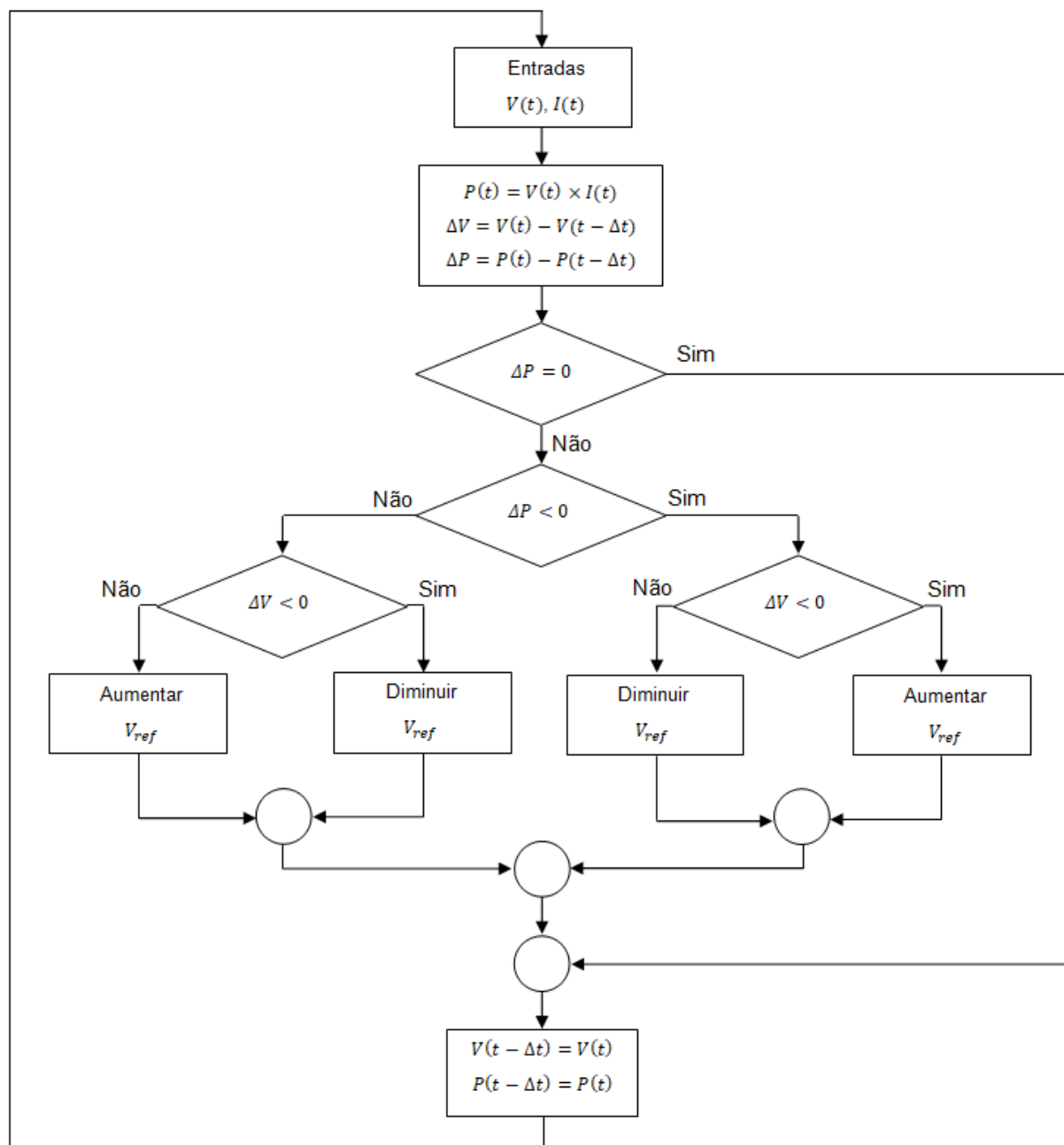


Figura 4.9 – Fluxograma do método P&O.

Fonte: Adaptada de CARVALHO, 2012.

O Algoritmo direciona as variações na busca do MPP, sendo os valores de entrada $P(V \times I)$ estabelecidos pelas equações do circuito equivalente. Quando o MPP é atingido, a tensão do painel varia constantemente em torno deste.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentadas as comparações entre o modelo simulado e o datasheet da placa fotovoltaica utilizada nos estudos, e os resultados obtidos através de diferentes condições meteorológicas através de dados reais, simulando-os no Matlab.

5.1 Curvas Típicas Geradas

Primeiramente, foram simuladas as curvas elétricas características para as condições de operação padrão de referência STC, considerando uma radiação incidente de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C e também na condição NOCT que considera uma irradiância de 800 W/m^2 e temperatura de operação de 20°C .

A partir das curvas geradas pelo Matlab/Simulink, foi possível determinar as coordenadas no ponto de máxima potência e o erro percentual entre os valores de P_{mp} , I_{mp} , V_{mp} disponibilizados no datasheet do fabricante (Anexo) e os valores encontrados no modelo simulado no Simulink.

As Figuras 5.1 e 5.2 geradas correspondem aos gráficos simulados para a condição STC.

A sigla STC (Standard Test Conditions) refere-se às condições padronizadas de teste do módulo, desta forma, é possível comparar os painéis de diversos fabricantes levando-se em consideração os mesmo critérios.

A Figura 5.1 mostra a curva $I \times V$ para uma irradiância de 1000 W/m^2 e uma temperatura de operação de 25°C . Como pode-se observar, a corrente de curto-circuito (I_{sc}) é a corrente que o módulo fornece quando seus terminais estão em curto-circuito, indicando a máxima corrente gerada quando o módulo recebe 1000 W/m^2 . Na condição STC, I_{sc} equivale a $9,23 \text{ A}$ e V_{oc} , a tensão de circuito aberto, equivale a $37,7 \text{ V}$.

A Figura 5.2 expressa a curva $P \times V$ para os mesmos parâmetros da Figura 5.1.

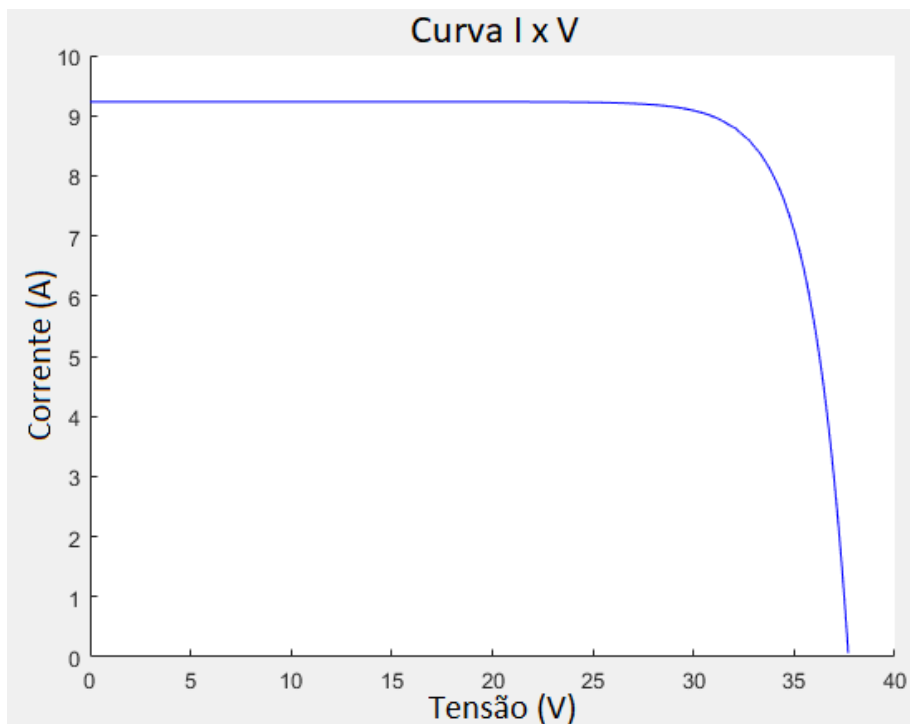


Figura 5.1 – Curva I x V para a radiação de 1000 W/m² em uma temperatura de 25°C.

Fonte: OS AUTORES.

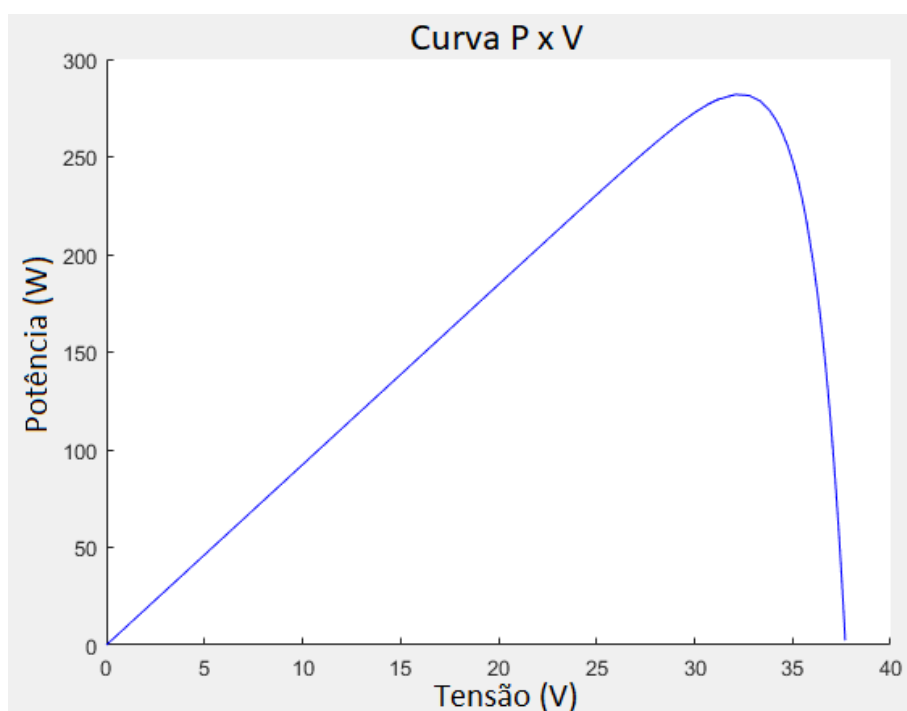


Figura 5.2 – Curva P x V para a radiação de 1000 W/m² em uma temperatura de 25°C.

Fonte: OS AUTORES.

A Tabela 5.1 contém os valores e os erros percentuais referentes à condição STC.

Parâmetros	Fabricante	Simulados	Erro Percentual
Tensão de Máxima Potência (STC)	30,50 V	32,08 V	5,18%
Corrente de Máxima Potência (STC)	8,66 A	8,79 A	1,50%
Máxima Potência (STC)	265,00 W	281,90 W	6,38%

Tabela 5.1 – Comparação dos valores simulados com os parâmetros do fabricante (STC).

Fonte: OS AUTORES.

As Figuras 5.3 e 5.4 correspondem aos gráficos simulados para a condição NOCT.

As características elétricas na condição NOCT (Nominal Operating Conditions Test) representam os parâmetros de operação em condições mais próximas do funcionamento real do módulo.

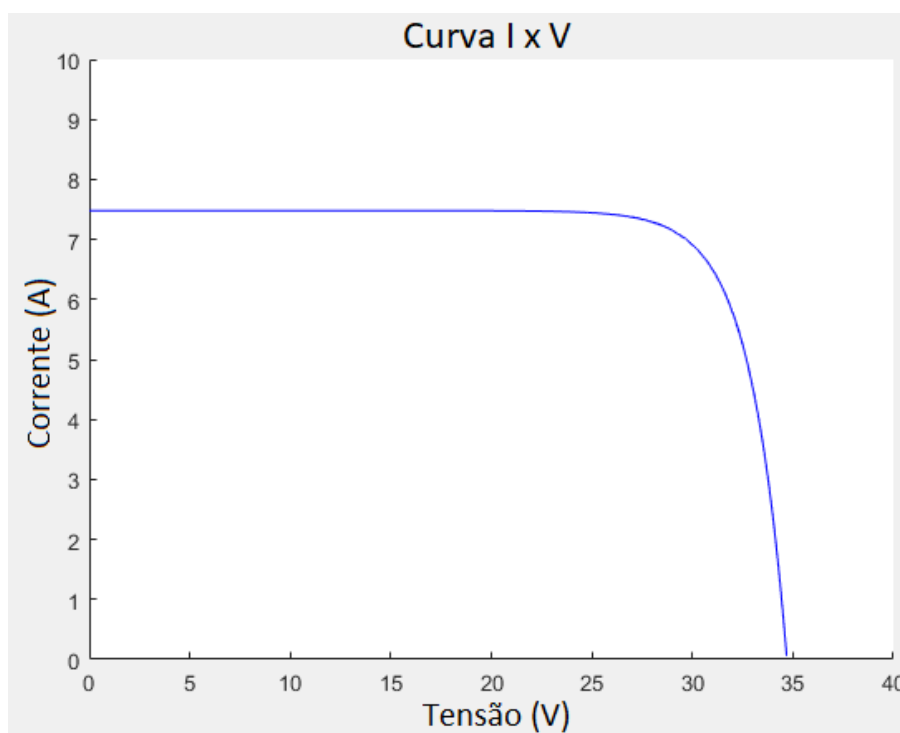


Figura 5.3 – Curva I x V para a radiação de 800 W/m² em uma temperatura de 20°C.

Fonte: OS AUTORES.

A Figura 5.3 mostra a curva característica I x V para uma irradiação de 800 W/m² e uma temperatura ambiente de 20°C. Desta forma, pode-se observar que a corrente I_{sc} da Figura 5.3 é menor se comparada com a corrente de curto-circuito da Figura 5.1, fato decorrente de uma menor incidência de irradiação solar. Ou seja, quando maior o nível de radiação incidente, maior será a corrente máxima fornecida ao módulo.

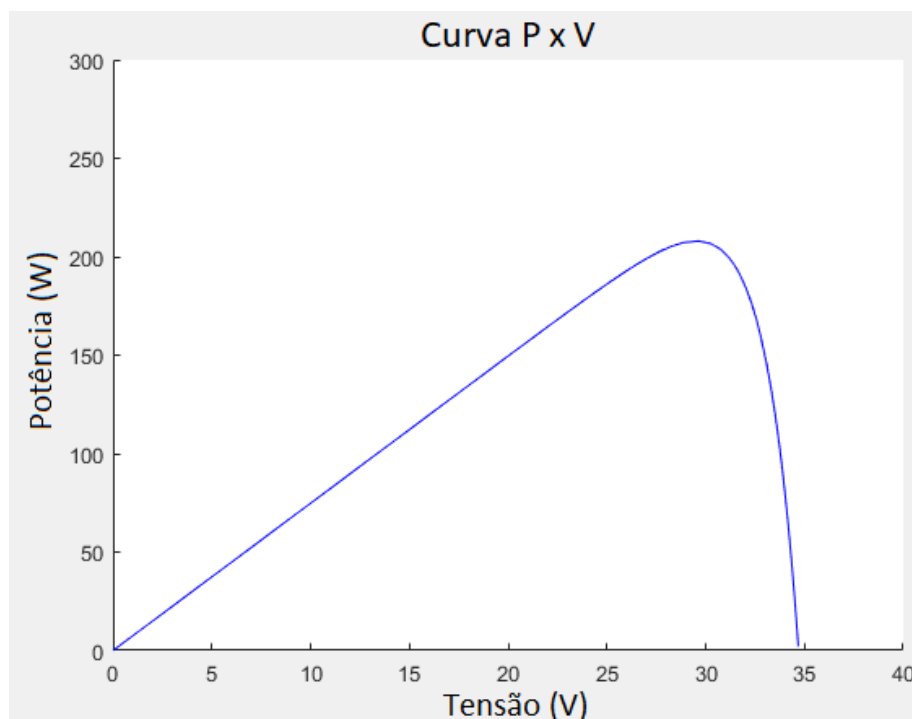


Figura 5.4 – Curva P x V para a radiação de 800 W/m² em uma temperatura de 20°C.

Fonte: OS AUTORES.

A Figura 5.4 corresponde a curva P x V gerada no Simulink utilizando os mesmos parâmetros na Figura 5.3. Como é possível observar, o ponto de máxima potência (P_{mp}) para a condição NOCT é menor se comparado com a Figura 5.2. Logo, a potência elétrica que o módulo pode fornecer depende diretamente da intensidade da radiação solar que incide sobre suas células fotovoltaicas.

A Tabela 5.2 contém os valores e os erros percentuais referentes à condição NOCT.

Parâmetros	Fabricante	Simulados	Erro Percentual
Tensão de Máxima Potência (NOCT)	27,90 V	29,67 V	6,34%
Corrente de Máxima Potência (NOCT)	6,88 A	7,01 A	1,89%
Máxima Potência (NOCT)	192,00 W	208,00 W	8,33%

Tabela 5.2 - Comparação dos valores simulados com os parâmetros do fabricante (NOCT).

Fonte: OS AUTORES.

Conforme pode-se observar nas Tabelas 5.1 e 5.2, os valores dos erros percentuais encontrados foram satisfatórios, confirmando que o modelo utilizado está coerente e dentro das expectativas. Os erros encontrados são decorrentes,

principalmente, dos valores utilizados para a resistência em paralelo (R_s) e a resistência shunt (R_{sh}). Conforme mostrado na Tabela 4.1, a resistência shunt tende ao infinito e a resistência em série tende a zero.

5.2 Variação da Irradiação e Temperatura

Conforme mencionado no capítulo anterior, para o estudo da variação da irradiação e da temperatura ao longo do dia e da interferência destas variáveis nas curvas elétricas características do módulo fotovoltaico, foram utilizados os dados do SONDA/INPE registrados a cada 15 minutos.

Este espaçamento de tempo não representa um intervalo muito apropriado para registrar todas as variações destas duas grandezas, principalmente para a irradiação, que como mencionado anteriormente, apresenta grandes oscilações ao longo do dia. Porém, para o estudo pretendido será o suficiente.

A Figura 5.5 ilustra a variação da radiação solar ao longo do mês Janeiro de 2015 referente à cidade de Cachoeira paulista.

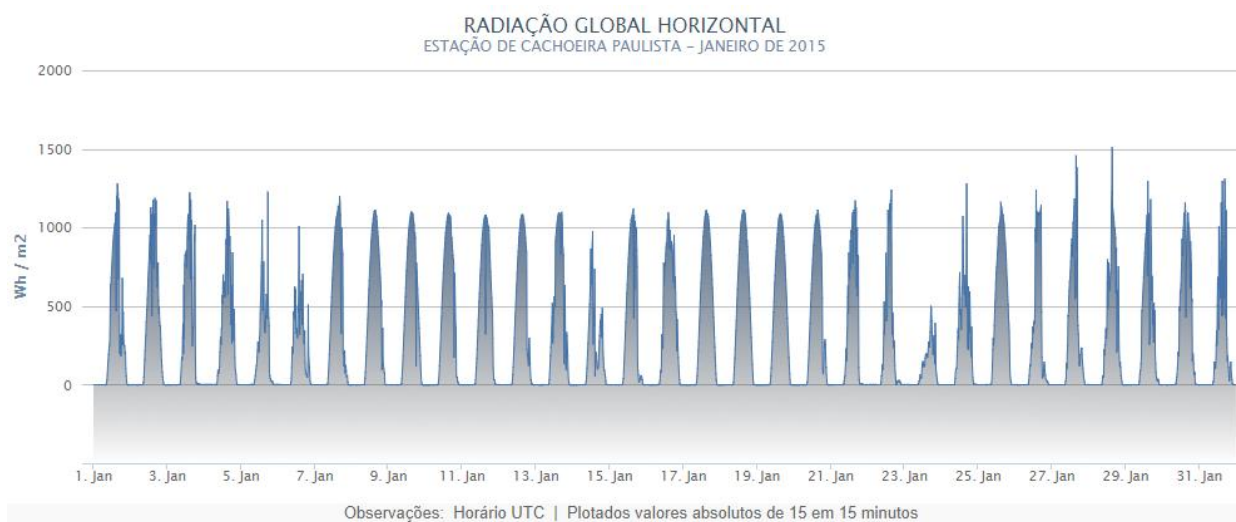


Figura 5.5 – Radiação global horizontal para a cidade de Cachoeira Paulista para o mês de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

A Figura 5.6 ilustra a variação da temperatura ao longo do mês de janeiro de 2015.

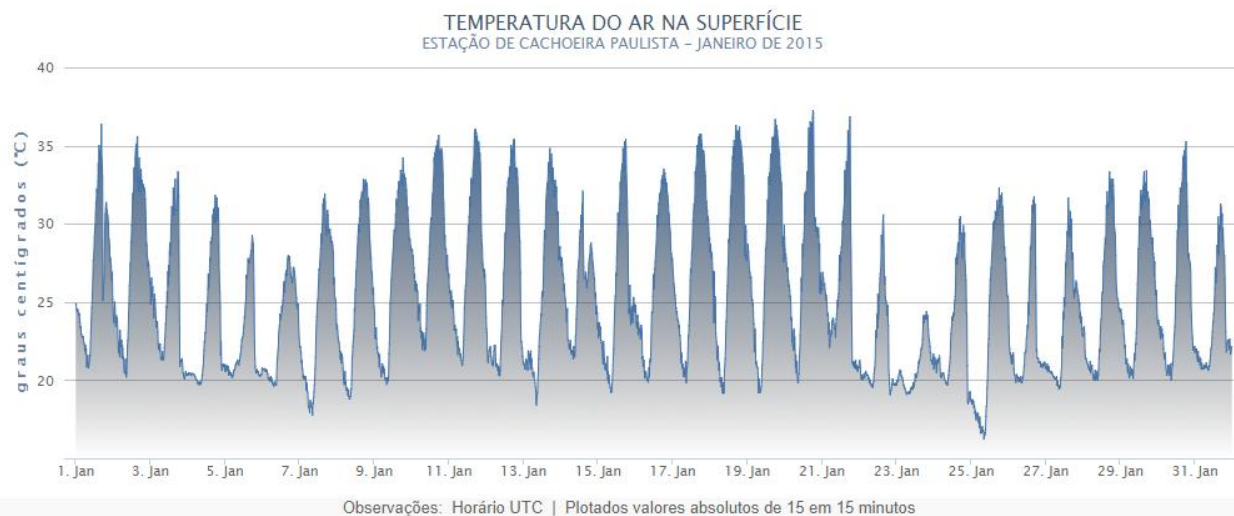


Figura 5.6 – Temperatura do ar na superfície para a cidade de Cachoeira Paulista para o mês de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

Buscando estabelecer uma comparação, foram escolhidos os dias com menor e maior incidência solar.

A Figura 5.7 ilustra o dia (23 de janeiro) com menor nível de incidência de radiação solar, sendo 500 W/m^2 o maior valor, referente ao horário de 17:15 horas.



Figura 5.7 – Radiação global horizontal para a cidade de Cachoeira Paulista para o dia 23 de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

A Figura 5.8 ilustra a variação da temperatura ao longo do dia 23 de Janeiro, sendo 24,4°C a temperatura medida no momento de maior incidência de irradiação.

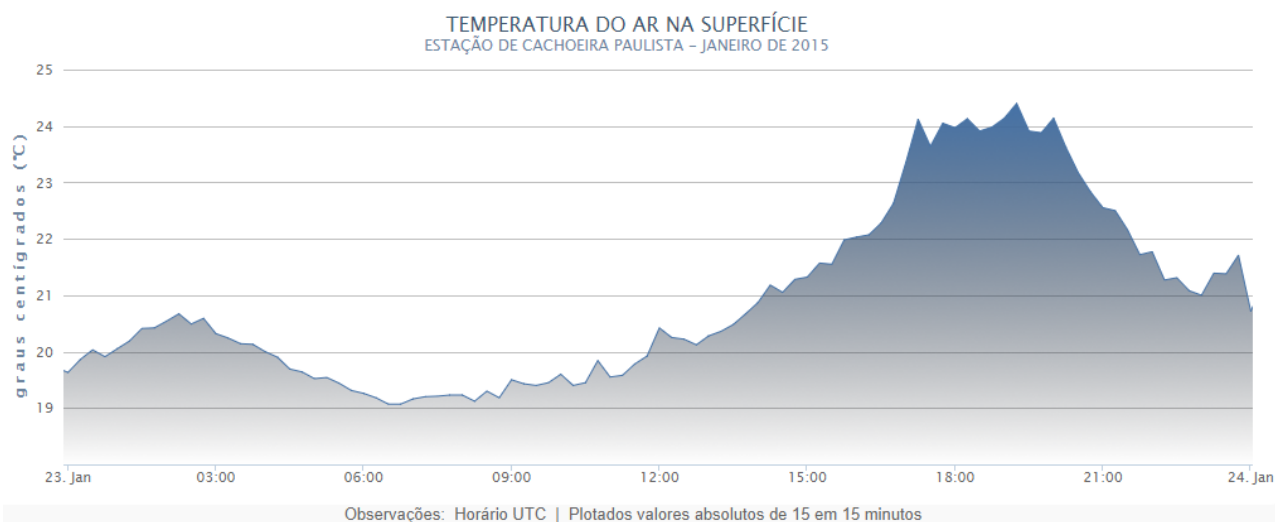


Figura 5.8 – Temperatura do ar na superfície para a cidade de Cachoeira Paulista para o dia 23 de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

A partir dos dados coletados, foi possível simular as curvas característica para a situação mencionada, conforme as Figuras 5.9 e 5.10. Os parâmetros utilizados para a simulação foram do padrão STC da Tabela 4.1.

Conforme se pode observar nas Figuras 5.9 e 5.10, para uma radiação de 500 W/m² e uma temperatura ambiente de operação de 24,4°C, houve uma diminuição significativa na corrente I_{sc} e, conseqüentemente, na máxima potência que pode ser fornecida a carga. Por outro lado, como a variação da temperatura pode ser considerada desprezível, não ocorreu uma variação significativa na tensão de curto aberto do módulo.

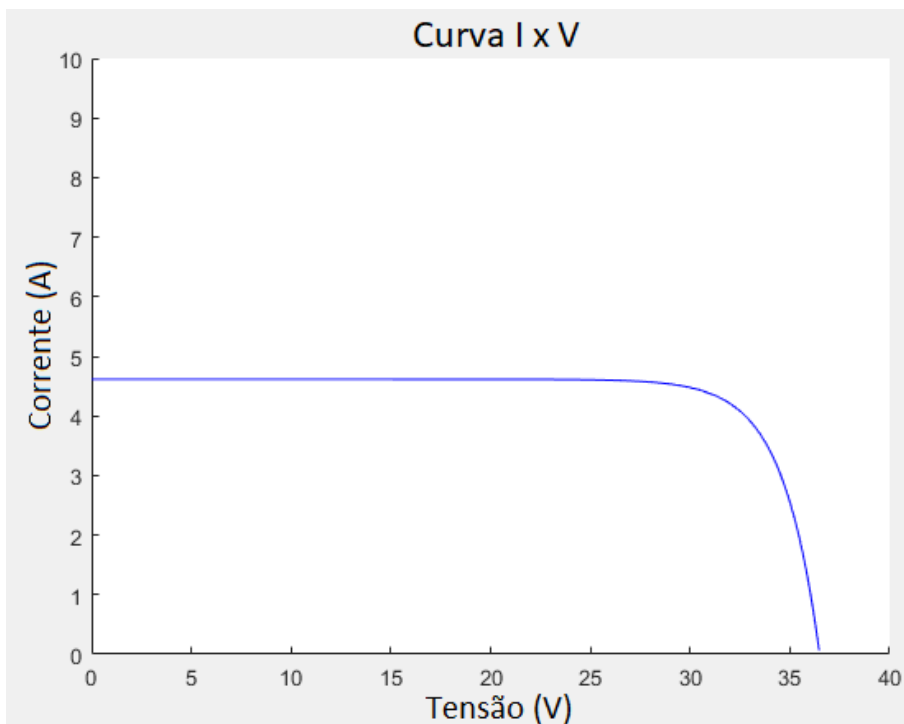


Figura 5.9 – Curva I x V para a radiação de 500 W/m^2 em uma temperatura de $24,4^\circ\text{C}$.
Fonte: OS AUTORES.

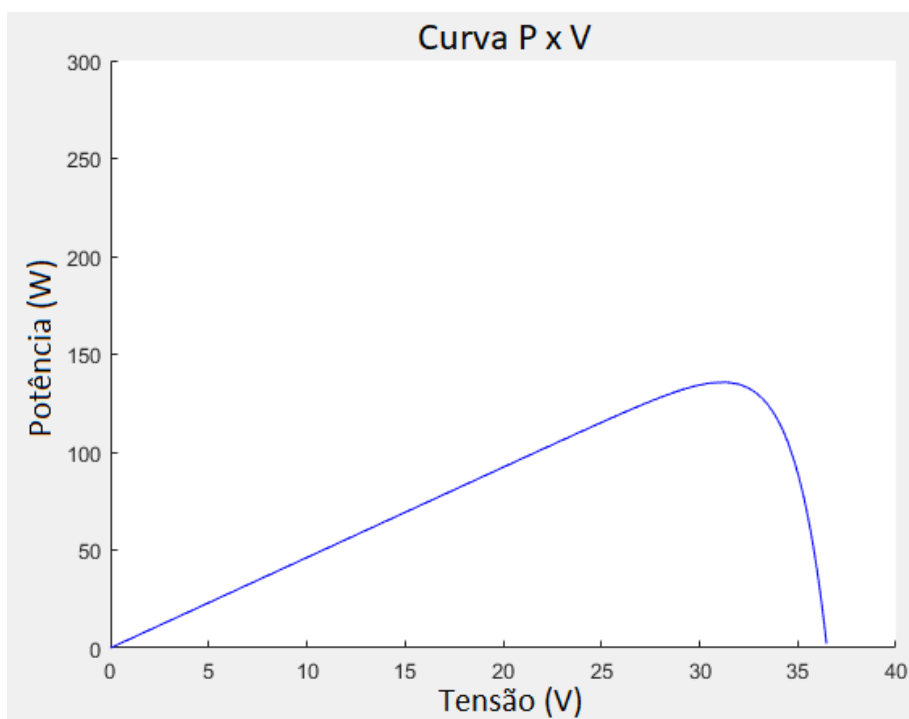


Figura 5.10 – Curva P x V para a radiação de 500 W/m^2 em uma temperatura de $24,4^\circ\text{C}$.
Fonte: OS AUTORES.

A partir das curvas geradas pelo Matlab/Simulink, foi possível determinar as coordenadas no ponto de máxima potência para os valores de P_{mp} , I_{mp} , V_{mp} simulados. Conforme pode-se visualizar na Tabela 5.3, o valor encontrado para a corrente é baixo se comparado com os valores de referência no STC, consequência da baixa irradiação incidente no módulo.

Parâmetros	Valores Simulados
Tensão de Máxima Potência	31,35 V
Corrente de Máxima Potência	4,33 A
Máxima Potência	135,70 W

Tabela 5.3 – Valores de MPP simulados para o horário de 17:15 do dia 23 de janeiro de 2015.

Fonte: OS AUTORES

A Figura 5.11 ilustra o dia (28 de janeiro) com maior nível de incidência de radiação, sendo 1507 W/m^2 o maior valor, referente ao horário de 15:15 horas.



Figura 5.11 – Radiação global horizontal para a cidade de Cachoeira Paulista para o dia 28 de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

A Figura 5.12 ilustra a variação da temperatura ao longo do dia 28 de Janeiro, sendo $30,6^{\circ}\text{C}$ a temperatura medida no momento de maior incidência de irradiação.

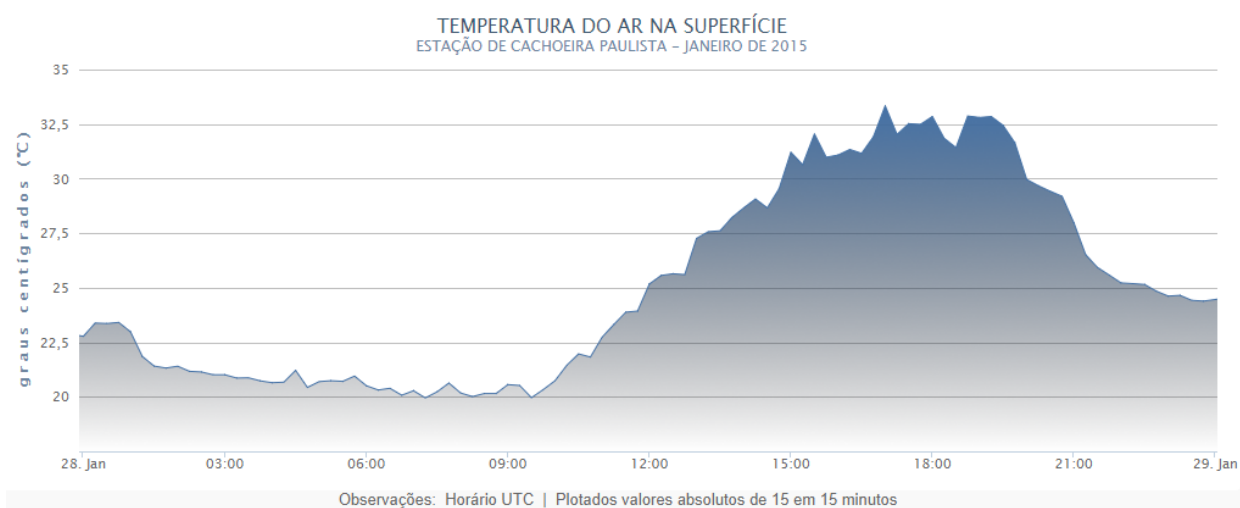


Figura 5.12 – Temperatura do ar na superfície para a cidade de Cachoeira Paulista para o dia 28 de janeiro de 2015.

Fonte: SONDA/INPE, 2016.

Utilizando os mesmo parâmetros das curvas anteriores, foram simuladas as curvas características para o maior índice de radiação do dia 28 de janeiro de 2015. As curvas geradas estão representadas nas Figuras 5.13 e 5.14.

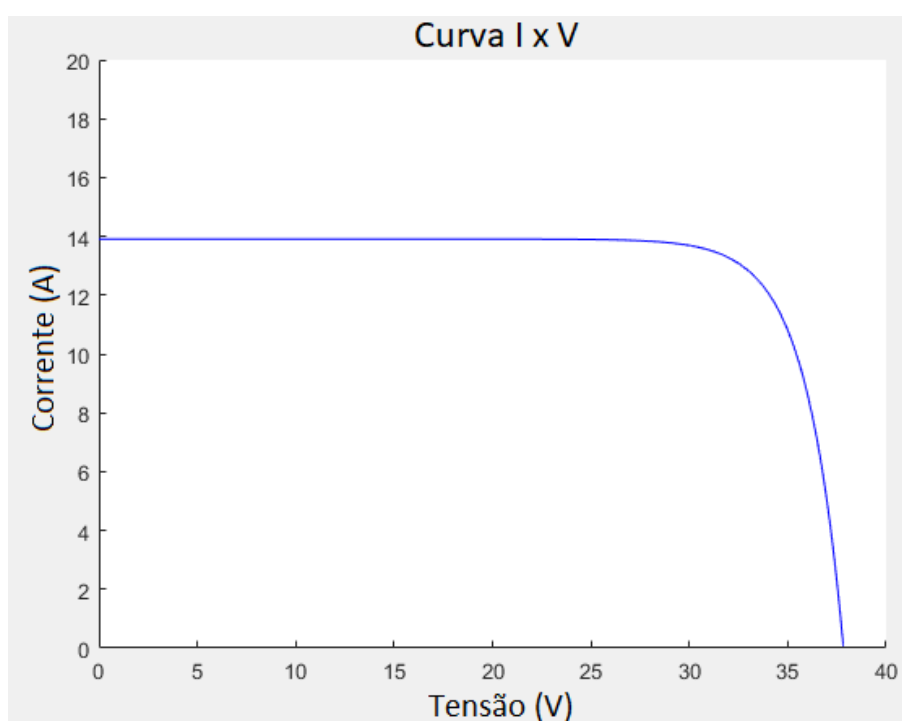


Figura 5.13 – Curva I x V para a irradiação de 1507 W/m^2 em uma temperatura de $30,6^\circ\text{C}$.

Fonte: OS AUTORES.

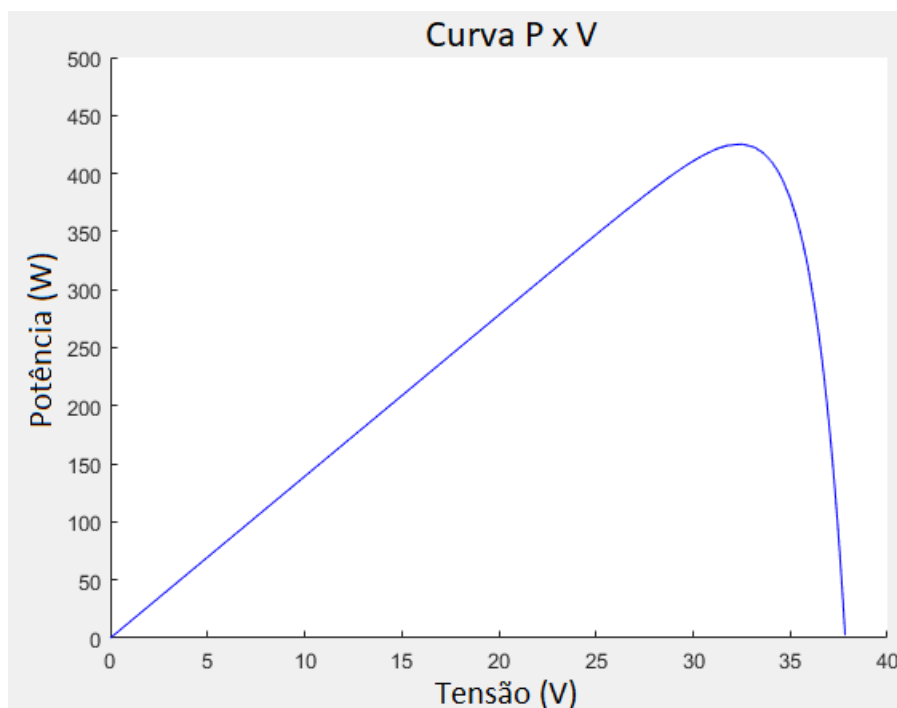


Figura 5.14 – Curva P x V para a irradiação de 1507 W/m² em uma temperatura de 30,6°C.

Fonte: OS AUTORES.

Através das curvas geradas, assim como no dia 23 de janeiro, foi possível determinar as coordenadas no ponto de máxima potência. A Tabela 5.4 contém os valores simulados para o dia 28 de janeiro. Como o valor para a radiação incidente é muito elevado, a corrente I_{mp} apresentou um valor também elevado, aumentando a potencia do sistema.

Parâmetros	Valores Simulados
Tensão de Máxima Potência	32,53 V
Corrente de Máxima Potência	13,08 A
Máxima Potência	425,30 W

Tabela 5.4 – Valores de MPP simulados para o horário de 15:15 do dia 28 de janeiro de 2015.

Fonte: OS AUTORES

As curvas geradas acima representam um cenário específico para cada nível de irradiância. Ao longo do dia diversas curvas podem ser traçadas, sendo a radiação e a temperatura os parâmetros variantes.

Nas situações simuladas foi possível observar que a variação da temperatura em pouco afetou a tensão elétrica, visto que a temperatura mais elevada foi de

30,6°C. Por outro lado, a variação da irradiância foi significativa e afetou diretamente a corrente e, conseqüentemente, a potência.

6 CONCLUSÕES

A partir da proposta de modelar e simular o circuito equivalente para o módulo fotovoltaico utilizando o Simulink foi possível verificar e comprovar a conformidade com a literatura a respeito do comportamento da célula solar diante da variação dos parâmetros de irradiância, temperatura e resistências série e shunt. Logo, ficou clara a relação de dependência entre a radiação incidente com a corrente elétrica e a temperatura com a tensão.

A compreensão dos principais algoritmos possibilitou uma visão geral de como ocorre o rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos. No algoritmo P&O o MPP é calculado em tempo real, reagindo instantaneamente as alterações nas condições de operação do painel.

Este trabalho propôs uma metodologia para a implementação do Algoritmo P&O, sendo necessária a continuidade deste estudo.

Através da comparação da simulação com os parâmetros fornecidos pelo fabricante do módulo Canadian Solar gerou-se erros percentuais satisfatórios, visto a utilização de resistências ideais.

Nas curvas características geradas a partir dos dados do SONDA/INPE foi possível observar o comportamento do painel sob diferentes níveis de temperatura e irradiância. Ficando claro o quanto é significativo as condições meteorológicas favoráveis.

Desta forma, conclui-se que o Brasil possui condições ideais para produção de energia através da tecnologia fotovoltaica, sendo muito importante o incentivo para estudo e o desenvolvimento nesta área. Países como a Alemanha apresentam índices de irradiação muito inferiores ao do Brasil e geram grande quantidade de energia a partir de sistemas fotovoltaicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Marcos Gutierrez. **Mini-inversores para aproveitamento de energia fotovoltaica, com técnicas de mppt, sincronismo e conexão com a rede de ca em bt, proteção de ilha, gerenciamento da energia e da operação.** 170 p. Tese (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, 2013

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2.ed. São José dos Campos : INPE, 2017. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf> Acesso em: 20 de Setembro de 2017.

BEM - Balanço Energético Nacional. **Ministério de Minas e Energia. Relatório Síntese, ano base 2016.** Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf> Acesso em: 10 de Maio de 2017.

BOYLESTAD, Robert L; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.** 8ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

CAMARGO, Suzana. **O domingo em que 95% da energia da Alemanha veio de fontes renováveis.** Conexão Planeta. 16 maio 2016.

CARVALHO, Edson de Paula. **Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos.** Taubaté: Universidade de Taubaté, 2012. 133 p. Tese (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012.

CRESESB – Centro de Referências para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Energia Solar – Princípios e Aplicações.** Disponível em: <http://cresesb.cepel.br>. Acesso em 01 de Junho 2017.

CUSTOM GREEN. Disponível em: < <http://www.customgreen.com.au/is-off-grid-off-limits/>> Acesso em: 15 de Outubro de 2017.

GASPARIN, Fabiano Perin. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2009. 58f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Programa de pós Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – DET – CRESESB, 2008.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia solar no Brasil: Situação e Perspectivas**. Estudo Técnico. Consultoria Legislativa, 2017.

OLIVEIRA, Fernando Marcos. **Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas**. 99 p. Tese (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal doParaná, 2015.

PALZ, Wolfgang. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. Hermus Livraria, Distribuidora e Editora S.A.

PORTAL SOLAR. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/a-melhor-direcao-do-painel-solar-fotovoltaico.html>> Acesso em: 20 de Maio de 2017.

ROQUE, Acássio Matheus. **Utilização de algoritimos de rastreamento de pontos de máxima potência em sistemas fotovoltaicos**. Universidade de São Paulo, 2014.

SONAI, Gabriela G. **CÉLULAS SOLARES SENSIBILIZADAS POR CORANTES NATURAIS: UM EXPERIMENTO INTRODUTÓRIO SOBRE ENERGIA RENOVÁVEL PARA ALUNOS DE GRADUAÇÃO**. Quím. Nova. 2015, vol.38, n.10, pp.1357-1365. ISSN 0100-4042.

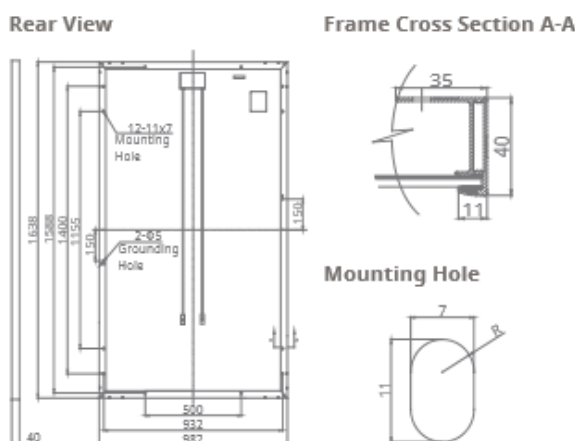
SONDA/INPE. **Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais**. Base de dados solarimétricos. 2015. Disponível em: <http://www.sonda.ccst.inpe.br> Acesso em: 5 de Outubro de 2017.

SOUSA, Yan Rodrigues de. **Estudo do rastreamento do ponto de máxima potência – MPPT – Em sistemas de geração fotovoltaica**. Brasília: Universidade de Brasília, 2016. 65 p. Dissertação (Graduação), curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

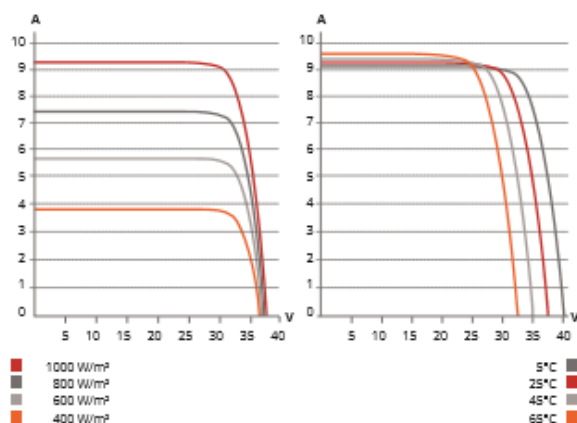
VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1ªed. São Paulo: ÉricaLtda, 2012.

ANEXO – Datasheet do módulo Canadian Solar

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6P-265P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA / STC*

CS6P	260P	265P	270P
Nominal Max. Power (Pmax)	260 W	265 W	270 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	30.4 V	30.6 V	30.8 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.56 A	8.66 A	8.75 A
Open Circuit Voltage (Voc)	37.5 V	37.7 V	37.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.12 A	9.23 A	9.32 A
Module Efficiency	16.16 %	16.47 %	16.79 %
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C		
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)		
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC61730)		
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 / NOCT*

CS6P	260P	265P	270P
Nominal Max. Power (Pmax)	189 W	192 W	196 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	27.7 V	27.9 V	28.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	6.80 A	6.88 A	6.97 A
Open Circuit Voltage (Voc)	34.5 V	34.7 V	34.8 V
Short Circuit Current (Isc)	7.39 A	7.48 A	7.55 A

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

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Industry leading performance at low irradiance, average relative efficiency of 96.5 % from an irradiance of 1000 W/m² to 200 W/m² (AM 1.5, 25°C).

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6×10)
Dimensions	1638×982×40 mm (64.5×38.7×1.57 in)
Weight	18 kg (39.7 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm ² (IEC) or 4 mm ² & 12AWG 1000 V (UL), 1000 mm (39.4 in) (650 mm (25.6 in) is optional)
Connectors	Friends PV2a (IEC), Friends PV2b (IEC / UL)
Standard	26 pieces, 515 kg (1135.4 lbs)
Packaging	(quantity & weight per pallet)
Module Pieces per Container	728 pieces (40' HQ)

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.053 % / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2 °C

PARTNER SECTION

