



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

Christielly Fernandes da Costa

**Estudo de um sistema fotovoltaico isolado com
aplicação do método de rastreamento de máxima
potência Perturba e Observa**

Uberlândia
2017

Christielly Fernandes da Costa

**Estudo de um sistema fotovoltaico isolado com
aplicação do método de rastreamento de máxima
potência Perturba e Observa**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso do Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Caixeta
Guimarães

Profº Geraldo Caixeta Guimarães

Profº Adélio José de Moraes

Me. Leonardo Rosenthal Caetano Silva

Uberlândia
2017

Dedico este trabalho à minha mãe,
Nilva Ribeiro Fernandes, a primeira
professora que conheci.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, aos meus irmãos e ao meu pai, Lindolfo Alves da Costa, por estarem sempre perto, mesmo à distância. Por acreditarem em mim, por estarem ao meu lado e por me apoiarem em todos os momentos. Essa conquista também é de vocês.

Ao meu orientador, Prof. Geraldo Caixeta Guimarães, pela oportunidade de orientação e pelo aprendizado durante sua tutoria no Programa de Educação Tutorial. Esse programa teve grande impacto na minha vida pessoal e acadêmica. Ao Mestre Leonardo Rosenthal, pela paciência e pelo auxílio.

Aos professores e toda equipe da Faculdade de Engenharia Elétrica, por todo o conhecimento transmitido, pela dedicação e pelo excelente trabalho.

Aos meus colegas de turma e amigos, por compartilharem essa caminhada comigo, pela paciência, pelo crescimento emocional e profissional. Vocês tornaram essa jornada mais alegre e divertida.

E agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que este sonho se tornasse realidade.

Da Costa, C. F. **ESTUDO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PERTURBA E OBSERVA**. Projeto de Fim de Curso, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia (MG), 2017.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo simular um sistema fotovoltaico isolado com aplicação do método Perturba e Observa para rastreamento do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos e uso do conversor elevador de tensão tipo Boost, visando analisar a teoria desses componentes, como modelagem matemática com equações e gráficos característicos, e comparar com os resultados obtidos no ambiente Simulink do software MATLAB.

A importância desse tipo de estudo está no fato de que a busca por uso de fontes alternativas de energia tem crescido consideravelmente nos últimos anos, visto que países do mundo todo se preocupam com o meio ambiente e com a redução da utilização de combustíveis fósseis. Portanto, é necessário que haja discussões sobre as técnicas utilizadas no desenvolvimento destes sistemas de geração de energia e como trabalhar com a máxima eficiência dos equipamentos.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, máxima potência, conversor Boost, Perturba e Observa, Simulink.

Da Costa, C. F. **STUDY OF A PHOTOVOLTAIC ISOLATED SYSTEM WITH APPLICATION OF PERTURB AND OBSERVE AS MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD.** Course Completion Project, Electrical Engineering School, Federal University of Uberlandia, MG, Brazil, 2017.

ABSTRACT

This study aims to simulate na isolated photovoltaic system with application of Perturbe and Observe method for tracking the maximum power point of the photovoltaic modules and use of Boost voltage converter to analyze the theory of these componentes, such as mathematical modeling with equations and graphs, and compare to the results obtained in the MATLAB Simulink software. The importance of this type of study is the fact that the search for alternative energy sources has grown considerably in recente years, since countries around the world are concerned about the environment and with the reduction of use of fossil fuels. So it is necessary that discussions about the techniques used in the development of these energy generation systems are made.

Key-words: Photovoltaic system, maximum power, converter Boost, Perturbe and Observe, Simulink.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética brasileira	15
Figura 2: Exemplo de sistema fotovoltaico conectado à rede	17
Figura 3: Exemplo de sistema fotovoltaico isolado doméstico	18
Figura 4: Exemplo de sistema fotovoltaico isolado não doméstico para bombeamento solar.....	19
Figura 5: Espectro de Radiação Solar.....	23
Figura 6: Massa de Ar	24
Figura 7: Radiação solar direta e difusa	25
Figura 8: Insolação, em Wh/m^2	27
Figura 9: Distribuição de radiação média em Minas Gerais	27
Figura 10: Trajetória do movimento aparente do Sol para um observador no hemisfério Sul.....	28
Figura 11: Inclinação do eixo de rotação da Terra	29
Figura 12: Combinação dos movimentos de rotação e translação da Terra em torno do Sol	30
Figura 13: Movimento aparente do Sol durante o verão e o inverno	31
Figura 14: Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia	32
Figura 15: Rastreamento automático da posição do Sol.....	34
Figura 16: Célula fotovoltaica em detalhes	35
Figura 17: Material tipo P: dopagem de silício com Gálio	36
Figura 18: Material tipo N: dopagem de silício com Fósforo	37
Figura 19: Célula fotovoltaica de silício monocristalino	38
Figura 20: Célula fotovoltaica de silício policristalino	39
Figura 21: Célula fotovoltaica de filme fino.....	40
Figura 22: Curva $I \times V$ de um painel genérico	41
Figura 23: Curva $P \times V$ de um painel genérico	42
Figura 24: Característica de funcionamento de um painel genérico.....	42
Figura 25: Curvas $I-V$ para diferentes valores de radiação solar.....	44
Figura 26: Curvas $I-V$ para diferentes valores de temperatura.....	45
Figura 27: Modelo ideal de uma célula fotovoltaica.....	46
Figura 28: Modelo real de uma célula fotovoltaica	47
Figura 29: Curva característica de uma célula prática	48
Figura 30: Fluxograma da técnica P&O	51
Figura 31: Funcionamento de um conversor Boost.....	52
Figura 32: Gráficos $I-V$ e $P-V$ para diferentes valores de radiação solar a 25°C do catálogo do fabricante	56
Figura 33: Gráficos $I-V$ e $P-V$ para diferentes valores de radiação solar a 25°C do modelo do painel disponível no MATLAB.....	57
Figura 34: Arranjo fotovoltaico Simulink	59
Figura 35: Circuito conversor Boost Simulink.....	59
Figura 36: Circuito da lógica do P&O Simulink.....	60
Figura 37: Circuito do controlador PWM do conversor Boost Simulink	60
Figura 38: Tensão de entrada V_{in} do conversor Boost variação de irradiância	61
Figura 39: Tensão de saída V_{out} do conversor Boost variação de irradiância	61
Figura 40: Potência entregue ao conversor Boost variação de irradiância	62

Figura 41: Tensão de entrada V_{in} do conversor Boost variação de temperatura	63
Figura 42: Tensão de saída V_{out} do conversor Boost variação de temperatura	63
Figura 43: Potência entregue ao conversor Boost variação de temperatura....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Amperes
AM – Massa de Ar
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
C – Coulomb
CA – Corrente alternada
CC – Corrente contínua
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
GD – Geração Distribuída
GWh – Gigawatt-hora
Hz – Herz
IBGE – Instituto Brasileiro de Estatística
 $I_{\max}$ – Corrente de máxima potência
 I_{SC} – Corrente de circuito aberto
J - Joule
K – Kelvin
 kW/m^2 – Quilowatt por metro quadrado
m - metros
m/s – metros por segundo
MATLAB – Matrix Laboratory
MPP – Ponto de máxima potência
MPPT – Rastreamento do ponto de máxima potência
N – Negativo
nm - nanometro
P – Positivo
P&O – Perturba e Observa
PI – Proporcional integral
 $P_{\max}$ – Potência máxima
s - segundo
STC – Condições padrões de teste
V – Volt
 $V_{\max}$ – Tensão de máxima potência
 V_{OC} – Tensão de circuito aberto
W - Watt
 W/m^2 - Watt por metro quadrado
Wh – Watt-hora
 Wh/m^2 - Watt-hora por metro quadrado
 Ω - ohm

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 ENERGIA NO BRASIL	14
2.1 Histórico Econômico.....	14
2.2 Matriz Energética.....	15
2.3 Geração de Energia Fotovoltaica no Cenário Brasileiro.....	16
2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	16
2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Isolados	18
2.3.2.1 Luz para Todos	20
3 ESTUDO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	21
3.1 Módulo Fotovoltaico	21
3.1.1 Conceitos Básicos	21
3.1.2 Radiação Solar	21
3.1.2.1 Massa de Ar	23
3.1.2.2 Tipos de Radiação Solar.....	24
3.1.3 Energia Solar	26
3.1.3.1 Irradiância	26
3.1.3.2 Insolação.....	26
3.1.4 Orientação dos Módulos.....	28
3.1.4.1 Movimento da Terra	29
3.1.4.2 Ângulo de Incidência dos Raios Solares	31
3.1.4.3 Ângulo de Inclinação do Módulo Solar	32
3.1.5 Rastreamento Automático da Posição do Sol	33
3.2 Conversão de Energia Solar em Elétrica.....	34
3.2.1 Efeito Fotovoltaico	34
3.3 Tipos de Células Fotovoltaicas	38
3.3.1 Silício Monocristalino	38
3.3.2 Silício Policristalino	39
3.3.3 Filmes Finos	39
3.4 Características dos Módulos Fotovoltaicos	40
3.4.1 Curvas Características de Corrente, Tensão e Potência	40
3.4.2 Influência da Radiação Solar e da Temperatura.....	43
3.4.3 Célula Fotovoltaica Ideal	45

3.4.4 Célula Fotovoltaica Prática.....	46
3.5 Conversor de Energia CC-CC.....	49
3.5.1 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.....	49
3.5.2 Métodos para Aplicação de MPPT	50
3.5.3 Método Perturba e Observa.....	50
3.5.4 Conversor Boost CC-CC.....	52
3.5.4 Controle da Tensão de Entrada do Conversor	54
4 MODELAGEM COMPUTACIONAL	55
4.1 Sobre o Software MATLAB.....	55
4.2 Parâmetros de Simulação.....	55
4.2.1 Parâmetros Módulo Fotovoltaico.....	55
4.2.1.1 Arranjo dos Dispositivos Fotovoltaicos.....	57
4.2.2 Parâmetros Conversor Boost.....	58
4.3 Resultados	59
5 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Após anos de utilização e queima de combustíveis fósseis para geração de energia, a crescente preocupação com o meio ambiente devido ao uso destes, além da previsão de queda destas reservas, têm estimulado países de todo o mundo a buscarem fontes alternativas, limpas e renováveis.

Nesse contexto, juntamente com o avanço e pesquisas de novas tecnologias, começou-se, então, a diversificação de fontes de energia, tais como a partir do Sol, do vento, das marés, etc.

No Brasil, o uso da energia solar vem se tornando uma das principais escolhas na geração de energia, principalmente no âmbito residencial, pois houve um avanço nas negociações entre consumidores e distribuidoras de energia, além da publicação de resoluções e regulações para conectar o sistema de geração à rede elétrica.

Pensando nisso, estudos e análises dos dispositivos que compõem um sistema fotovoltaico são essenciais para garantir melhores dimensionamento e instalação de módulos fotovoltaicos, conversores e baterias, quando necessárias. Além disso, é necessário que os conversores tenham maior rendimento e extraiam a máxima potência possível desse sistema.

Neste trabalho, será realizado um estudo dos principais componentes de um sistema fotovoltaico isolado da rede elétrica e a validação do método de rastreamento de máxima potência chamado Perturba e Observa.

O capítulo 2 traz uma perspectiva de como está a geração de energia fotovoltaica no cenário brasileiro, tanto de sistemas isolados quanto de conectados, além de um projeto de aplicação do uso dessa geração criado pelo governo federal chamado Luz para Todos.

O capítulo 3 mostra um estudo teórico dos principais componentes de um sistema fotovoltaico, como os módulos solares, tipos de células fotovoltaicas e conversores de energia. São também explorados conceitos básicos de energia solar, como radiação solar, massa de ar, irradiância, insolação, orientação e ângulo de inclinação dos módulos, além do próprio método Perturba e Observa.

O capítulo 4 traz a modelagem computacional do sistema, os principais parâmetros e resultados da simulação no software MATLAB.

Por fim, o capítulo 5 traz as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho. Então, no capítulo 6, são apresentadas as referências utilizadas no texto.

2 ENERGIA NO BRASIL

A fim de entender o uso e a geração de energia fotovoltaica no Brasil, será mostrada a matriz energética brasileira, sua relação com a economia e como a geração fotovoltaica vem se destacando no cenário brasileiro.

2.1 Histórico Econômico

Sabe-se que o crescimento econômico de um país e seu consumo de energia elétrica estão diretamente relacionados. Com isso, torna-se necessário que se façam estudos tanto sobre o desenvolvimento econômico do país, como sobre sua geração e seu consumo de energia.

A EPE, Empresa de Pesquisa Energética, empresa pública instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, e do Decreto nº 5.184, de 16 de agosto de 2004, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético. Através dos trabalhos dessa empresa, é possível enxergar a evolução do consumo de energia do país ao longo dos anos. [1]

A década de 1970 é marcada por dois momentos de crise com o aumento no preço do petróleo. Desde então, formou-se um consenso global sobre a necessidade de geração de energia a partir de fontes diversificadas de energia. O Brasil, por exemplo, começou pesquisas que ajudaram a diminuir a dependência internacional, como a criação de usinas hidrelétricas e nucleares e as pesquisas iniciais dos combustíveis renováveis. O país se tornou, então, pioneiro na investigação e uso de combustíveis sustentáveis. [2]

Para o ano de 2017, já foi contabilizado um consumo de 233.221 GWh no primeiro semestre, um crescimento de 0,4% na comparação com o mesmo período de 2016. O principal setor que contribuiu para esse resultado foi o residencial. [3]

Esse aumento do consumo de energia no setor residencial reflete também o aumento da busca dos consumidores por geração própria de energia.

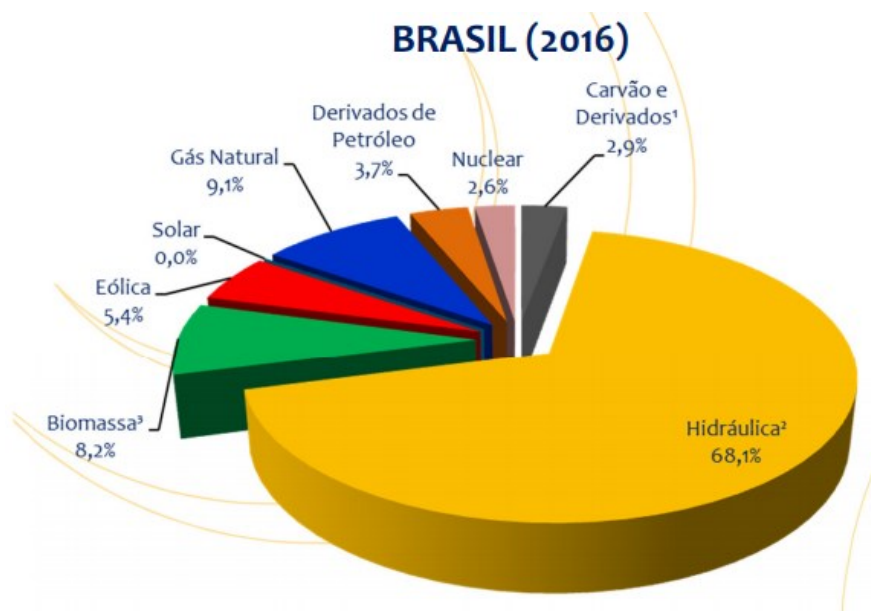
Desde 17 de abril de 2012, quando a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica com o uso de fontes renováveis ou cogeração qualificada, além disso, pode também fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localização. [4]

2.2 Matriz Energética

Matriz energética é um conjunto de fontes de energia ofertado em um país para captar, distribuir e utilizar energia nos setores comerciais, industriais e residenciais. A origem dessa energia pode ser de fontes renováveis ou não renováveis.

A matriz energética brasileira possui sua base na produção hidrelétrica, ou seja, é composta, em sua maioria, por fontes renováveis. [5] A figura 1 apresenta a matriz energética brasileira com ano base em 2016:

Figura 1: Matriz energética brasileira



Fonte: [1]

No setor elétrico brasileiro, o ano de 2016 é marcado pela entrada da fonte solar fotovoltaica no Balanço Energético Nacional, como mostra a figura anterior. [6]

Logo, é importante entender como se encontra a geração de energia fotovoltaica no cenário brasileiro e como esta vem ganhando espaço na matriz energética.

2.3 Geração de Energia Fotovoltaica no Cenário Brasileiro

2.3.1 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Em 2012, juntamente com o estabelecimento do Sistema de Compensação de Energia Elétrica pela ANEEL mencionado anteriormente, a EPE publicou uma nota técnica com o título “Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira”, onde são abordadas as principais aplicações da energia solar para geração de eletricidade no país. Além disso, foi dado um foco especial aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Nesses estudos mostrou-se que a inserção fotovoltaica se realizaria via Geração Distribuída (GD), especialmente na autoprodução residencial e comercial, pois os custos da energia gerada por um sistema fotovoltaico estavam se equiparando às tarifas cobradas pelas distribuidoras de energia. [7]

GD é uma expressão usada para indicar a geração realizada junto ou próxima dos consumidores, independente da potência, tecnologia ou fonte de energia. A GD tem vantagem sobre a geração centralizada, pois economiza investimentos em transmissão, além de reduzir perdas nesses sistemas, melhorando, assim, a estabilidade do serviço de energia elétrica. [8] Assim, sistemas fotovoltaicos conectados fazem parte da GD.

Comparado aos países líderes em capacidade instalada de geração distribuída fotovoltaica urbana, como Alemanha, China e Itália, o Brasil se mostra possuidor de um enorme potencial, já que apresenta maior incidência solar sobre seu território, entretanto, não oferece a mesma atratividade

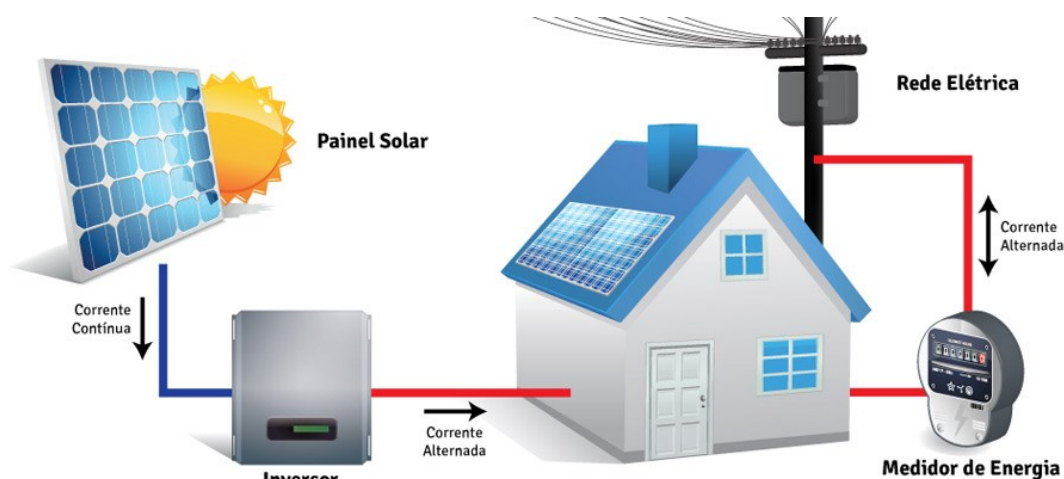
proporcionada nos outros países para viabilizar economicamente a popularização dessa fonte de energia.

Alguns avanços, porém, podem ser destacados, visto que ajudaram a aumentar a inserção da geração distribuída fotovoltaica no sistema elétrico brasileiro, tais como, regulação, financiamento econômico, apoio ao consumidor, certificação e normatização, tributação e legislação e pesquisa e desenvolvimento. [7]

Quando conectado à rede, o sistema vai fornecer a esta a energia não consumida e, mais tarde, compensar essa geração extra nas contas de energia pelo sistema de compensação.

A figura 2 ilustra um sistema fotovoltaico conectado à rede genérico e seus principais componentes.

Figura 2: Exemplo de sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: [9]

O sistema é composto por:

- Arranjo de painéis fotovoltaicos: conjunto de painéis conectados em série e em paralelo;
- Inversor: converte a corrente e equaliza a frequência, tensão e corrente com a rede elétrica;

- Medidor de energia: equipamento eletrônico que calcula a diferença entre a energia consumida do distribuidor e a energia fornecida para o mesmo;
- Rede elétrica: o excesso de energia gerada vai para a rede elétrica, criando créditos que poderão ser compensados.

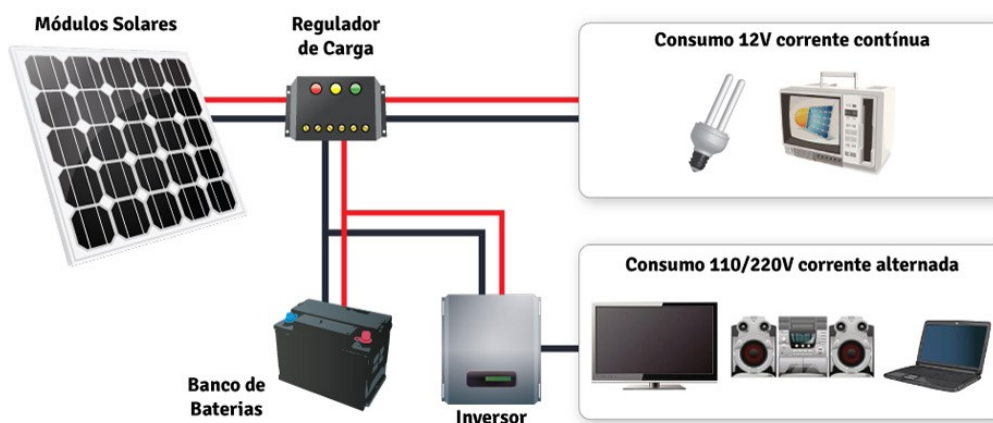
2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

Os sistemas fotovoltaicos isolados ou autônomos podem ser destinados ao uso doméstico ou não doméstico. Os primeiros são aqueles sistemas que fornecem eletricidade a residências, mas que não estão conectados à rede de distribuição da concessionária local. No Brasil, esses sistemas atendem principalmente comunidades isoladas, como em cidades do Norte e do Nordeste, onde grande parte da população se encontra na zona rural, sem acesso à energia elétrica. Em sua maioria, esses sistemas fornecem eletricidade para iluminação, refrigeração e outras cargas baixas de energia.

Já os não domésticos isolados foram as primeiras aplicações comerciais para sistemas terrestres. Esses sistemas fornecem energia para uma larga escala de aplicações, como telecomunicação, refrigeração de medicamentos e vacinas, bombeamento de água, iluminação entre outros. [10]

A figura 3 ilustra um sistema fotovoltaico isolado doméstico e seus principais componentes.

Figura 3: Exemplo de sistema fotovoltaico isolado doméstico



Fonte: [9]

O sistema é composto por:

- Arranjo de painéis fotovoltaicos: conjunto de painéis conectados em série e em paralelo;
- Regulador de carga; controla o nível de carga do banco de baterias, evitando sobrecarga ou descarga excessiva;
- Inversor: caso o sistema alimente cargas em corrente alternada (CA);
- Banco de baterias: acumulam energia gerada para utilização à noite ou em momentos de pouca insolação.

Os componentes do sistema poderão variar de acordo com a aplicação a que se destina. No caso de sistemas sem baterias, os módulos solares alimentam diretamente o equipamento a ser eletrificado. Além disso, nesse caso são dispensáveis tanto o inversor como o regulador de carga e o sistema só funcionará enquanto houver Sol.

A figura 4 ilustra a aplicação de um sistema fotovoltaico isolado não doméstico.

Figura 4: Exemplo de sistema fotovoltaico isolado não doméstico para bombeamento solar



Fonte: [11]

Um projeto de grande destaque também no uso da geração de energia fotovoltaica no Brasil, possibilitando o acesso à eletricidade para cerca de 16 milhões de pessoas, foi o Luz para Todos.

2.3.2.1 Luz para Todos

No ano de 2010, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) levantou dados para o Censo de 2000 e mostrou que existiam mais de 2 milhões de domicílios rurais sem acesso a energia elétrica no Brasil, o que representava mais de 10 milhões de pessoas não atendidas por esse serviço público.

Além do número expressivo de residências a serem atendidas, a menor densidade populacional das áreas rurais onde elas se localizavam exigiria a instalação de vários equipamentos e materiais, o que, por consequência, demandaria um maior esforço e investimento das concessionárias, impactando até mesmo na tarifa paga pelos consumidores.

Então, o governo federal desenvolveu um programa de eletrificação rural e em 11 de novembro de 2003, foi instituído pelo Decreto nº 4.873 o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica, mais conhecido como Luz para Todos. Esse programa estava previsto até o ano de 2008, mas foi prorrogado até 2018 devido a identificação de um número maior de famílias em áreas remotas sem acesso a energia elétrica. [12]

Dessa forma, em locais de baixa densidade populacional, difícil acesso e até mesmo isolados, onde era difícil chegar a rede elétrica convencional, o Ministério de Minas e Energia estabeleceu critérios técnicos e financeiros para que as concessionárias atendessem esses consumidores com o uso de fontes solar, eólica e outras.

Essa resolução abriu uma nova etapa para a discussão de sistemas fotovoltaicos no Brasil, criando a perspectiva de um mercado importante. [13]

3 ESTUDO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Tanto os sistemas fotovoltaicos isolados quanto os conectados à rede têm o mesmo tipo de estrutura no que se refere aos equipamentos que os compõe.

A seguir, serão apresentados os principais componentes que compõe sistemas fotovoltaicos isolados.

3.1 Módulo Fotovoltaico

O componente básico responsável pela conversão da energia da luz solar de modo direto em energia elétrica é a célula fotovoltaica.

O termo módulo fotovoltaico, também conhecido como placa ou painel fotovoltaico, é usado para caracterizar um conjunto de células fotovoltaicas que são conectadas eletricamente sobre uma estrutura rígida. [14] Além disso, podem ser feitos diferentes tipos de arranjos fotovoltaicos com o agrupamento desses módulos.

Esta seção apresentará um estudo teórico sobre a conversão de energia, os tipos de células fotovoltaicas disponíveis e a modelagem matemática necessária para a simulação de um módulo fotovoltaico.

3.1.1 Conceitos Básicos

Para melhor entendimento do funcionamento das células fotovoltaicas e da conversão de energia solar em elétrica, a seguir, serão definidos alguns conceitos básicos sobre a energia solar e a maneira correta de instalação dos módulos fotovoltaicos em relação ao Sol.

3.1.2 Radiação Solar

A energia do Sol chega à superfície terrestre através do espaço na forma de ondas eletromagnéticas. Essa radiação é constituída de variadas frequências e comprimentos de ondas. [14]

As ondas eletromagnéticas viajam com velocidade constante e igual à da luz no vácuo do espaço (aproximadamente 3×10^8 m/s), sendo que o comprimento de onda e a frequência são inversamente proporcionais, ou seja, quanto maior a frequência da radiação, menor será seu comprimento de onda. A equação (1) mostra essa relação:

$$c = \lambda \times f \quad (1)$$

Onde:

λ = comprimento de onda (m);

f = frequência de oscilação da onda (Hz).

Além disso, é possível quantificar a energia, em Joules (J), de uma onda eletromagnética com a equação de Planck, também conhecida como relação de Planck-Einstein, em (2):

$$E = h \times f \quad (2)$$

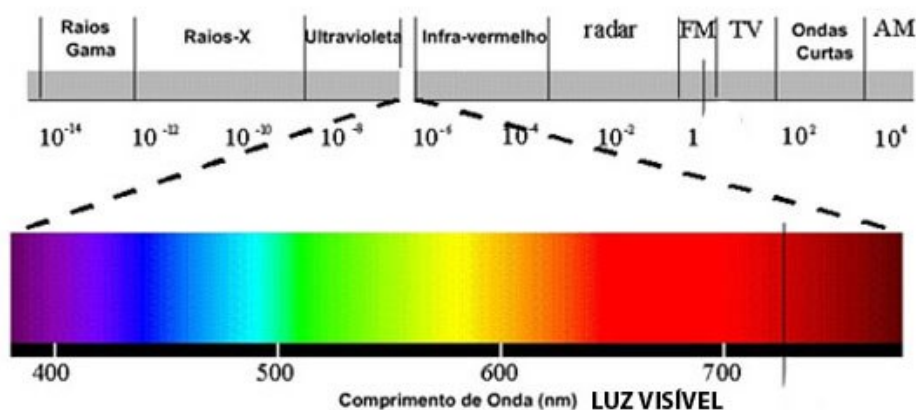
Onde:

h = constante de proporcionalidade, também conhecida por constante de Planck, que vale aproximadamente $6,636 \times 10^{-34}$ (J.s).

Espectro solar é a denominação para a distribuição de energia irradiada pela luz solar na superfície da atmosfera terrestre e é função do comprimento de onda. [15]

Entretanto, apenas uma faixa desse espectro é captada pelo olho humano, chamado espectro de luz visível. Além da faixa de luz visível, o espectro solar também é composto por radiação invisível, com uma pequena parte de luz infravermelha e a maior parte de luz ultravioleta. [14] A figura 5 ilustra esse espectro:

Figura 5: Espectro de Radiação Solar



Fonte: [16]

Todo o espectro de radiação, sejam as ondas de luz visível ou invisível, carregam energia que pode ser transformada em energia térmica ou elétrica [14].

O estudo da radiação solar não é simples, uma vez que o perfil do espectro da radiação solar sobre a superfície terrestre sofre interferência de diversos fatores, como a variação da temperatura ao longo do disco solar e o efeito da própria atmosfera terrestre. Na distância média entre o Sol e a Terra, a energia irradiada é de aproximadamente $1,353 \text{ kW/m}^2$ no espaço. Mas, ao atingir a superfície terrestre, essa radiação é da ordem de 1 kW/m^2 .

O trajeto da radiação solar da atmosfera até a superfície terrestre é caracterizado pela massa de ar. [17]

3.1.2.1 Massa de Ar

As massas de ar são volumes de ar acumulados que possuem traços em comum, como pressão, temperatura e umidade. São formadas acima de grandes áreas uniformes de terra ou água e suas principais características se baseiam na influência destas. Elas estão em constante movimento por causa da diferença de pressão, o deslocamento acontece de áreas de alta para áreas de baixa pressão. [18]

A radiação solar que atravessa a atmosfera terrestre é alterada significativamente antes de atingir a superfície. Suas características dependem

da densidade e da composição da massa de ar, incluindo o ar e elementos em suspensão, como vapor de água e poeira. [14]

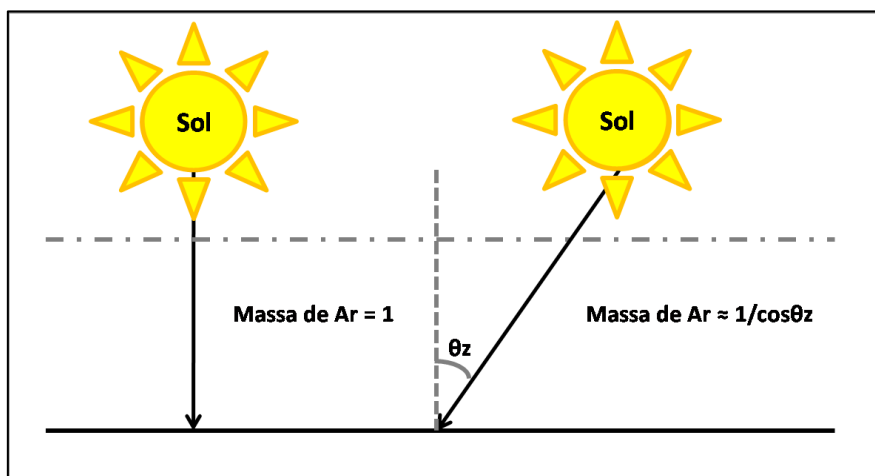
Massa de ar, ou AM (do inglês Air Mass), é um coeficiente definido como a secante do ângulo entre o Sol e a linha zênite do ponto de captação, conforme mostram a equação (3) e a figura 6:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (3)$$

Onde:

θ_z = ângulo zenital do Sol (°).

Figura 6: Massa de Ar



Fonte: [19]

A distribuição AM1.5, com $\theta_z = 48,19^\circ$ é a mais frequentemente usada em catálogos de fabricantes de painéis fotovoltaicos. Mas é importante lembrar que essa distribuição é baseada na latitude média dos países do hemisfério norte e não refletem as características de captação de luz solar em todos os lugares. [17]

3.1.2.2 Tipos de Radiação Solar

Como mostrado anteriormente, o fluxo da radiação solar é alterado significativamente devido ao caminho que percorre ao chegar da atmosfera

terrestre até o solo. Isso ocorre, pois, devido à composição da massa de ar, parte da energia solar é espalhada ou refletida, e outra parte é absorvida.

A absorção da radiação solar acontece por causa, principalmente, de dois elementos presentes na atmosfera: o ozônio e o vapor d'água. Juntamente com outros gases menos significativos, eles são responsáveis por absorver uma parte da irradiação vinda do espaço. Já o espalhamento acontece devido à moléculas de gases, particulados e gotículas de água. [15]

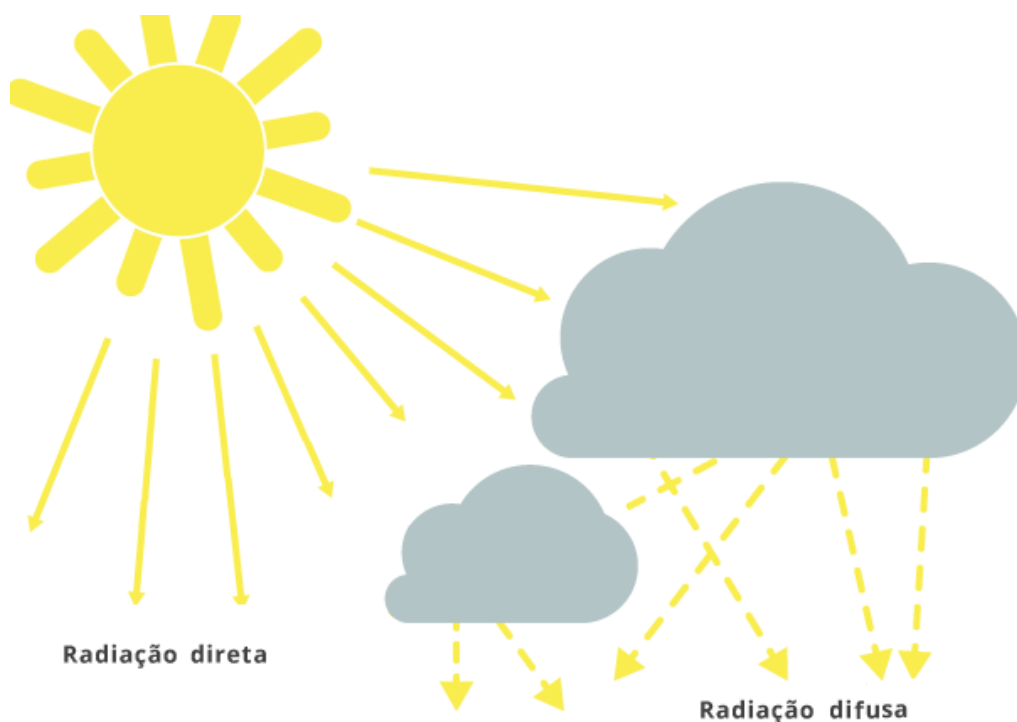
A radiação direta é aquela cujos raios solares chegam do Sol em linha reta sobre o plano horizontal, sendo que sua inclinação dependerá do ângulo azimutal já mencionado anteriormente.

A radiação difusa é composta por todos os raios solares que não chegam de forma direta ao plano horizontal, ou seja, é resultado do espalhamento e da refração que acontece na atmosfera devido à poeira, nuvens e outros objetos.

A radiação global pode ser definida, então, como a soma da radiação direta e da radiação difusa. [14]

A figura 7 mostra os dois tipos de radiação solar, direta e difusa.

Figura 7: Radiação solar direta e difusa



Fonte: [20]

3.1.3 Energia Solar

A radiação solar pode ser medida com diversos tipos de equipamentos, inclusive com sensores baseados em células fotovoltaicas de silício que permitem analisar o desempenho de módulos fotovoltaicos. [14]

Os tipos de sensores que capturam o espectro solar e seu modo de funcionamento não são foco do presente trabalho, todavia, é importante saber que existem aparelhos específicos para analisar a radiação solar ao nível do solo e quantificar a energia que esta carrega.

3.1.3.1 Irradiância

A irradiância é uma grandeza usada para mensurar a quantidade de radiação solar e é expressa em W/m^2 . Ou seja, é uma unidade de potência por área. Sendo o Watt uma taxa de variação de energia em um intervalo de tempo, isso quer dizer que, quanto maior a potência da radiação solar, maior a quantidade de energia que ela carrega em um certo tempo.

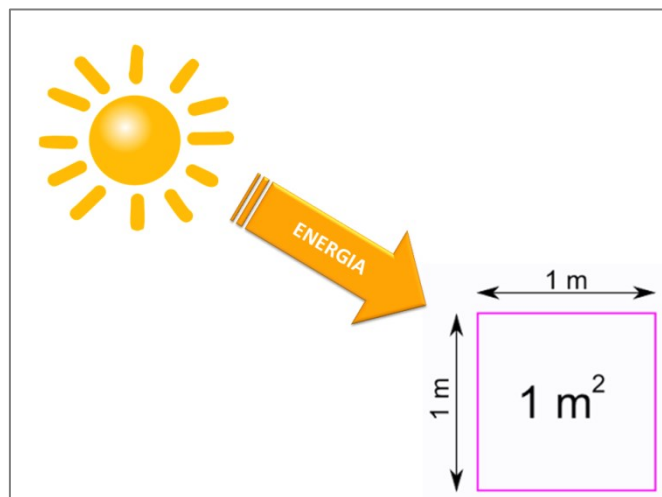
Na superfície da Terra, a irradiância da luz solar é de, aproximadamente, 1000 W/m^2 . Esse valor é usado como padrão na indústria para especificação de células e módulos fotovoltaicos.

Para se medir a quantidade de energia recebida da luz solar em uma determinada área durante um dia, são colocados sensores específicos que armazenam coletam e armazenam valores de irradiância. Esse procedimento também pode ser feito para captar a energia solar em um tempo maior, como semanas, meses ou um ano. [14]

3.1.3.2 Insolação

Insolação é a medida usada para quantificar a energia solar que incide sobre uma determinada região plana ao longo de um determinado intervalo de tempo. É expressa em Wh/m^2 , que é uma unidade de densidade de energia por área. A figura 8 ilustra a energia recebida do Sol (em Wh) por unidade de área (m^2) durante um intervalo de tempo. [14]

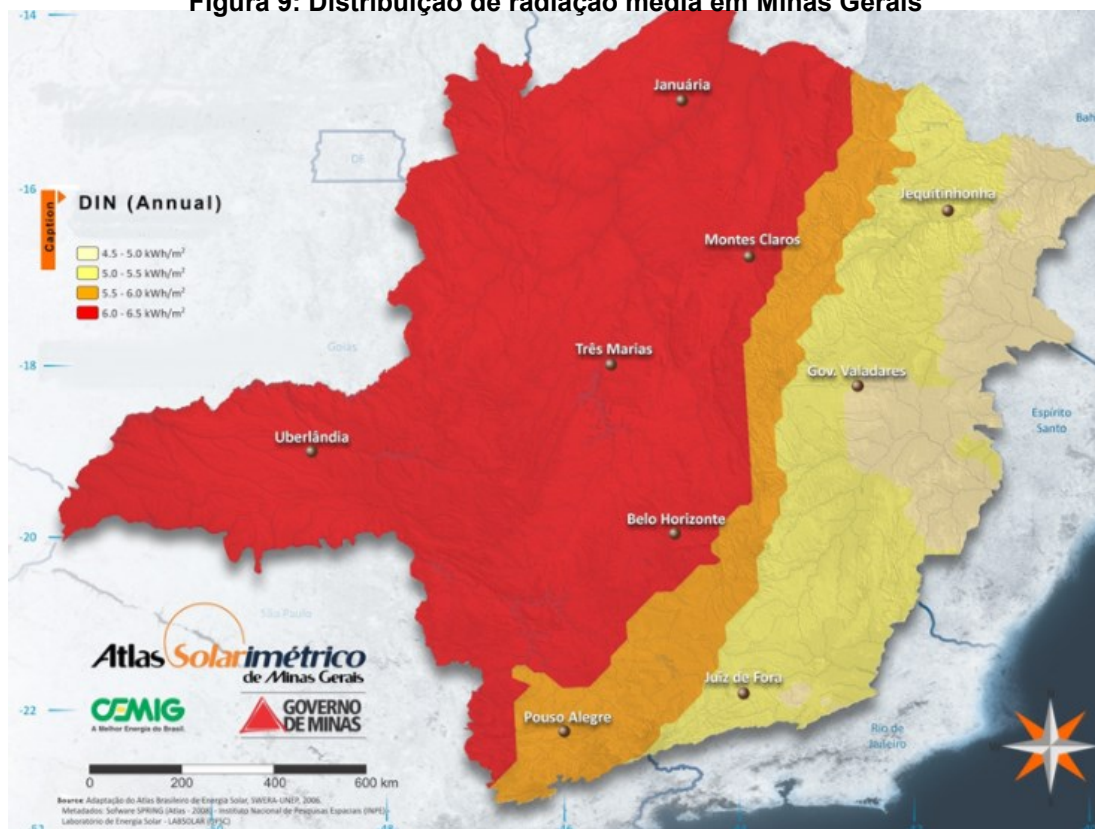
Figura 8: Insolação, em Wh/m²



Fonte: Autora, composição com figuras extraídas de images.google.com.

Na região de Uberlândia, de acordo com o Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, a média diária anual da radiação solar direta normal é entre 6.0 e 6.5 kWh/m². [21] A figura 9 mostra a distribuição de radiação média no estado de Minas Gerais.

Figura 9: Distribuição de radiação média em Minas Gerais



Fonte: [21]

A medida de insolação do local onde será instalado o sistema fotovoltaico é muito importante para seu correto dimensionamento. Além de conhecer os valores de insolação, é necessário orientar os módulos corretamente a fim de garantir o máximo aproveitamento da energia do Sol disponível nesse local.

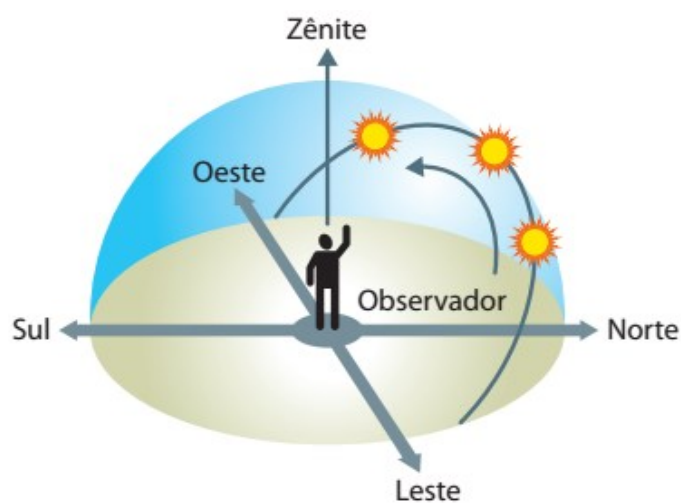
3.1.4 Orientação dos Módulos

Para que os módulos fotovoltaicos sejam instalados corretamente a fim de receber a maior quantidade de energia possível do Sol, é necessário entender como os raios solares chegam à Terra e como isso afeta a forma da orientação dos módulos.

Os raios solares são ondas eletromagnéticas paralelas que viajam pelo espaço em linha reta até cruzarem a atmosfera terrestre. Nesse momento, os raios sofrem difusão e têm sua trajetória mudada para todas as direções. Entretanto, a maioria dos raios permanece na trajetória em linha reta.

A inclinação da radiação direta com o solo não é a mesma dependendo do ponto do planeta que esta atinge. Além disso, essa inclinação muda ao longo dos dias e meses do ano, pois relaciona-se com a posição da Terra e do Sol no sistema solar.

Para um observador no hemisfério Sul, sabendo-se que o Sol nasce na direção Leste e se põe na direção Oeste, a trajetória do movimento aparente do Sol fica de acordo com a figura 10:



Fonte: [22]

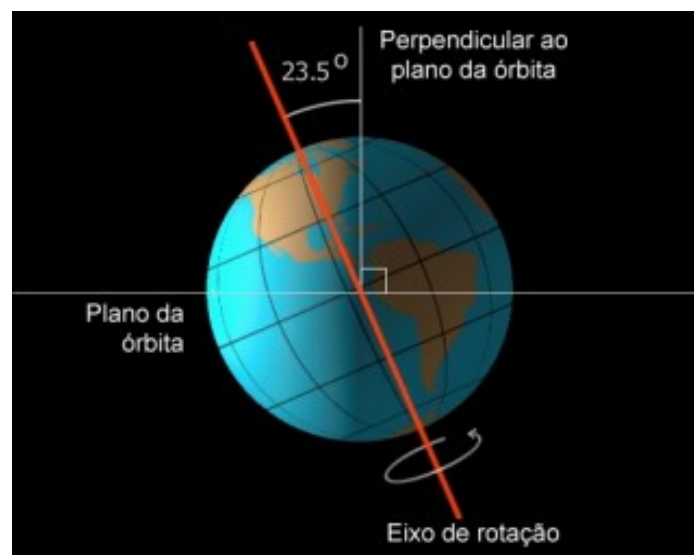
A partir da imagem, é possível perceber que, para instalar os módulos fotovoltaicos de maneira a captarem luz durante o dia inteiro, é necessário que estejam voltados para o Norte. De outra maneira, eles receberiam radiação somente na parte da manhã (voltados para Leste), tarde (voltados para Oeste), ou não receberiam (voltados para o Sul).

De maneira semelhante, se o observador estiver no hemisfério Norte, os módulos fotovoltaicos devem ser instalados voltados para o Sul. [14]

3.1.4.1 Movimento da Terra

A Terra realiza dois tipos de movimento: rotação e translação. A rotação é o movimento que a Terra faz em torno do seu próprio eixo, sendo que o eixo dos polos norte e sul geográficos é levemente inclinado com um ângulo de, aproximadamente, $23,5^\circ$ em relação à linha perpendicular do plano fixo que contém a órbita da Terra. A figura 11 indica essa inclinação.

Figura 11: Inclinação do eixo de rotação da Terra

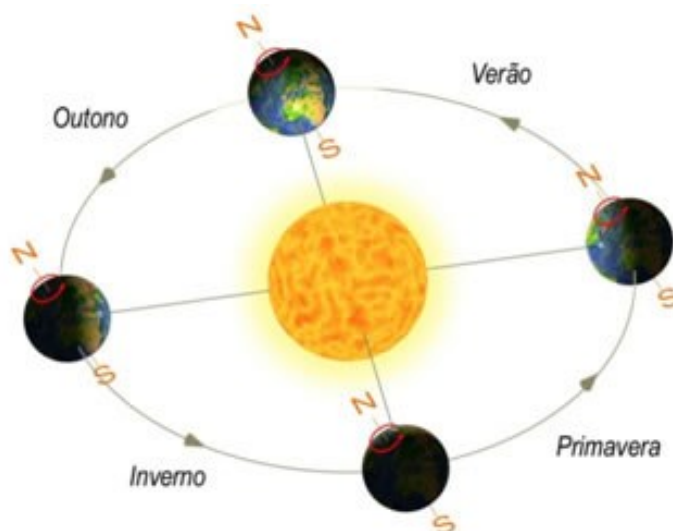


Fonte: [23]

Já o movimento de translação é a trajetória elíptica que a Terra descreve em torno do Sol. O percurso completo tem duração de, aproximadamente, 365 dias e seis horas. Como a duração do ano do calendário é de 365 dias, a cada quatro anos, tem-se um ano bissexto, que possui um dia a mais.

A combinação desses dois movimentos faz com que os hemisférios norte e sul fiquem mais próximos ou distantes do Sol em cada dia do ano, dependendo da posição da Terra em seu percurso, originando, dessa forma, as estações do ano. A figura a seguir ilustra o resultado.

Figura 12: Combinação dos movimentos de rotação e translação da Terra em torno do Sol



Fonte: [24]

Quanto mais próximo da linha do Equador, menor a influência da inclinação do eixo de rotação da Terra sobre as estações do ano. Todavia, quanto mais próximo dos polos norte e sul do planeta, maior a influência sobre a duração dos dias e das noites, sendo que os dias tornam-se mais longos no verão, e as noites, no inverno.

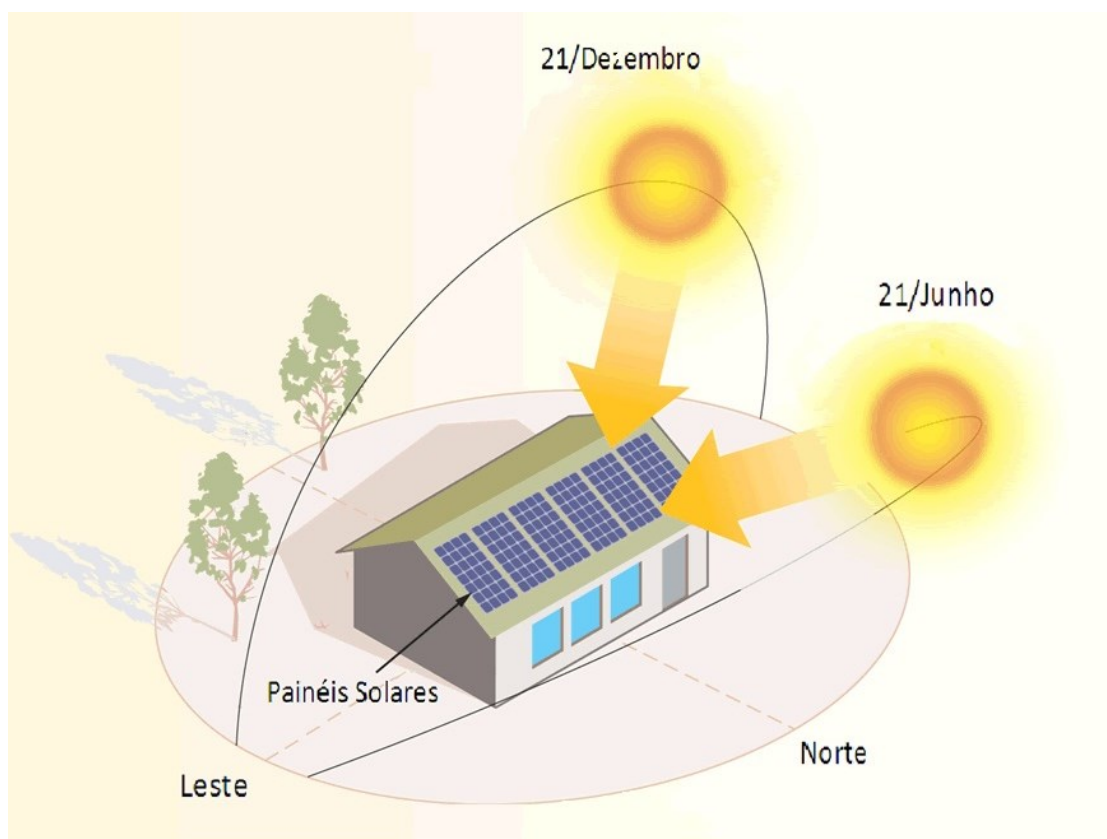
A diferença na duração dos dias e a inconstância nas massas de ar percorridas pelos raios solares já explicadas anteriormente, ambos dependendo da localização geográfica, fazem com que a quantidade de energia solar recebida seja desigual em cada região do planeta.

Além disso, a quantidade de energia vinda do Sol também é diferente para cada dia do ano e é maior no verão do que no inverno. [14]

3.1.4.2 Ângulo de Incidência dos Raios Solares

O ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície terrestre varia com a latitude e com as horas do dia. A posição aparente do Sol no céu é diferente ao longo do dia e do ano, conforme mostra a figura a seguir.

Figura 13: Movimento aparente do Sol durante o verão e o inverno



Fonte: [25]

O mesmo princípio se aplica aos ângulos de emissão dos raios solares: ao meio-dia solar, a magnitude de insolação é máxima, entretanto, nas horas da manhã ou da tarde, quando o Sol está num ângulo baixo, a quantidade de insolação é menor.

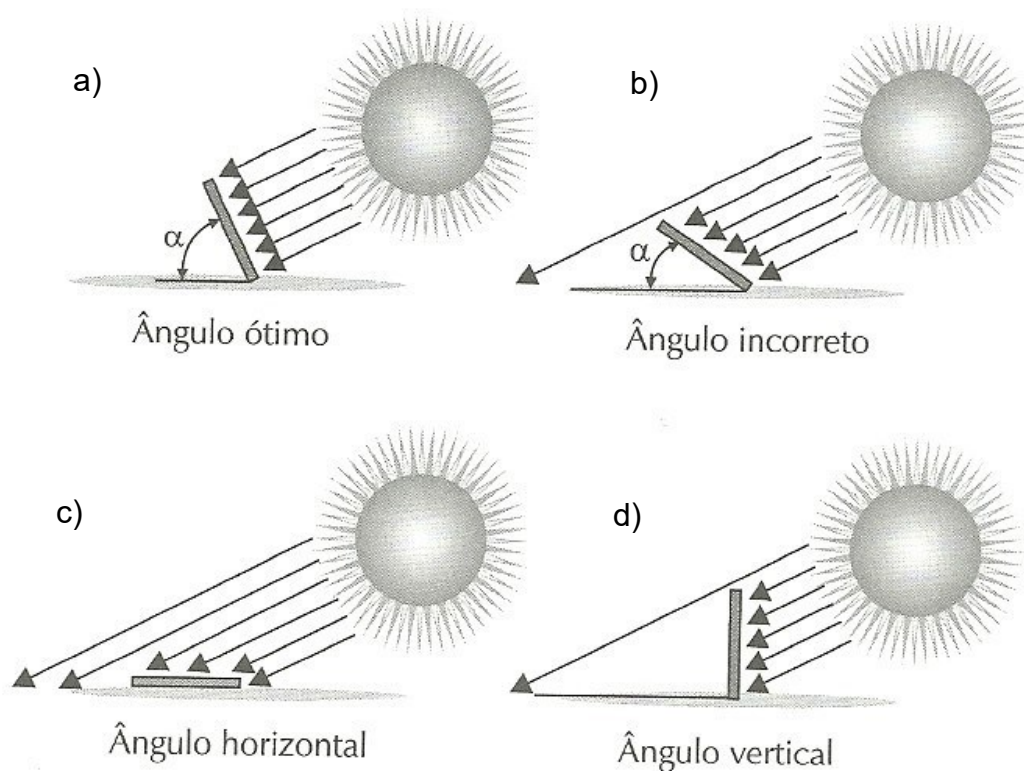
Para um melhor aproveitamento da energia solar, é necessário estimar o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, este voltado para o norte geográfico, para a melhor captação de energia durante todo o ano. [25]

3.1.4.3 Ângulo de Inclinação do Módulo Solar

Para a maioria dos sistemas fotovoltaicos, o ângulo de inclinação dos módulos é fixo, logo, este deve ser escolhido de maneira correta, pois, caso contrário, a captação dos raios solares é reduzida, comprometendo a produção de energia elétrica.

A figura 14 ilustra quatro casos com diferentes ângulos de inclinação do painel fotovoltaico, seguida de uma discussão sobre cada um.

Figura 14: Efeito da inclinação do módulo fotovoltaico na captação de energia



Fonte: [25]

No caso a, o ângulo de inclinação é ótimo, pois faz os raios solares incidirem de forma perpendicular em relação à superfície do módulo, maximizando a captação de radiação solar direta.

No caso b, o módulo tem uma inclinação menor e, para o mesmo feixe de raios solares, não é o ideal, já que uma parte dos raios não atinge o módulo. Isso representa uma produção menor de energia, se comparada ao caso anterior.

Os últimos dois casos c e d são modos extremos para a instalação do módulo. Na posição horizontal, a captação de energia é grande nos meses de verão com o Sol mais alto no céu, mas é prejudicada nos meses de inverno, quando o Sol está mais baixo. O contrário acontece com a posição vertical.

Para determinar o ângulo de inclinação das placas fotovoltaicas, sendo estas estacionárias, que melhor possibilitará produção de energia durante todo o ano, os fabricantes de modo geral utilizam a latitude do local de instalação como informação. [14]

O cálculo da angulação é feito de acordo com a seguinte equação (4):

$$\alpha_{\text{ótimo}} = 3,7 + 0,69 \times \varphi \quad (4)$$

Onde:

$\alpha_{\text{ótimo}}$ = Melhor ângulo para captação da radiação, em graus (°).

φ = Valor da latitude local, em graus (°).

Na cidade de Uberlândia, Minas Gerais, por exemplo, a latitude é de 18,918°. A partir da equação 4, o ângulo ótimo para inclinação do módulo solar é de 16,754°, voltado para o Norte. Com essa inclinação, as placas serão capazes de captar o máximo de radiação em média no ano. [26]

3.1.5 Rastreamento Automático da Posição do Sol

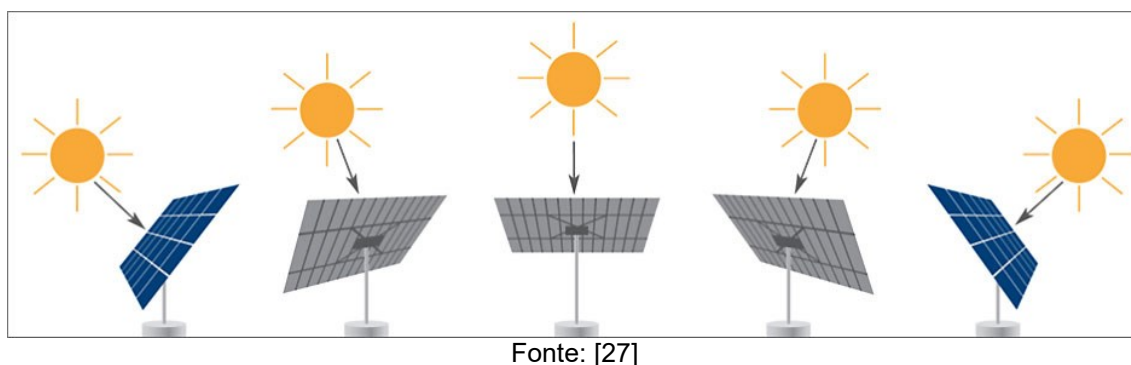
O sistema de rastreamento automático da posição do Sol otimiza o ângulo de incidência da radiação solar sobre os módulos de maneira automática, através da mudança da posição do módulo.

Dessa maneira, a placa está sempre recebendo os raios solares com o melhor ângulo de incidência possível, ao longo do dia e do ano.

Apesar de aumentar a produção de energia, esse tipo de sistema tem um custo mais elevado e necessita de manutenção das partes mecânicas móveis e dos sistemas de controle. [14]

A figura 15 ilustra várias posições do módulo com o uso do seguidor solar.

Figura 15: Rastreamento automático da posição do Sol



3.2 Conversão de Energia Solar em Elétrica

O efeito fotovoltaico está intimamente ligado ao efeito fotoelétrico, porém, ambos são diferentes. Enquanto o efeito fotoelétrico expulsa elétrons do material após absorver uma quantidade de energia suficiente, o efeito fotovoltaico diz respeito à troca de camadas atômicas pela energia da radiação, ou seja, os elétrons na camada de valência são excitados e escapam para uma camada de condução, tornando-se livres.

O chamado efeito fotovoltaico acontece em alguns tipos de materiais na presença de luz solar e será explicado com mais detalhes a seguir. [26]

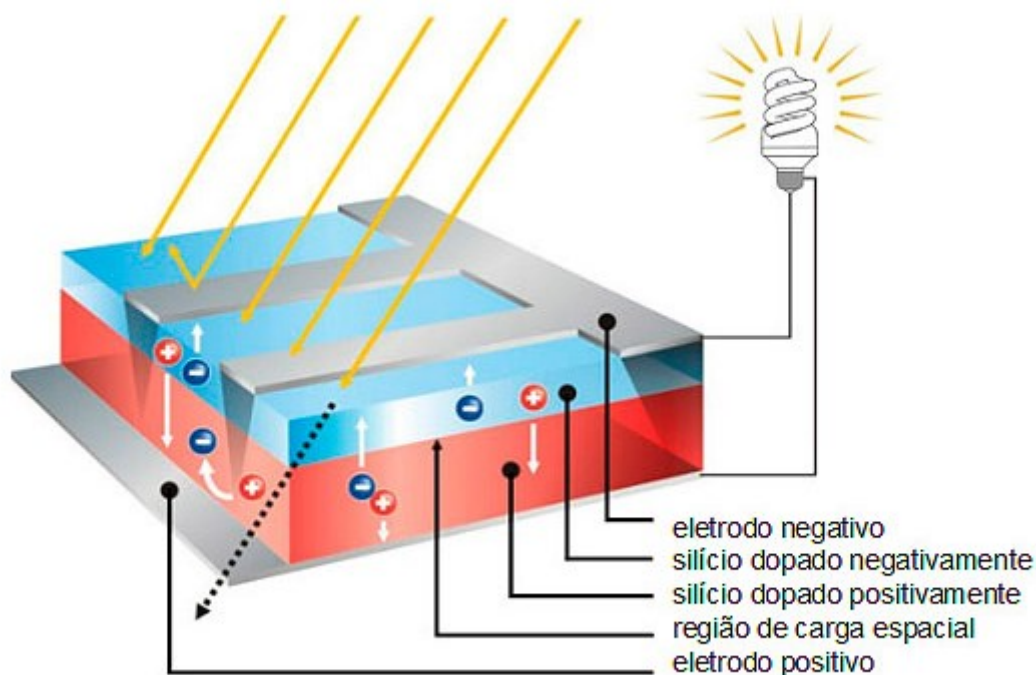
3.2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que converte luz diretamente em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a radiação solar incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com características específicas.

A estrutura de uma célula fotovoltaica é composta por duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P (positivo) e outra do tipo N (negativo), uma grade de coletores metálicos superior e uma base metálica inferior, também chamados de eletrodos negativo e positivo, respectivamente. [14]

A figura 16 mostra os detalhes de uma célula fotovoltaica:

Figura 16: Célula fotovoltaica em detalhes



Fonte: [28]

Os eletrodos positivo e negativo são os terminais elétricos que coletam a corrente elétrica produzida pela conversão da luz. A base inferior é uma película de alumínio ou prata. A parte superior precisa ser translúcida, já que recebe a luz solar e, logo, os contatos elétricos são feitos na forma de uma fina grade metálica impressa na célula.

As camadas semicondutoras de uma célula podem ser fabricadas com diversos tipos de materiais, mas a maioria é construída com silício, já que é um material abundante e barato.

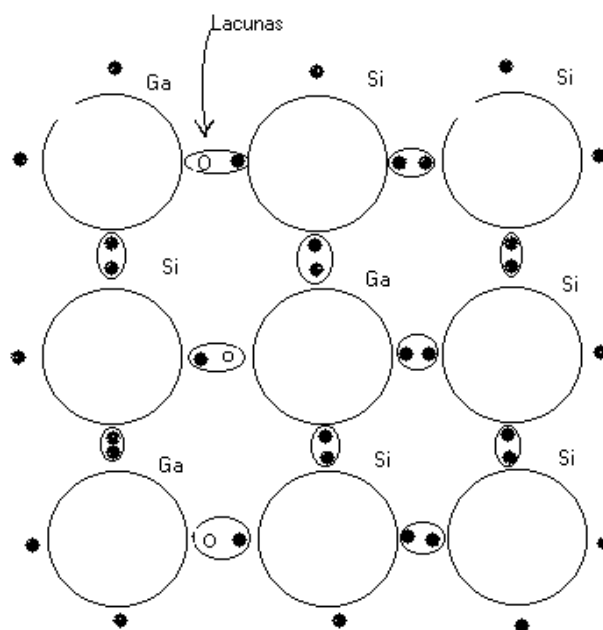
A adição de materiais dopantes ou de certos tipos de impurezas modificam as propriedades de um material semicondutor. Sabe-se que um material semicondutor é aquele que não é considerado nem isolante, nem condutor elétrico.

Uma célula fotovoltaica típica é constituída pela junção de duas camadas, tipo N e tipo P, como dito anteriormente. A diferença entre esses materiais é que o tipo N possui excesso de elétrons, enquanto que o tipo P, a falta destes. [14]

A formação desses dois tipos de materiais acontece através da dopagem do silício pela introdução de impurezas. Para o tipo P, é introduzido um material com três elétrons na camada de valência e, dessa maneira, são criadas lacunas, fazendo com que o material tenha carga positiva. [29]

A figura 17 mostra a dopagem de silício com Gálio:

Figura 17: Material tipo P: dopagem de silício com Gálio

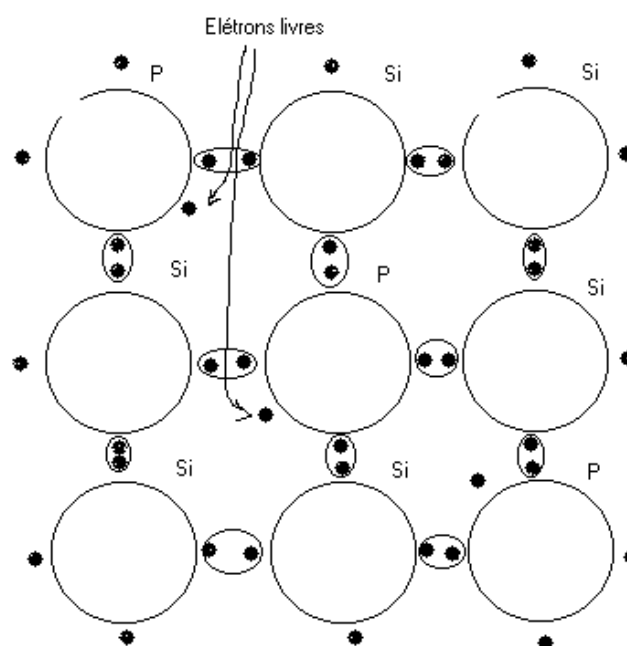


Fonte: [29]

Já para a formação do tipo N, associa-se ao silício um material com cinco elétrons na última camada e, assim, haverá elétrons livres que podem se mover pela estrutura com maior facilidade. Dessa maneira, o material possui carga negativa. [29]

A figura 18 mostra a dopagem de silício com Fósforo:

Figura 18: Material tipo N: dopagem de silício com Fósforo



Fonte: [29]

Devido à essa diferença de concentração de elétrons, quando duas camadas de materiais P e N são colocadas em contato, os elétrons da camada N fluem para a camada P, criando um campo elétrico em uma zona chamada de depleção ou barreira de potencial. Quando a célula não está iluminada, os elétrons e as lacunas permanecem presos atrás dessa barreira.

Os elétrons em movimento são coletados pelos eletrodos metálicos e, quando há um circuito fechado, eles circulam em direção à camada N, formando uma corrente elétrica.

Uma célula fotovoltaica sozinha produz uma baixa quantidade de energia, além de apresentar tensão elétrica limitada. Então, várias células são ligadas em série para produzirem tanto uma maior quantidade de energia, quanto de tensão. [14]

Existem vários tipos de células fotovoltaicas, mas, atualmente, os principais tipos fabricados são de silício monocristalino, policristalino, filmes finos ou silício amorfo.

3.3 Tipos de Células Fotovoltaicas

O silício usado na produção de células fotovoltaicas é extraído a partir do minério chamado quartzo. Apesar de o Brasil ser rico em fontes desse minério, a sua purificação e a fabricação das próprias células são feitas em outros países. [14]

3.3.1 Silício Monocristalino

O silício monocristalino é constituído de uma estrutura cristalina que possui organização molecular homogênea. Por essa razão, sua aparência é brilhante e regular.

As bolachas finas de silício puro são submetidas a processos químicos para receberem impurezas a fim de formarem as camadas tipo P e N, que é a base para o funcionamento da célula fotovoltaica.

Por fim, a célula recebe uma película metálica em uma das faces uma grade metálica na outra, e ainda uma camada de material antirreflexivo na face que vai receber a luz. [14]

O resultado final é mostrado a seguir na figura 19:

Figura 19: Célula fotovoltaica de silício monocristalino



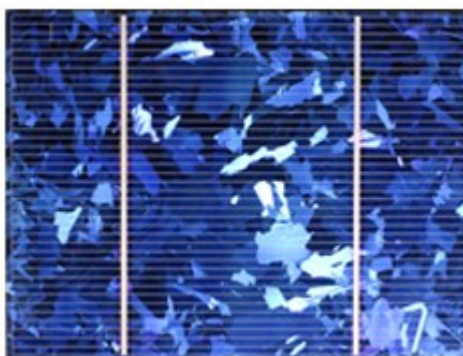
Fonte: [29]

As células de silício monocristalino são as que apresentam maior eficiência (entre 15 a 18%) e são produzidas em larga escala. Entretanto, seu custo de produção é mais elevado que de outros tipos de células. [14]

3.3.2 Silício Policristalino

O silício policristalino é formado por um aglomerado de pequenos cristais, com tamanhos e orientações diferentes. As células produzidas a partir desse material possuem aspecto heterogêneo e até manchado. [14] O resultado dessa produção é mostrado na figura 20:

Figura 20: Célula fotovoltaica de silício policristalino



Fonte: [29]

Esse tipo de célula possui eficiência comercial menor que a de monocristalino (entre 13 e 15%), mas seu custo de fabricação é menor, o que compensa a redução de eficiência. [14]

3.3.3 Filmes Finos

Os filmes finos são uma tecnologia mais recente. Enquanto as células cristalinas são produzidas a partir de fatias de lingotes de silício, os filmes finos são fabricados através da deposição de finas camadas de silício e de outros materiais sobre uma base, rígida ou flexível.

Os dispositivos de filmes finos podem ser produzidos em qualquer dimensão, logo, não existe a diferença entre célula e módulo para este caso. Isso quer dizer que é possível fabricar um módulo inteiro com uma única célula.

Os filmes finos possuem custo menor que os de silício cristalino, mas apresentam baixa eficiência (média entre 7 e 13%) e, por esse motivo, necessitam de uma área maior de módulos para produzirem a mesma quantidade de energia. [30]

Além disso, esses módulos sofrem uma degradação de maneira mais acelerada do que os cristalinos. [14]

A figura 21 ilustra uma célula de filme fino.

Figura 21: Célula fotovoltaica de filme fino



Fonte: [30]

3.4 Características dos Módulos Fotovoltaicos

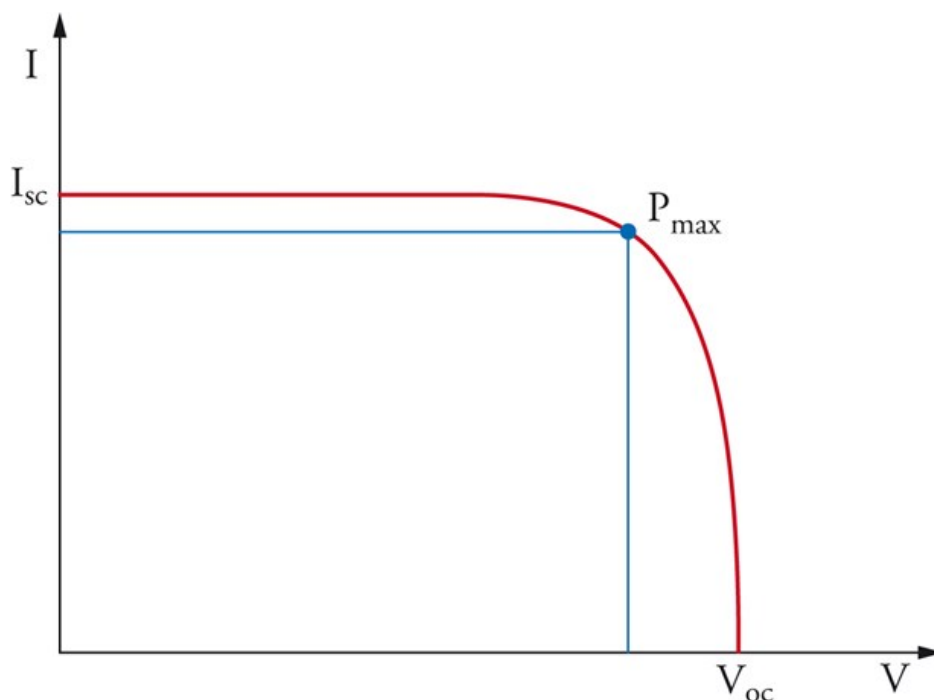
Nesta seção, serão apresentadas as principais informações disponibilizadas pelos fabricantes para se entender o funcionamento dos módulos fotovoltaicos. Além disso, serão exibidas as principais equações para a modelagem matemática de um módulo genérico.

3.4.1 Curvas Características de Corrente, Tensão e Potência

O comportamento de um módulo fotovoltaico não é o de uma fonte elétrica convencional, pois os valores da tensão e da corrente dependem do que está conectado aos seus terminais.

A curva $I \times V$ demonstra essa relação entre corrente e tensão, que é uma característica semelhante para todos os módulos fotovoltaicos. Para cada curva $I \times V$, existe uma $P \times V$ correspondente, que mostra a forma que a potência varia em função de sua tensão. A figura 22 ilustra, de maneira geral, a curva $I \times V$.

Figura 22: Curva $I \times V$ de um painel genérico



Fonte: [31]

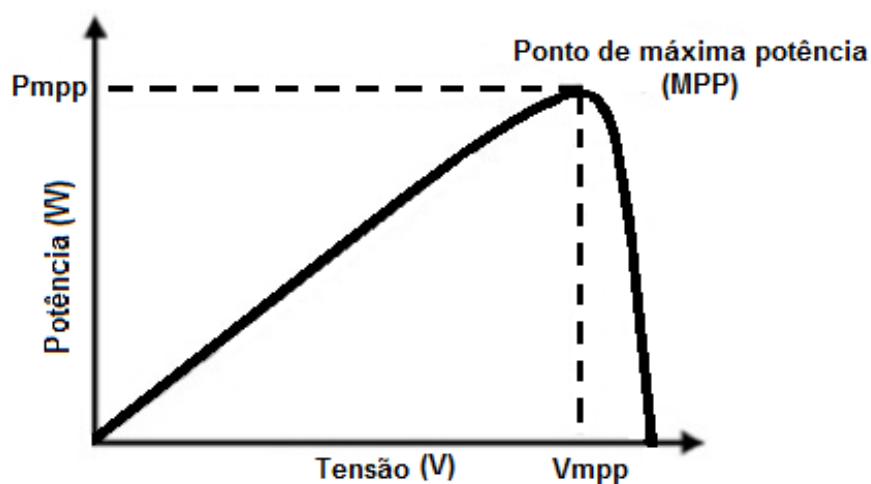
Na curva, é possível ver o ponto de máxima potência destacado (P_{max}), que é o ponto de operação ideal do módulo, pois, nesta situação, sua produção de energia é maior. Além disso, dois pontos extremos também são importantes: corrente de curto-circuito (I_{sc} , do inglês *short-circuit*) e tensão de circuito aberto (V_{oc} , do inglês *open-circuit*).

A corrente de curto-circuito é aquela que ocorre quando os terminais do módulo são colocados em curto-circuito. Nessa situação, a diferença de potencial entre os terminais é nula e a corrente do módulo atinge seu valor máximo.

A tensão de circuito aberto é aquela que se mede na saída do módulo enquanto seus terminais estão abertos, isto é, não há nada ligado a ele. Nessa situação, a tensão do módulo alcança seu valor máximo. [14]

A curva $P \times V$ genérica de um módulo é mostrada a seguir:

Figura 23: Curva $P \times V$ de um painel genérico

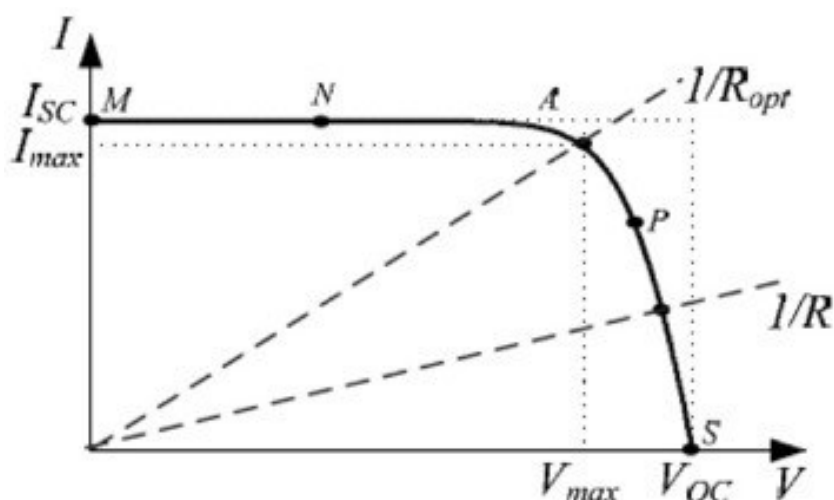


Fonte: [32]

Como já mencionado anteriormente, é necessário manter o ponto de funcionamento próximo do ponto de máxima potência (P_{max} ou MPP, do inglês *Maximum Power Point*) a fim de garantir a máxima eficiência do painel.

Para entender como a condição de operação do módulo está relacionada à variação de tensão e corrente, serão apresentadas três situações distintas de funcionamento, de acordo com a figura 24.

Figura 24: Característica de funcionamento de um painel genérico



Fonte: [32]

A reta $1/R$ representa a característica de carga, considerando esta como resistiva. Essa reta mostra que a potência fornecida à carga depende apenas do valor da mesma.

Para a primeira situação, tem-se que o módulo está funcionando dentro da região M-N da curva, ou seja, para um R pequeno. O painel pode ser tomado como uma fonte de corrente constante, cujo valor é aquele da corrente de curto-circuito I_{SC} .

Para a segunda, o módulo funciona na região P-S da curva, para um R elevado. Dessa forma, o painel operará como uma fonte de tensão constante e o seu valor é o mesmo da tensão de circuito aberto V_{OC} .

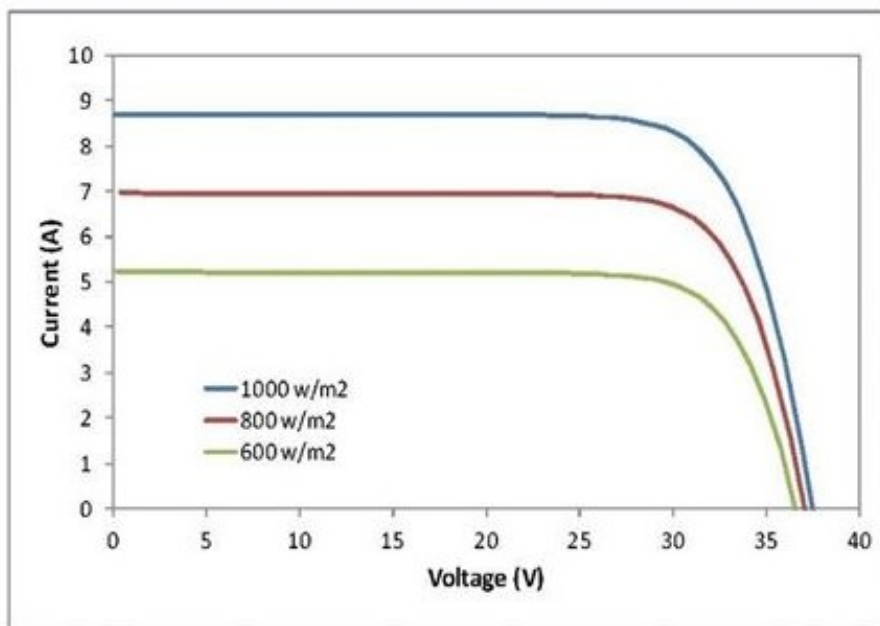
Por fim, na terceira situação, o painel funciona no ponto A, de coordenadas $[I_{max}, V_{max}]$, e, assim, é capaz de fornecer sua potência máxima. [32]

3.4.2 Influência da Radiação Solar e da Temperatura

A quantidade de radiação solar que incide sobre o módulo afeta diretamente o valor da corrente elétrica que este é capaz de produzir. Para uma radiação de 1.000 W/m^2 a uma temperatura de 25°C (características elétricas em STC: *Standard Test Conditions*, ou condições padrões de teste), os módulos devem ser capazes de fornecer a máxima corrente especificada em seu catálogo. [14]

A figura 25 mostra como a radiação afeta a curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico:

Figura 25: Curvas IxV para diferentes valores de radiação solar



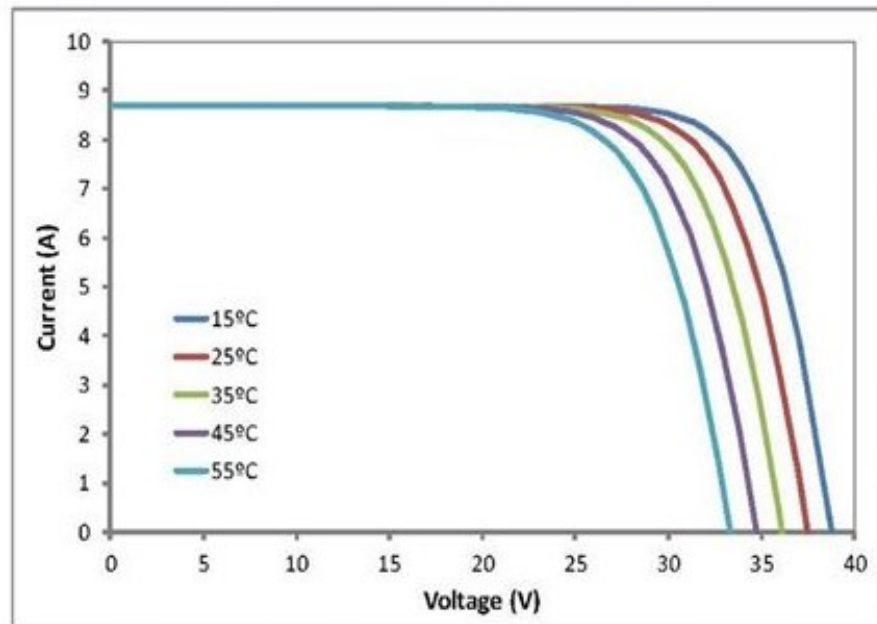
Fonte: [33]

A temperatura, por outro lado, influencia no valor da tensão que o módulo fornece em seus terminais e, conseqüentemente, na potência entregue, uma vez que a potência é resultado do produto da tensão e da corrente.

Para temperaturas mais baixas, as tensões são mais elevadas, assim como a potência, já para temperaturas mais altas, as tensões são menores e a potência também. [14]

A figura 26 mostra como a temperatura afeta a curva I-V de um módulo fotovoltaico:

Figura 26: Curvas IxV para diferentes valores de temperatura



Fonte: [33]

3.4.3 Célula Fotovoltaica Ideal

O modelo de um diodo caracteriza a célula fotovoltaica como sendo ideal. Nele, a célula é considerada como uma fonte de corrente, tendo suas resistências em série e paralelo desprezadas.

A equação básica que descreve matematicamente a característica I-V de uma célula ideal é [17]:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (4)$$

Onde I_{pv} é a corrente gerada pela incidência da luz e I_d é a equação do diodo de Shockley [17]:

$$I_d = I_0 \left[\exp \frac{qV}{akT} - 1 \right] \quad (5)$$

Onde:

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo (A).

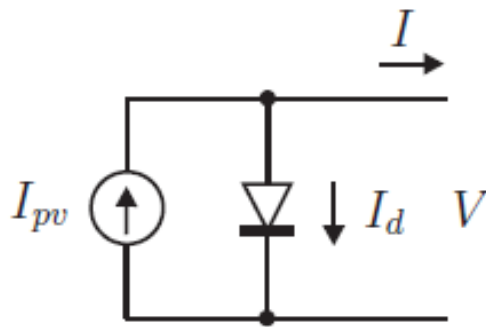
q = carga elementar do elétron (aproximadamente $1,6022 \times 10^{-19}$ C).

k = constante de Boltzmann (aproximadamente $1,3806 \times 10^{-23}$ J/K).

T = temperatura da junção p-n (K).

A figura 27 retrata o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica ideal descrita pela equação 4:

Figura 27: Modelo ideal de uma célula fotovoltaica



Fonte: [17]

Entretanto, as equações apresentadas para o modelo ideal não representam as características I-V de um dispositivo prático.

3.4.4 Célula Fotovoltaica Prática

As características nos terminais de um painel fotovoltaico necessitam de um acréscimo de parâmetros na equação básica apresentada anteriormente. Logo, a corrente I que a célula fornece no modelo prático em função de V é [17]:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \frac{V + R_S I}{V_t a} - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (6)$$

Onde:

R_S = resistência série equivalente do painel (Ω).

R_P = resistência paralela equivalente do painel (Ω).

V_t = tensão térmica do painel (V).

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (7)$$

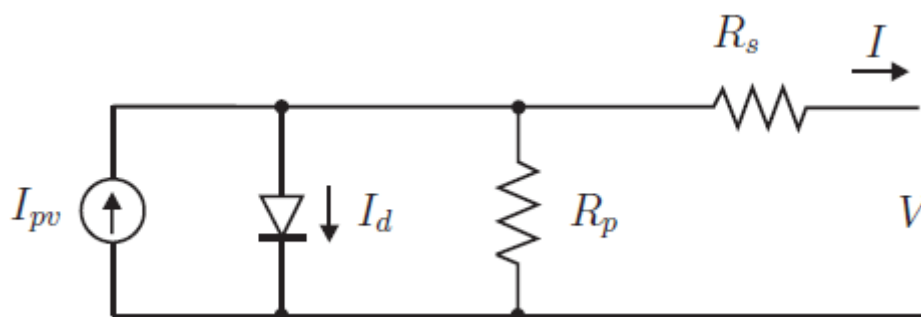
Onde:

N_s = número de células conectadas em série (adimensional).

A conexão de células em paralelo não é usual nos painéis fotovoltaicos comerciais, mas, quando realizada, é capaz de aumentar sua capacidade de corrente. Se o conjunto for composto por mais de uma célula em paralelo, então as correntes I_{pv} e I_0 deverão ser multiplicadas por N_p (número de células conectadas em paralelo). [17]

A figura 28 retrata o modelo de um diodo prático de um dispositivo fotovoltaico, onde as resistências série e paralelo já não são desprezadas:

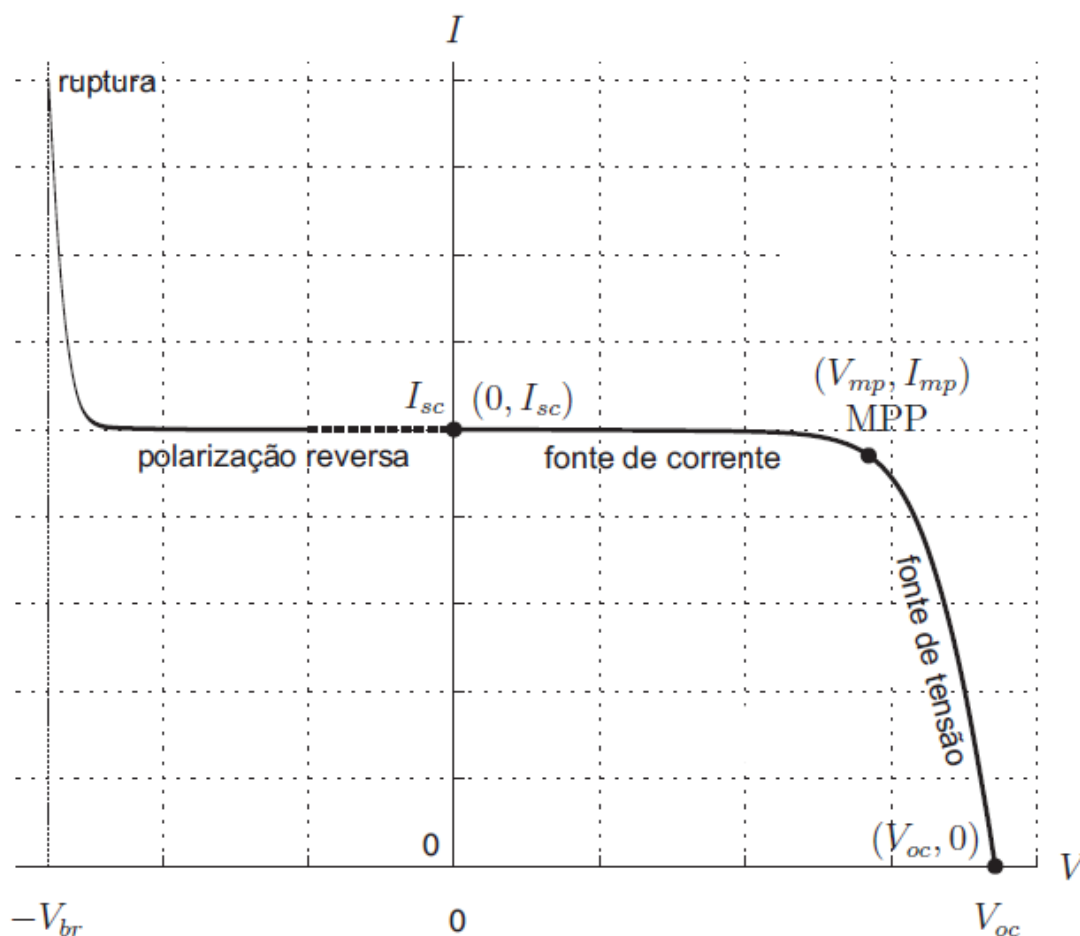
Figura 28: Modelo real de uma célula fotovoltaica



Fonte: [17]

A equação 6 origina, então, uma curva $I \times V$ característica mostrada a seguir:

Figura 29: Curva característica de uma célula prática



Fonte: [17]

Nesse gráfico, três pontos estão destacados: curto-circuito $(0, I_{sc})$, máxima potência (V_{mp}, I_{mp}) ; que são: tensão e corrente de máxima potência respectivamente) e circuito aberto $(V_{oc}, 0)$. Tais pontos já foram comentados anteriormente.

A zona de polarização direta é dividida em duas zonas de operação do sistema fotovoltaico: fonte de corrente e fonte de tensão. Já na região de polarização reversa, a tensão sobre o dispositivo fotovoltaico é negativa, fazendo-o dissipar energia e até se danificar por aquecimento.

Um dispositivo fotovoltaico pode ser submetido a funcionar na região reversa, caso ele esteja inserido num conjunto com vários painéis em série sem a utilização de diodos paralelos. Entretanto, não se deve operar nessa região, pois o dispositivo pode alcançar a tensão de ruptura V_{br} e ser destruído por aquecimento. [17]

O modelo de um diodo representa de modo simples e preciso um dispositivo fotovoltaico, apesar de alguns autores apresentarem modelos mais precisos e realistas usando dois ou mais diodos.

3.5 Conversor de Energia CC-CC

Sabe-se que existe uma busca incessante por fontes renováveis de energia e, mesmo com a tendência mundial de utilização destas, a geração de energia fotovoltaica somente foi capaz de crescer devido ao desenvolvimento paralelo da eletrônica de potência, que é utilizada como ferramenta para o processamento da energia gerada.

Em grande parte da aplicação da eletrônica de potência, o objetivo é processar os níveis de tensão e corrente de entrada para que alcancem outros necessários a uma carga específica. Para o uso de sistemas em corrente contínua, como é o caso de sistemas fotovoltaicos, os conversores CC-CC podem ser usados.

No presente trabalho, será apresentado um estudo sobre o conversor tipo Boost, que é um elevador de tensão.

Além da utilização de um conversor entre o módulo fotovoltaico e a carga à frente a fim de mantê-la alimentada de maneira adequada, o conversor também pode ser usado para permitir que o módulo funcione no seu ponto de entrega de máxima potência, ou no MPP. Essa aplicação é tão relevante que os conversores utilizados para esse fim são denominados de rastreadores de máxima potência. [34]

3.5.1 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

O rastreamento do ponto de máxima potência, ou MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*), é imprescindível aos sistemas fotovoltaicos a fim de garantir que o painel solar opere sempre no seu ponto de elevado rendimento, produzindo o máximo de energia.[17] Isso é necessário, pois as condições de

operação do painel, como temperatura e radiação, mudam aleatoriamente ao longo do dia.

3.5.2 Métodos para Aplicação de MPPT

Existem diversas técnicas citadas na literatura para garantir a operação de um sistema fotovoltaico em seu MPP. [17, 26 e 34]

Na maioria das técnicas usadas para o rastreamento da máxima potência, utilizam-se os sinais de tensão e corrente de saída do módulo fotovoltaico. Além disso, algumas podem ser aplicadas de forma analógica ou digital.

A desvantagem dos rastreadores executados de forma analógica é que há a necessidade de alteração em hardware caso o método seja mudado. Por outro lado, a utilização de técnicas digitais permite uma mudança instantânea do método apenas com alteração no código fonte, ou seja, no software. [34]

Dentre os métodos mais comuns na literatura, é possível apontar:

- Baseados na Lógica Fuzzy;
- Baseados em Redes Neurais;
- Baseados em Frações da Tensão V_{OC} ;
- Tensão Constante;
- Perturba e Observa (P&O);
- Condutância Incremental.

A técnica a ser explorada com mais detalhes neste trabalho será a Perturba e Observa, uma vez que esta é amplamente difundida na literatura, além de ser bem robusta.

3.5.3 Método Perturba e Observa

A técnica de MPPT Perturba e Observa é a mais utilizada por causa de sua fácil implementação. A explicação está no próprio nome: a técnica é baseada em perturbar a tensão do arranjo em uma direção e observar a potência na

saída do mesmo. Caso o valor da potência cresça, a perturbação continua na mesma direção, e se o contrário ocorrer, a perturbação troca de direção. [26]

O rastreamento é feito considerando-se duas iterações. Na primeira, são lidos os valores de tensão $V(n)$ e de corrente $I(n)$ para o cálculo da potência:

$$P(n) = V(n) \times I(n) \quad (8)$$

A segunda iteração começa com uma pequena perturbação ΔV , onde:

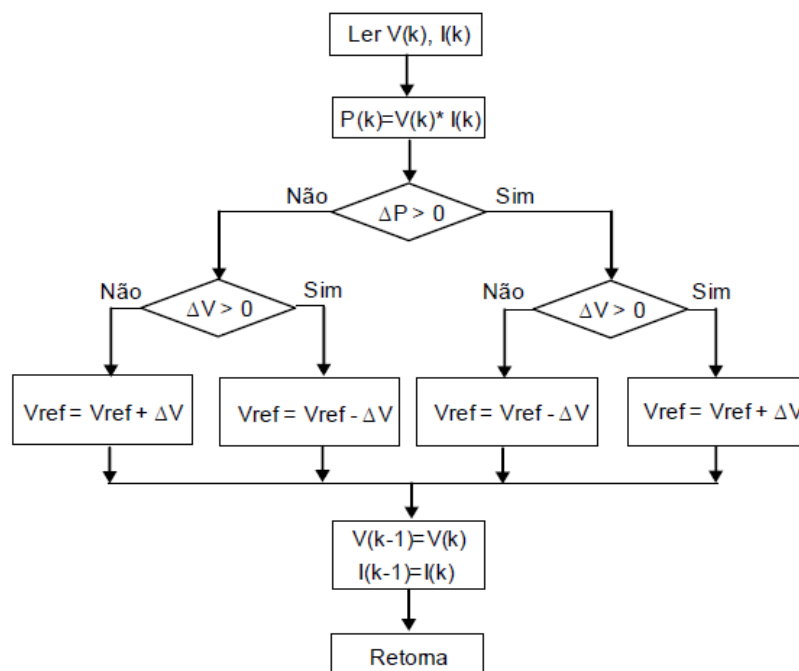
$$\Delta V = V(n) - V(n - \Delta n) \quad (9)$$

Assim, calcula-se uma nova potência ΔP :

$$\Delta P = P(n) - P(n - \Delta n) \quad (10)$$

A partir da análise de ΔP e ΔV , a perturbação continua ou não na mesma direção. A figura 30 representa o método P&O:

Figura 30: Fluxograma da técnica P&O



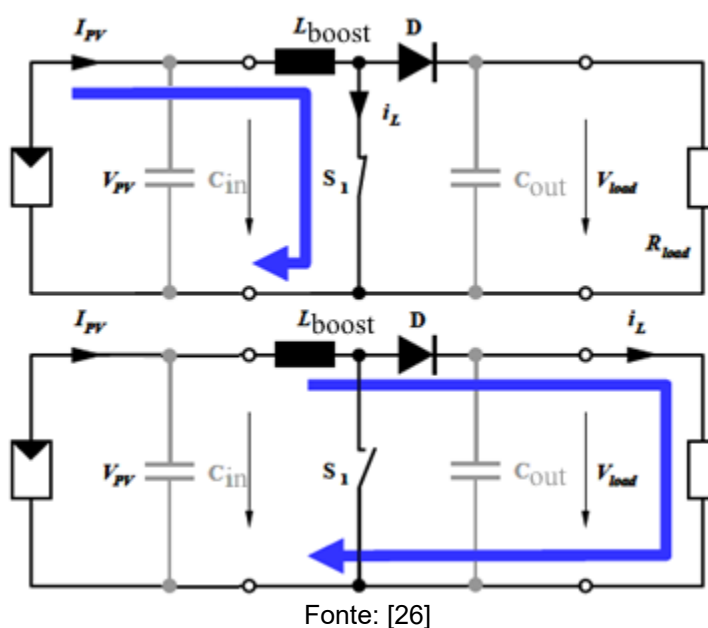
Fonte: [35]

A aplicação desse método de MPPT junto ao uso do conversor CC-CC do tipo Boost tentarão fazer com que o sistema fotovoltaico entregue sempre a máxima potência, além dos níveis corretos de tensão e corrente.

3.5.4 Conversor Boost CC-CC

O conversor CC-CC do tipo Boost é elevador de tensão, ou seja, a tensão em sua saída é maior que a tensão de entrada (sistema fotovoltaico). O circuito representado na figura 31 caracteriza um conversor Boost:

Figura 31: Funcionamento de um conversor Boost



O seu funcionamento pode ser explicado em dois estágios diferentes: com a chave fechada e aberta.

Com a chave fechada, a tensão V_{in} é aplicada ao indutor e o diodo fica reversamente polarizado. Nesse momento, energia é acumulada em no indutor L_{boost} .

No segundo momento, com a chave aberta, a energia armazenada no indutor L_{boost} é transferida para a saída, resultando em duas fontes em descarga, aumentando, assim, a tensão de saída V_{out} . [36]

Para o cálculo de L_{boost} e do capacitor de entrada C_{in} , são utilizadas as seguintes equações [37]:

$$L_{boost} = \frac{V_{in} \times D}{f_{chave} \times \Delta I} \quad (11)$$

$$C_{in} \geq \frac{\frac{P_{in}}{V_{in}} \times D}{f_{chave} \times V_{in} \times Rip_{tensão}} \quad (12)$$

$$D = \left(1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}\right) \quad (13)$$

$$\Delta I = Ripple_{Iadmitido} \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad (14)$$

Onde:

L_{boost} = indutor do conversor Boost (H).

C_{in} = capacitância de entrada (F).

V_{in} = tensão de entrada do Boost (V).

D = razão cíclica de chaveamento, do inglês *Duty Cycle* (adimensional).

ΔI = corrente de entrada com a ondulação desejada (A).

V_{out} = tensão de saída do Boost (V).

$Ripple_{Iadmitido}$ = ondulação admitida na corrente (A).

P_{in} = potência de entrada do boost (W).

O capacitor de saída do conversor Boost é dado pela seguinte equação:

$$C_{out} = \frac{\left(\frac{\sqrt{2} \times \frac{V_{rede}}{V_{out}}}{V_{out}} - \frac{1}{\eta \times V_{in}}\right) \times P_{in}}{4 \times \pi \times f_{rede} \times V_{out} \times Ripple_{Vadmitido}} \quad (15)$$

Onde:

C_{out} = capacitância saída (F).

V_{rede} = tensão da rede (V).

η = rendimento do inversor (adimensional).

$Ripple_{Vadmitido}$ = ondulação admitida na tensão de saída do boost (V).

3.5.4 Controle da Tensão de Entrada do Conversor

Para aplicação desse conversor em um sistema fotovoltaico, a fonte de tensão de entrada terá amplitude variável e deverá ser controlada. Já a tensão de saída do conversor pode ser controlada com a conexão da bateria ou do inversor conectado à rede. [38]

Dessa forma, foi feito um controlador PI de modo empírico que compara a tensão de referência com uma onda triangular a fim de emitir o sinal de abertura e fechamento da chave do conversor.

4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A simulação irá mostrar um arranjo fotovoltaico acoplado a um conversor Boost com o método P&O para garantir o rastreamento da máxima potência. Além disso, mostra que os níveis de tensão na saída do conversor e a potência fornecida pelo módulo estão adequados para alimentar uma carga isolada.

4.1 Sobre o Software MATLAB

O MATLAB (abreviatura para *Matrix Laboratory*) é um software iterativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Essa ferramenta permite a exploração de análises e simulações de modelos matemáticos voltados para diversas áreas, como automação e controle industrial, gerenciamento de risco financeiro, biotecnologia, etc.

Já o Simulink é um ambiente gráfico dentro do MATLAB voltado para a simulação e design de modelos de diversos tipos de sistemas dinâmicos.

Faculdades e universidades em todo o mundo usam MATLAB e Simulink para ensinar e pesquisar em diversas disciplinas técnicas.

4.2 Parâmetros de Simulação

Esta seção irá apresentar todos os parâmetros utilizados para a simulação de um sistema genérico com base na teoria que já foi explicada no capítulo 3.

4.2.1 Parâmetros Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico escolhido para a simulação foi um China Sunergy CSUN250-60M, composto de 60 células do tipo monocristalinas, sendo 6 linhas paralelas de 10 células em série.

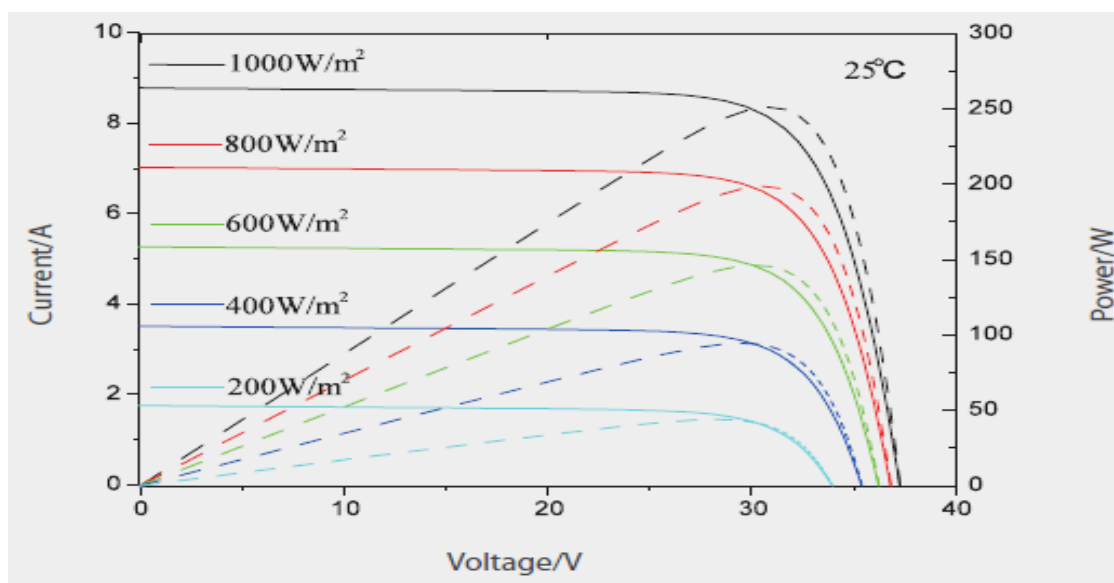
Os parâmetros principais desse módulo em STC estão na tabela 1:

Tabela 1: Parâmetros em STC do catálogo do fabricante

Modelo	CSUN250-60M
Máxima Potência - MPP (W)	250,00
Tolerância	0~3%
Tensão de Circuito Aberto - V_{OC} (V)	37,30
Corrente de Curto-circuito - I_{SC} (A)	8,78
Tensão de Máxima Potência - V_{mp} (V)	30,10
Corrente de Máxima Potência - I_{mp} (A)	8,31
Eficiência do Módulo	15,40%

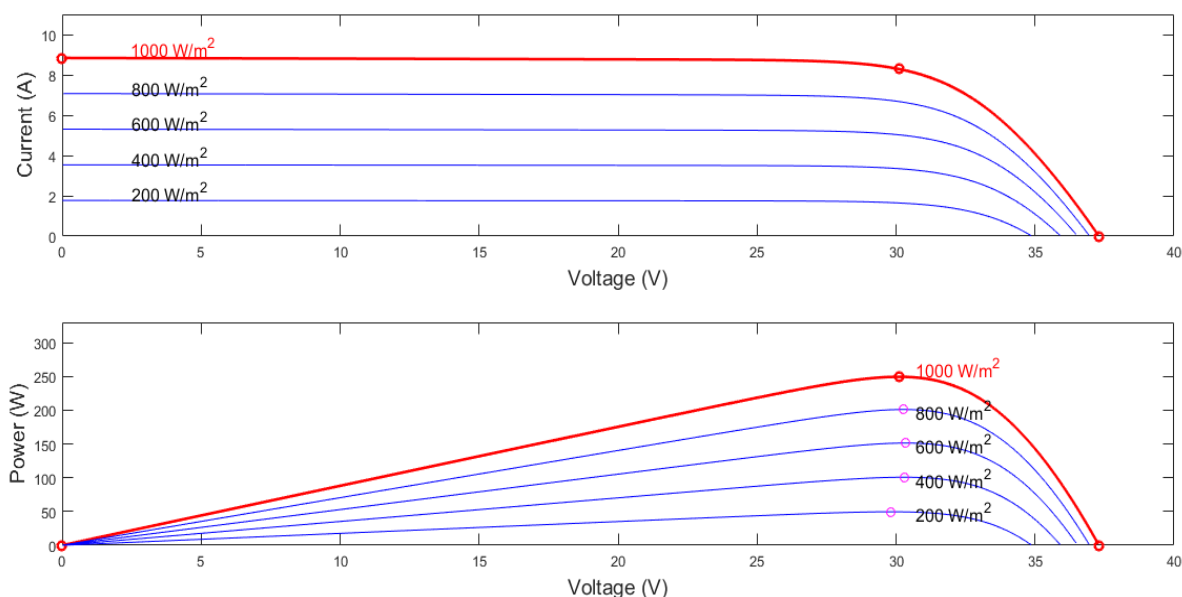
Fonte: Catálogo CSUN

Para mostrar a validade do componente que representa o módulo no MATLAB, são mostrados na figura 32 os gráficos $I \times V$ e $P \times V$ tanto do catálogo do fabricante, quanto aquele gerado no próprio MATLAB na figura 33.

Figura 32: Gráficos $I \times V$ e $P \times V$ para diferentes valores de radiação solar a 25°C do catálogo do fabricante

Fonte: Catálogo CSUN

Figura 33: Gráficos IxV e PxV para diferentes valores de radiação solar a 25°C do modelo do painel disponível no MATLAB



Fonte: Modelo do Módulo CSUN250-60M com gráficos I-V e P-V plotados no MATLAB para temperatura de 25°C.

4.2.1.1 Arranjo dos Dispositivos Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos, que são feitos de associações de células solares, podem ser combinados para formarem conjuntos ou arranjos fotovoltaicos, também denominados de *arrays* na literatura. Esses conjuntos são formados pela associação em série e/ou paralela de painéis. [17]

A partir de diferentes arranjos, é possível construir sistemas fotovoltaicos com diferentes características de saída de tensão e corrente.

Para a simulação nesse trabalho, será considerada uma carga resistiva de potência igual a 1000 W em um sistema isolado.

Logo, será utilizado um arranjo de 4 painéis fotovoltaicos do modelo já apresentado, sendo 1 cadeia de 5 módulos seriais, resultando em uma tensão de 120,4 volts na máxima potência.

As equações a seguir mostram o cálculo de R a partir do arranjo escolhido, para uma saída de 400 volts no conversor Boost:

$$P_{in} = 4 \times MPP = 4 \times 250 = 1000 \text{ W} \quad (16)$$

$$R = \frac{V_{out}^2}{P_{in}} = \frac{400^2}{1000} = 160 \, \Omega \quad (17)$$

A tabela 2 mostra os parâmetros do arranjo fotovoltaico que alimentará a carga resistiva.

Tabela 2: Parâmetros do arranjo fotovoltaico

Número de módulos em série	4
Número de módulos em paralelo	1
V arranjo Máxima Potência	120,4
I arranjo Máxima Potência	8,31
Potência Máxima do Arranjo	1000,52

Fonte: Autora

4.2.2 Parâmetros Conversor Boost

Com base nas equações apresentadas anteriormente e o arranjo fotovoltaico escolhido, é possível definir os valores mínimos do Boost para uma saída de 400 volts na simulação do sistema. Os dados estão na tabela 3:

Tabela 3: Parâmetros do conversor Boost

L boost	4,05E-03	ΔI	4,16
C in $\geq$	9,65E-04	Ripple corrente	0,50
D	0,70	C out	2,81E-04
f chave	5000	V rede	180
V out	400	Rendimento	0,93
V in	120,40	Modulação $\left(\frac{V_{rede}}{V_{out}}\right)$	0,45
P in	1000,52	Vrede	179,61
Ripple tensão	0,01	Frequência rede	60

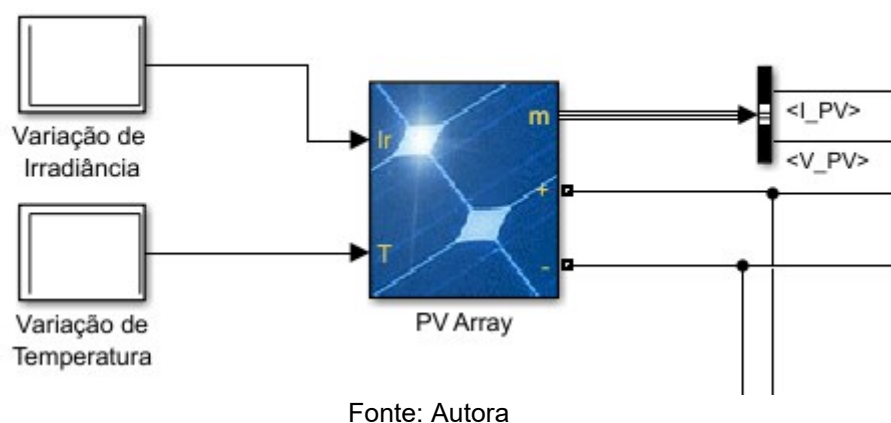
Fonte: Autora

Esses são os valores críticos, mas para a simulação, serão usados valores comerciais de capacitor e indutor.

4.3 Resultados

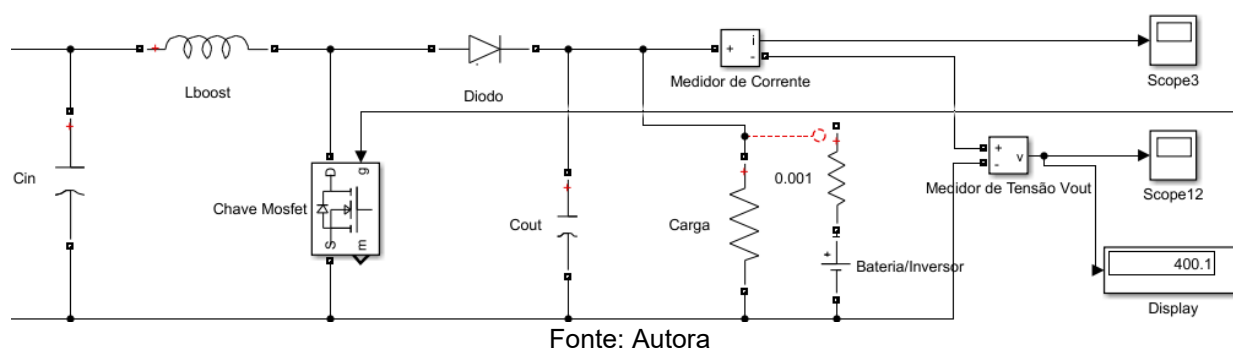
A simulação e os resultados do sistema fotovoltaico e do MPPT aplicado ao conversor CC-CC do tipo Boost serão mostrados nessa seção. Para tal, foram simuladas variações tanto da irradiância incidente sobre o arranjo fotovoltaico quanto da temperatura ambiente, de maneira isolada, a fim de verificar o comportamento da tensão e da potência de saída. As imagens a seguir mostram como isso foi construído no Simulink, começando pela figura 34 com o arranjo fotovoltaico.

Figura 34: Arranjo fotovoltaico Simulink



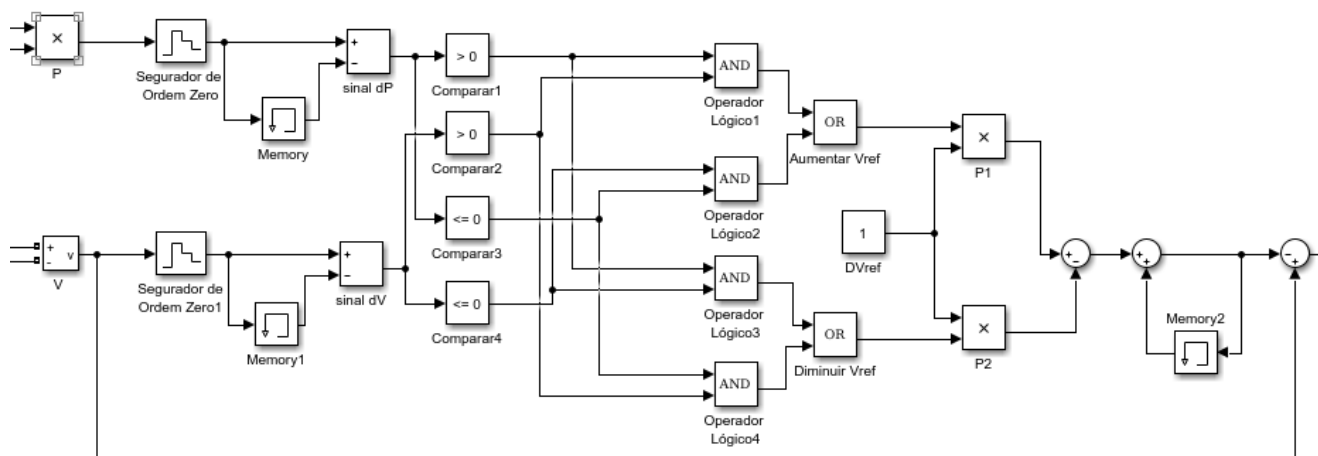
A figura 35 representa o conversor Boost no Simulink, sendo que existe uma fonte CC desconectada, em vermelho, representando uma bateria para sistemas isolados ou mesmo um inversor para ligar o sistema à rede, caso seja conectado. Caso isso aconteça, a tensão de saída é mantida em 400V:

Figura 35: Circuito conversor Boost Simulink



O circuito da figura 36 representa a lógica do MPPT Perturba e Observa mostrada no fluxograma da seção 3.5.3:

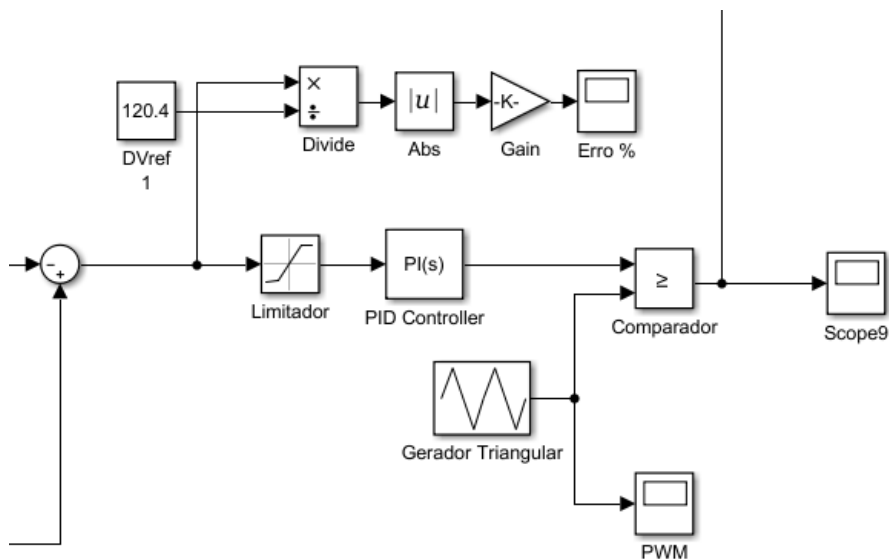
Figura 36: Circuito da lógica do P&O Simulink



Fonte: Autora

O circuito da figura 37 representa o PWM que controla a chave mosfet do conversor:

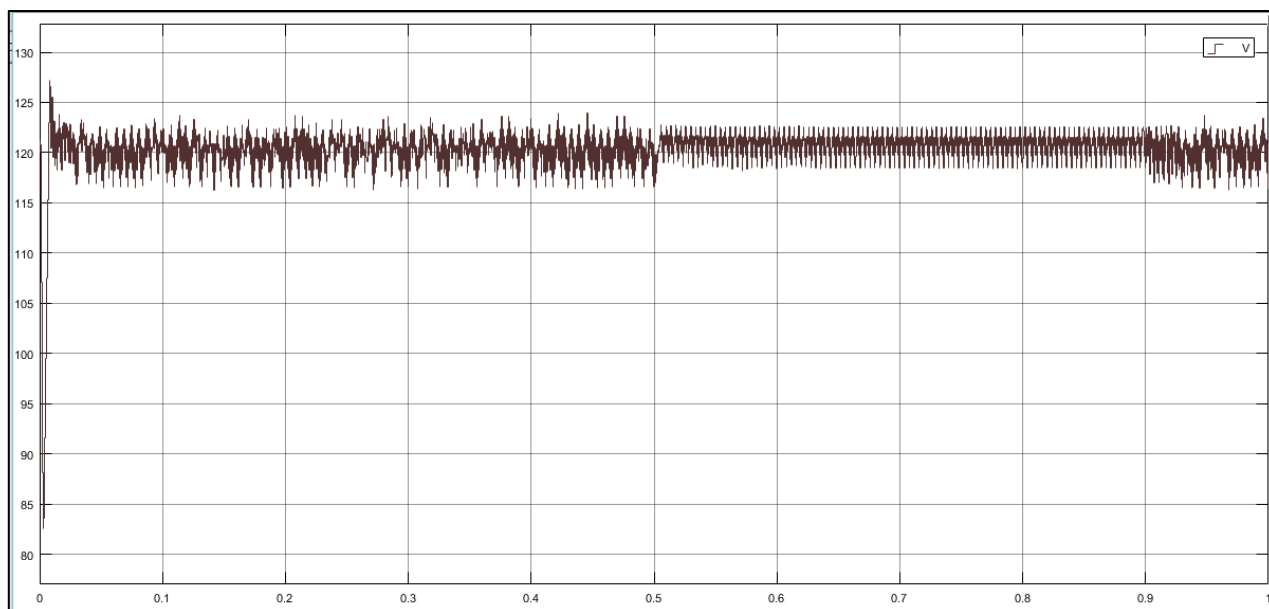
Figura 37: Circuito do controlador PWM do conversor Boost Simulink



Fonte: Autora

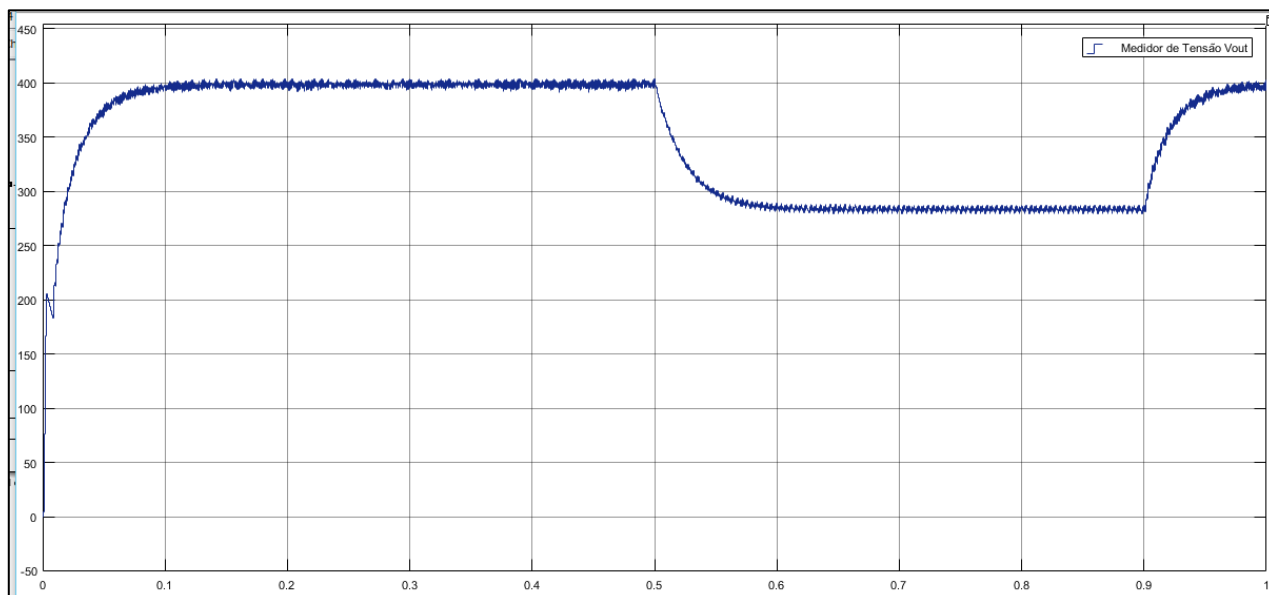
- a) Os gráficos resultantes da simulação para uma temperatura fixa de 25°C e com variação de irradiância de 1000 para 500 W/m² serão mostrados nas figuras 38, 39 e 40.

Figura 38: Tensão de entrada Vin do conversor Boost variação de irradiância



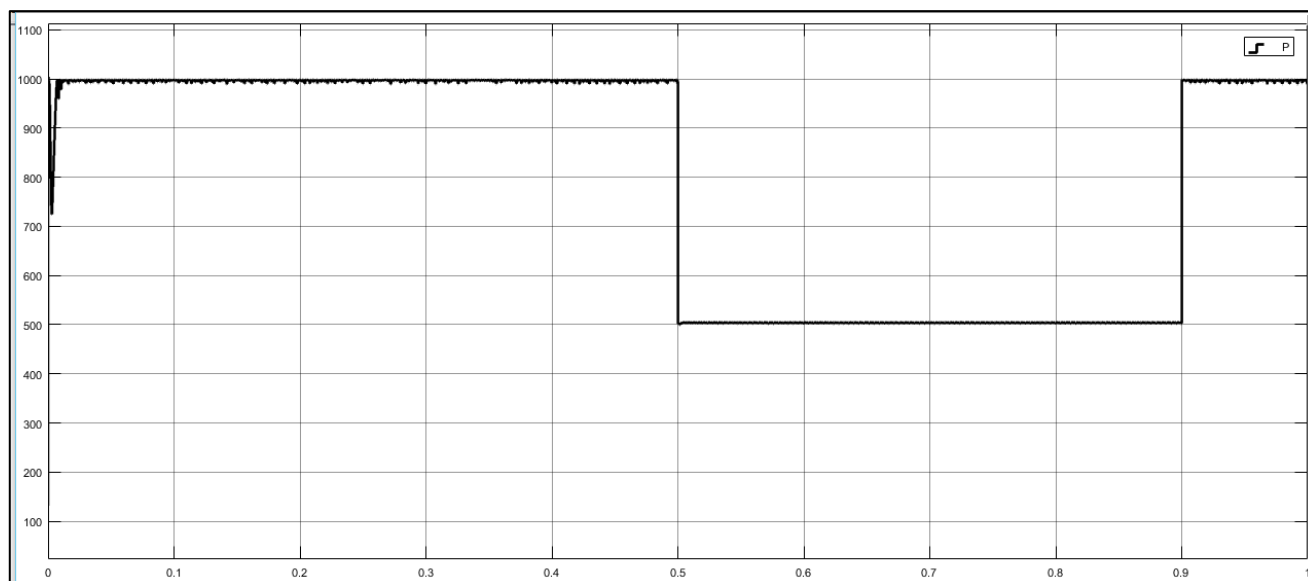
Fonte: Autora

Figura 39: Tensão de saída Vout do conversor Boost variação de irradiância



Fonte: Autora

Figura 40: Potência entregue ao conversor Boost variação de irradiância



Fonte: Autora

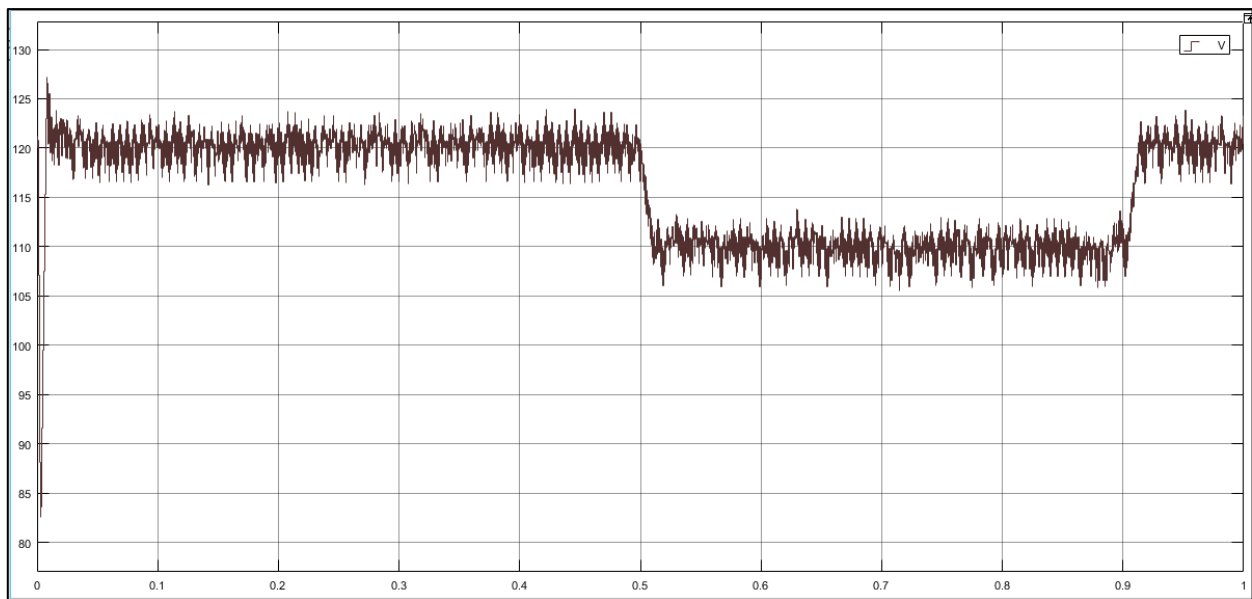
Como visto nas figuras anteriores, o método P&O está funcionando a fim de manter a potência entregue do arranjo fotovoltaico para o conversor em seu máximo valor possível, apesar das condições ambientais simuladas.

Na figura 38, o valor de tensão do arranjo fotovoltaico pouco variou considerando-se a mudança de radiação, já que esta variação afeta principalmente a corrente que o arranjo é capaz de produzir.

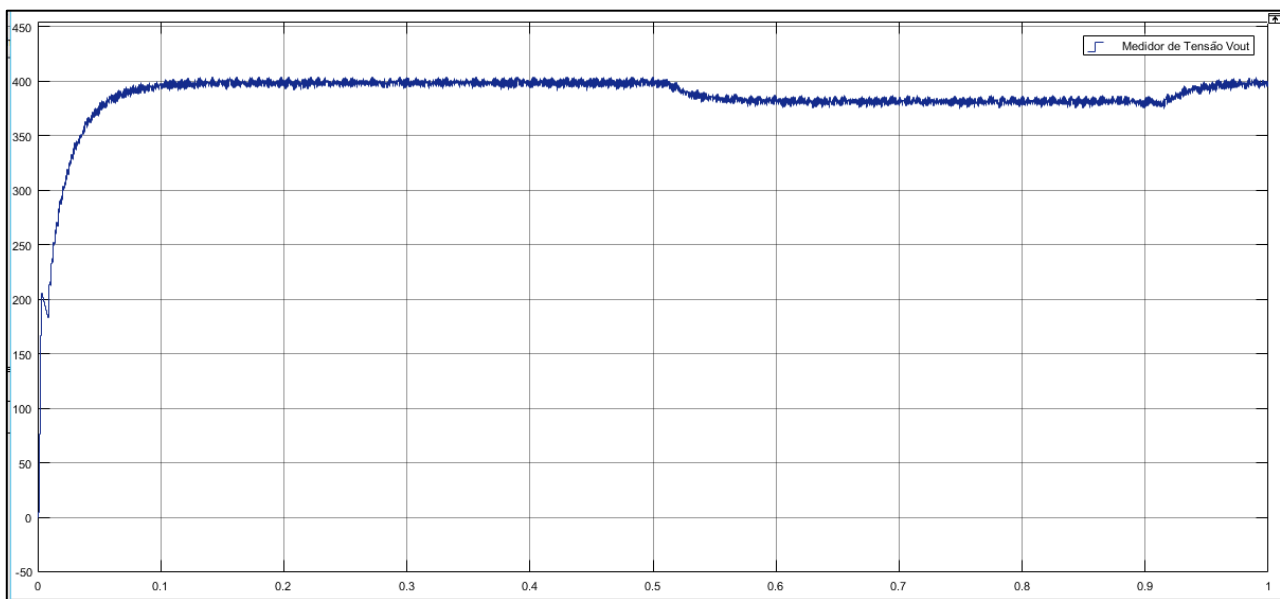
Isso fica evidenciado na figura 39, onde a tensão entregue pelo conversor, que depende da corrente produzida pelos módulos, teve uma queda significativa.

Na figura 40, a potência caiu para metade, pois é diretamente proporcional à variação de irradiância.

- b) Os gráficos resultantes da simulação para uma irradiância fixa de 1000 W/m^2 e com variação de temperatura de 25 para 45°C serão mostrados nas figuras 41, 42 e 43.

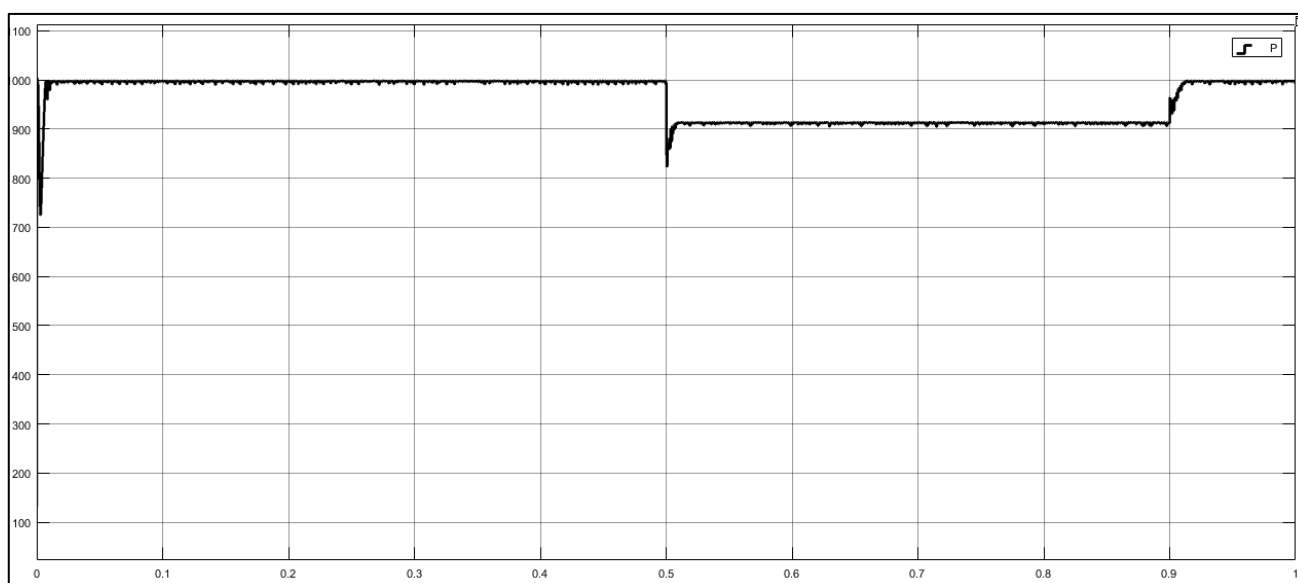
Figura 41: Tensão de entrada Vin do conversor Boost variação de temperatura

Fonte: Autora

Figura 42: Tensão de saída Vout do conversor Boost variação de temperatura

Fonte: Autora

Figura 43: Potência entregue ao conversor Boost variação de temperatura



Fonte: Autora

Na figura 41, o valor de tensão do arranjo fotovoltaico teve maior variação considerando-se que a temperatura tem maior influência nesse valor. É possível observar ainda que com o aumento da temperatura, a tensão diminuiu como esperado.

Na figura 42 é possível observar que a tensão de saída do Boost pouco variou com a diferença de temperatura.

Já na figura 43, houve queda da potência entregue, uma vez que esta é o produto entre a tensão V_{in} , que caiu consideravelmente, e a corrente de saída dos módulos.

Ou seja, como dito anteriormente, para temperaturas mais baixas, a tensão fica mais elevada e, conseqüentemente, a potência.

5 CONCLUSÕES

Países de todo o mundo têm buscado por fontes alternativas de energia a fim de diversificarem sua matriz energética e dependerem menos de combustíveis fósseis, já que esta é uma fonte é finita, apresenta preços voláteis no mercado. A partir do avanço de pesquisas e do desenvolvimento de novas tecnologias, as células fotovoltaicas tem ganhado espaço na geração de energia limpa e renovável. Aliado a isso, incentivos e regulamentação têm atraído consumidores a investirem nessa geração de energia, principalmente no uso doméstico.

Dessa forma, fabricantes e pesquisadores têm trabalhado para aumentarem a eficiência de sistemas fotovoltaicos, como garantir a extração da máxima potência possível dos módulos, desenvolvimento de materiais com maior rendimento na conversão de energia solar em elétrica, melhor dimensionamento dos componentes do sistema, etc.

No caso de um sistema isolado analisado no presente trabalho, foram apresentados os principais conceitos que dizem respeito à geração de energia solar fotovoltaica, métodos para rastreamento da máxima potência dos módulos, com ênfase no Perturba e Observa, juntamente com um conversor CC-CC elevador de tensão do tipo Boost. Com os resultados da simulação no Simulink do programa MATLAB, foi possível verificar o funcionamento desse sistema.

Finalmente, conclui-se que o setor de geração de energia a partir de fontes renováveis, principalmente do Sol, possui grandes oportunidades de crescimento, ainda mais no Brasil, visto que este é um país com características que representam grande capacidade de geração fotovoltaica.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2017: Relatório Síntese - Ano Base 2016**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2017.
- [2] REDACAO. **Tudo sobre a crise energética brasileira e mundial**. 2014. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/tudo-sobre-crise-energetica-brasileira-e-mundial/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- [3] OLIVEIRA, Nielmar de. **Consumo de energia elétrica no país cresce 1,1% em junho e 0,4% no semestre**. 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-08/consumo-de-energia-eletrica-no-pais-cresce-11-em-junho-e-04-no-semester>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- [4] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed. Brasília: Cadernos Temáticos Aneel, 2016.
- [5] RIBEIRO, Amarolina. **"O que é matriz energética?"**; *Brasil Escola*. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-matriz-energetica.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- [6] FERRAZ, Clarice. **O avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil – Boas ou más notícias?** 2016. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/09/o-avanco-da-energia-solar-fotovoltaica-brasil-boas-ou-mas-noticias/30269>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2014.
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (Rio de Janeiro). **O QUE É GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- [9] REAL SOLAR - ENERGIA RENOVÁVEL DO BRASIL (Natal). **OS SISTEMAS**. Disponível em: <<http://real-solar.com/como-funciona.php>>. Acesso em: 21 nov. 2017.
- [10] Gilberto de Martino Jannuzzi, Fabiana K. de O. M. Varella, e Rodolfo Dourado Maia Gomes. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: Panorama da atual legislação**. Outubro 2009. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/26823983/RELATORIO-PROJETO-2a-FINAL-4>> Acesso em: 21 nov. 2017.

[11] SOLAR - ACESSÓRIOS SOLARES (Birigui). **Tipos de Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<http://www.asolar.com.br/sistemas-fotovoltaicos.php>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

[12] ELETROBRAS. **Luz para Todos**. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Luz-para-Todos.aspx>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

[13] RIBEIRO, Tina Bimestre Selles. **Sistemas fotovoltaicos e a experiência do Programa Luz para Todos em São Paulo**. 2015. Tese (Doutorado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Doi:10.11606/T.106.2016.tde-04052016-123333. Acesso em: 21 nov. 2017.

[14] VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. 2. ed. Campinas: Saraiva, 2015. 224 p.

[15] GUIMARÃES, Ana Paula Cardoso. **Estimativa de Parâmetros da Camada Atmosférica para Cálculo da Irradiação Solar Incidente na Superfície Terrestre**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[16] ARTFILM: A LUZ NATURAL E SUA ENTRADA PELAS PORTAS E JANELAS DE CASAS. A LUZ NATURAL E SUA ENTRADA PELAS PORTAS E JANELAS DE CASAS. Disponível em: <<http://www.artprotect.com.br/art-film.php>>. Acesso em: 26 set. 2017.

[17] VILLALVA, Marcelo Gradella. **Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2017. 268 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010

[18] PENA, Rodolfo F. Alves. **Massas de Ar**. Em Geografia Física. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/massas-ar.htm>>. Acesso em: 26 set. 2017.

[19] LISBOA, Daniela da Silva. **DIMENSIONAMENTO DE UM SFVCR: ESTUDO DE CASO DO PRÉDIO CENTRAL DO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ – PA**. 2017. 1 v. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2010.

[20] O SOL: fonte de energia. Energia Heliotérmica. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-sol-fonte-de-energia>>. Acesso em: 04 out. 2017.

[21] COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais, 2012.

[22] FLANDOLI, Fabio. **Conceitos básicos de energia solar**. 2017. Programa Eletricista Consciente. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/1-introducao-e-conceitos-basicos-de-energia-fotovoltaica/conceitos-basicos-de-energia-solar/>>. Acesso em: 10 out. 2017.

[23] MARTINO, Lulis. **Quando o dia é igual a noite!!!** 2016. Disponível em: <<http://lulismartino.blogspot.com.br/2016/09/quando-o-dia-e-igual-noite.html>>. Acesso em: 17 out. 2017.

[24] FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. **Movimentos da Terra**. Disponível em: <<http://escolakids.uol.com.br/movimentos-da-terra.htm>>. Acesso em: 17 out. 2017.

[25] ENERGIA SOLAR: Funcionamento. Funcionamento. SunEnergy - Energia Fotovoltaica. Disponível em: <<http://sunenergy.eco.br/energia-solar/#funcionamento>>. Acesso em: 17 out. 2017.

[26] SILVA, Leonardo Rosenthal Caetano. **ANÁLISE DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) PARA APLICAÇÃO EM ARRANJOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**. 2017. 187 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015

[27] PASSOS, Fabiano. **SEGUIDOR SOLAR - TRACKER: VANTAGENS E DESVANTAGENS PARTE 1**. Portal Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/seguidor-solar---tracker-vantagens-e-desvantagens-parte-1.html>>. Acesso em: 21 out. 2017.

[28] ENERGIA FOTOVOLTAICA. Fotovoltec - Solar Engineering. Disponível em: <<http://www.fotovoltec.com.br/front/tecnologia>>. Acesso em: 21 out. 2017.

[29] TYPES of photovoltaic cells. 2016. Solar Energy. Disponível em: <<https://solar-energy.technology/photovoltaic-solar-energy/types-photovoltaic-cells>>. Acesso em: 22 out. 2017.

[30] TIPOS DE PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO. Portal Solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 22 out. 2017.

[31] FERRAZZA, Francesca. **Tecnologie fotovoltaiche**. 2008. Enciclopedia della Scienza e della Tecnica. Disponível em: <[http://www.treccani.it/enciclopedia/tecnologie-fotovoltaiche_\(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica\)/>](http://www.treccani.it/enciclopedia/tecnologie-fotovoltaiche_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/>). Acesso em: 22 out. 2017.

[32] FERREIRA, Ricardo. **PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: Curvas de Funcionamento**. 2008. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee03195/Carro_Solar/PaineisCurvasdeFuncionamento.html>. Acesso em: 23 out. 2017.

- [33] MÓDULOS Fotovoltaicos - Características Elétricas. Solar Brasil. Disponível em: <<http://www.solarbrasil.com.br/blog-da-energia-solar/135-modulos-fotovoltaicos-caracteristicas-eletricas>>. Acesso em: 29 out. 2017.
- [34] COELHO, Roberto Francisco. **ESTUDO DOS CONVERSORES BUCK E BOOST APLICADOS AO RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**. 2017. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [35] SEGUEL, Júlio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2017. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [36] POMILIO, José Antenor. **Pré-reguladores de Fator de Potência**. 2016. Capítulo 03. Disponível em: <<http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/pfp>>. Acesso em: 08 nov. 2017.
- [37] BARBI, Ivo. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 2006. Instituto de Eletrônica de Potência – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [38] OLIVEIRA JÚNIOR, Cláudio José de. **UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE INVERSORES SOLARES COM DUAS ENTRADAS DE MPPT INDEPENDENTES E CAPACIDADE DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM CONDIÇÕES DE SOMBREAMENTO PARCIAL**. 2017. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.