

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

WAGNER TURCHIELO GRUNDEMANN

**MPPT PERTURBA E OBSERVA
APLICADO AO CONVERSOR BOOST**

**Alegrete
2017**

WAGNER TURCHIELO GRUNDEMANN

**MPPT PERTURBA E OBSERVA APLICADO AO
CONVERTOR BOOST**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Giovani Guarienti
Pozzebon

Alegrete
2017

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

G889m Grundemann, Wagner Turchielo
MPPT PERTURBA E OBSERVA APLICADO AO CONVERSOR BOOST /
Wagner Turchielo Grundemann.
61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2017.
"Orientação: Giovani Guarienti Pozzebon".

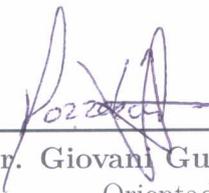
1. Método de rastreamento de máxima potência Perturba e Observa
- . 2. Energia solar fotovoltaica. I. Título.

WAGNER TURCHIELO GRUNDEMANN

MPPT PERTURBA E OBSERVA APLICADO AO CONVERTOR BOOST

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 29 de novembro de 2017
Banca examinadora:



Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo Hahn Durgante
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida e por ter me dado forças para enfrentar os desafios que ela tem me apresentado.

Gostaria de agradecer também aos meus pais, Airton e Fátima Miguelina, pelo amor, carinho, incentivo e o apoio incondicional que me deram durante toda a vida. E ao meu irmão Jessé, pelo apoio, incentivo e amizade que possuímos desde a infância.

Agradeço também a minha namorada Bianca, pelo amor, companheirismo e paciência nos momentos de incertezas e angustias.

Grato também aos demais familiares, que sempre me apoiaram e incentivaram.

Sou grato também, a todos os amigos que tenho e fiz durante minha jornada acadêmica, em especial, Ângelo, Cauã, Matheus e meus colegas de apartamento, que dividiram muitos momentos de estudo, angustia e também de felicidade, e de todos os que de uma maneira ou outra me auxiliaram na construção deste trabalho.

"O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso sem que se perca o entusiasmo".
(Winston Churchill.)

RESUMO

Este trabalho apresenta, o estudo e simulação de um arranjo fotovoltaico de oito painéis *CanadianCS6K – M*, ligados em série até uma carga, em que é aplicado o método rastreador de máxima potencia, perturba e observa (*P&O*) no conversor de potência *CC – CC BOOST*. São apresentados os cálculos para a determinação dos parâmetros do conversor, bem como a modelagem física do painel utilizando a ferramenta do software *PSIM® physical – model*. A simulação é feita com, quatro tipos de entradas, constante, senoidal, rampa e quadrada, já a temperatura com entradas constante e quadrada. Os níveis de irradiação testados no arranjo, variam de $300 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$ e os de temperatura, de $25^{\circ}C$ a $30^{\circ}C$. São exibidas as formas de onda, de potencia interna do *PV*, potência produzida com o método e também a potência na carga, além das formas de onda de tensão e corrente de cada entrada. Essas apresentam ótimos resultados, com tempo de convergência médio em torno de $0,2s$, além de oscilações médias de tensão de $4,5V$ e de corrente de $0,15A$.

Palavras-chave: PSIM, conversor *CC – CC*, perturba e observa, fotovoltaico, irradiação, temperatura.

ABSTRACT

This work presents the study and simulation of a photovoltaic arrangement of eight *CanadianCS6K – M* panels, connected in series to a load, in which the maximum power tracer, disturbs and observes (*P&O*) in the power converter *CC – CC BOOST* is applied. Calculations for the determination of the parameters of the converter, as well as the physical modeling of the panel using the software tool *PSIM® physical – model*. The simulation is done with four types of inputs, constant, sinusoidal, ramp and square, and the temperature with constant and square inputs. The irradiance levels tested in the arrangement vary from $300 \frac{W}{m^2}$ to $1000 \frac{W}{m^2}$ and temperature from $25^{\circ}C$ to $30^{\circ}C$, where the waveforms are shown, the internal power of the *PV*, the power produced with the method and also the power in the load, besides of the voltage and current waveforms of each input. These have excellent results, with average convergence time around $0.2s$, in addition to average voltage oscillations of $4.5V$ and current of $0.15A$. **Key-words:** PSIM, converter *CC – CC*, disturb and observe, photovoltaic, irradiation, temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perspectiva de Crescimento da Geração Distribuída.	22
Figura 2 – Crescimento global de energia solar.	23
Figura 3 – Perspectiva de Mercado da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.	24
Figura 4 – Variação da Radiação Solar no Brasil.	24
Figura 5 – Preços Médios de Leilões de Geração por Fonte.	25
Figura 6 – Funcionamento de um PWM.	28
Figura 7 – Conversor CC Boost.	29
Figura 8 – Formas de Onda Conversor Boost.	30
Figura 9 – Inversor VSC.	31
Figura 10 – Exemplo <i>PWM</i> Inversor.	31
Figura 11 – Circuito Elétrico Equivalente.	32
Figura 12 – Curvas Característica de uma Célula Fotovoltaica Qualquer.	34
Figura 13 – Variação da Irradiação a Temperatura Constante.	34
Figura 14 – Variação da Tensão em Função da Temperatura.	35
Figura 15 – Operação com e sem MPPT.	37
Figura 16 – MPPT Tensão Constante com Variação na Temperatura.	37
Figura 17 – MPPT Tensão Constante com Variação na Irradiação.	38
Figura 18 – Alto Passo na Razão Cíclica.	39
Figura 19 – Baixo Passo na Razão Cíclica.	39
Figura 20 – Algoritmo P&O.	40
Figura 21 – Curva da Potência e da Derivada da Potência em Relação a Derivada da Tensão.	41
Figura 22 – Fluxograma do Método Condutância Incremental	42
Figura 23 – Curvas $I \times V$ com Variação na Temperatura e Irradiação.	44
Figura 24 – Parâmetros do Painel Adicionados na Ferramenta.	45
Figura 25 – Circuito Utilizado na Modelagem do Conversor.	47
Figura 26 – Resistência em Função da Potência	47
Figura 27 – Circuito Simulado.	48
Figura 28 – Potência de Referência do Painel e Potência Através do MPPT	49
Figura 29 – Formas de Onda de Tensão e Corrente Provenientes do Painel	50
Figura 30 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga	50
Figura 31 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Senoidal	51
Figura 32 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Senoidal	51
Figura 33 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Senoidal.	52
Figura 34 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Rampa.	53
Figura 35 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Rampa.	53
Figura 36 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Rampa.	54

Figura 37 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Quadra- drada.	55
Figura 38 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Quadrada.	55
Figura 39 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Quadrada. .	56
Figura 40 – Sinais de Saída do Bloco MPPT e Chaveamento do MOSFET	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características Paineis <i>CanadianCS6K – 275</i>	43
Tabela 2 – Parâmetros do Painel Simulados.	44
Tabela 3 – Parâmetros do Arranjo Fotovoltaico	45
Tabela 4 – Especificações Projeto Conversor BOOST.	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Energia solar no mundo	23
2.2	Energia fotovoltaica no Brasil	24
2.3	Sistemas fotovoltaicos	26
2.3.1	Sistemas de geração isolados da rede	26
2.3.2	Sistemas híbridos	26
2.3.3	Sistemas ligados a rede	26
2.3.4	Geração centralizada	27
2.3.5	Geração distribuída	27
2.4	Conversores de potência	27
2.4.1	Conversor Boost	28
2.4.2	Inversor CC-CA	29
2.5	Circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica	32
2.6	Curvas características	33
2.6.1	Variação da potência em função a temperatura e da irradiação	33
2.7	Métodos seguidores de máxima potência	36
2.7.1	Método da tensão constante	36
2.7.2	Método perturba e observa (P&O)	38
2.7.3	Condutância incremental	40
3	DESENVOLVIMENTO	43
3.1	Metodologia	43
3.1.1	Parâmetros Conversor BOOST.	44
3.1.2	Análise em Malha Aberta do Circuito	46
3.2	Simulação e resultados no software PSIM®	48
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	Referências	59

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica vem como uma alternativa renovável e de baixo impacto ambiental a métodos convencionais de geração, tais como a queima de combustíveis fósseis e grandes centrais hidrelétricas. Por apresentar diversas vantagens, este tipo de geração tem crescido exponencialmente nos últimos anos, tanto no mundo como no Brasil. (ASSOCIATION et al., 2013), (ANEEL, 2008).

A geração fotovoltaica no Brasil, vem sendo impulsionada por incentivos governamentais e diversas pesquisas na área, visto que conta com um dos melhores índices de irradiação solar do mundo. Um dos incentivos é o *ProGD*, que foi lançado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2015, esse programa tem como objetivo aumentar a geração de energia distribuída no país, ou seja geração de energia pelo consumidor final. A geração distribuída além de proporcionar uma economia para os consumidores, também proporciona benefícios para o sistema elétrico do país, pois ajuda a equilibrar e aliviar o sistema de distribuição e transmissão de energia.

Pelos estudos do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, as previsões são animadoras, este prevê que até 2050 18% dos domicílios contarão com geração de energia fotovoltaica, representando 13% do consumo residencial (MME, 2016). A Figura 1, apresenta a perspectiva de crescimento, da capacidade de geração distribuída no Brasil.

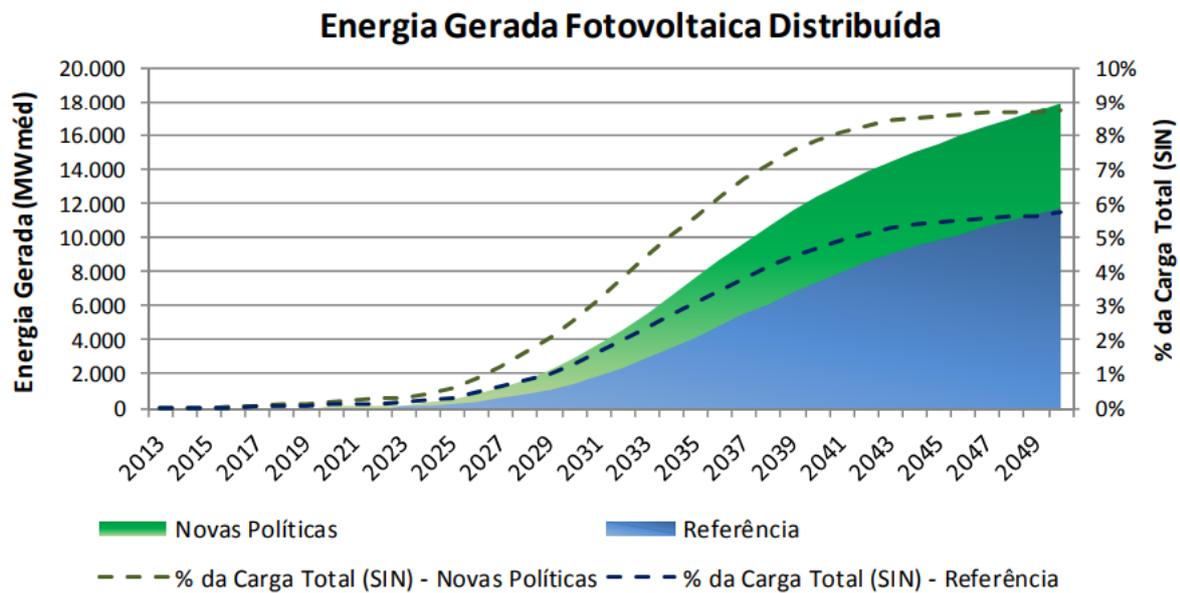
Como nota-se na Figura 1, existem dois cenários, um em que novas políticas e incentivos realizados pelo governo (*Verde*), e outra de referência atual (*Azul*). Mesmo no menor cenário a potência instalada, chega perto dos 6% da carga total do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2050, já no maior cenário a potência instalada chega perto dos 10% da carga total do SIN em 2050. Portanto, verifica-se que nas próximas décadas a geração e energia fotovoltaica, será uma das mais importantes fontes energia renováveis do País (EPE, 2014).

Além disto, vale-se destacar a melhora significativa na tecnologia e manipulação dos materiais semicondutores, principalmente o silício, o que contribuiu muito para o aumento do rendimento das células fotovoltaicas, deve-se também atrelar a isso o desenvolvimento da eletrônica de potência, visto que esta é a ferramenta utilizada para processar a energia gerada.

A eletrônica de potência, é utilizada para alterar os níveis de tensão e corrente com objetivo de alimentar uma determinada carga, essa alteração de parâmetros se dá por circuitos chamados de conversores de potência. Na geração fotovoltaica, os conversores são alocados entre o painel fotovoltaico e a carga, com o objetivo não só de manter adequada a alimentação da carga, mas também para fazer com que o módulo fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, onde se consegue extrair a máxima potência gerada. Por esta característica esses circuitos são chamados de rastreadores de máxima potência.

Neste trabalho, são abordados os conceitos de geração fotovoltaica, e dos circuitos rastreadores de máxima potência, bem como os métodos mais utilizados na literatura.

Figura 1 – Perspectiva de Crescimento da Geração Distribuída.



Fonte: EPE (2014)

Adicionalmente, foram realizadas simulações no software *PSIM*, de um circuito rastreador de máxima potência, utilizando o conversor *BOOST*.

O capítulo 2, mostra um panorama geral da geração fotovoltaica no Brasil e no mundo, posteriormente uma breve análise dos tipos de geração fotovoltaica, uma revisão dos principais conversores de potência, uma rápida revisão do modelo elétrico da célula fotovoltaica, um estudo das curvas características dos painéis PV e por fim uma análise dos principais métodos buscadores de máxima potência.

O capítulo 3, apresenta a modelagem do conversor *CC-CCBOOST*, para atender a um conjunto de oito painéis *CanadianCS6K - M*, ligados em série até uma carga, será utilizada a técnica de rastreamento de máxima potência perturbado e observado aplicado ao conversor de potência.

No capítulo 4, são mostradas as conclusões a respeito das simulações, bem como da comparação entre as formas de onda obtidas e as suas respectivas análises.

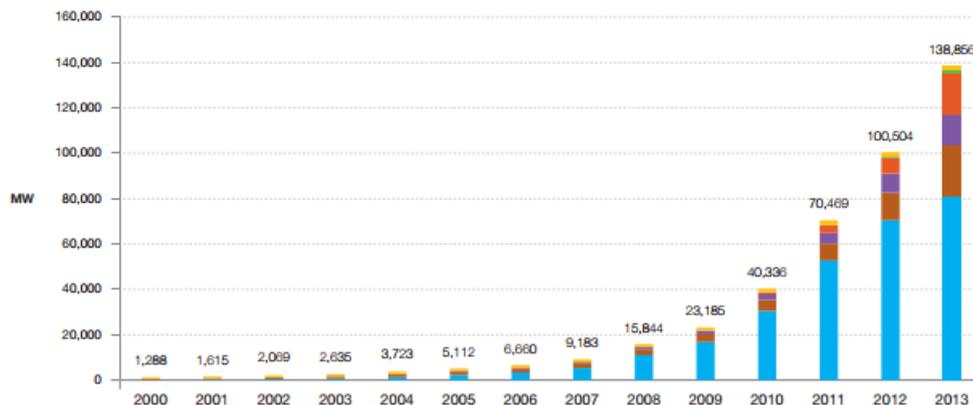
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia solar no mundo

Com o aumento da demanda, de energia mundial e com uma possível futura falta dos combustíveis fósseis aliado com a preocupação ambiental sobre estes, torna-se imprescindível a busca por fontes renováveis de energia, tal como a energia solar fotovoltaica. Esta vem sendo impulsionada por meio de incentivo econômico e de pesquisas relacionadas a área, assim a capacidade de geração instalada cresceu e deve continuar crescendo no decorrer dos próximos anos (ASSOCIATION et al., 2013).

Como nota-se pelo gráfico na Figura 2, ao final do ano de 2009 a potência instalada em todo mundo não era mais que 23 GW passado um ano a potência quase que dobrou atingindo os 40 GW. No final de 2012 atingiu os 100 GW e no final do ano seguinte atingiu um valor próximo a 140 GW de potência fotovoltaica instalada globalmente (ASSOCIATION et al., 2013).

Figura 2 – Crescimento global de energia solar.



Fonte: Association et al. (2013)

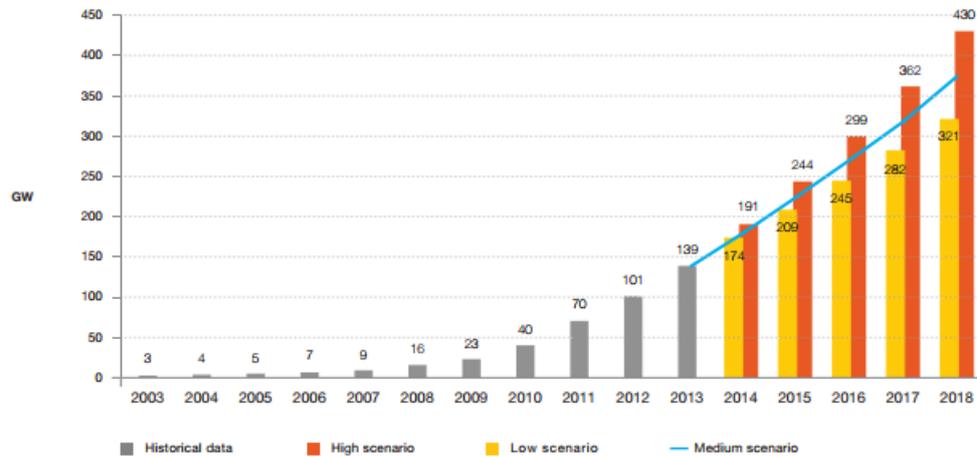
A Europa continua na vanguarda da energia solar com capacidade instalada de 81,5 GW, porém em porcentagem diminuiu de 70% em 2012 para 59% no último levantamento, isto se deve principalmente ao rápido crescimento desta forma de energia nos países da Ásia-Pacífico, que representam 40,6 GW e a América com parcela de 13,7 GW de capacidade instalada (ASSOCIATION et al., 2013).

Em um estudo a EPIA (*European Photovoltaic Industry Association*) considerou dois cenários possíveis para os próximos anos como poder ser visto na Figura 3.

Cenário baixo em (*Amarelo*), neste se considerou uma capacidade instalada anualmente variando de 35 a 39 GW, onde os mercados europeu em baixa e um mercado crescente nos países emergentes. Cenário Alto (*Laranja*), neste mercado europeu crescerá e em torno de 17 GW, nos cinco anos consecutivos, juntamente com um crescimento

mercados emergentes.

Figura 3 – Perspectiva de Mercado da Energia Solar Fotovoltaica no Mundo.

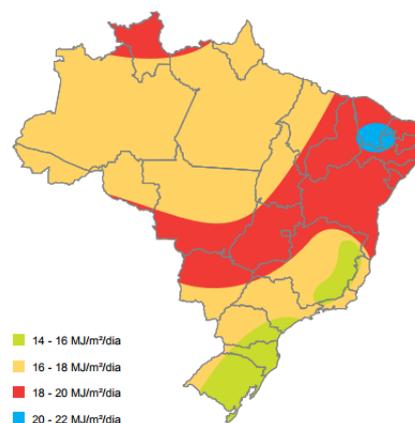


Fonte: Association et al. (2013)

2.2 Energia fotovoltaica no Brasil

O Brasil apresenta um enorme potencial de geração de energia a partir do sol, pois a incidência de radiação é muito alta, podendo ser aproveitado em todas as regiões do país, sendo que o nordeste se destaca com um potencial comparável com as melhores regiões do mundo para esta prática, como pode ser visto na Figura 4 (ANEEL, 2008).

Figura 4 – Variação da Radiação Solar no Brasil.



Fonte: ANEEL (2008)

Apesar desta tecnologia ainda estar a passos lentos no país, e até agora ser pouco relevante na matriz energética, salvo em sistemas isolados em áreas rurais onde a rede

de distribuição está muito distante, onde torna-se inviável economicamente a ligação da mesma. Existem políticas que estão tentando alavancar essa tecnologia no país, entre os anos de 2014 e 2015, houve leilões referentes a contratação de energia solar de geração pública centralizada na qual, foram contratados um total de 2.653 MW com um valor de mercado bem competitivo em relação as outras fontes como pode ser visto na figura 5. O começo da geração está previsto para os anos de 2017 e 2018 (ANEEL, 2008; MME, 2016).

Figura 5 – Preços Médios de Leilões de Geração por Fonte.



Fonte: MME (2016)

Superada apenas pelo cavaco e o carvão mineral em dólares, a energia solar está entrando no mercado com um valor bem competitivo, o que deve ajudar a impulsionar o crescimento e investimentos na mesma (MME, 2016).

Para encorajar o crescimento a energia solar no Brasil, existem uma serie de políticas de estímulos para o setor tais como:

- ProGD: Lançado pelo Ministério de minas e energia no final de 2015, o programa de desenvolvimento da geração distribuída de energia elétrica, tendo este como principal objetivo aprofundar o estímulo de geração pelos consumidores finais (residencial, comercial, indústria e agropecuária), com energias renováveis principalmente a solar.
- Isenção de impostos como o IPI, ICMS, PIS e COFINS, na geração distribuída.
- Inclusão no programa mais alimentos possibilitando financiamento a juros mais baratos.
- Apoio do BNDS, a partir do final de 2015 o banco foi autorizado a liberar financiamentos para a geração distribuída em escolas e hospitais (MME, 2016).

Previsões do PDE 2024 - (Plano Decenal de Expansão de Energia), que até o ano de 2024 a capacidade instalada seja de 8.300 MW, sendo 7.000 MW de geração centralizada e 1.300 MW de geração distribuída (MME, 2016).

Ainda em estudos do Plano Nacional de Energia - PNE 2050, prevê que até 2050 18% dos domicílios contarão com geração de energia fotovoltaica, representando 13% do consumo residencial (MME, 2016).

2.3 Sistemas fotovoltaicos

Se conhece por sistema fotovoltaico, um conjunto formado por um ou mais painéis fotovoltaicos que são utilizados para a geração de energia elétrica através da radiação do solar, onde estes podem ser separados em, isolados e os que são conectados à rede, nos dois casos estes podem operar só com a fonte solar, ou em combinação com outras fontes energéticas e então chamados de híbridos. Variando conforme a disponibilidade energética de cada região (PINHO; GALDINO, 2014; VILELA, 2011).

2.3.1 Sistemas de geração isolados da rede

Estes sistemas, geralmente são utilizados onde a rede de distribuição é inexistente, em áreas rurais e locais isolados. Esses sistemas são muito variados dependendo da carga a ser alimentada (CC ou CA) e/ou com armazenamento ou não de energia em bancos de baterias (PINHO; GALDINO, 2014):

- Carga puramente CC de baixa potência com ou e sem armazenamento de energia, é o sistema mais simples aonde a carga é conectada na saída do painel fotovoltaico, é usual utilizar um método seguidor de máxima potência (MPPT) para melhorar o uso da energia e um controlador de carga, quando houver banco de baterias com o objetivo de aumentar a vida útil do mesmo.
- Carga CA com ou sem armazenamento de energia. Consiste de um arranjo fotovoltaico, um estágio com conversores CC/CC para adequar os níveis de tensão juntamente com MPPT, controlador de carga quando houver banco de baterias, e de um inversor tendo a finalidade de alternar a corrente contínua em corrente alternada (PINHO; GALDINO, 2014; VILELA, 2011).

2.3.2 Sistemas híbridos

São sistemas de alta complexidade que geralmente formam micro redes de corrente alternada, em lugares em que a rede elétrica é inexistente, em que se utiliza mais de uma forma de geração de energia em conjunto, como grupo de geradores diesel, aerogeradores, painéis fotovoltaicos e etc (PINHO; GALDINO, 2014; VILELA, 2011).

2.3.3 Sistemas ligados a rede

São sistemas que não precisam necessariamente de banco de baterias, visto que todo a energia gerada pelo painel fotovoltaico é entregue a rede. Consiste de um arranjo de

painéis fotovoltaicos, um conversor estático CC com MPPT, um inversor de frequência e alguns sistemas de filtragem de harmônicas para que a energia respeite as normas vigentes de qualidade.

2.3.4 Geração centralizada

A geração centralizada ou GC é a forma mais tradicional de geração de energia elétrica, é um sistema que emprega uma grande fonte de geração de energia. São exemplos grandes usinas hidroelétricas e termoeletricas, por suas dimensões e recursos específicos para operar, estas normalmente se localizam próximas de rios ou fontes de energia, ficando assim longe dos grandes centros consumidores, o que torna indispensável o uso de linhas de transmissão, subestações transformadoras e redes de distribuição (BOEFF, 2013).

2.3.5 Geração distribuída

Geração distribuída é a geração no local de consumo ou próximo ao local de consumo final, tal como residencial, comercial, geralmente essa geração é proveniente de pequenos arranjos de painéis fotovoltaicos e pequenos geradores eólicos (BOEFF, 2013).

Em 2012 a ANEEL aprovou as resoluções normativas nº482 e nº517, nestas são estabelecidas as conjecturas gerais para a microgeração de energia elétrica, como também o sistema de compensação de energia elétrica. Ou seja a energia excedente produzida e entregue a concessionária, esta então um vira saldo e posteriormente é descontada da fatura de energia elétrica, sendo que os créditos gerados são válidos por 60 meses (MME, 2016; BOEFF, 2013).

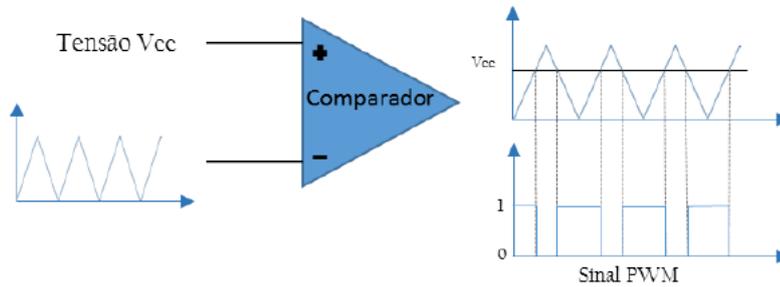
2.4 Conversores de potência

Em eletrônica de potência, algumas aplicações requerem que alguns parâmetros, de um circuito sejam modificados, tais como tensão corrente e potência. Em algumas aplicações, também é necessário que se mude a natureza da energia, alterando entre corrente contínua e alternada. Os circuitos que fazem estas mudanças são chamados conversores e ou inversores de potência, eles são compostos de elementos armazenadores de energia, tais como capacitores, indutores, diodos e etc. Possuem uma ou mais chaves semicondutoras que regulam o fluxo de potência entre um circuito e outro.

A chave semicondutora necessita de um tipo de controle para que regule o fluxo de potência, existem várias técnicas de modulação, porém a mais utilizada é a modulação por largura de pulso (*PWM*) com frequência fixa para o chaveamento da chave. O funcionamento do PWM se dá pela comparação de uma onda de referência V_{cc} , e o sinal de uma onda do tipo triangular, como pode ser visto na [Figura 6](#).

Quando o sinal da onda de referência V_{cc} é maior que o da triangular o valor do sinal é um ou seja chave conduzindo, quando o valor da triangular é mais alta o resultado

Figura 6 – Funcionamento de um PWM.



Fonte: [Ribeiro \(2015\)](#)

é zero e a chave abre, assim pode-se dizer que o PWM é um sistema binário que fica variando de zero a um.

Esta modulação é aplicada em conversores de potência CC-CC, já nos inversores a modulação se dá de forma analógica, porém a onda de referência é uma forma senoidal como pode ser visto na [subseção 2.4.2](#)

2.4.1 Conversor Boost

O Boost é um conversor CC-CC, também conhecido por ser um elevador de tensão, pois ele fornece na saída uma tensão controlada maior ou igual a de entrada, o modelo elétrico é apresentado na [Figura 7](#).

Quando o sinal de controle é um e a chave está conduzindo, a corrente flui da fonte CC, e carrega o indutor armazenando energia no mesmo. Quando o sinal de controle vai pra zero e a chave abre, o indutor e a fonte ficam em série com o restante do circuito, assim a corrente que fluía pela chave agora passa pelo diodo e conseqüentemente pela carga, com isso o indutor descarrega a energia na carga aumentando a sua tensão terminal ([BARBI; MARTINS, 2000](#)). Na [Figura 8](#) pode-se observar as formas de onda nos elementos do circuito.

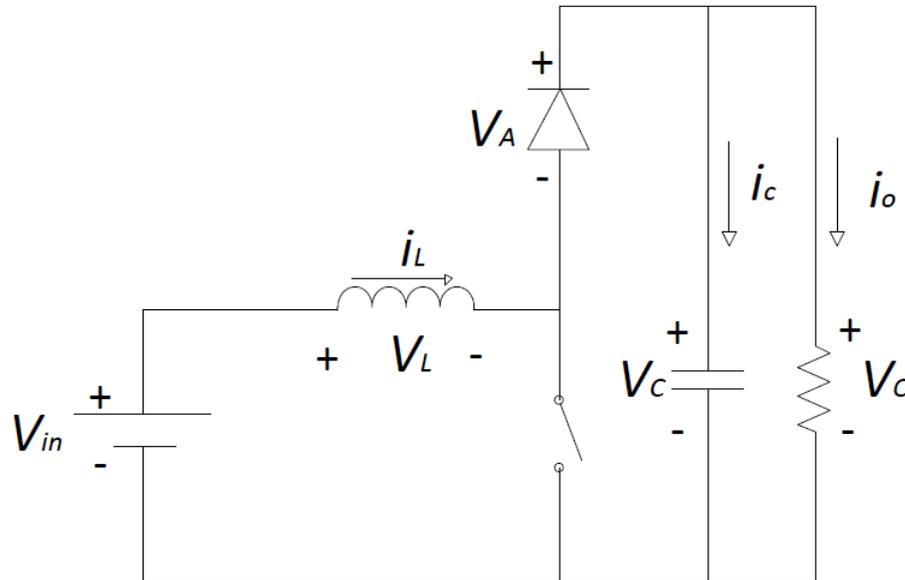
A tensão aplicada no indutor é expressa pela [Equação 2.1](#). Considerando os elementos do circuito ideais, e a que a corrente cresce e decresce linearmente no indutor, como visto na [Figura 8](#), a tensão de entrada pode ser expressa pela [Equação 2.2](#) ([RIBEIRO, 2015](#)).

$$v_l = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$V_{in} = \frac{L \cdot (I_{L2} - I_{L1})}{t_1} = \frac{L \cdot \Delta I}{t_1} \quad (2.2)$$

Do mesmo modo a diferença de potencial entre a carga e a fonte pode ser expressa pela [Equação 2.3](#):

Figura 7 – Conversor CC Boost.



Fonte: Mohan (2011)

$$V_0 - V_{in} = \frac{L \cdot \Delta I}{t_2} \quad (2.3)$$

Onde ΔI é a corrente de pico a pico que circula no indutor, como é observado na figura 9. Sabendo que $t_1 = DT_s$ e $t_2 = (1-D)T_s$, a relação entre a tensão de entrada e de saída é expressa pela [Equação 2.4](#), onde D é o ciclo de trabalho do conversor ([BARBI; MARTINS, 2000](#)):

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.4)$$

E também pela relação das correntes de entrada e saída:

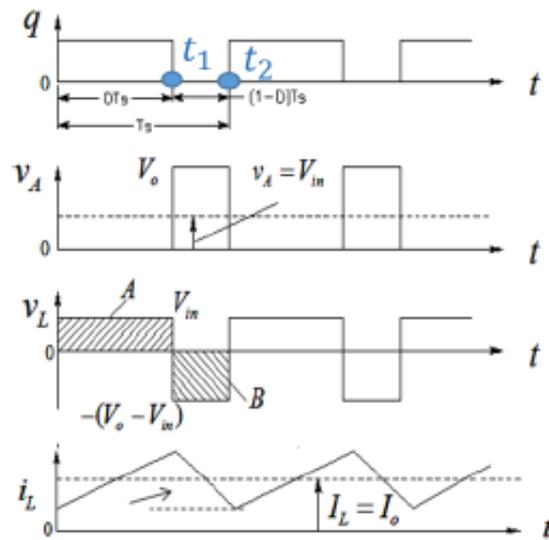
$$\frac{I_i n}{I_0} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.5)$$

A partir da [Equação 2.4](#), consegue-se concluir que a tensão de saída deve ser maior ou igual a de entrada, visto que o ciclo de trabalho (D) varia de zero até um, por isso a característica do conversor de ser um elevador de tensão ([RIBEIRO, 2015](#)).

2.4.2 Inversor CC-CA

Os inversores, são circuitos capazes de converter, corrente contínua em corrente alternada, amplamente utilizados na eletrônica de potência, eles podem ser tanto monofásicos, bifásicos ou trifásicos, onde a tensão na saída do inversor considerado ideal dever ter

Figura 8 – Formas de Onda Conversor Boost.



Fonte: Mohan (2011)

uma forma senoidal. Mas, na prática isto não ocorre, visto que contém níveis de corrente harmônica, causado pelo chaveamento dos semicondutores.

Para uma baixa potência e dependendo da aplicação, se utiliza inversores monofásicos, onde é aceitável uma onda quase quadrada na saída, porém para inversores trifásicos em que geralmente a potência é elevada, necessita-se de uma forma senoidal e com baixos níveis de distorção harmônica, acarretando no uso de filtros CA na saída destes. (RASHID, 2007), (RIBEIRO, 2015)

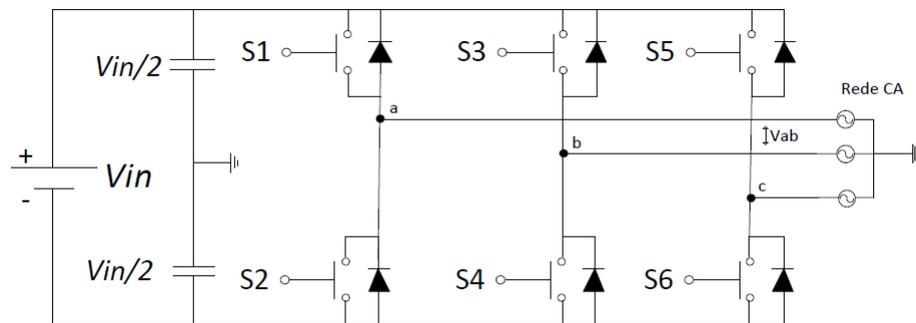
Os inversores trifásicos, são divididos em inversores de fonte de tensão constante e fonte corrente constante, ambos utilizam diferentes métodos de chaveamento PWM, podendo atuar como fontes controladas. A saída destes conversores deve possuir fase, frequência e amplitude controláveis, quando ligados a rede CA. (RASHID, 2007)

Um exemplo que é muito utilizado em sistemas fotovoltaicos, é o inversores do tipo VSC (*Voltage Source Converters*), este possui seis chaves semicondutoras, com capacidade de condução e de corte, contanto também com diodos antiparalelos, para permitir a reversão de corrente, fornecendo assim maior capacidade operativa para esse sistema. Na Figura 9, apresenta-se um modelo do circuitos VSC. (RIBEIRO, 2015)

As chave semicondutoras, são acionadas de acordo com a modulação PWM, um exemplo de modulação é apresentado na Figura 10, onde são apresentadas as formas de onda para a chave S1 e S3 e a tensão V_{ab} . O funcionamento do PWM é análogo com o usado em conversores CC-CC, porém nesta modulação a referência de entrada é uma forma senoidal.

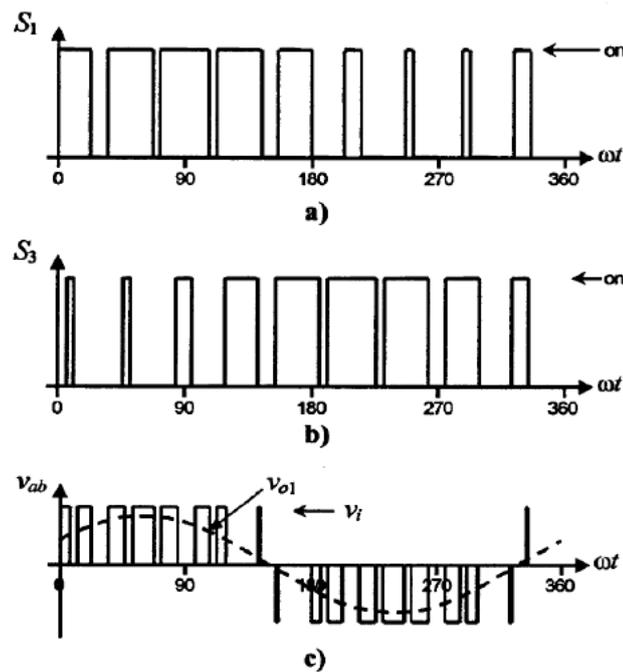
Um fato importante é que a tensão de saída máxima do inversor é a metade da

Figura 9 – Inversor VSC.



Fonte: Rashid (2007)

Figura 10 – Exemplo PWM Inversor.



Fonte: Rashid (2007)

tensão de entrada CC, assim a tensão de linha é raiz de três vezes esta, outro fator que influencia também é o fator de modulação ma que varia de 0 até 1. Portanto a tensão de linha varia conforme a [Equação 2.6](#). (RIBEIRO, 2015)

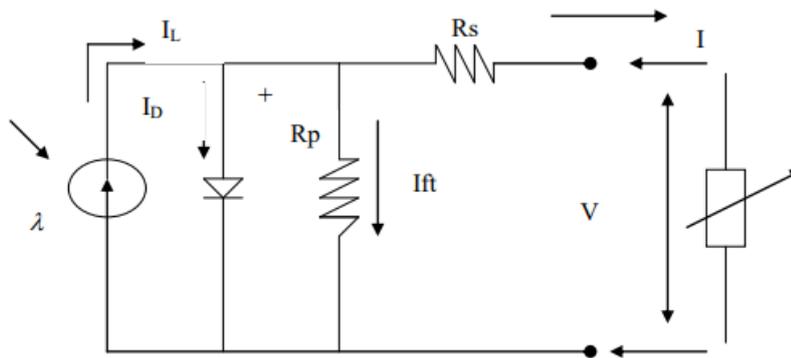
$$V_{ab} = ma \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{V_{in}}{2} \quad (2.6)$$

Onde $0 < ma < 1$.

2.5 Circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica

O circuito elétrico mostrado na [Figura 11](#) descreve o funcionamento interno de uma célula quando a mesma está submetida à radiação solar ([FADIGAS, 2012](#)).

Figura 11 – Circuito Elétrico Equivalente.



Fonte: [FADIGAS \(2012\)](#)

Os parâmetros do circuito que são exibidos na [Figura 11](#) são:

I_L é a corrente gerada pela incidência da radiação.

I_D é a corrente de saturação do diodo.

I_{ft} é a corrente de fuga para terra.

I é a corrente nos terminais de saída.

R_p é a resistência shunt.

R_s é a resistência série.

Em condições em que se tem irradiação e temperaturas fixas tem-se que a corrente útil de saída é:

$$I = I_L - I_D = I_{ft} \quad (2.7)$$

Onde a resistência série e a oposição a corrente interna, devido a impurezas do material, espessura da junção p-n e a resistência do contato. Em uma célula ideal tem-se que a resistência serie é igual a zero e a resistência shunt é igual a infinito ou seja corrente de fuga igual a zero. Enquanto a célula fotovoltaica estiver exposta a radiação solar e nenhuma carga conectada, consegue-se medir uma diferença de potencial nos seus terminais, esta é a tensão de circuito aberto, esta pode ser definida pela seguinte expressão ([FADIGAS, 2012](#)):

$$V_{ca} = V + I.R_p \quad (2.8)$$

Uma outra medida importante deste circuito é a corrente de curto circuito (I_{cc}), para se mesurar esta corrente coloca-se os terminais da célula em curto-circuito e mede-se esta corrente, quando a célula está submetida a uma dada radiação solar. Matematicamente pode-se desconsiderar as correntes I_{ft} e I_D devido ao curto-circuito assim a expressão fica (FADIGAS, 2012):

$$I = I_L \quad (2.9)$$

2.6 Curvas características

Para se obter a curva característica $I \times V$, a uma dada radiação solar deve-se ir variando a carga nos terminais da célula ou conjunto de células (módulo), e assim obter um par de tensão e corrente, sendo que nos extremos tem-se a corrente e tensão de circuito aberto e de corrente de curto circuito.

Fazendo o produto da tensão e da corrente, se obtém a potência gerada pela célula ou módulo fotovoltaico em cada ponto correspondente, porém existe apenas um lugar em que se consegue a máxima potência, para isso se traça uma curva da potência em função da tensão, no "joelho" desta curva é que se consegue o máximo valor de potência para uma dada irradiação solar.

Fazendo uma sobreposição da curva da tensão em função da potência com a curva $I \times V$, se obtém o valor de corrente e tensão para que se consiga a máxima potência para uma dada irradiação solar e temperatura (FADIGAS, 2012).

As características citas nos parágrafos acima podem ser observadas na [Figura 12](#).

2.6.1 Variação da potência em função a temperatura e da irradiação

Vários fatores influenciam no rendimento e na potência de saída das células ou painéis fotovoltaicos sendo que os principais são:

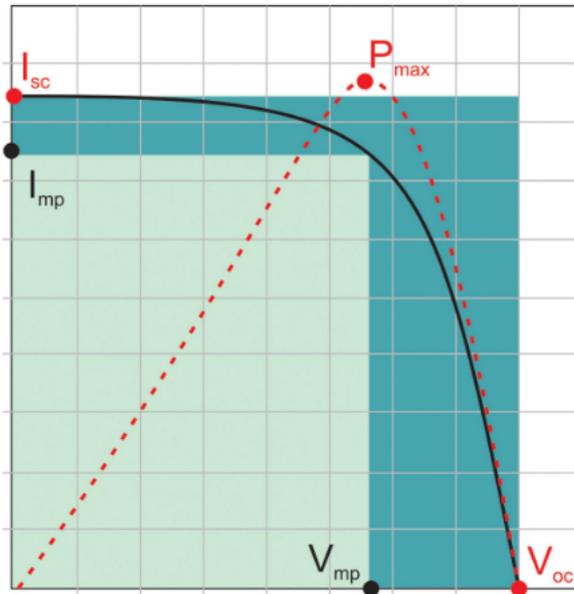
1: A variação da irradiação pode depender tanto do sombreamento dos painéis, época do ano horário do dia e etc. É um dos principais fatores, que influenciam na geração de energia elétrica, pois quanto maior a irradiação solar na célula ou painel fotovoltaico maior será a corrente gerada e conseqüentemente maior a potência, pode se observar isto na [Figura 13](#), onde o painel foi mantido a uma temperatura de 25°C (CANTOR, 2017):

A corrente gerada pela célula ou painel depende diretamente da irradiação sobre ela, como pode ser visto pela [Equação 2.10](#).

$$i_{celula} = \frac{S}{S_{STD}} \cdot i_{CC} \quad (2.10)$$

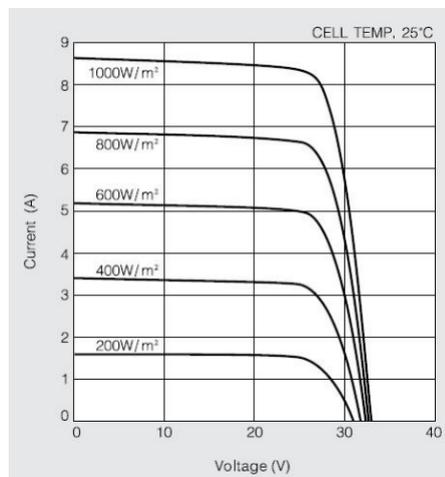
Sendo que:

Figura 12 – Curvas Característica de uma Célula Fotovoltaica Qualquer.



Fonte: Gabriela et al. (2015)

Figura 13 – Variação da Irradiação a Temperatura Constante.



Fonte: Kyocera (2017)

i_{celula} é a corrente na célula.

S é a Irradiação atual.

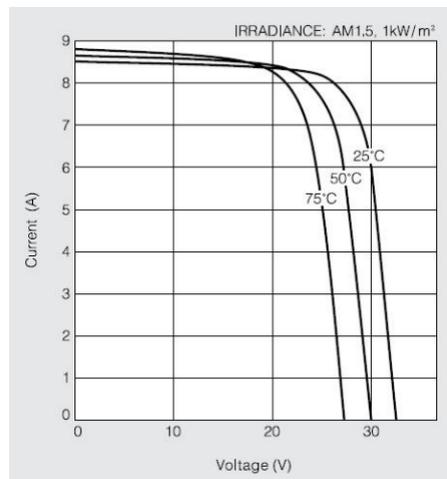
S_{STD} é a irradiação de referência normalmente $1000 \frac{W}{m^2}$.

i_{CC} é a corrente de curto circuito.

A partir desta equação nota-se que quanto mais próximo, o valor de S a o de S_{std} , maior será o valor de I_{cc} (MENDONÇA, 2017).

2: Os painéis fotovoltaicos por estarem dispostos no sol, recebem uma grande quantidade de energia térmica, além disso ocorre o aquecimento devido ao efeito da corrente que circula pela resistência, isto faz com que a sua temperatura aumente, fazendo com que a tensão de saída seja menor a uma corrente constante. Na Figura 14 observa-se esse comportamento, onde é aplicado uma irradiação de $1000 \frac{W}{m^2}$, com mudança de temperatura (CANTOR, 2017).

Figura 14 – Variação da Tensão em Função da Temperatura.



Fonte: Kyocera (2017)

A variação da temperatura afeta diretamente a corrente que circula pelo diodo, quando esta aumenta a corrente de saída do painel diminui como visto na Equação 2.7. A variação de corrente no diodo é mostrada pela equação de Schottky Equação 2.11 (CANTOR, 2017).

$$i_D = i_0 e^{\frac{V_D}{n \cdot V_T} - 1} \quad (2.11)$$

Onde:

I_0 é a corrente de saturação reversa.

V_d é a tensão na camada pn.

n é o fator de idealidade do diodo.

V_T tensão térmica.

Sendo que a tensão térmica pode ser encontrada a partir da Equação 2.12

$$V_T = \frac{k \cdot T_{op}}{q} \quad (2.12)$$

Onde:

k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$)

T_{op} temperatura de operação da junção

q é a magnitude da carga elétrica ($1,6 \times 10^{-19} C$)

A tensão térmica varia de acordo com o material que é utilizado, neste caso a variação é linear com a temperatura ambiente (CANTOR, 2017).

2.7 Métodos seguidores de máxima potência

O termo Maximum Power Point (MPP), ou Ponto de Máxima Potência é utilizado para denominar um ponto específico de tensão e corrente, em que uma célula ou painel fotovoltaico, com uma dada irradiação solar e temperatura, a potência é máxima. Para que os painéis fotovoltaicos operem sempre no ponto de máxima potência, deve-se utilizar alguma técnica (Maximum Power Point Tracking) que esteja incessantemente procurando o ponto de máxima potência, visto que o mesmos estão sujeitos a mudanças de irradiação, temperatura e carga (STEIN, 2012).

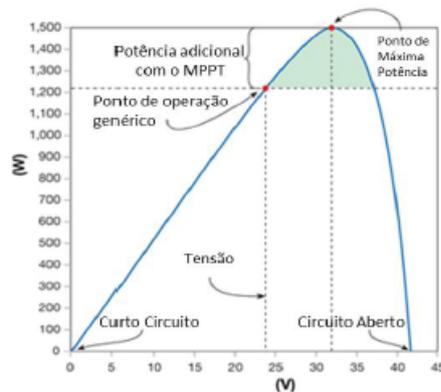
A técnica de máxima potência (MPPT), é feita a partir da utilização de algoritmos de controle no conversor CC que está acoplado no painel, esta consiste de um incessante rastreamento do ponto de operação, trabalhando em qualquer ponto da curva I x V, para que se consiga extrair a máxima potência. Encontram-se muitas formas de aplicação e de variação desta técnica, podendo aumentar a potência extraída do painel de 15 a 30% (STEIN, 2012; CAVALCANTI et al., 2007). Na Figura 15 se observa a diferença entre um sistema sem rastreamento de máxima potência e outro com, a parte em verde é a quantidade de potência a mais que se consegue extrair do mesmo painel usando MPPT.

2.7.1 Método da tensão constante

Trata-se de um método, em que se mantém o painel fotovoltaico a uma tensão estabelecida como referência, esta é tensão do ponto de máxima potência. Com isto, a tensão de saída do painel é monitorada, e tendo como base a de referência, o controle faz uma alteração na razão cíclica de modo a atingir a tensão de referência (COELHO et al., 2008). Porém o método não considera a variação de temperatura e a mesma faz com que a tensão de saída diminua, implicando em perda de potência.

Na Figura 16 Pode-se perceber que a tensão do ponto de máxima potência se afastou de maneira considerável da tensão de referência, visto que não se considera a variação da tensão de saída com a temperatura, já quando a temperatura é constante

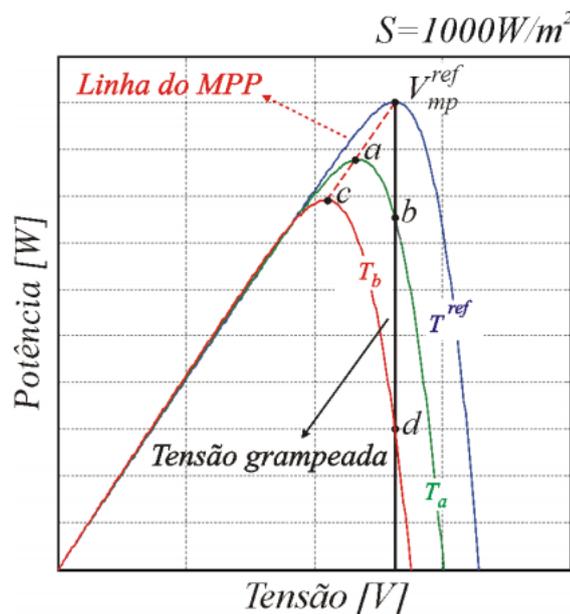
Figura 15 – Operação com e sem MPPT.



Fonte: HomePower (2017)

o método funciona muito bem, pois a tensão de saída se mantém constante na linha de tensão de operação do conversor, como se observa na Figura 17 (COELHO et al., 2008).

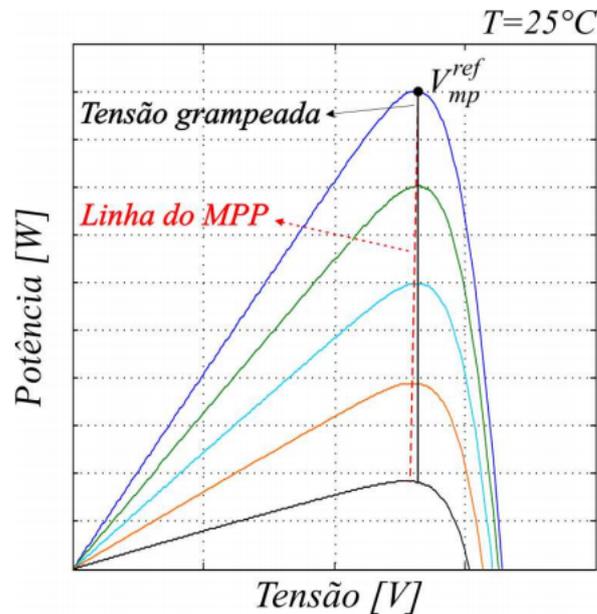
Figura 16 – MPPT Tensão Constante com Variação na Temperatura.



Fonte: Coelho et al. (2008)

Contudo apesar do não ser muito preciso com a variação da temperatura, o método é utilizado pela simplicidade e facilidade de sua implementação, visto que só é necessário medir a tensão do módulo (RIBEIRO, 2015).

Figura 17 – MPPT Tensão Constante com Variação na Irradiação.



Fonte: Coelho et al. (2008)

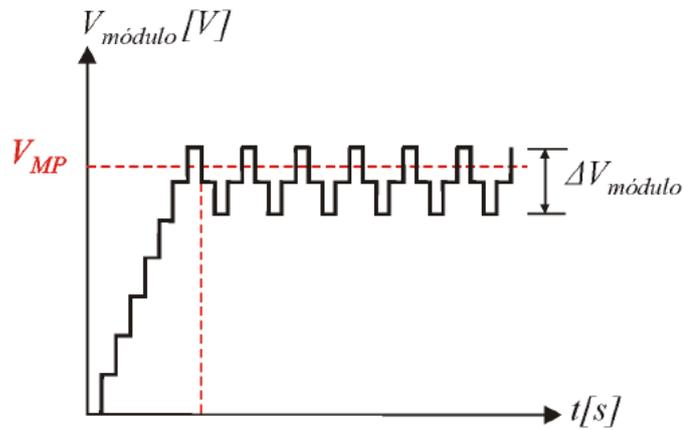
2.7.2 Método perturba e observa (P&O)

O método perturba e observa diferentemente do da tensão constante, considera não apenas a tensão V_{modulo} , mas também a corrente I_{modulo} , para buscar o ponto de máxima potência. A técnica consiste de duas iterações, a primeira quando o conversor CC-CC é posto a operar, leem-se os valores de corrente e tensão na saída do modulo, com isso se calcula a potência que está sendo gerada. Na segunda iteração, faz-se uma pequena alteração na razão cíclica ΔD , podendo ser incremento ou decremento, após essa operação calcula-se novamente o valor de potência gerado, se a nova potência for de valor mais alto que a anterior, conclui-se que o sistema está convergido para o ponto de máxima potência, caso contrário se faz a operação no outro sentido da razão cíclica (COELHO et al., 2008).

Para poder se determinar o tamanho da perturbação ΔD , deve-se escolher entre a velocidade da resposta do sistema ou qualidade em regime permanente. Pois com um passo maior o sistema converge mais rápido, ao ponto de máxima potência, porém oscila mais em regime permanente como pode ser visto na Figura 18. Já um passo menor tem um tempo de convergência mais lento, mas em regime permanente a oscilação em torno do ponto é menor como pode ser visto na Figura 19 (COELHO et al., 2008).

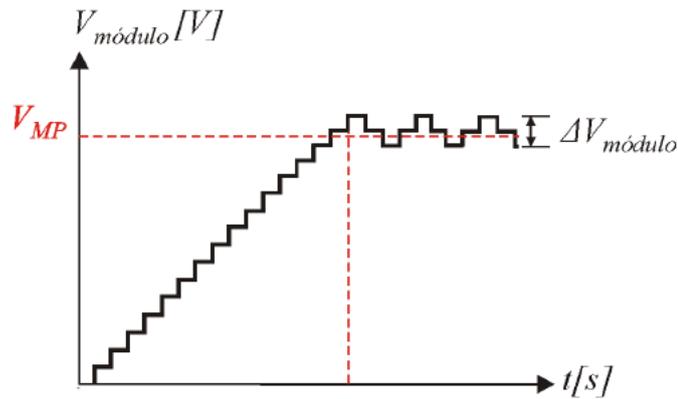
O Tempo de subida do sistema até que o método comece a oscilar entorno de V_{mP} , é chamado de t_{RP} , que pode ser obtido conforme a Equação 2.13.

Figura 18 – Alto Passo na Razão Cíclica.



Fonte: Coelho et al. (2008)

Figura 19 – Baixo Passo na Razão Cíclica.



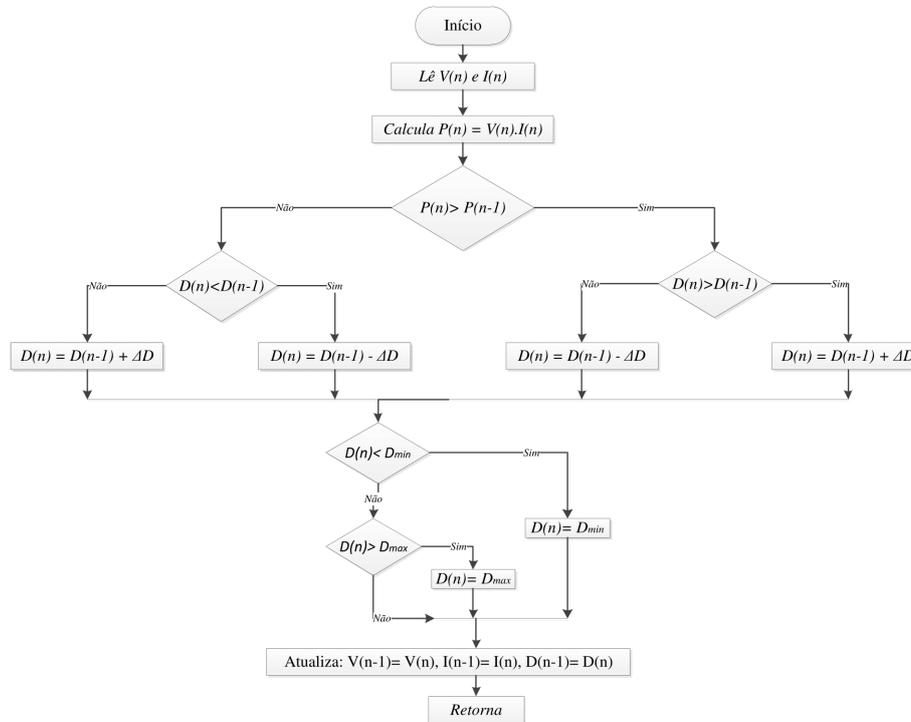
Fonte: Coelho et al. (2008)

$$tRp = \frac{N_{step}}{F_{mppt}} \quad (2.13)$$

Sendo que o N_{step} é o número de vezes que a razão cíclica tem de ser incrementada ou decrementada, até que se encontre o ponto de máxima potência. Já o F_{mppt} é a frequência com que, os incrementos e decrementos são realizados, portanto quanto maior F_{mppt} , mais rápido o rastreamento se dá, porém o F_{mppt} está relacionado diretamente com o capacitor de barramento C_{bar} , onde este é normalmente posto na entrada do conversor CC-CC. Com isso a constante de tempo do capacitor limita o F_{mppt} , pois para que se de qualquer incremento ou decremento na razão cíclica, é necessário que o C_{bar} esteja em regime permanente.

A [Figura 20](#) mostra a estrutura de um algoritmo em forma de fluxograma do método perturba e observa.

Figura 20 – Algoritmo P&O.



Fonte: [Coelho et al. \(2008\)](#)

2.7.3 Condutância incremental

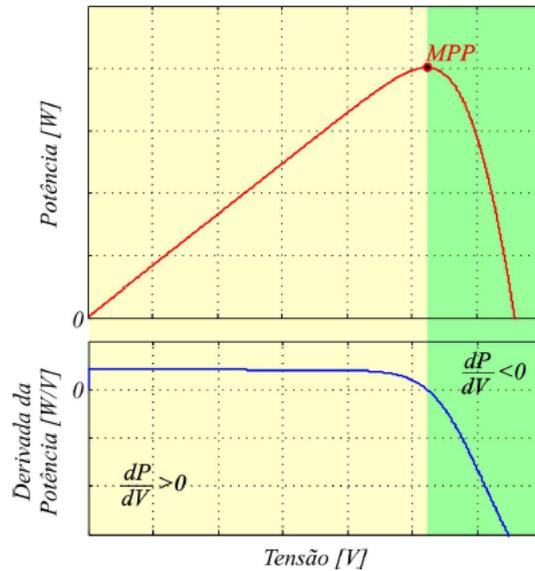
O método da condutância incremental, é o método que apresenta melhor resultado dentre os demais citados, pois apresenta alta velocidade de rastreamento e baixa oscilação em regime permanente, porém exige um esforço computacional mais alto ([CORRÊA, 2008](#)).

Neste método as variações do ponto de operação, não se de dão pela variação de potência, mas sim pela razão das variações de potência e de tensão, como mostra a [Equação 2.14](#).

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.14)$$

Examinando [Figura 21](#), que mostra a curva P×V e a curva da derivada em relação a derivada da tensão, consegue-se perceber duas regiões que se definem bem: à esquerda do ponto de máxima potência a derivada é positiva, e a direita a derivada é negativa ([COELHO et al., 2008](#)).

Figura 21 – Curva da Potência e da Derivada da Potência em Relação a Derivada da Tensão.



Fonte: Coelho et al. (2008)

Quando a relação das derivadas for maior que zero, o modulo fotovoltaico está operando com uma tensão abaixo do ponto de máxima potência, desta forma o MPPT deve regular a razão cíclica de forma a elevar a tensão do modulo (COELHO et al., 2008).

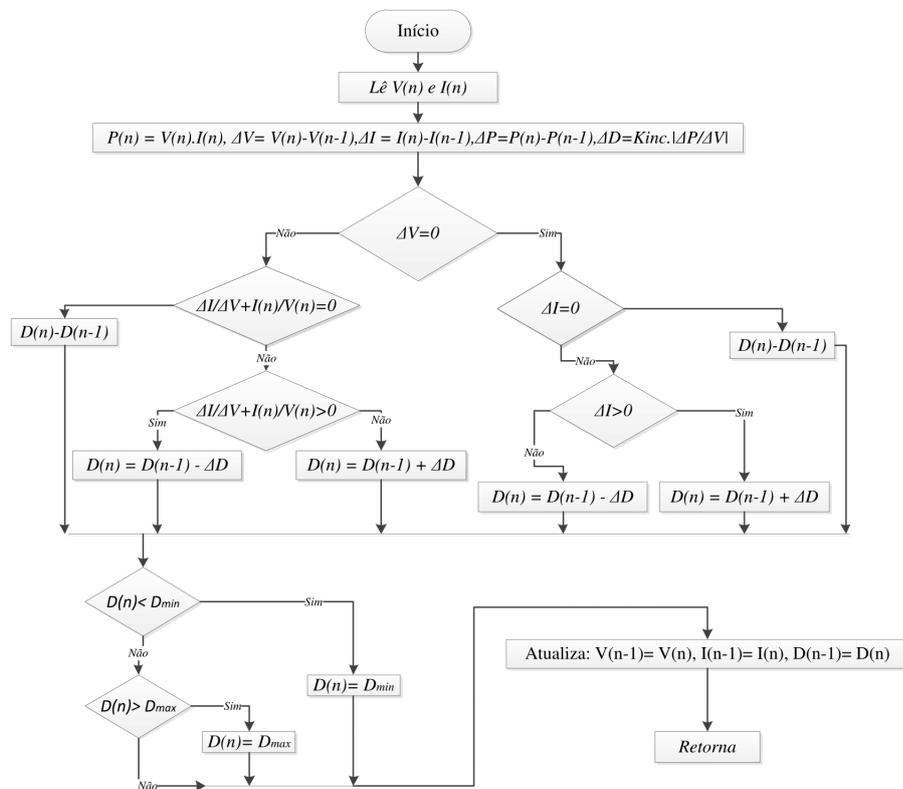
Quando esta relação for menor que zero, a tensão de operação do painel está além da do ponto de máxima potência, portanto o MPPT deve regular a razão cíclica de forma a baixar a tensão aplicada ao modulo (COELHO et al., 2008).

Torna-se claro que o MPPT, deve buscar o ponto em que a relação da derivada da potência e da tensão deve ser igual a zero, já que não há variação das derivadas e portanto o painel está operando no ponto de máxima potência (COELHO et al., 2008).

Em relação a velocidade de convergência, é evidente que quanto mais distante do ponto de máxima potência maior é o valor da derivada, portanto se atrela a isto o passo do método, assim a convergência se dá de forma rápida. Assim o sinal da derivada determina a razão cíclica, e o modulo deste valor determina o passo a ser dado (COELHO et al., 2008).

Na figura 22, é mostrado um fluxograma do método condutância incremental.

Figura 22 – Fluxograma do Método Condutância Incremental .



Fonte: Coelho et al. (2008)

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, primeiramente foi a análise do painel fotovoltaico *CanadianCS6K – 275*, das suas curvas PxV e IxV e as carteiristas de potência máxima, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, e das propriedades térmicas do mesmo, estes dados podem ser vistos na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Características Painel *CanadianCS6K – 275*

Grandeza	Representação	Valor
Número de Células	-	60
Potência Máxima Nominal	$P_{max}(W)$	275
Tensão de Operação	$V_{pmax}(V)$	31,3
Corrente de Operação	$I_{pmax}(A)$	8,8
Tensão de Circuito Aberto	$V_{ca}(V)$	38,3
Corrente de Curto-Circuito	$I_{cc}(A)$	9,31
Coefficiente de Temperatura (P_{max})	(%/°C)	-0,41
Coefficiente de Temperatura (V_{ca})	(%/°C)	-0,31
Coefficiente de Temperatura (I_{cc})	(%/°C)	0,05

Fonte: [Canadian \(2017\)](#)

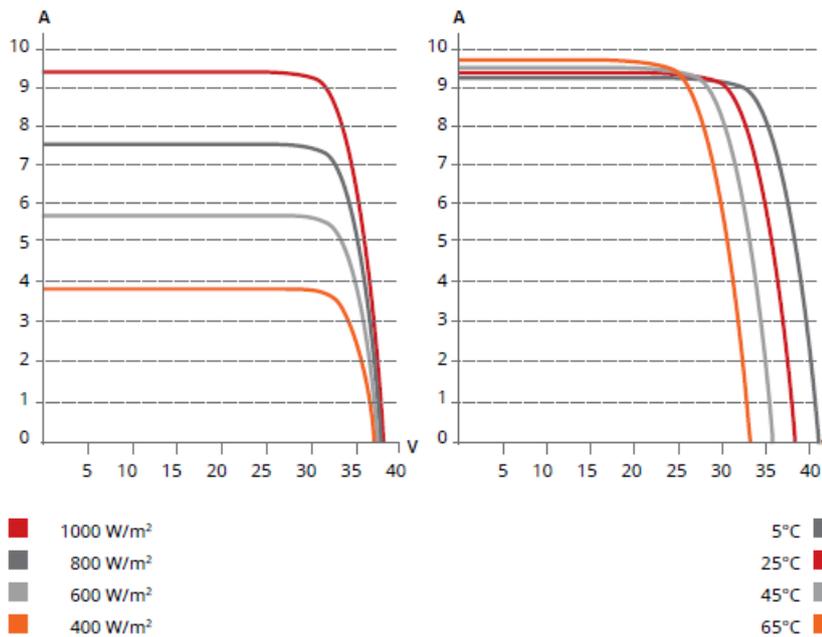
Na [Figura 23](#), são mostradas as curvas IxV , tanto para variação de temperatura, como para de irradiação, fornecidas pelo fabricante. Os dados que compõem as curvas são observados na [Tabela 1](#).

Para a modelagem do painel, foi utilizada uma ferramenta do Software *PSIM®*, chamada *physical – model*, esta estima os parâmetros físicos do painel, gerando um modelo no ambiente do software que pode então, simular diferentes condições de temperatura e irradiação. Na [Figura 24](#), pode-se observar a interface do programa, bem como dados do painel proposto dispostos.

Os parâmetros referentes a resistência *Shunt*, banda de energia, e fator de idealidade foram utilizados os pré-definidos no software, já que no *datasheet* do painel estes dados não estavam disponíveis, esses também são parâmetros muito utilizados na literatura os quais estimam bem o painel proposto, pode-se perceber isto comparando os valores da [Tabela 1](#) que são os de *datasheet*, com a [Tabela 2](#), que foram simulados através da ferramenta. Além disto, a resistência *shunt* é geralmente muito alta e portanto a corrente sobre ela muito baixa, desta forma praticamente não influenciando nas simulações propostas neste trabalho.

Na [Tabela 2](#), são mostrados os parâmetros físicos calculados pelo software, estes foram simulados á mesma irradiação e temperatura do *datasheet*.

A configuração de arranjo fotovoltaico proposta neste trabalho, foi de se colocar 8 painéis em série, com o objetivo de simular uma instalação residencial razoável, visando

Figura 23 – Curvas $I \times V$ com Variação na Temperatura e Irradiação.

Fonte: Canadian (2017)

Tabela 2 – Parâmetros do Painel Simulados.

Grandeza	Representação	Valor
Potência Máxima Nominal	$P_{max}(W)$	273,47
Tensão de Operação	$V_{pmax}(V)$	31,23
Corrente de Operação	$I_{pmax}(A)$	8,76
Tensão de Circuito Aberto	$V_{ca}(V)$	38,3
Corrente de Curto-Circuito	$I_{cc}(A)$	9,31
Corrente de Saturação	(A)	9.76e-9
Coefficiente de Temperatura	(A/K°)	0,004655

Fonte: Próprio Autor

também uma tensão no barramento CC adequada, para futura inversão de corrente, e posterior conexão com a rede de distribuição, na Tabela 3 são observados os dados deste arranjo.

3.1.1 Parâmetros Conversor BOOST.

Para determinar os parâmetros do conversor, é necessário definir todas as especificações para projeto. A frequência de chaveamento, a máxima ondulação de tensão e corrente, foram escolhidas de acordo com as encontradas na literatura, já a tensão de saída do conversor, foi estipulada de forma a garantir uma boa faixa de operação ao conversor

Figura 24 – Parâmetros do Painel Adicionados na Ferramenta.

Manufacturer Datasheet		
Number of Cells Ns:	60	
Maximum Power Pmax:	275	(W)
Voltage at Pmax:	31.3	(V)
Current at Pmax:	8.8	(A)
Open-Circuit Voltage Voc:	38.3	(V)
Short-Circuit Current Isc:	9.31	(A)
Temperature Coeff. of Voc:	-0.31	(%/oC or oK)
Temperature Coeff. of Isc:	0.05	(%/oC or oK)
Standard Test Conditions:		
Light Intensity S0:	1000	W/(m²m)
Temperature Tref:	25	(oC)
dv/di (slope) at Voc: (if available)	-0.41	(V/A)
Model Parameters (defined)		
Band Energy Eg:	1.12	(eV)
Ideality Factor A:	1.2	
Shunt Resistance Rsh:	1000	(Ohm)
Coefficient Ks:	0	

Fonte: Próprio Autor

Tabela 3 – Parâmetros do Arranjo Fotovoltaico

Grandeza	Representação	Valor
Potência Máxima Nominal	$P_{max}(W)$	2187,78
Tensão de Operação	$V_{pmax}(V)$	249,82
Corrente de Operação	$I_{pmax}(A)$	8,76
Tensão de Circuito Aberto	$V_{ca}(V)$	306,4
Corrente de Curto-Circuito	$I_{cc}(A)$	9,31
Corrente de Saturação	(A)	9.76e-9
Coefficiente de Temperatura	(A/K°)	0,004655

Fonte: Próprio Autor

CC – CC. Estes parâmetros podem ser visto na [Tabela 4](#).

Conforme a [Equação 2.4](#), a razão cíclica é definida como:

$$D = 1 - \frac{249,4}{450} = 0,4435 \quad (3.1)$$

A resistência de carga pode ser determinada conforme a lei de ohm:

$$R = \frac{450^2}{2200} = 94\Omega \quad (3.2)$$

A determinação dos parâmetros, de indutância L e capacitância de entrada C_{pv} pode ser feita conforme apresentado em (JR et al.,) (KJAER; PEDERSEN; BLAAB-JERG, 2005). O capacitor de entrada é calculado pela [Equação 3.3](#) e o indutor pela [Equação 3.5](#).

Tabela 4 – Especificações Projeto Conversor BOOST.

Grandeza	Representação	Valor
Potência Máxima Nominal	$P_{max}(W)$	2187,78
Tensão de Operação	$V_{pmax}(V)$	249,82
Corrente de Operação	$I_{pmax}(A)$	8,76
Tensão na Carga	$V_c(V)$	450
Frequência de Chaveamento	$f_s(Hz)$	15e3
Máxima Ondulação de Tensão	$\Delta V(V)$	7,5
Máxima Ondulação de Corrente	$\Delta I(A)$	0,44

Fonte: Próprio Autor

$$C_{pv} = \frac{P_{max}}{4 \cdot \pi \cdot f_s \cdot V_{pmax} \cdot \Delta(V)} \quad (3.3)$$

Desta forma:

$$C_{pv} = \frac{2187,78}{4 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 249,82 \cdot 7,5} = 776 \mu F \quad (3.4)$$

A frequência utilizada para determinar o capacitor é uma fundamental da frequência da rede, que futuramente pretende-se conectar.

Já o indutor é determinado utilizando a frequência de chaveamento do circuito:

$$L = \frac{V_{pmax} \cdot D}{f_s \cdot \Delta(I)} \quad (3.5)$$

Portanto:

$$L = \frac{249,82 \cdot 0,4435}{15 \cdot 10^3 \cdot 0,44} = 1,68 mH \quad (3.6)$$

Quanto ao capacitor de saída C_s , se adotou a capacitância de 2000 μF , visando uma baixa ondulação de tensão, e conseqüentemente de potência na carga.

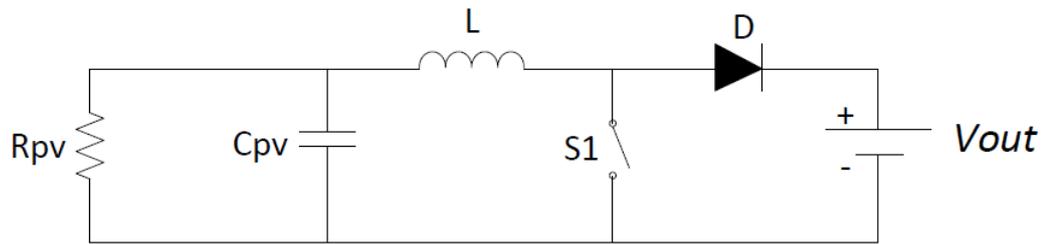
3.1.2 Análise em Malha Aberta do Circuito

Foi feita também, uma análise em malha aberta do circuito, para que em um trabalho futuro possa se realizar o projeto de um controlador. Para a modelagem do conversor, pode-se considerar o circuito aprestado na [Figura 25](#).

Como visto em ([JR et al.](#),), a partir da modelagem em espaço de estados médios, do conversor $CC - CC$ boost, é possível obter a função de transferência, que relaciona a tensão no capacitor C_{pv} em relação à razão cíclica de chaveamento do conversor D . Esta é mostrada na [Equação 3.7](#).

$$G_{C_{pv}D}(s) = \frac{V_{out} \cdot R_{pv}}{s^2 \cdot R_{pv} \cdot L \cdot C_{pv} + s \cdot (L + C_{pv}) + R_{pv}} \quad (3.7)$$

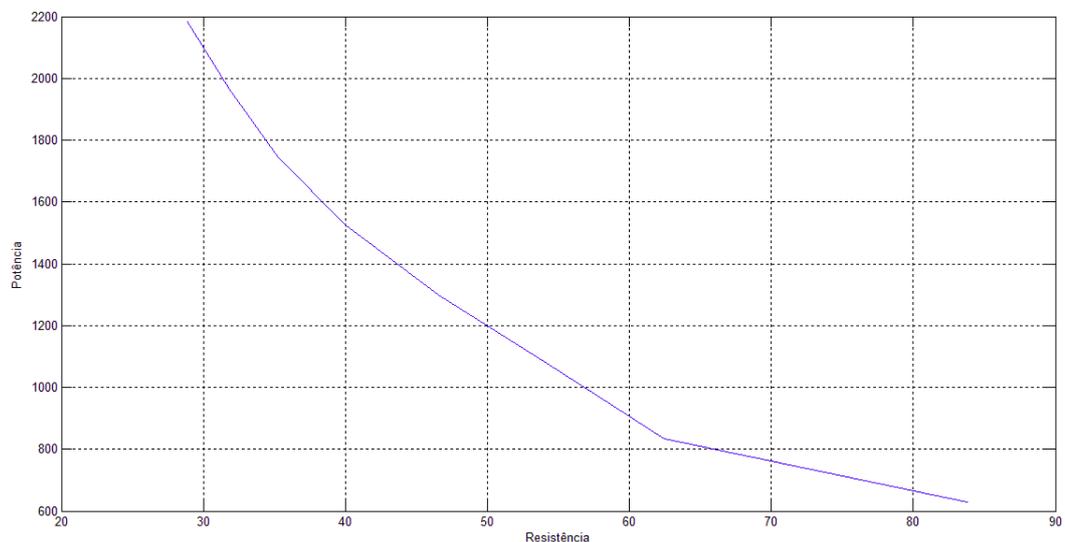
Figura 25 – Circuito Utilizado na Modelagem do Conversor.



Fonte: (JR et al.,)

A resistência média do arranjo fotovoltaico R_{pv} , pode ser determinada conforme visto em (CHAVES et al.,), utilizando a lei de ohm, para cada valor de irradiação, consegue-se um valor de potência, a uma tensão praticamente constante, assim é calculado um valor de resistência correspondente. Com isto, foi possível montar a curva que é apresentada na Figura 26. A partir desta curva escolheu-se o valor médio de $54,69\Omega$.

Figura 26 – Resistência em Função da Potência



Fonte: Próprio Autor

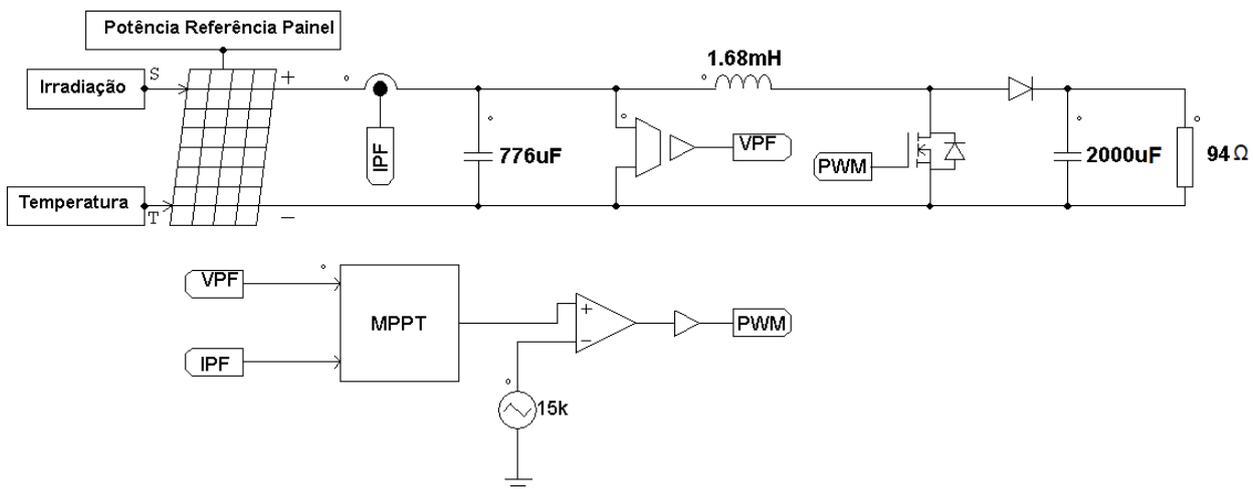
Considerando as chave e diodo ideais e a tensão de saída constante, fez-se a substituição de valores na Equação 3.7, obtendo assim a função de transferência de malha aberta, para o circuito simulado mostrado na Equação 3.8

$$G_{CPVD}(s) = \frac{2,461 \cdot 10^4}{7,13 \cdot 10^{-5} s^2 + 0,00168 s + 54,69} \quad (3.8)$$

3.2 Simulação e resultados no software PSIM®

O método escolhido para realizar as simulações, foi o perturba e observa (*P&O*), este foi adotado, pela sua facilidade de implementação, aliado a uma boa qualidade da resposta, e um esforço computacional razoável. Com os parâmetros determinados e o método escolhido, foi possível realizar a simulação, o circuito proposto pode ser observado na [Figura 27](#).

Figura 27 – Circuito Simulado.



Fonte: Próprio Autor

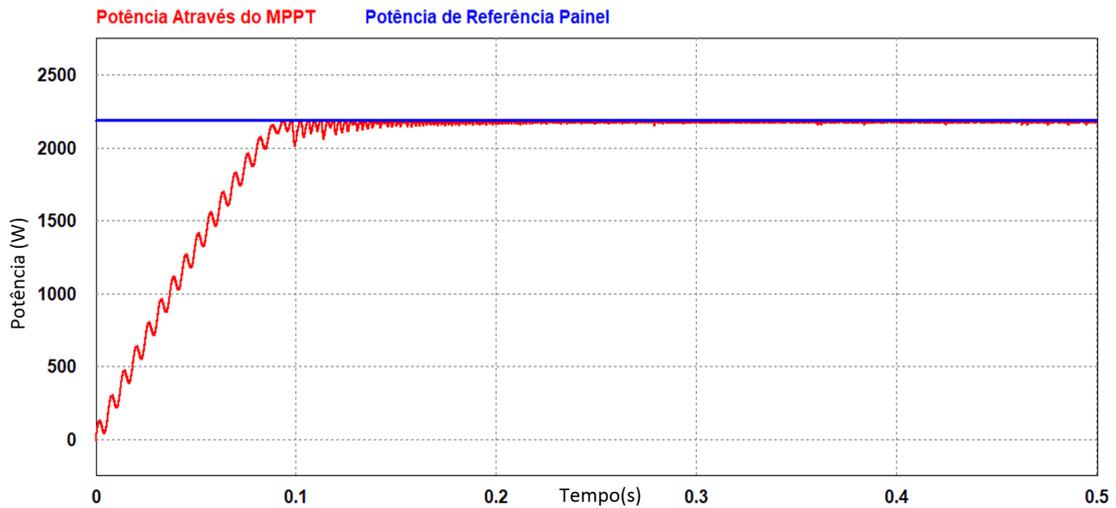
O circuito consiste de um arranjo fotovoltaico com 8 painéis ligados em série, dois sensores, um de tensão e outro de corrente, onde os sinais provenientes destes são ligados ao bloco que contém o código do método utilizado, o sinal de saída do bloco é comparado com uma onda triangular com frequência de $15kHz$, fazendo a modulação *PWM*, que atua no *MOSFET* do Conversor boost, de forma a aumentar ou diminuir a razão cíclica, assim que o método percebe alguma variação de potência proveniente do painel.

A frequência de amostragem do método foi utilizada a mesma que de chaveamento $15kHz$, e o passo utilizado foi de 0,3 na razão cíclica, foram estipulados, um limite superior de 0,85 e inferior de 0,15 para a saída do bloco *MPPT*, após este sinal é comparado com a triangular.

Foram testadas, as entradas para a irradiação do tipo, constante, senoidal, rampa, e quadrada, já para a temperatura utilizou-se apenas duas a quadrada e a constante.

Primeiramente foi testada, a entrada constante tanto para irradiação fixada em $1000 \frac{W}{m^2}$, como para temperatura fixada em $25^\circ C$ na Figura 28, é mostrada a comparação entre as formas de potência de referência fornecida pelo painel, e a potência através do método. Pode-se notar que o método convergiu próximo a 0,1s e apresentou um bom desempenho em regime oscilando cerca 2W.

Figura 28 – Potência de Referência do Painel e Potência Através do MPPT



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 29, são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente provenientes do painel, que formam a curva de potencia da Figura 28.

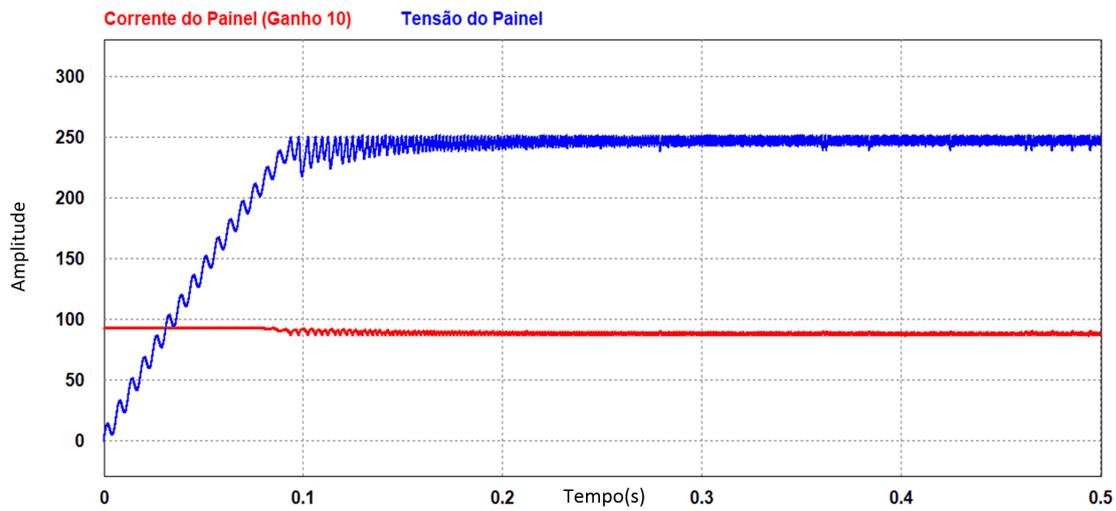
Nota-se que o comportamento da tensão segue o sentido da razão cíclica, de forma a chegar próximo a tensão de potencia máxima, ja a corrente se ajusta levemente, isto se deve ao fato do painel, se comportar como uma fonte de corrente e que nas condições iniciais o painel, estava exposto as mesmas simuladas ou seja irradiação a $1000 \frac{W}{m^2}$, e a temperatura a $25^\circ C$. Observou-se ainda uma baixa ondulação de tensão em regime na ordem de 4,5V e uma oscilação de corrente 0,1A.

A Figura 30, apresenta as forma de onda de potência através do método e a forma de onda de potência na carga. Nota-se ainda que, a potência de carga leva um certo tempo, cerca 0,5s para alcançar o valor da potência de referência, isso se deve a capacitância C_s e seu valor elevado, apesar disto a resposta é aceitável no que propõem o trabalho.

Para representar um sombreamento com certa lentidão, foi proposto uma variação na irradiação de forma lenta e senoidal de $400 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$, e uma variação de temperatura de forma lenta e quadra de $25^\circ C$ a $45^\circ C$, o tempo de simulação foi de 60s, instante em que a senoide completa o período.

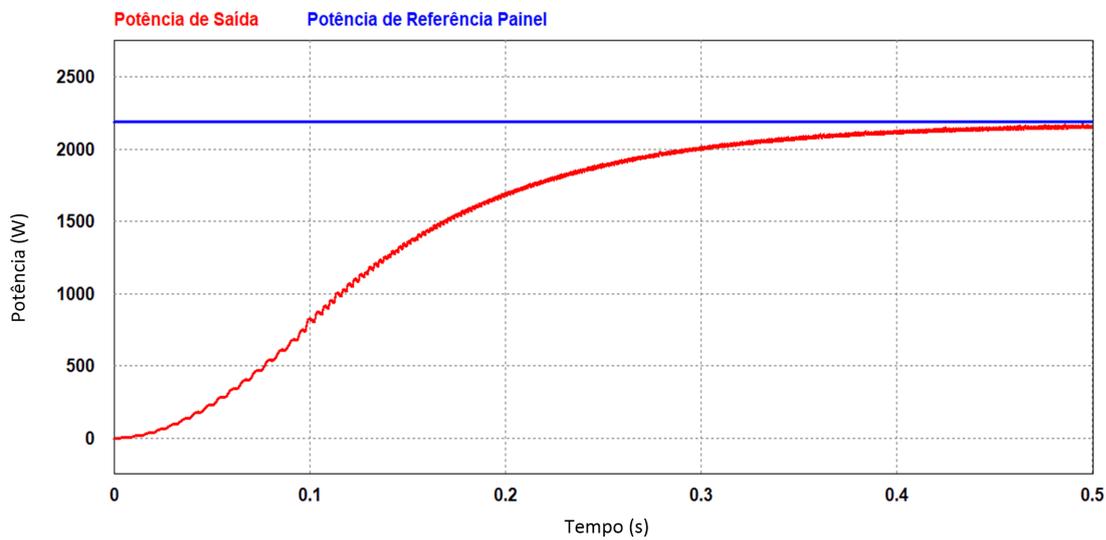
A Figura 31, apresenta a forma de onda de de potência através do MPPT, bem

Figura 29 – Formas de Onda de Tensão e Corrente Provenientes do Painei



Fonte: Próprio Autor

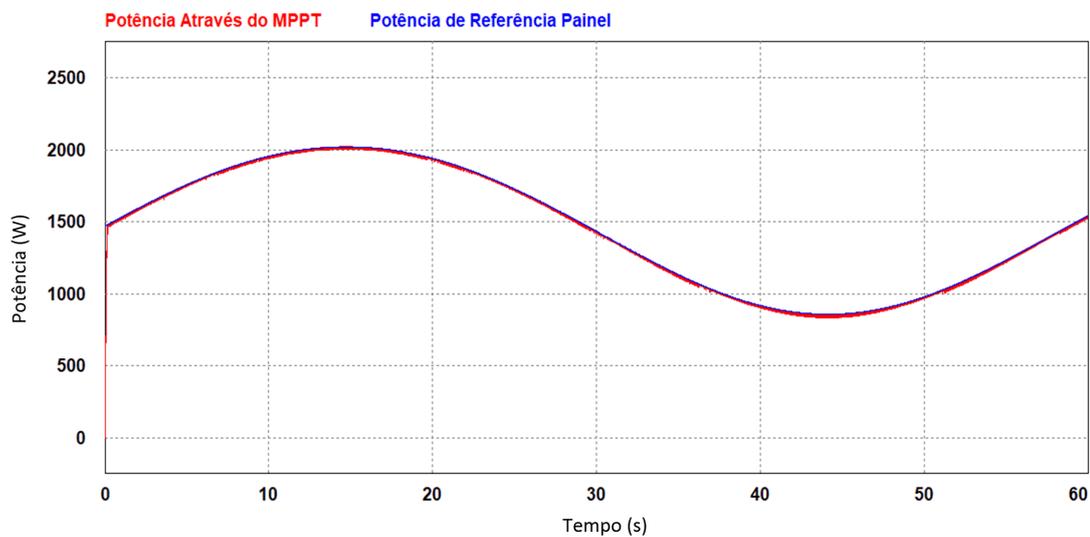
Figura 30 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga



Fonte: Próprio Autor

como a forma de onda de potência de referência fornecida pelo painel. Nota-se que, o método conseguiu uma boa resposta, mesmo quando o painel foi exposto a variações de irradiação e temperatura, por um tempo relativamente longo. A variação de potência máxima, da ordem de $20W$ ocorreu quando, a irradiação chegou a $400 \frac{W}{m^2}$, em que as especificações de projeto do conversor boost, chegam próximo ao limite com relação a

Figura 31 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Senoidal

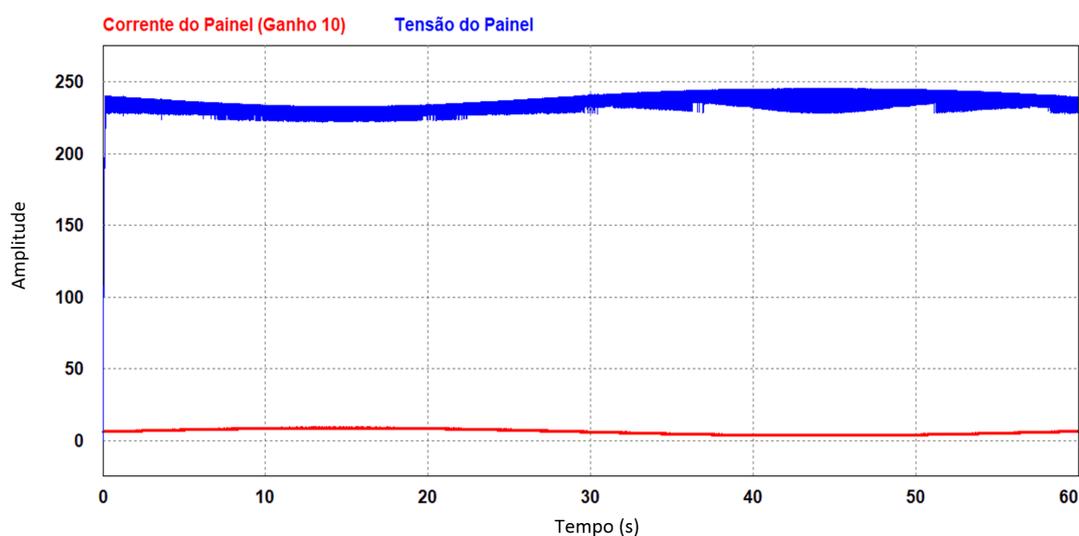


Fonte: Próprio Autor

razão cíclica.

Na Figura 32, são apresentadas as formas de onda de e corrente respectiva aos dados simulados na Figura 31.

Figura 32 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Senoidal



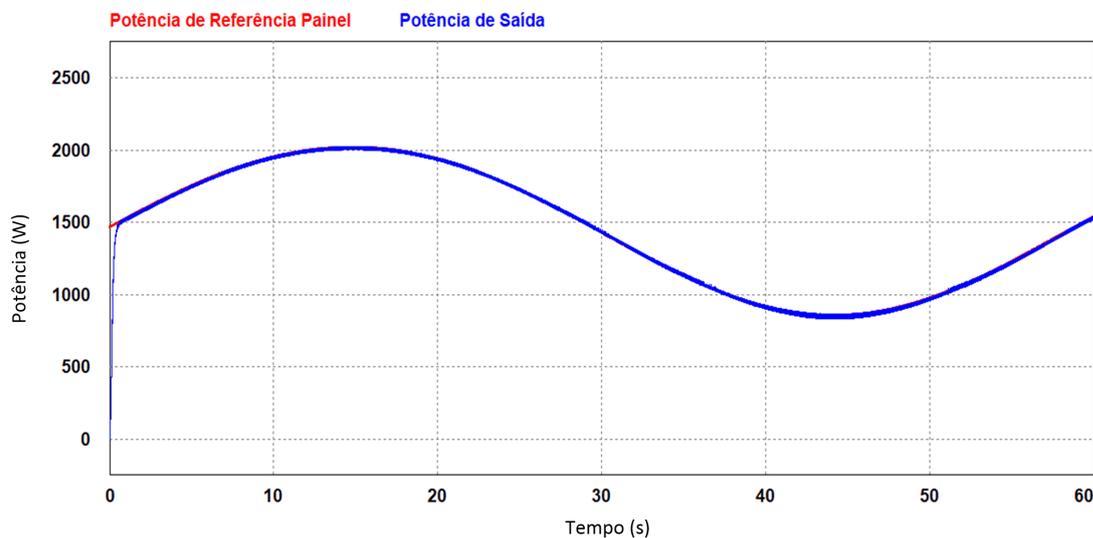
Fonte: Próprio Autor

Observa-se que a tensão terminal acompanha a variação de temperatura, visto que a tensão terminal modifica-se com o aumento ou decréscimo de temperatura. A corrente

acompanha a variação de irradiação, pois como dito anteriormente o painel se comporta como fonte de corrente. No espaço de tempo entre 40s e 50s ocorre a menor irradiação, afetando também a tensão terminal, isto ocorreu devido a limite que o conversor foi projetado. A variação máxima de tensão ocorreu neste ponto e é da ordem de 8V, e a de corrente 0,15A, valores bem aceitáveis.

A Figura 33, apresenta as forma de onda de potência através do método e a forma de onda de potência na carga. Nota-se ainda que, a potência de carga logo alcança a de referência, tendo apenas oscilações, posteriores a da referência, isto ocorre devido ao capacitor de saída C_s .

Figura 33 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Senoidal.



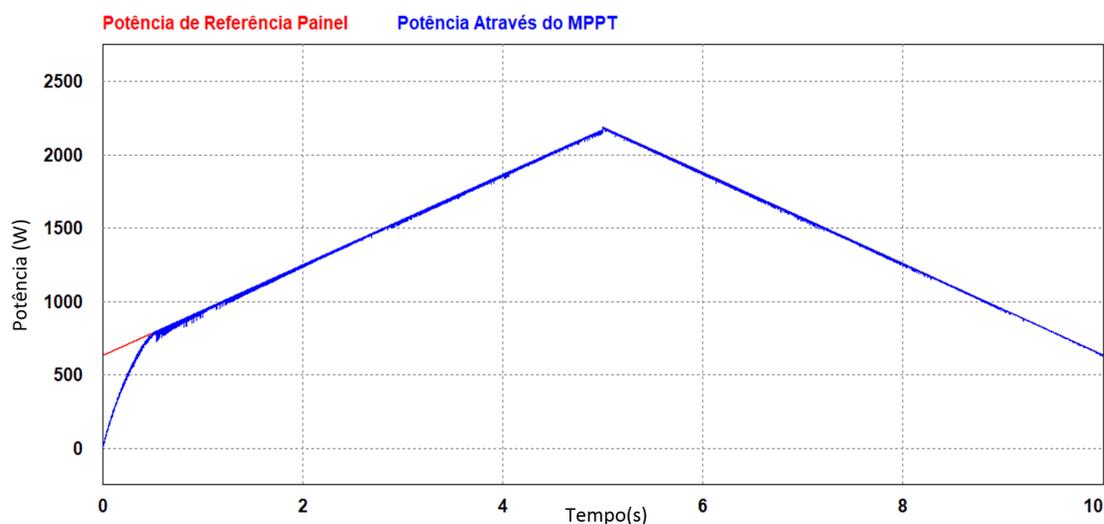
Fonte: Próprio Autor

Foi proposto também, a simulação com uma entrada em rampa, com o objetivo de reproduzir um sombreamento rápido e contínuo com acréscimo e decréscimo de irradiação relativamente rápidos, a temperatura também foi variada de forma quadrada. A irradiação foi variada de $300 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$, e temperatura de $25^{\circ}C$, a $27^{\circ}C$. Na Figura 34, são mostradas as ondas de potências de referência e através do MPPT, com entrada em rampa.

Ve-se que, o método leva entorne 0,5s para convergir com a onda de referência, ocorre que a simulação inicia com uma irradiação muito baixa de $300 \frac{W}{m^2}$, neste ponto a faixa de operação do conversor $CC - CC$ se encontra no limite, desta forma a medida que a irradiação aumenta, o método consegue convergir mais rapidamente. Por conta disso, a variação de potencia no tempo de 0,5s, e de 23W.

Na Figura 35, nota-se que a tensão no instante entre 0s e 2s, possuiu uma oscilação maior devido ao conversor $CC-CC$ estar no limite de operação a qual foi projetado. A

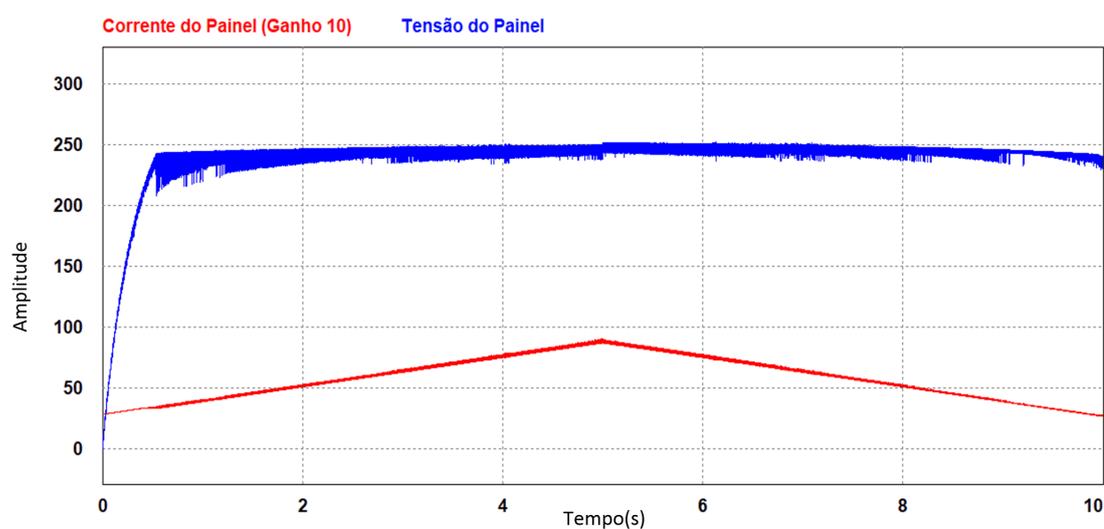
Figura 34 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Rampa.



Fonte: Próprio Autor

medida que o tempo passa, e a irradiação aumenta, o conversor entra na sua região de operação e as variações na tensão são provenientes da diferença de temperatura. No transitório inicial, a oscilação de tensão foi da ordem de $17,5V$ e em regime de $4,5V$, já a corrente oscilou cerca de $0,15A$, resultados bem aceitáveis no que propõem o trabalho.

Figura 35 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Rampa.

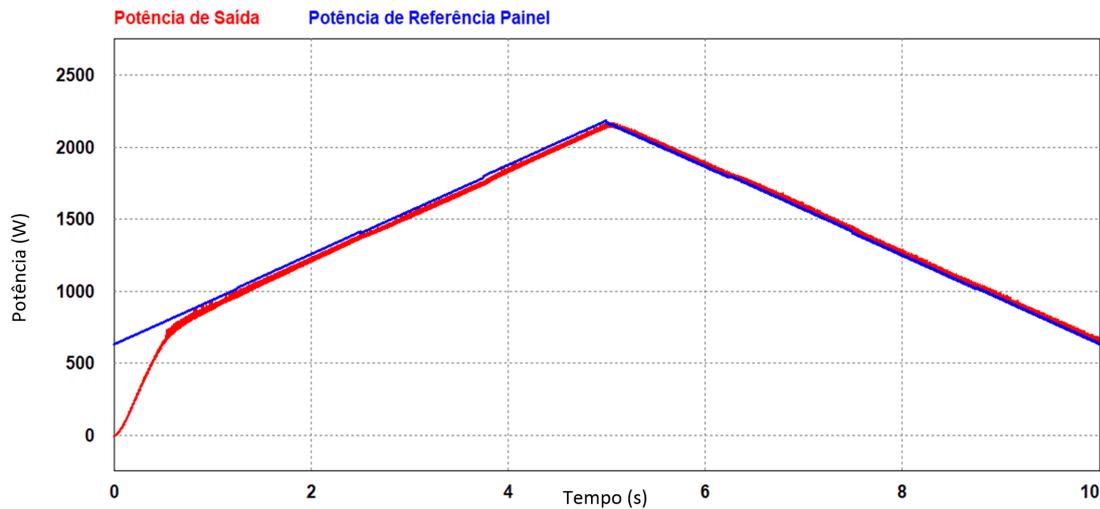


Fonte: Próprio Autor

Na [Figura 36](#), são mostradas as forma de onda de potência através do método e

a forma de onda de potência na carga. No instante de 5s, a potência de saída torna-se levemente maior, pois neste instante a irradiação começa a diminuir, e como o capacitor armazena a energia do instante anterior, em que a irradiação era maior, a potencia saída tende a ficar ligeiramente maior.

Figura 36 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Rampa.



Fonte: Próprio Autor

Para atestar, o funcionamento do método em condições, de rápida mudança de irradiação e temperatura, foi proposto uma entrada do tipo quarada, onde a irradiação foi variada de $300 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$, e a temperatura de $25C^{\circ}$ a $28C^{\circ}$.

A Figura 37, apresenta as formas de ondas de potências de referência e através do MPPT com entrada quadrada.

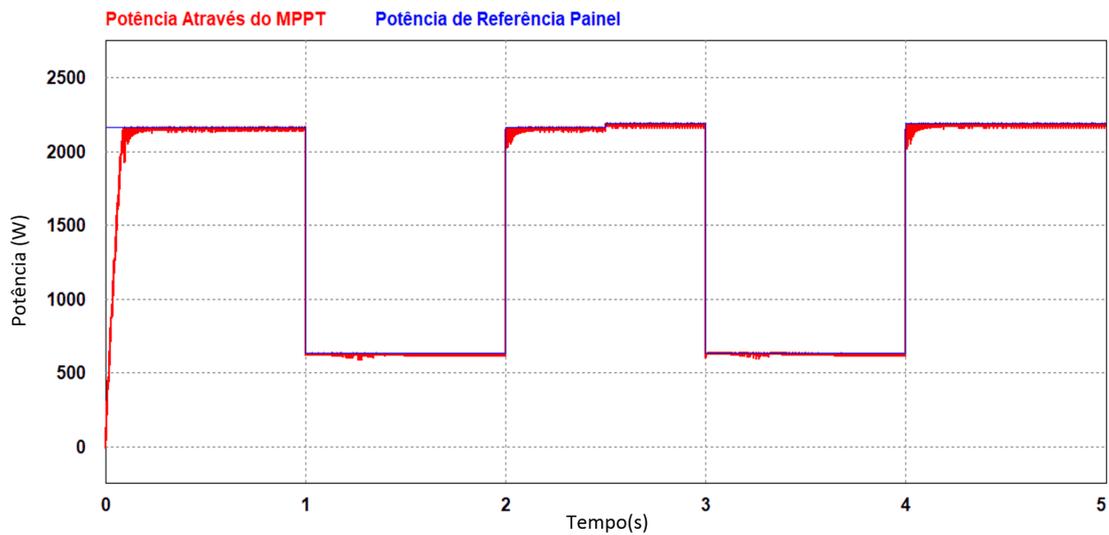
O método provou-se funcional, mesmo quando a irradiação foi variada de forma rápida e brusca, juntamente com variações de temperatura, em que mesmo alcançou rapidamente o ponto de máxima potencia e permaneceu seguindo as variações de potência.

Na Figura 38, são apresentados as formas de onda de tensão e corrente, para os dados simulados na Figura 37.

Nota-se que a tensão oscila, conforme a mudança de temperatura, mas também em relação a abrupta mudança de irradiação, isto ocorre pelo fato de o conversor boost, estar trabalhando aquém do que foi projetando, mesmo assim os resultados são aceitáveis em que a oscilação máxima de tensão fica na ordem de $4,5V$. Já a corrente oscila conforma e irradiação, pelo fato do painel se comportar como fonte de corrente, a oscilação máxima de corrente em regime foi de $0,25A$.

Na Figura 39, são mostradas as forma de onda de potência através do método e a forma de onda de potência na carga. Onde pode-se notar que a potência de saída não

Figura 37 – Ondas de Potências de Referência e Através do MPPT Entrada Quadrada.

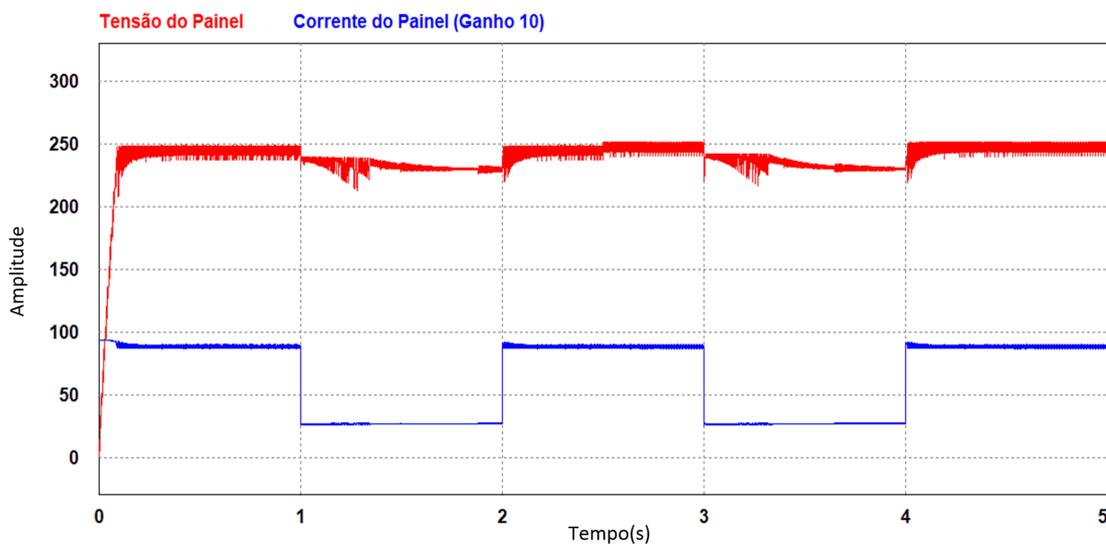


Fonte: Próprio Autor

consegue acompanhar a de referência, pois a mudança da irradiação é muito rápida, e consequentemente a uma grande oscilação de potencia.

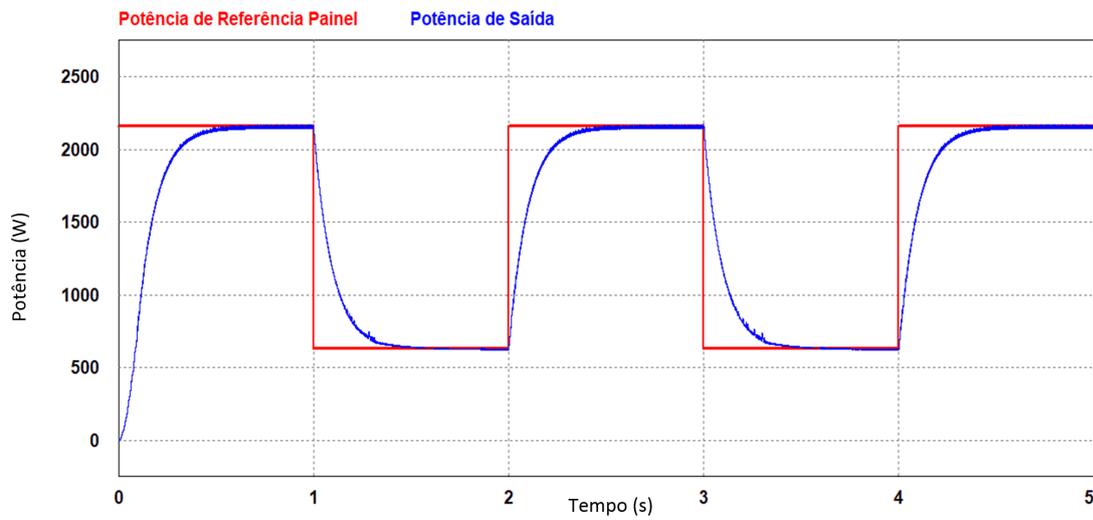
Na Figura 40, são mostrados os sinais de saída após o bloco MPPT, bem como o sinal responsável pelo chaveamento da chave MOSFET, no instante próximo a 1s, em

Figura 38 – Ondas de Tensão e Corrente Provenientes do Painel Entrada Quadrada.



Fonte: Próprio Autor

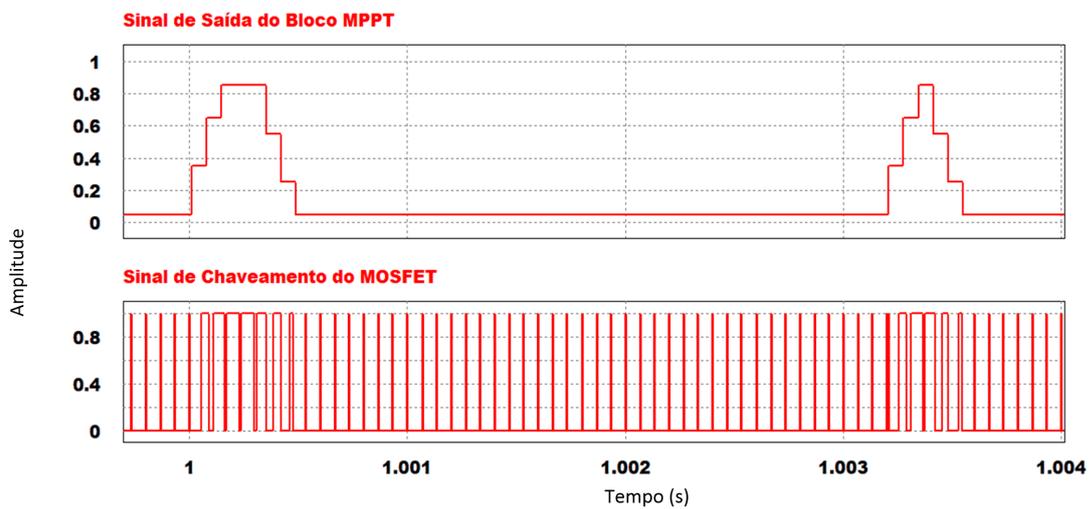
Figura 39 – Potência Através do MPPT e Potência na Carga Entrada Quadrada.



Fonte: Próprio Autor

que ocorre uma brusca variação de irradiação como visto na [Figura 37](#).

Figura 40 – Sinais de Saída do Bloco MPPT e Chaveamento do MOSFET



Fonte: Próprio Autor

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho de conclusão de Curso, foi apresentado, o desenvolvimento e simulação de um estudo na área de energias renováveis, onde proposto um arranjo com oito painéis fotovoltaicos *CanadianCS6K – M* ligados série, com capacidade de geração de 2200 W, foi aplicado a esse conjunto um circuito condicionador de potência, que utilizou um conversor de potência *CC – CC BOOST*, aplicado ao método de rastreo de máxima potencia perturba e observa.

Foram então feitas, as especificações do conversor *CC – CC boost*, bem como de seus componentes internos, como o objetivo de adequar os níveis de tensão entre o arranjo e a carga.

A modelagem física do painel *CanadianCS6K – M*, bem como a simulação do circuito proposto, foram realizadas no ambiente do software *PSIM®*. Em que o método foi testado a diferentes níveis de irradiação solar e temperatura, tendo como objetivo comprovar a eficiência do método.

Foram testadas, quatro tipos de entradas diferentes a entrada constante, senoidal, rampa e quadrada de modo, a tentar simular as condições reais a que o arranjo estaria exposto.

Em um primeiro momento, o arranjo foi testado em condições ideais, idênticas e constantes as do *datasheet* com irradiação $1000 \frac{W}{m^2}$ e temperatura de $25^{\circ}C$, para este cenário o método convergiu rapidamente levando apenas 0,1s, e uma oscilação de potencia da ordem de 2W. A oscilação de tensão em regime foi de 4,5V e a de corrente de 0,1A, sendo estes valores melhores que os de projeto.

Foi testada também, a entrada de forma senoidal com um tempo de simulação relativamente elevado de 60s, objetivando expor o arranjo a condições de sombreamento lento, em que a irradiação foi variada $400 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$ e temperatura de forma também senoidal e lenta de $25^{\circ}C$ a $45^{\circ}C$. A oscilação de potência foi da ordem de 20W, ocorrendo no instante de mais baixa irradiação, neste instante também ocorreram as maiores oscilações de tensão e corrente, em torno de 8V e 0,15A. Considerando o tempo de simulação, e a grande variação, tanto de irradiação como de temperatura, os resultados obtidos foram satisfatórios.

A entrada em rampa, também foi testa objetivo de reproduzir um sobramento de forma continua e rápida, em que a irradiação foi variada $300 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$ e a temperatura de $25^{\circ}C$ a $27^{\circ}C$. A maior oscilação de potência foi em torno de 23W, e ocorreu quando o valor da irradiação era o mais baixo, neste instante também ocorreram as maiores oscilações de tensão da ordem de 17,5V, valores foram razoáveis, considerando o nível de irradiação neste instante.

A entrada de forma quadrada, foi proposta para atestar o funcionamento do método, em condições de variação brusca em um curto espaço de tempo, a irradiação foi variada de $300 \frac{W}{m^2}$ a $1000 \frac{W}{m^2}$ e a temperatura de $25^{\circ}C$ a $28^{\circ}C$. O método mostrou-se

eficiente, alcançando rapidamente o ponto de máxima potência e permanecendo, apesar das variações bruscas de irradiação temperatura. As oscilações tanto de tensão, como de corrente estão dentro do que foi projetado, com valores em torno de 4, 5 e 0, 25A.

Para todas as entradas, a potência de saída se mostrou de acordo com o esperado, tendo apenas um atraso em relação a potência que foi fornecida pelo conversor, isto se deve ao carregamento do capacitor de saída C_s .

Notou-se porém, um aumento da oscilação da tensão de terminal, quando os níveis de irradiação chegaram próximos a $300 \frac{W}{m^2}$, isto ocorreu devido ao conversor, estar trabalhando aquém do que foi projetado. E apesar disto, a gama de diferentes níveis de irradiações e temperaturas a qual o método é válido é muito grande, justificando a sua aplicabilidade.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, A. Atlas de energia elétrica do Brasil. **Brasília**, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 21, 24 e 25.
- ASSOCIATION, E. P. I. et al. Global market outlook for photovoltaics 2013-2017. **EPIA Report**, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.
- BARBI, I.; MARTINS, D. C. Conversores cc-cc básicos não isolados. **Edição dos autores. Florianópolis**, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- BOEFF, L. F. Relé de potência reversa. 2013. Citado na página 27.
- CANADIAN. **datasheet: CS6K-275**. 2017. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/downloads/datasheets/na/Canadian_Solar-Datasheet-CS6KM_SmartDC_v5.4na.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- CANTOR guillermo andrés rodríguez. influência dos fatores climáticos no desempenho de módulos fotovoltaicos em regiões de clima tropical. **universidade federal da paraíba**, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 33, 35 e 36.
- CAVALCANTI, M. et al. Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. **Eletrônica de Potência**, v. 12, n. 2, p. 163–171, 2007. Citado na página 36.
- CHAVES, E. et al. Projeto de controlador baseado no modelo interno utilizado em p&o-mppt e conversor cc-cc boost quadrático. **Eletrônica de Potência**, p. 383–394. Citado na página 47.
- COELHO, R. F. et al. Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. Florianópolis, SC, 2008. Citado 7 vezes nas páginas 36, 37, 38, 39, 40, 41 e 42.
- CORRÊA, T. P. **Desenvolvimento de um Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Maximização das Eficiências do Arranjo Fotovoltaico e do Motor Elétrico**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Citado na página 40.
- EPE, D. d. E. 2050. **Estudos de Demanda de Energia Empresa de Pesquisa Energética-Ministério de Minas e Energia**, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- FADIGAS, E. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. **Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo**, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- GABRIELA, G. et al. Células solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdutório sobre energia renovável para alunos de graduação. **Química Nova**, 2015. Citado na página 34.
- HOMEPOWER. **Maximum Power Point Tracking (MPPT)**. 2017. Disponível em: <<http://www.homepower.com/maximum-power-point-tracking-mppt>>. Citado na página 37.
- JR, C. J. O. et al. Projeto e simulação de um arranjo fotovoltaico composto por 2 strings utilizando mppt's independentes. Citado 3 vezes nas páginas 45, 46 e 47.

- KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. **IEEE transactions on industry applications**, IEEE, v. 41, n. 5, p. 1292–1306, 2005. Citado na página 45.
- KYOCERA. **datasheet: kd210gx-lp**. 2017. Disponível em: <<https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/kd210gx-lp.pdf?>> Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- MENDONÇA, C. M. análise de rendimento de um painel fotovoltaico com o vidro danificado. **universidade federal do pampa**, 2017. Citado na página 35.
- MME. energia solar brasil e no mundo. **Brasília**, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 21, 25, 26 e 27.
- MOHAN, N. **Power electronics: a first course**. [S.l.]: Wiley, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. **Rio de Janeiro: CEPTEL**, 2014. Citado na página 26.
- RASHID, M. H. Power electronic handbook. **Academic Press, Elsevier**, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- RIBEIRO, M. R. Conexão de um sistema solar fotovoltaico na rede de distribuição de energia elétrica. 2015. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31 e 37.
- STEIN, F. Conversão de energia solar fotovoltaica com rastreamento de máxima potência aplicado ao conversor boost. **UDESC. Joinville**, p. 78, 2012. Citado na página 36.
- VILELA, A. O. R. Projeto e construção de um conversor boost controlado em modo de tensão. **Universidade Federal de Viçosa**, 2011. Citado na página 26.