

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Miréli Binder Vendruscolo

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT**

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

**Miréli Binder Vendruscolo**

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. António Manuel Santos Spencer Andrade

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

---

©2020

Todos os direitos autorais reservados a Miréli Binder Vendruscolo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Saldanha Marinho, N° 757, Centro, Cachoeira do Sul, RS, Brasil.

CEP: 96508-001;

Fone: (55) 99710-2280;

Endereço Eletrônico: [mibvendruscolo@hotmail.com](mailto:mibvendruscolo@hotmail.com)

---

**Miréli Binder Vendruscolo**

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) – Campus Cachoeira do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Aprovado em 21 de agosto de 2020:**

---

**Antônio Manuel Santos Spencer Andrade, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Cristiane Cauduro Gastaldini, Dra. (UFSM)**

---

**Ronaldo Antonio Guisso, Dr. (UFSM)**

Cachoeira do Sul, RS, Brasil  
2020

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus pais Valdir e Lovani pelo apoio e incentivo. Obrigada por estarem sempre ao meu lado.*

*Sou grata aos meus professores que acompanharam meus estudos durante estes anos e pela contribuição na minha formação academia e profissional. Agradeço ao meu orientador por todo o apoio e ajuda no desenvolvimento desse trabalho.*

*Obrigado aos meus amigos, namorado (Cristian) e familiares que me deram suporte e a compreensão necessária nesses últimos anos.*

*Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul pela oportunidade de estudo e por proporcionar uma educação de qualidade.*

*"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."*

*(José de Alencar)*

## RESUMO

### ANÁLISE COMPARATIVAS DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT

AUTORA: Miréli Binder Vendruscolo

ORIENTADOR: António Manuel Santos Spencer Andrade

Primeiramente é feito um estudo sobre o panorama da energia elétrica, com o intuito de apresentar os principais benefícios de se utilizar a energia solar fotovoltaica. Posteriormente os painéis fotovoltaicos (PVs) são analisados, através do modelo matemático e elétrico equivalente. Assim como o efeito dos fatores meteorológicos, que são: irradiação e temperatura, nas características elétricas de rendimento e potência de um PV. Para que os painéis fotovoltaicos operem no ponto de máxima potência, é necessário utilizar técnicas que procurem incessantemente este ponto. Por essa razão, as técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), aplicadas em um conversor CC-CC, são essenciais para se obter a máxima potência produzida, visto que esses algoritmos trabalham em qualquer ponto da curva IxV. Sendo assim, é realizada uma análise comparativa entre as principais técnicas clássicas de rastreamento do ponto de máxima potência, sendo elas: Perturba e Observa (P&O), Hill Climbing (HC) e Condutância Incremental (InC). Essas técnicas serão testadas para variações bruscas de irradiação e temperatura. Será feita uma análise de desempenho utilizando os conversores estáticos CC-CC: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. No qual, o MPPT será aplicado na entrada e saída dos conversores, a fim de observar qual posição obtém o melhor desempenho, para os diferentes MPPTs. Os principais pontos a serem analisados serão: oscilação de potência, eficiência e tempo de convergência para a estabilização. Os resultados de simulação foram obtidos através do *software* de simulação PSIM®.

**Palavras-chave:** Painéis fotovoltaicos. Irradiação e temperatura. MPPT. Conversores estáticos CC-CC. *Buck*. *Boost*. *Buck-Boost*. Perturba e Observa. Hill Climbing. Condutância Incremental. Psim.

## ABSTRACT

### COMPARATIVE ANALYSIS OF MPPT CLASSICAL TECHNIQUES

AUTHOR: Miréli Binder Vendruscolo

ADVISOR: António Manuel Santos Spencer Andrade

Firstly, a study is done on the panorama of electric energy, in order to present the main benefits of using solar photovoltaic energy. Subsequently, the photovoltaic panels (PVs) are analyzed, through the equivalent mathematical and electrical model. As well as the effect of meteorological factors, which are: irradiation and temperature, on the electrical characteristics of performance and power of a PV. For the photovoltaic panels to operate at the point of maximum power, it is necessary to use techniques that constantly seek this point. For this reason, MPPT (Maximum Power Point Tracking) techniques, applied in a CC-CC converter, are essential to obtain the maximum power produced, since these algorithms work at any point on the  $I \times V$  curve. Therefore, a comparative analysis is carried out between the main classic techniques for tracking the maximum power point, namely: Disturb and Observe (P&O), Hill Climbing (HC) and Incremental Conductance (InC). These techniques will be tested for sudden variations in radiation and temperature. A performance analysis will be made using the static converters CC-CC: Buck, Boost and Buck-Boost. In which, the MPPT will be applied at the input and output of the converters, in order to observe which position obtains the best performance, for the different MPPTs. The main points to be analyzed will be: oscillation of power, efficiency and time of convergence for stabilization. The simulation results were obtained using the PSIM® simulation software.

**Keywords:** Photovoltaic panels. Irradiation and temperature. MPPT. Static DC-DC converters. Buck. Boost. Buck-Boost. Disturb and Observe. Hill Climbing. Incremental conductance. Psim.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz elétrica mundial .....	13
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira: potência instalada em operação (MW) .....	14
Figura 3 – Potência instalada e status da Geração Centralizada solar fotovoltaica por estado	15
Figura 4 – Média anual da irradiação no Brasil.....	16
Figura 5 – Geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo.....	17
Figura 6 – Curva característica de corrente e tensão em função da irradiação e da temperatura .....	18
Figura 7 – Diagrama de uma célula fotovoltaica.....	21
Figura 8 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica de um diodo.....	23
Figura 9 – Curva $I \times V$ de um painel fotovoltaico sobreposta por uma curva típica de potência vs. tensão.....	25
Figura 10 – Influência da irradiação solar e da temperatura em painéis fotovoltaicos .....	27
Figura 11 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa (P&O).....	28
Figura 12 – Fluxograma da técnica Hill Climbing (HC).....	29
Figura 13 – Fluxograma da técnica Condutância Incremental (InC) .....	31
Figura 14 – Conversor CC-CC .....	33
Figura 15 – Conversor CC-CC com a) MPPT na entrada e b) MPPT na saída.....	34
Figura 16 – Conversor (a) <i>Boost</i> . (b) <i>Boost</i> simplificado. (c) <i>Buck</i> . (d) <i>Buck</i> simplificado. (e) <i>Buck-Boost</i> . (f) <i>Buck-Boost</i> simplificado. ....	34
Figura 17 – Etapas de operação do conversor <i>Boost</i> (a) Interruptor fechado (b) Interruptor aberto .....	36
Figura 18 – Formas de onda do conversor <i>Boost</i> .....	36
Figura 19 – Ganho estático do conversor <i>Boost</i> .....	38
Figura 20 – Esboço de um sistema fotovoltaico com o conversor <i>Boost</i> .....	39
Figura 21 – Simplificação do capacitor de entrada .....	41
Figura 22 – Simulação do conversor <i>Boost</i> .....	45
Figura 23 – Tensão de saída do conversor <i>Boost</i> .....	45
Figura 24 – Corrente no indutor do conversor <i>Boost</i> .....	46
Figura 25 – Corrente no interruptor do conversor <i>Boost</i> .....	46
Figura 26 – Tensão no interruptor do conversor <i>Boost</i> .....	47
Figura 27 – Corrente no diodo do conversor <i>Boost</i> .....	47
Figura 28 – Tensão no diodo do conversor <i>Boost</i> .....	47

Figura 29 – Tensão no capacitor de saída .....	48
Figura 30 – Corrente no indutor para uma potência mínima.....	48
Figura 31 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Buck.....	53
Figura 32 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Boost.....	53
Figura 33 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Buck-Boost.....	54
Figura 34 – Conversor Boost com MPPT na entrada.....	69
Figura 35 – Conversor Buck com MPPT na entrada.....	69
Figura 36 – Conversor Buck-Boost com MPPT na entrada .....	70
Figura 37 – Conversor Boost com MPPT na saída .....	70
Figura 38 – Conversor Buck com MPPT na saída .....	70
Figura 39 – Conversor Buck-Boost com MPPT na saída.....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Característica das células fotovoltaicas .....	22
Quadro 2 – Característica dos conversores.....	35
Quadro 3 – Parâmetros do módulo fotovoltaico.....	40
Quadro 4 – Parâmetros escolhidos para o projeto dos conversores <i>Buck</i> , <i>Boost</i> e <i>Buck-Boost</i> .....	44
Quadro 5 – Parâmetros calculado para o conversor <i>Boost</i> .....	44
Quadro 6 – Parâmetros calculados para os conversores <i>Buck</i> e <i>Buck-Boost</i> .....	49
Quadro 7 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor <i>Boost</i> .....	50
Quadro 8 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor <i>Boost</i> .....	51
Quadro 9 – Resultados de simulação da técnica InC aplicada na entrada e saída do conversor <i>Boost</i> .....	52
Quadro 10 – Avaliação qualitativa .....	54
Quadro 11 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor <i>Buck</i> .....	65
Quadro 12 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor <i>Buck</i> .....	66
Quadro 13 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor <i>Buck-Boost</i> .....	67
Quadro 14 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor <i>Buck-Boost</i> .....	68

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	PANORAMA ENERGETICO NO BRASIL E NO MUNDO .....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.3.1	Objetivos gerais .....	19
1.3.2	Objetivos específicos .....	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
2.1	PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....	21
2.1.1	Modelo matemático e elétrico equivalente da célula fotovoltaica.....	23
2.1.2	Efeitos dos fatores meteorológicos nas características elétricas .....	26
2.1.3	Técnica Perturba e Observa (P&O) .....	27
2.1.4	Técnica Hill Climbing (HC) .....	29
2.1.5	Técnica Condutância Incremental (InC) .....	30
2.2	ESTRATÉGIAS DE COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MPPT .....	32
<b>3</b>	<b>CONVERSORES ESTÁTICOS</b> .....	<b>33</b>
3.1	ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR <i>BOOST</i> .....	35
3.1.1	Primeira etapa de operação ( $0 < t < DT_s$ ).....	35
3.1.2	Segunda etapa de operação ( $DT_s < t < T_s$ ) .....	37
3.2	CÁLCULO DO GANHO ESTÁTICO .....	38
3.3	METODOLOGIA DE PROJETO .....	39
3.3.1	Capacitor de entrada $C_{pv}$ .....	40
3.3.2	Projeto do indutor .....	41
3.3.3	Projeto do capacitor de saída .....	42
3.3.4	Semicondutores (interruptor e diodo).....	43
3.4	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÕES</b> .....	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>ANEXO A – DATASHEET DO MÓDULO SOLAR CS6K DA CANADIAN SOLAR</b> .....	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO B – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES BUCK E BUCK-BOOST</b> .....	<b>65</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO C – CIRCUITOS ELÉTRICOS E CÓDIGOS DE MPPT</b> .....	<b>69</b>

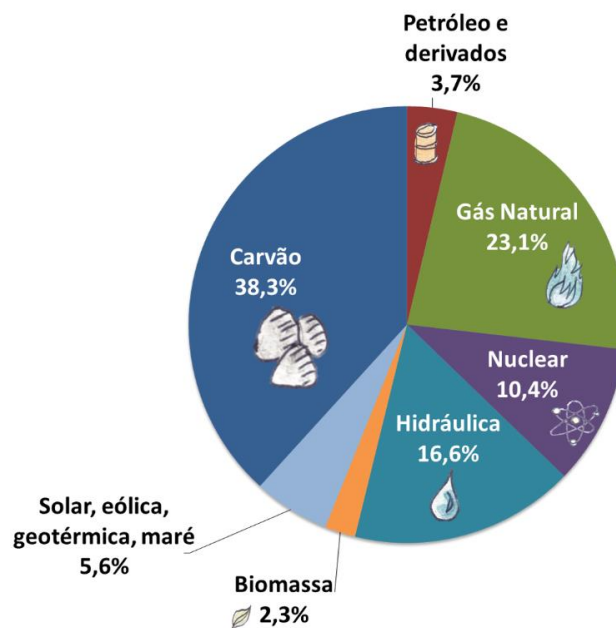
# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o panorama energético do país e no mundo, dando ênfase na geração fotovoltaica. Destacando-se as vantagens de se utilizar energias provenientes de fontes renováveis. São apresentados os motivos que impulsionaram este estudo, assim como a metodologia de forma a esclarecer o tema proposto.

## 1.1 PANORAMA ENERGETICO NO BRASIL E NO MUNDO

Atualmente, há um incessante aumento no desenvolvimento do setor industrial mundial, na utilização de equipamentos elétricos em diversas atividades diárias, que contribuem para o aumento da demanda de energia elétrica (CONFESSOR, 2014). A Figura 1 apresenta um percentual das principais fontes constituintes da matriz elétrica mundial. Observa-se que grande parte da energia provém de fontes não renováveis, como: petróleo (3,7%), carvão (38,3%) e o gás natural (23,1%). As fontes de energias não renováveis são baseadas em recursos que vão se esgotando ao longo do tempo e apresentam um impacto ambiental bastante negativo. Um exemplo é a queima de combustíveis fósseis, que emitem gases como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o metano ( $\text{CH}_4$ ), que provocam o efeito estufa, causando o aquecimento global (ZIENTARSKI, 2017).

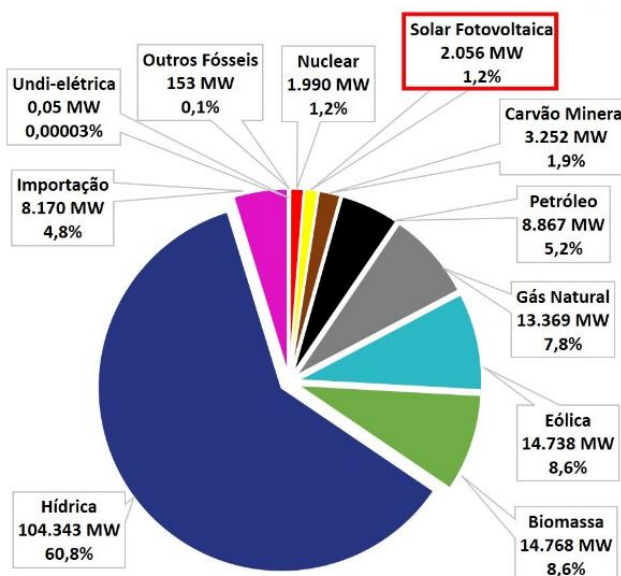
Figura 1 – Matriz elétrica mundial



Fonte: (EPE, 2018).

A matriz elétrica do Brasil é composta, principalmente, por energia proveniente de usinas hidrelétricas, conforme pode ser visto na Figura 2, com mais de 60% de energia provinda de recursos hídricos. Pois, o país dispõe de uma grande bacia hidrográfica, reduzindo assim o interesse na geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos (IMHOFF, 2007). Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2019b) a potência total instalada de sistemas fotovoltaicos, atingiu a marca de 2,056 megawatts (MW) de operação em sistemas de geração centralizada, ou seja, usinas de grande porte, conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Isto equivale à 1,2% na matriz elétrica brasileira. Ocupando o 7º lugar no ranking das principais fontes do País, ultrapassando a energia nuclear com 1.990 MW advindas das usinas Angra I e Angra II no Rio de Janeiro.

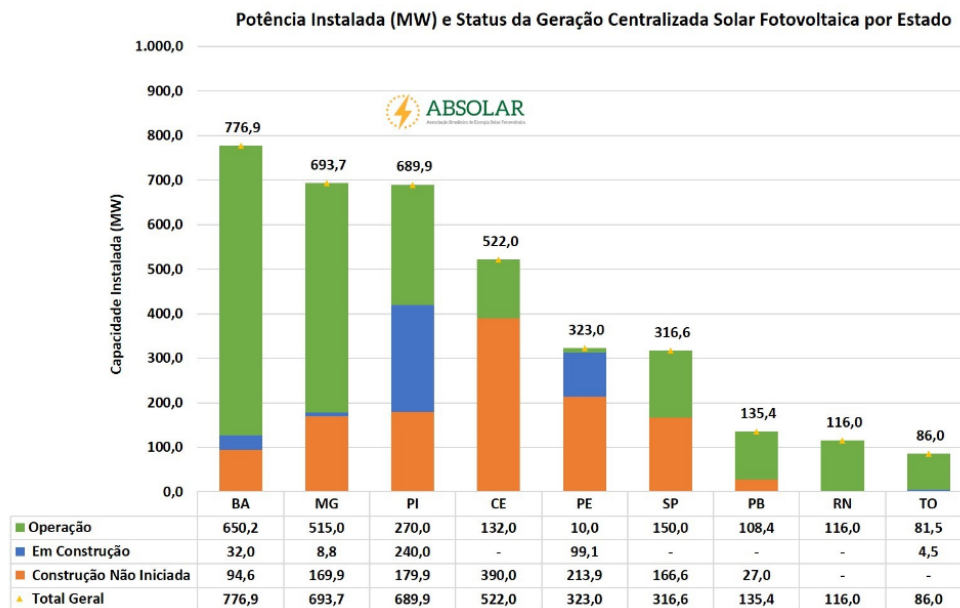
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira: potência instalada em operação (MW)



Fonte: (ANEEL/ABSOLAR, 2019b).

O Brasil possui atualmente várias usinas solares fotovoltaicas de grande porte, operando em nove estados nas regiões Nordeste, Sudeste e Norte. A Figura 3, apresenta o status de geração centralizada de energia fotovoltaica por estado e a potência total já instalada. Como pode ser visto, o estado da Bahia está liderando o ranking nacional com 776,9 MW de potência instalada no país, não muito atrás está Minas Gerais (693,7 MW) e Piauí (689,9 MW) (ABSOLAR, 2019b). Ainda, segundo a ABSOLAR (2018), a previsão é que até 2040 a fonte de energia solar alcançará cerca de 126 mil MW, conquistando o posto de primeira fonte no ranking da matriz, com 32% de participação, superando as hidrelétricas, que terá 29%.

Figura 3 – Potência instalada e status da Geração Centralizada solar fotovoltaica por estado

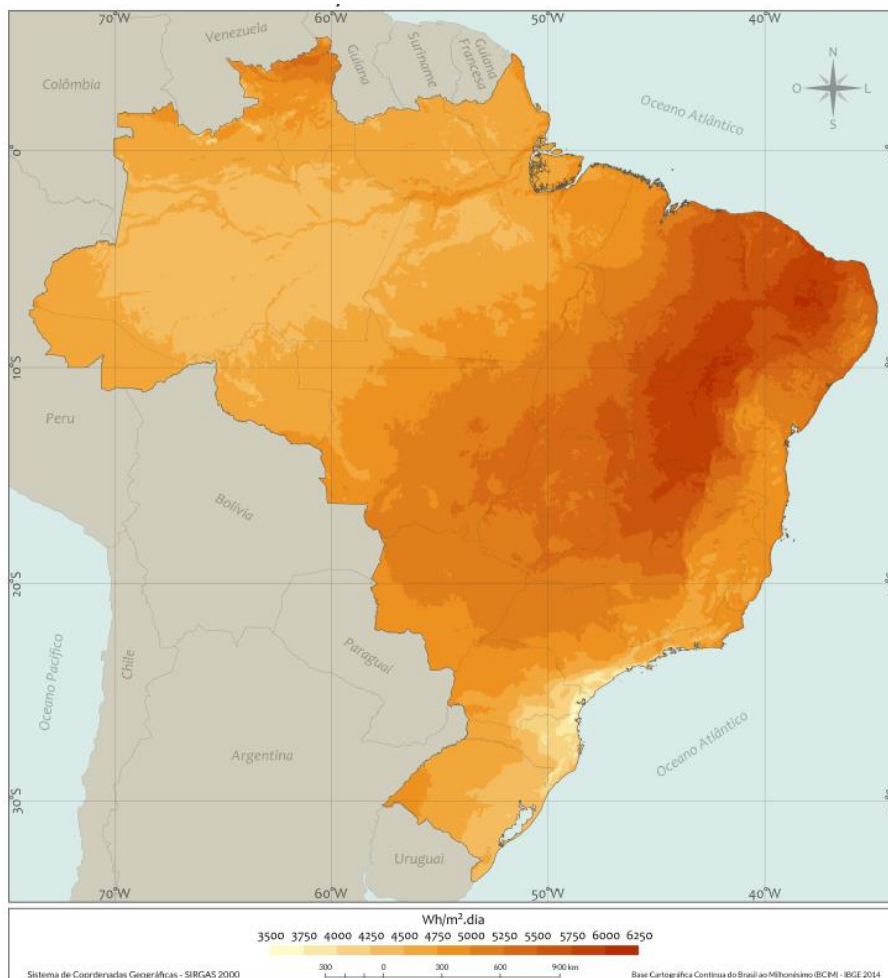


Fonte: (ABSOLAR, 2019b).

O constante aumento da demanda de energia elétrica no Brasil, junto à necessidade de diminuir a dependência dos combustíveis fósseis, faz com que há uma maior busca por fontes de energia limpa e renováveis. Pois, pode-se utilizá-las continuamente e nunca acabam, tais como: sistemas fotovoltaicos; hidrelétricas; eólicas; oceânicas; geotérmicas; e da biomassa (VILLALVA, 2017). Segundo a ABSOLAR (2019a), a energia solar se destaca pela redução dos gastos com energia elétrica, atração de novos investimentos privados, geração de empregos locais, redução de impacto ambiental, redução das perdas elétricas na rede, alívio no sistema elétrico em horários de alta demanda diurna, principalmente no verão.

O Brasil possui um enorme potencial de geração de energia a partir do sol, pois há uma alta incidência de radiação solar, devido ao país estar localizado próximo à linha do Equador, propiciando uma alta incidência solar durante todo o dia e pouca variação ao longo das estações do ano. A Figura 4, apresenta o mapa solarimétrico do Brasil, com os dados de radiação média anual em ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ), apontando altos índices de radiação em todo território ( $3500$  à  $6250 \text{ Wh}/\text{m}^2.\text{dia}$ ). Como pode ser visto, a região do Nordeste possui o maior índice de irradiação, devido sua localização mais próxima ao Equador, em seguida estão as regiões Centro-Oeste, Sudeste, Norte e Sul. Os níveis nacionais de irradiação solar são muito maiores que os de países como a Alemanha, que fazem uso da tecnologia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica em grande escala (INPE, 2017).

Figura 4 – Média anual da irradiação no Brasil



Fonte: (ATLAS BRASILEIRO/LABREN/CCST/INPE, 2017).

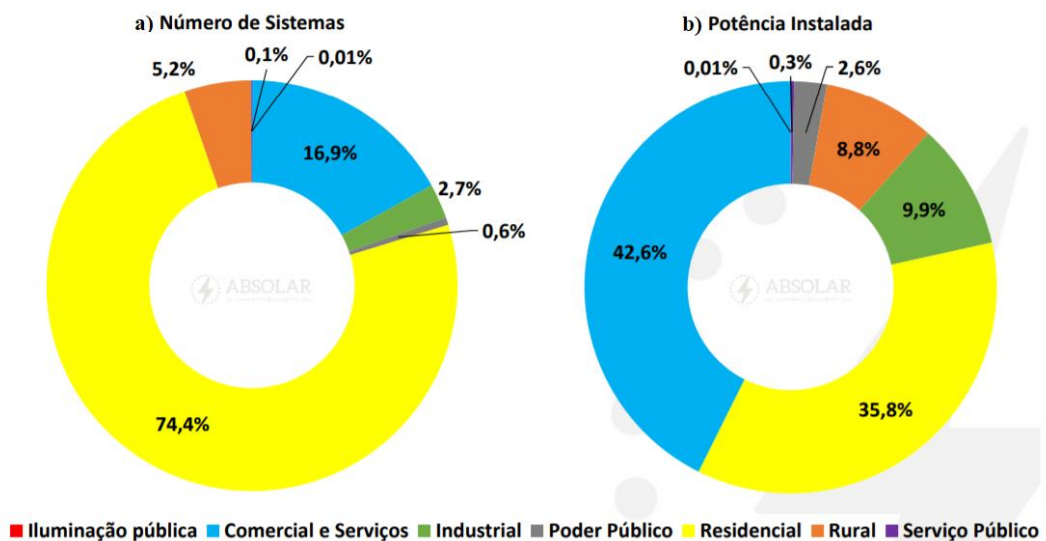
Atualmente o Brasil ultrapassou a marca de 1 gigawatt (GW) de potência instalada em micro e minigeração distribuída de energia elétrica. A fonte mais utilizada para micro e minigeração distribuída, pelos consumidores brasileiros, é a solar fotovoltaica, com 82,6 mil micro e mini usinas e cerca de 870 megawatts (MW) de potência instalada. Em segundo lugar está a produção por centrais geradoras hidrelétricas (CGHs), com 86 usinas e 81,3 MW de potência. Os estados que mais aderiram, superando 10 mil unidades consumidoras, foram Minas Gerais (16,7 mil unidades de geração e 212,3 MW de potência instalada), Rio Grande do Sul (12 mil unidades, 144,4 MW) e São Paulo (14,5 mil unidades, 117,4 MW) (ANEEL, 2019).

Segundo a ABSOLAR (2019a), conforme visto na Figura 5 (a), em número de sistemas instalados, os consumidores residenciais estão no topo da lista, representando 74,4% do total. Em seguida, aparecem as empresas dos setores de comércio e serviços (16,9%), consumidores rurais (5,2%), indústrias (2,7%), poder público (0,6%) e outros tipos, como serviços públicos (0,1%) e iluminação pública (0,01%). Já em potência instalada Figura 5 (b), os consumidores



dos setores de comércio e serviços lideram o uso da energia solar fotovoltaica, com 42,6% da potência instalada no País, seguidos de perto por consumidores residenciais (35,8%), indústrias (9,9%), consumidores rurais (8,8%), poder público (2,6%) e outros tipos, como serviços públicos (0,3%) e iluminação pública (0,01%).

Figura 5 – Geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo



Fonte: (SAUAIA, 2019).

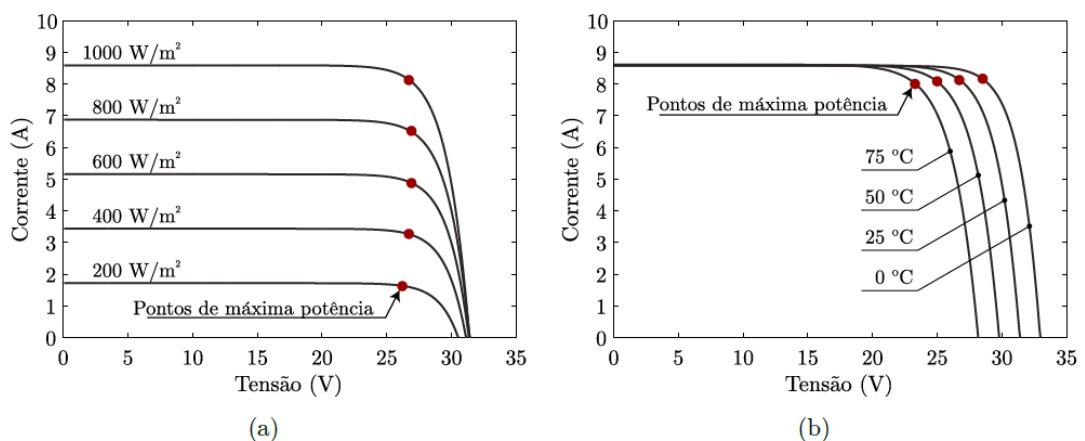
Sem dúvida, a energia solar é a melhor alternativa no quesito energia limpa, pois é um recurso abundante e capaz de suprir nossas necessidades de consumo sem poluição. Os painéis fotovoltaicos (PVs) captam a luz solar e convertem em eletricidade. São formados por células conectadas entre si, que individualmente possuem uma capacidade reduzida de produção de energia, equivalente a 1,5 W. Portanto, para atender a demanda necessária de energia, as células são associadas através de ligações série e paralelo, formando os PVs (IMHOFF, 2007). Normalmente um módulo fotovoltaico é constituído por cerca de 33 a 36 células ligadas em série (SEGUEL, 2009).

As características elétricas de rendimento e potência em um painel fotovoltaico são influenciadas diretamente por dois fatores climáticos: intensidade da radiação solar e temperatura das células. Ou seja, quanto maior a irradiação solar na célula ou painel fotovoltaico, maior será a corrente gerada e conseqüentemente maior a potência. Os painéis fotovoltaicos por estarem dispostos no sol, recebem uma grande quantidade de energia térmica, além do aquecimento pela resistência, isto faz com que a sua temperatura aumente, e conseqüentemente a tensão de saída diminui (GRUNDEMANN, 2017).

O termo MPP (*Maximum Power Point* – ponto de máxima potência) é utilizado para denominar um ponto específico de tensão e corrente, em que a célula ou módulo PV, com uma certa irradiação solar e temperatura, onde a potência é máxima. Para que os painéis fotovoltaicos operem sempre no MPP, é necessário utilizar técnicas que procurem incessantemente este ponto. Visto que os mesmos estão sujeitos a mudanças de irradiação, temperatura e carga constantemente (GRUNDEMANN, 2017).

A técnica de MPPT (*Maximum Power Point Tracking* – rastreamento do ponto de máxima potência) é realizada a partir de algoritmos de controle, em um conversor CC, que rastreiam incessantemente o ponto de operação, trabalhando em qualquer ponto da curva  $I \times V$ , para se obter a máxima potência dos módulos PVs (GRUNDEMANN, 2017). Conforme pode ser visto a Figura 6(a) apresenta as curvas resultantes para uma temperatura fixa de  $25^{\circ}\text{C}$  com uma irradiação variando de  $200$  a  $1000 \text{ W/m}^2$  e em (b) são apresentadas as curvas resultantes para uma irradiação fixa de  $1000 \text{ W/m}^2$  com a temperatura variando de  $0$  a  $75^{\circ}\text{C}$ . Cada curva destaca em vermelho, pontos em que a potência extraída do módulo é máxima. Podendo ser observado, que o nível de corrente em que ocorre o MPP sofre maior variação em função das variações da irradiação, enquanto que as variações na tensão do MPP são menores e dependem principalmente da temperatura de operação (ZIENTARSKI, 2017).

Figura 6 – Curva característica de corrente e tensão em função da irradiação e da temperatura



Fonte: (ZIENTARSKI, 2017).

Nos sistemas com maior número de painéis, surgem problemas relacionados à sombreamento parcial. Esse fato tende a diminuir o MPP do sistema. Para contornar tais problemas, diferentes arquiteturas podem ser utilizadas, tais como: Inversor Central, Inversor *Multi-string*, Inversor *String* e Inversor Integrado (ZIENTARSKI, 2017).

Portanto, para garantir a máxima potência é necessário utilizar o MPPT, que garantirá um retorno rápido do investimento e, também contribuirá para a diminuição do número de painéis para se obter a mesma potência, reduzindo os custos da energia gerada.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os algoritmos de MPPT são a melhor maneira de coletar a potência máxima disponível dos painéis fotovoltaicos, aumentando assim o ganho na produção de energia. Os principais métodos clássicos são: Perturba e Observa (P&O), Hill Climbing (HC) e Condutância Incremental (InC). O estudo de MPPT é necessário para que ocorra um aproveitamento máximo da eficiência do sistema, garantindo assim menores custos, maior ganho na produção e maior rendimento.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivos gerais

Estudar, simular e fazer uma análise comparativa das principais técnicas de MPPT para um sistema fotovoltaico. Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos devem ser seguidos.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Revisão bibliográfica de estudos realizados sobre sistemas de energia fotovoltaica;
- Estudo do panorama da energia elétrica;
- Estudo das características para obter o ponto de máxima potência;
- Estudo dos algoritmos de MPPT;
- Estudo de conversores estáticos CC-CC aplicados em sistemas fotovoltaicos;
- Análise das técnicas propostas através de resultados obtidos em simulação computacional, visando escolher a mais eficiente para trabalhos futuros;
- Divulgação dos resultados.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No segundo capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica teórica sobre o funcionamento dos painéis fotovoltaicos, características das células, modelo matemático e

elétrico equivalente. E os fatores que afetam a curva  $I \times V$ , assim como o estudo dos algoritmos de MPPT que rastreiam a máxima potência para esses fatores. Também será apresentada as estratégias para a comparação das melhores técnicas de MPPT.

No capítulo três será apresentado os principais conversores CC-CC utilizados para as simulações, assim como a metodologia de projeto para o conversor *Boost*. Sendo este o mais utilizado na literatura.

No quarto e quinto capítulo são apresentadas respectivamente, os resultados de simulação referente a este trabalho e as conclusões.

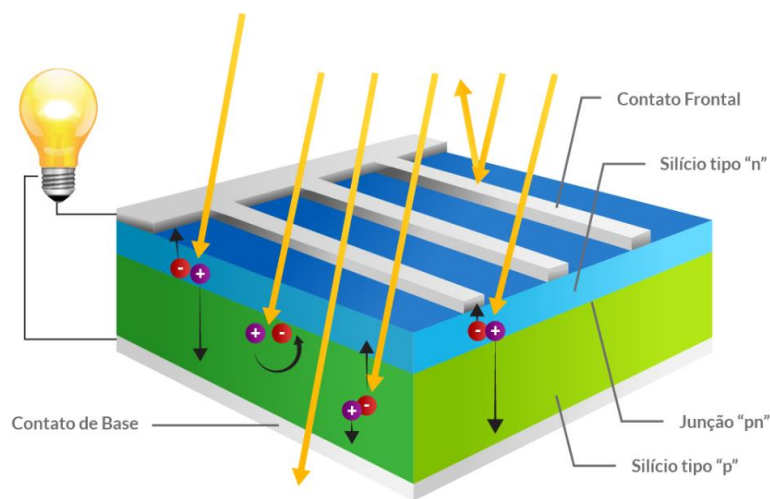
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada a revisão bibliográfica referente aos principais temas deste trabalho. Inicialmente, uma revisão sobre o funcionamento dos painéis fotovoltaicos é discutida. Por fim as técnicas clássicas de MPPT são estudadas e apresentadas, assim como também serão propostas as estratégias para comparação dos algoritmos.

### 2.1 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Um painel fotovoltaico é constituído por um conjunto de células fotovoltaicas, em série e/ou paralelo. Elas são fabricadas com um material semicondutor, geralmente o Silício. Porém, sozinho, este não é capaz de produzir corrente elétrica e a diferença de potencial exigida. Por isso, é adicionado um material dopante doador de elétrons, como o Fósforo (tipo N) e um dopante receptor de elétrons, o Boro (tipo P), formando a junção PN. Cada célula fotovoltaica é composta por uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura tipo P, conforme pode ser visto na Figura 7. Esta configuração permite que os fótons, provenientes da luz solar, absorvidos pela camada N da célula, desalojem elétrons. Que por sua vez, atingem a banda de condução e movimentam-se até os terminais da célula e direcionam-se para a camada tipo P (SOUSA, 2017). Este deslocamento de carga através da junção PN, dá origem a uma diferença de potencial. Logo, se suas extremidades forem conectadas por um fio, ainda conforme a Figura 7, haverá um fluxo de elétrons, que gera a corrente elétrica.






Figura 7 – Diagrama de uma célula fotovoltaica



Fonte: (SOUSA, 2017).

A seguir no Quadro 1, é apresentada algumas características das principais células comerciais, no qual percebe-se que as células de silício cristalino são mais eficientes e possuem uma maior potência em relação as de filme finos.

Quadro 1 – Característica das células fotovoltaicas

Tecnologia	Silício cristalino		Filmes finos		
	m – Si	p – Si	a – Si	CIGS	CdTe
<b>Eficiência</b>	15 – 22 %	14 – 20 %	5 – 9 %	10 – 13 %	9 – 11 %
<b>Potência</b>	50 – 300 W		50 – 110 W		
<b>Vantagens</b>	Alta eficiência		Processo econômico, matéria prima abundante e não tóxica	Boa eficiência	Eficiência média
<b>Desvantagem</b>	Custo elevado		Baixa eficiência, e degradação do material	Processo complexo e caro	Toxidade do Cádmio e escassez de Telúrio
<b>Aspecto</b>					

Fonte: Autor.

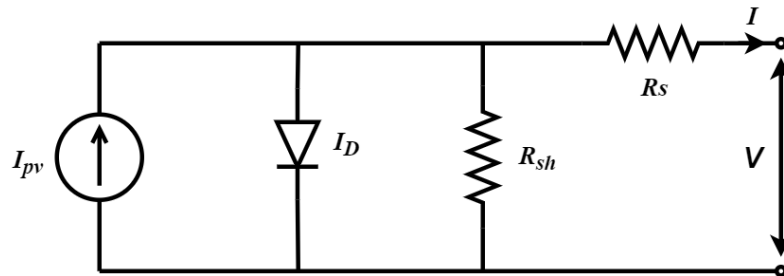
No mercado atual, temos diferentes modelos de células fotovoltaicas conforme visto no Quadro 1, que podem ser classificadas em três gerações, de acordo com seu material e suas características. A primeira geração é composta por Silício monocristalino (m – Si) e Silício policristalino (p – Si), com a maior participação no mercado, por ser uma tecnologia de maior eficiência. A segunda geração, também chamada de filmes finos, é dividida em três cadeias: Silício Amorfo (a – Si), Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) e Telureto de Cádmio (CdTe). São formadas por uma grande e única célula, fabricada na dimensão do módulo,

possuem um baixo custo e eficiência. A terceira geração, ainda em fase de pesquisa, é caracterizada por tecnologias que reúnem células orgânicas, híbridas e células solares de corante (DSC – Dye Solar Cells). Estas possuem alta eficiência, baixo custo/Watt e utilizam materiais abundantes e de baixa toxicidade (Almeida et al., 2016) (SILUK, 2017) (SILVA, 2015) (SOARES, 2011).

### 2.1.1 Modelo matemático e elétrico equivalente da célula fotovoltaica

A modelagem matemática de um painel fotovoltaico é realizada por meio de um circuito elétrico equivalente. O circuito mais usual é composto por uma fonte de corrente, que representa a corrente elétrica produzida através da irradiação absorvida, um diodo em paralelo que representa a junção PN, além de uma resistência em série e outra em paralelo que limitam a capacidade da célula, representando assim as perdas (SOUSA, 2017), conforme pode ser visto na Figura 8 abaixo.

Figura 8 – Modelo equivalente de uma célula fotovoltaica de um diodo



Fonte: Autor.

A corrente de saída  $I$  pode ser encontrada a partir do equacionamento das correntes nos três ramos do circuito, logo relaciona-se com outros parâmetros da célula, conforme (1).

$$I = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

Onde:

$I_{pv}$  - Corrente gerada pela incidência da radiação [A];

$I_D$  - Corrente de saturação reversa do diodo [A];

$V$  - Tensão entre os terminais de saída [V];

$R_s$  - Resistência em série [ $\Omega$ ];

a - Fator de idealidade do diodo ( $1 \leq a \leq 2$ );

$V_t$  - Tensão térmica [V];

$R_{sh}$  - Resistência *shunt* conectada em paralelo ( $\cong \infty$ ) [ $\Omega$ ].

Para que o circuito equivalente da célula solar, se aproxime de um modelo ideal sem perdas, é interessante que se tenha um valor alto para a resistência *shunt*, para evitar perdas. Já para a resistência em série, valores baixos são os que proporcionam uma melhor performance, pois diminuem a queda de tensão causada pelo resistor (SOUSA, 2017).

Podem ser calculados da seguinte forma:

$$R_s = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2)$$

E:

$$R_{sh} = \frac{V_{oc}}{I_{sc} - I_{mp}} \quad (3)$$

Onde:

$V_{oc}$  - Tensão de circuito aberto (*Circuit Open Voltage*);

$V_{mp}$  - Tensão de máxima potência (*Power Maximum Voltage*);

$I_{mp}$  - Corrente de máxima potência (*Maximum Power Current*);

$I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito (*Short Circuit Current*).

A tensão térmica por sua vez é obtida pela seguinte relação (4). Que relaciona tensão à temperatura e, indica outra dependência importante entre parâmetros que afetam o rastreamento do ponto de máxima potência (SOUSA, 2017). Onde  $k$  é a Constante de *Boltzmann* ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $T_{ac}$  é a temperatura da junção PN e  $q$  é a carga do elétron ( $1,60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

$$V_t = \frac{k \cdot T_{ac}}{q} \quad (4)$$

A corrente reversa de saturação  $I_D$  é dada por (5):

$$I_D = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot k \cdot T_{ac}}\right) - 1} \quad (5)$$

Onde  $I_{sc}$  é a corrente de curto-circuito e  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto. Já a corrente  $I_{pv}$  é dada em (6):

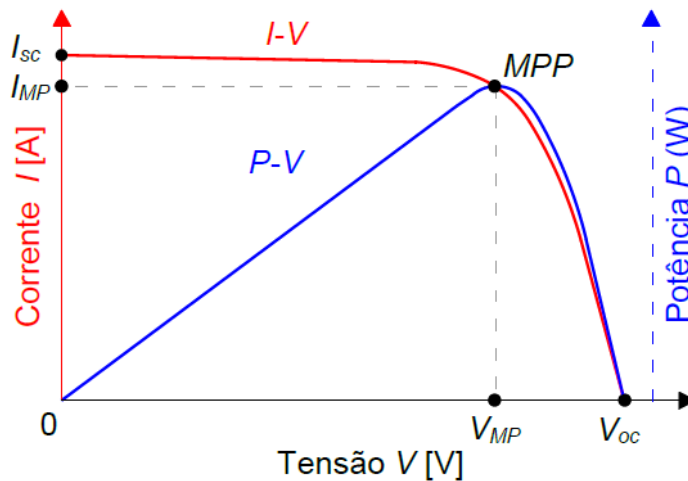


$$I_{pv} = \frac{I_{sc}}{G_{nom}} \cdot G \quad (6)$$

Onde  $G$  é a irradiância absorvida [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $G_{nom}$  é a irradiância nominal, geralmente disponibilizada pelo fabricante, igual a  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Enfim, como pode ser observado a seguir, logo é possível determinar os parâmetros das células nos casos extremos: para terminais da carga em curto-circuito, para circuito aberto e para valores máximos de tensão e corrente na carga (SOUSA, 2017) (NOVAIS, 2016). Tais parâmetros são representados em uma curva típica  $I \times V$ , conforme a Figura 9.

Figura 9 – Curva  $I \times V$  de um painel fotovoltaico sobreposta por uma curva típica de potência vs. tensão



Fonte: (NOVAIS, 2016).

- a) Equação de curto-circuito,  $V_{oc} = 0$  (7):

$$I_{sc} = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{sc}}{R_{sh}} \quad (7)$$

- b) Equação de circuito aberto,  $I_{sc} = 0$  (8):

$$0 = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (8)$$

- c) Equação de máxima potência ( $I_{mp}$  e  $V_{mp}$ ) (9):

$$I_{mp} = I_{pv} - I_D \left[ \exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{R_{sh}} \quad (9)$$

No entanto, como veremos a seguir, as características elétricas de uma célula fotovoltaica, podem ser influenciadas por alguns fatores meteorológicos, afetando assim a potência máxima gerada pelo painel.

### **2.1.2 Efeitos dos fatores meteorológicos nas características elétricas**

As características elétricas de um painel fotovoltaico são influenciadas diretamente por dois fatores climáticos: temperatura das células e intensidade da irradiação solar (GRUNDEMANN, 2017). Portanto, para analisar as características de corrente e tensão do módulo fotovoltaico, é necessário submeter o mesmo, sob condições de temperatura e radiação solar diferente dos padronizados, 25 °C e 1000 W/m<sup>2</sup>, respectivamente (SEGUEL, 2009).

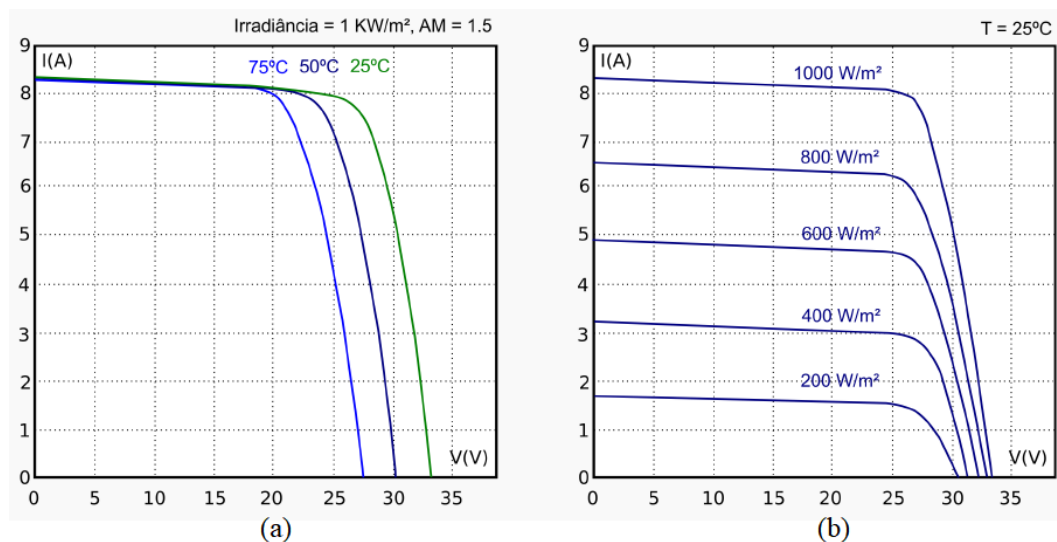
A corrente gerada pelo painel fotovoltaico apresenta pouca variação em função da temperatura. Porém com o aumento da temperatura da célula, a tensão de circuito aberto apresenta uma diminuição em seus valores significativamente, muito mais que a corrente gerada e, como resultado a potência máxima é reduzida. A Figura 10 (a) mostra o comportamento de um painel fotovoltaico com a mudança de temperatura, entre 25 e 75 °C e uma irradiância fixa de 1000 W/m<sup>2</sup>. No qual pode ser observado, que a temperatura exerce uma maior influência sobre a tensão, conforme indicam os deslocamentos horizontais das curvas. Assim, com o aumento da temperatura, além de ocorrer um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência (MPP), ele se desloca consideravelmente para a esquerda (CONFESSOR, 2014).

Já com a variação da irradiação, que pode depender tanto do sombreamento dos painéis, estações do ano e horários do dia. Esta influencia diretamente na corrente gerada pelo painel, ou seja, quanto maior a irradiação solar, maior será a corrente produzida e conseqüentemente maior a potência (GRUNDEMANN, 2017). Pode-se observar isto ainda na Figura 10 (b) no qual apresenta as características de um painel fotovoltaico para diferentes valores de irradiação, entre 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>, com uma temperatura fixa de 25 °C. Percebe-se que com o aumento da irradiância incidente, há um aumento significativo na corrente gerada pelo painel fotovoltaico. Ou seja, há um deslocamento para cima do ponto de máxima potência. Nesse sentido fica evidente que devem ser investigadas técnicas que garantem que a potência drenada do painel solar seja sempre a máxima. Técnicas de rastreamento de MPPT.

Para extrair a máxima potência dos painéis fotovoltaicos são utilizados métodos de rastreamento do ponto de máxima potência, que rastreiam a potência máxima para variações de irradiação solar e temperatura. Na literatura existem inúmeras técnicas de MPPT, como: tensão

constante, razão cíclica constante, Fuzzy, FLC (Controle Lógico Difuso), RNA (Redes Neurais Artificiais), entre outros. No entanto, nessa seção serão descritas apenas as técnicas clássicas, como: Perturba e Observa (P&O), Hill Climbing (HC) e Condutância Incremental (InC), pois possuem uma boa eficiência e são de fácil implementação. Esses algoritmos se baseiam nas medidas de corrente e tensão do painel fotovoltaico, para tomada de decisão do aumento ou diminuição da variável de controle (MOÇAMBIQUE, 2012). Estas técnicas variam em complexidade, velocidade de convergência, sensores requeridos, custo, faixa de eficiência, implementação, entre outros (CONFESSOR, 2014).

Figura 10 – Influência da irradiação solar e da temperatura em painéis fotovoltaicos



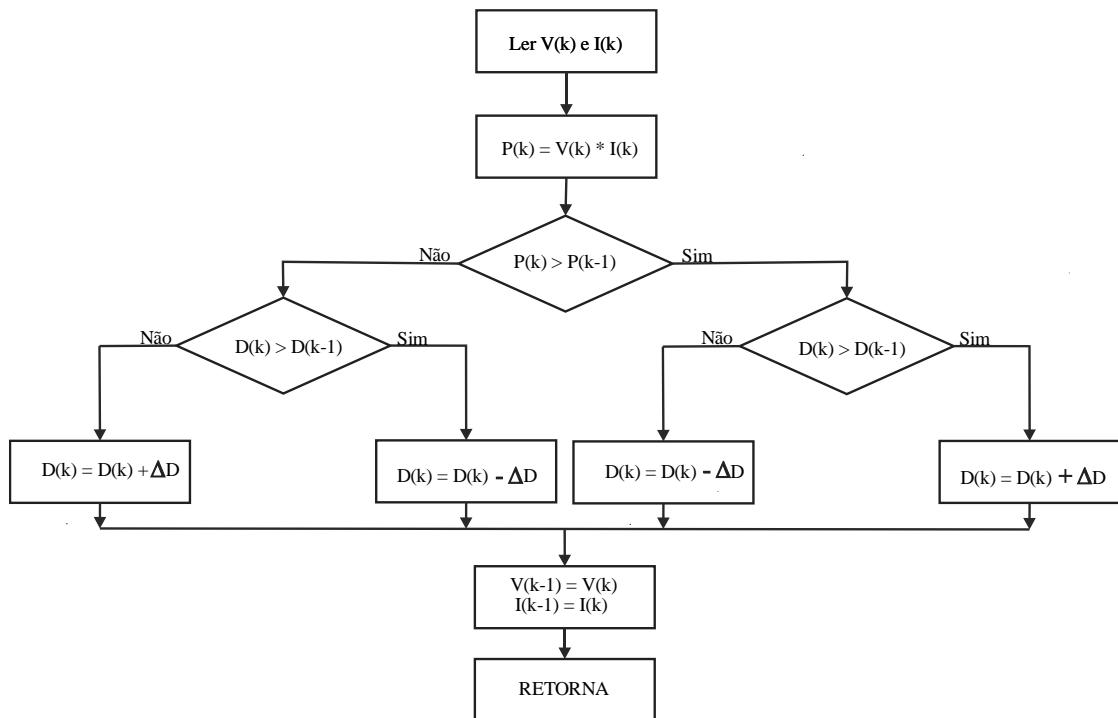
Fonte: (ALBUQUERQUE, 2017).

### 2.1.3 Técnica Perturba e Observa (P&O)

O método P&O tem sido amplamente utilizado devido à sua simplicidade de implementação. Visto que possui uma estrutura simples de controle e necessita de poucos parâmetros (tensão e corrente do painel solar) para realizar o MPPT. O método consiste no incremento ou decremento periódico da razão cíclica ( $D$ ,  $Duty$ ) do painel fotovoltaico, para a comparação entre a potência de saída antes e depois da perturbação. Isso faz com que o MPP nunca seja atingido, visto que a técnica estará sempre perturbando a razão cíclica do painel fotovoltaico. Assim, em regime permanente, o sistema oscila em torno do MPP desperdiçando a energia disponível pelo painel. O método é mais confiável quando a irradiação ou a temperatura não variam rapidamente (CONFESSOR, 2014).

A Figura 11 apresenta o fluxograma do algoritmo P&O, cuja referência para a variável de controle é a razão cíclica  $D_{(k)}$ . O controle deverá minimizar a diferença da razão cíclica, com a perturbação periódica da variável de controle, adicionando ou subtraindo um determinado valor fixo ( $\Delta D$ ). Após esse procedimento, ele compara a potência do painel fotovoltaico atual  $P_{(k)}$  com a anterior  $P_{(k-1)}$  (CONFESSOR, 2014).

Figura 11 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa (P&O)



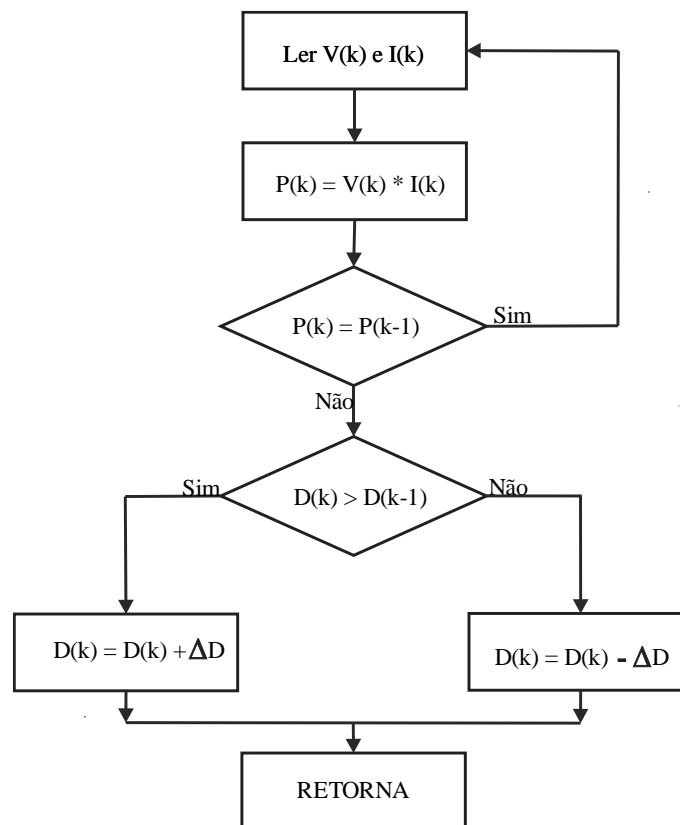
Fonte: Autor.

Nos artigos de Chowdhury, A. *et al.* (2018), Amara, K. *et al.* (2018) e Farhat, M. *et al.* (2015) são apresentadas análises comparativas das técnicas MPPT. Para realizar o sistema proposto foi utilizado o conversor *Boost*, devido a sua simplicidade de operação, baixo número de componentes e característica de fonte de corrente na entrada. Além disso, nesses trabalhos é destacado o fato de que o algoritmo P&O é um método simples, porém apresenta oscilações no estado estacionário. Além, de ser um método lento para encontrar o MPP e também se houver sombreamento em qualquer um dos painéis, não será capaz de encontrar o pico real.

### 2.1.4 Técnica Hill Climbing (HC)

O método de HC é simples e de baixo custo. O algoritmo funciona perturbando o sistema, alterando a razão cíclica ( $D$ ,  $Duty$ ) do conversor estático CC-CC e observando seu impacto na potência de saída produzida pelos painéis fotovoltaicos. Esse método é parecido com o de P&O, porém se a potência atual do painel for igual a anterior, o algoritmo reinicia. A técnica realiza uma amostragem periódica da tensão e corrente instantânea do painel fotovoltaico. Para calcular a potência e comparar os valores atuais com os anteriores (TERÁN, 2012), conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma da técnica Hill Climbing (HC)



Fonte: Autor.

Com esta informação, é possível determinar o sentido que se deve seguir para encontrar o ponto de máxima potência. Caso houver diferença entre a potência atual ( $P_k$ ) com a potência anterior ( $P_{k-1}$ ), é então feita uma análise com a tensão atual e a medida anterior do painel. Logo, a razão cíclica ( $D$ ,  $Duty$ ) é incrementada ou decrementada, dependendo da comparação desses valores de tensão. Ou seja, incrementada quando  $V_{(k)}$  é maior que  $V_{(k-1)}$  e decrementada, caso contrário. Desta forma a razão cíclica é alterada até que se atinja o MPP. É um método lento

para rápidas variações de irradiação solar, podendo não ser capaz de rastrear o MPPT, assim como o método P&O (RAMBO, 2015) e (TERÁN, 2012).

O artigo de Radhia, G. *et al.* (2013) trata do problema de otimização de energia em geradores fotovoltaicos. A fim de explorar bem a energia, é utilizado o método de MPPT de InC, com o auxílio do conversor *Boost*. Os resultados da simulação do algoritmo para diferentes casos de temperatura, iluminação e mudança de carga, ofereceram um bom desempenho, conseguindo se adaptar rapidamente em cada variação.

### 2.1.5 Técnica Condutância Incremental (InC)

O método InC necessita de sensores de tensão e corrente, assim como o método de P&O. Esse método analisa o sinal da derivada da potência pela tensão do arranjo fotovoltaico. De acordo com o método, o MPP está onde a derivada é nula. Assim, realizando uma amostragem periódica da tensão e corrente instantânea, calculando o incremento de condutância  $dI/dV$  e comparando com os valores instantâneos é possível rastrear o MPP segundo o algoritmo mostrado na Figura 13. Diferentemente das outras técnicas apresentadas anteriormente, este método apresenta melhores resultados em regime permanente e também para rápidas mudanças de irradiação. A localização do ponto de onde a máxima potência é extraída dos painéis é dada em (10) (IMHOFF, 2007), (TERÁN, 2012) e (LOBATO, 2015).

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (10)$$

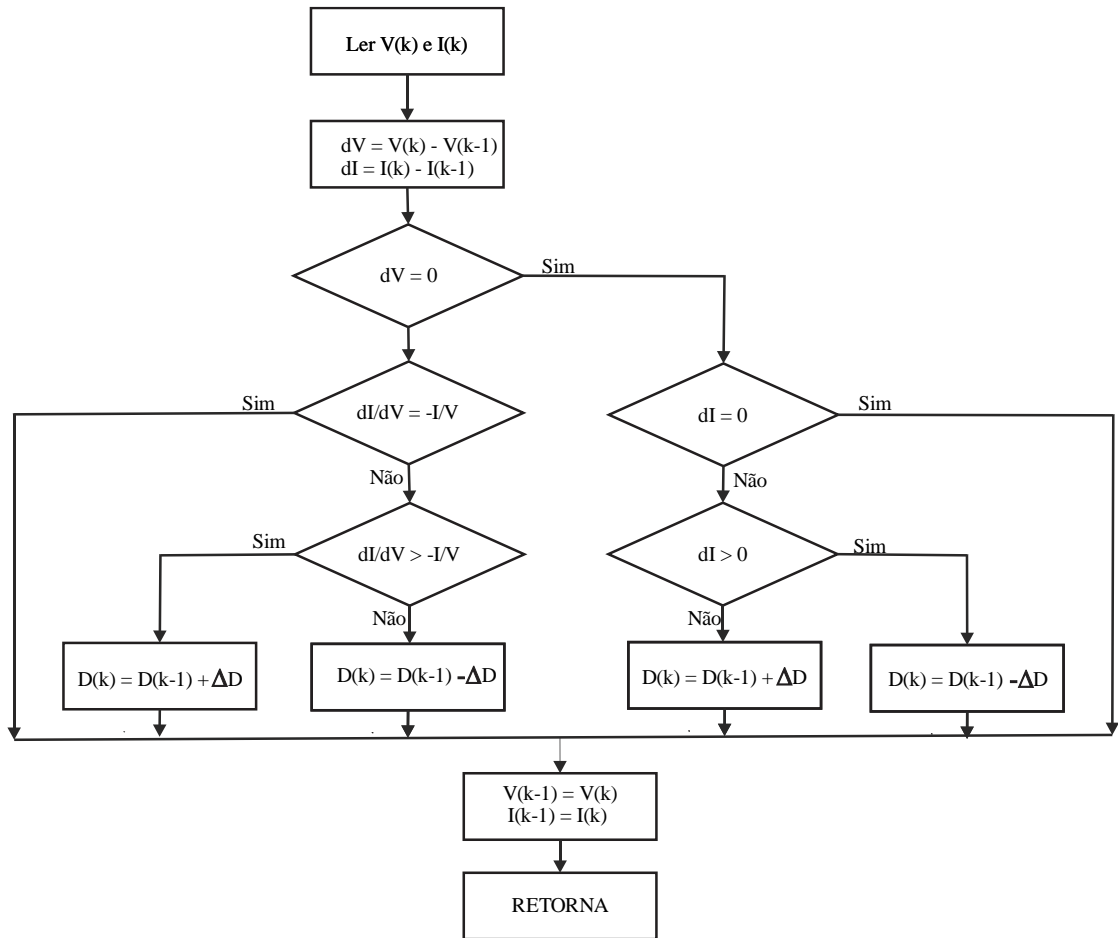
Dessa forma, de acordo com (10), o ponto da tensão na curva do painel fotovoltaico pode ser ajustado para rastrear o  $V_{mp}$ , e pode ser reescrita como (11):

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (11)$$

E a seguinte relação para o rastreamento por tensão:

$$\begin{cases} dI/dV = -I/V, \text{ no MPP} \\ dI/dV > -I/V, \text{ esquerda no MPP} \\ dI/dV < -I/V, \text{ direita no MPP} \end{cases} \quad (12)$$

Figura 13 – Fluxograma da técnica Condutância Incremental (InC)



Fonte: Autor.

O algoritmo funciona da seguinte forma: primeiramente os valores atuais de tensão  $V_{(k)}$  e corrente  $I_{(k)}$  do painel fotovoltaico são obtidos. Em seguida, os desvios  $dV$  e  $dI$  são calculados, subtraindo os valores de tensão  $V_{(k-1)}$  e corrente  $I_{(k-1)}$ , obtidos na leitura anterior, dos valores atuais  $V_{(k)}$  e  $I_{(k)}$ , respectivamente. A principal comparação realizada pelo algoritmo confronta os valores de  $dI/dV$  e  $-I/V$ . Segundo a equação (11), no ponto de máxima potência  $dI/dV = -I/V$ , nenhuma ação é tomada. Os valores  $V_{(k-1)}$  e  $I_{(k-1)}$ , são atualizados e o algoritmo retorna ao início. Porém quando  $dI/dV \neq -I/V$ , a razão cíclica  $D_k$  é ajustada até encontrar a máxima potência, de acordo com o sinal de  $dP/dV$ . Se o sistema já estiver operando no ponto de máxima potência ( $dV = 0$ ) as alterações climáticas serão detectadas através de  $dI \neq 0$  e o ajuste da razão cíclica  $D_k$  dependerá do sinal de  $dI$ .

O trabalho de Boudaraia, K. *et al.* (2016) estudou o comportamento do algoritmo InC, sob diferentes parâmetros atmosféricos, confirmando que o MPPT InC possui uma boa

eficiência e precisão. Nesse caso o conversor *Buck* é utilizado, para adaptar a tensão. Enquanto que no trabalho de Hichami, N. *et al.* (2018) foi realizado um estudo comparativo entre as técnicas InC e P&O de acordo com a irradiância e a temperatura, utilizando o conversor *Boost*. Mostrando que o algoritmo InC apresenta melhor desempenho, quando utilizado o conversor *Boost*, e se comporta melhor durante rápidas mudanças nas condições climáticas. No entanto, é um algoritmo mais complexo. Nessa mesma linha, Ahmad, S. *et al.* (2016) comparou os métodos P&O, InC e InC modificado, com o auxílio do conversor *Buck-Boost*. E teve como conclusão, que o algoritmo de condutância incremental modificado responde e rastreia o MPP com uma maior precisão e rapidez que outros algoritmos de MPPT. Além disso, não apresenta oscilação de estado, o que resulta em menor perda de potência. Sendo melhor que outros algoritmos de MPPT sob variação rápida de irradiação solar.

## 2.2 ESTRATÉGIAS DE COMPARAÇÃO DOS ALGORITMOS DE MPPT

O principal objetivo dos algoritmos de MPPT é garantir que o painel solar esteja produzindo a máxima potência. Isso extrai a quantidade máxima de energia a qualquer momento. Para descobrir qual técnica MPPT tem os melhores desempenhos, este trabalho apresentou três métodos, como pode ser visto anteriormente. Essas técnicas serão testadas para variações bruscas de irradiação e temperatura. Será feita uma análise de desempenho utilizando os conversores estáticos CC-CC: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*, como pode ser observado na próxima seção. No qual, o MPPT será aplicado na entrada e saída dos conversores, a fim de observar qual posição obtém o melhor desempenho, para os diferentes MPPTs. Os principais pontos a serem analisados serão: oscilação de potência, eficiência e tempo de convergência para a estabilização.

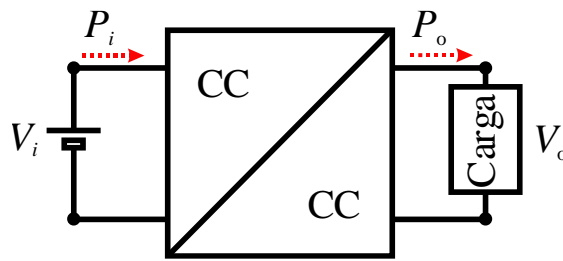


### 3 CONVERSORES ESTÁTICOS

Para realizar o MPPT um conversor estático de potência CC-CC é acoplado ao painel solar. Na Figura 14 pode ser visto uma estrutura genérica de um conversor CC-CC. Considerando um conversor ideal, a potência de saída é igual a de entrada ( $P_o = P_i$ ), o que significa que o rendimento do conversor é  $\eta = 100\%$ . Devido as não idealidades, tais como:  $R_{DS(on)}$ , resistências dos interruptores, ESR, resistência série equivalente dos capacitores, e  $v_f$ , queda de tensão direta dos diodos, o rendimento do conversor não é 100%. Logo a potência de saída do conversor é dada por (12):

$$P_o = \eta P_i \rightarrow P_o < P_i \quad (13)$$

Figura 14 – Conversor CC-CC



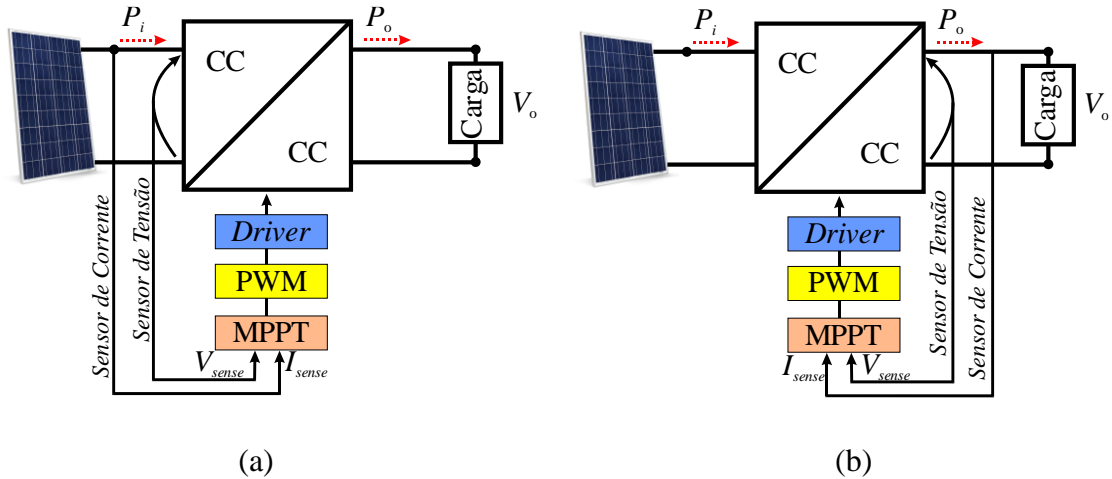
Fonte: Autor.

Usualmente, para realizar o MPPT é necessário fazer a leitura de tensão e/ou corrente na entrada ou saída do conversor, conforme pode ser visto na Figura 15. No entanto, na literatura é mais aplicado o uso de sensores na entrada. Pois apresenta um melhor desempenho para os conversores com fonte de corrente na entrada, devido a corrente de entrada ser sempre contínua. O que não ocorre para os conversores com fonte de tensão na entrada, em que a corrente de entrada é descontínua. Logo, o sensor de corrente pode efetuar uma leitura incoerente. Além disso, a carga nem sempre pode estar drenando a potência máxima.

Nos sistemas fotovoltaicos, podem-se utilizar vários tipos de conversores CC-CC não isolados, tais como: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. Essas topologias são apresentadas na Figura 15, bem como suas representações por fonte de tensão e corrente, e no Quadro 2 é feito um resumo dessas características. O conversor *Boost* é um elevador de tensão, isto é, a tensão de saída é igual ou maior que a de entrada ( $V_o \geq V_i$ ). Além de ter comportamento de fonte de corrente na entrada, devido à uma indutância  $L$  em série com a fonte de alimentação, o que se torna um atrativo para efetuar o MPPT na entrada. Por outro lado, o conversor *Buck*, é um abaixador de tensão ( $V_o \leq V_i$ ), que possui uma fonte de corrente na saída. Assim, estima-se que o melhor

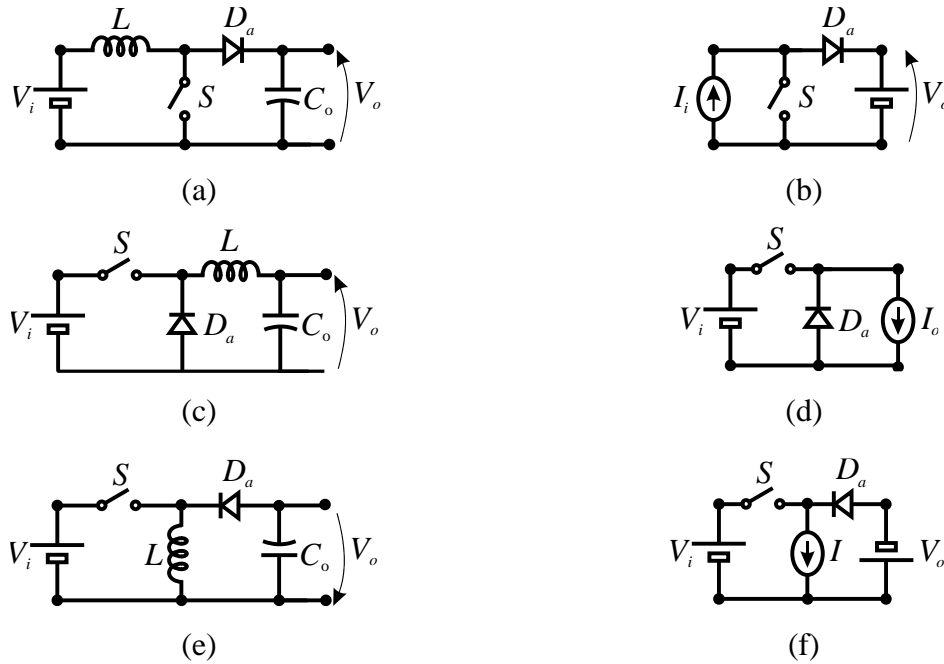
desempenho para realizar o MPPT nesse conversor é na saída. Já o conversor *Buck-Boost*, pode ser um abaixador ou elevador de tensão, porém com polaridade invertida. Este apresenta características de fonte de tensão na saída e entrada. Nesse caso, aplicar o MPPT na entrada ou saída, estima-se que o desempenho será semelhante.

Figura 15 – Conversor CC-CC com a) MPPT na entrada e b) MPPT na saída



Fonte: Autor.

Figura 16 – Conversor (a) *Boost*. (b) *Boost* simplificado. (c) *Buck*. (d) *Buck* simplificado. (e) *Buck-Boost*. (f) *Buck-Boost* simplificado.



Fonte: Autor.

A partir da revisão bibliográfica realizada anteriormente, constatou-se que o conversor *Boost*, visto na Figura 16 (a) e (b), é o mais utilizado para realizar o MPPT. Por essa razão, apenas este conversor será avaliado, em regime permanente, conforme pode ser visto nas próximas seções. Para os demais conversores, no entanto, seguindo essa mesma metodologia, para as equações e formas de onda, podem ser vistas em (BARBI, 2006).

Quadro 2 – Característica dos conversores

<b>Característica</b>	<b><i>Buck</i></b>	<b><i>Boost</i></b>	<b><i>Buck-Boost</i></b>
<b>Ganho (M)</b>	$D$	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$
<b>Entrada</b>	Fonte de tensão	Fonte de Corrente	Fonte de tensão
<b>Saída</b>	Fonte de Corrente	Fonte de tensão	Fonte de tensão

Fonte: Autor.

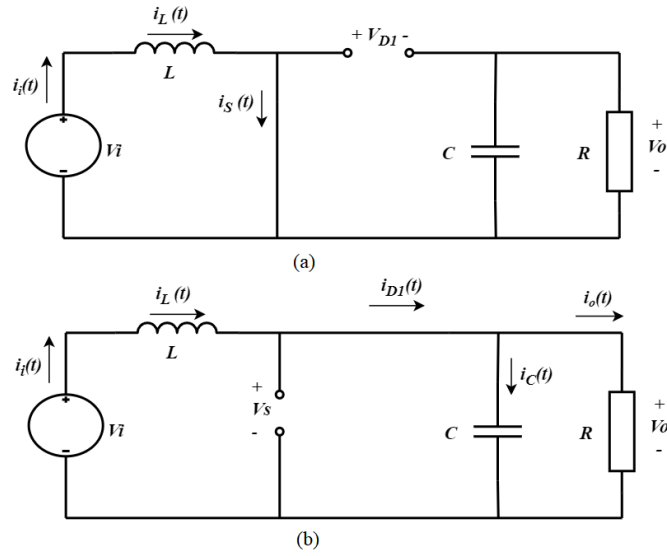
### 3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR *BOOST*

O conversor *Boost*, operando no modo de condução contínua (CCM) possui duas etapas de operação. Na primeira etapa, Figura 17 (a), o interruptor  $S$  está acionado e na segunda etapa, Figura 17 (b), o interruptor é aberto. Em cada uma das operações, faz-se a análise do circuito equivalente e obtêm-se as devidas equações e as formas de onda, como pode ser observado na Figura 18.

#### 3.1.1 Primeira etapa de operação ( $0 < t < DT_s$ )

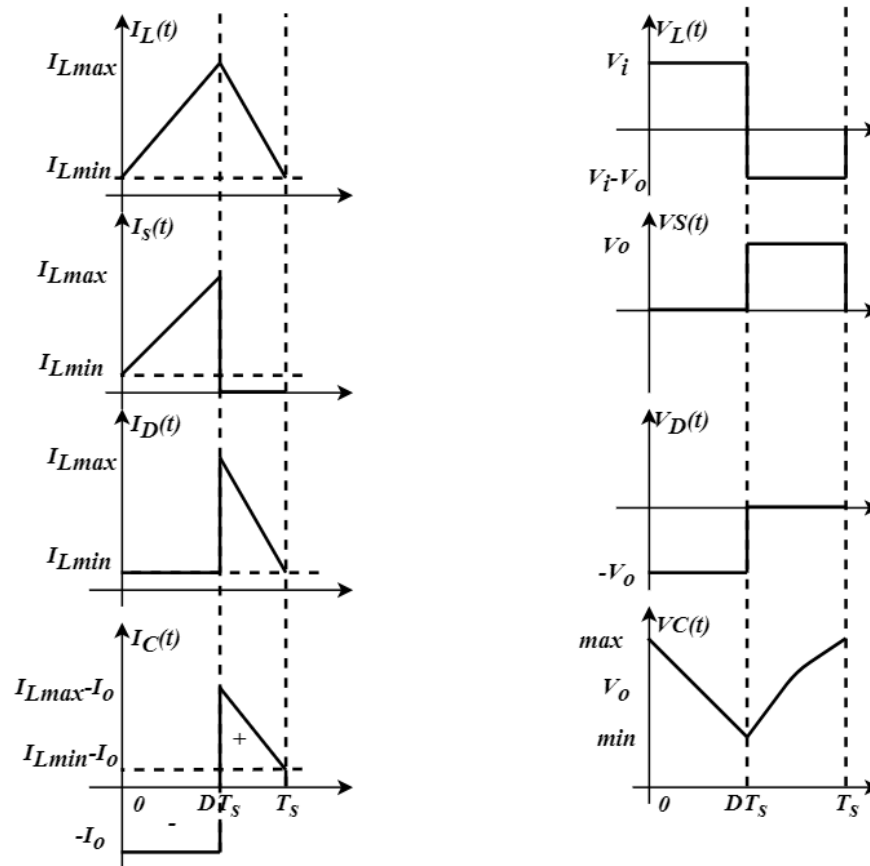
Na primeira etapa de funcionamento, o interruptor  $S$  se encontra fechado. Logo a corrente flui entre o indutor e o interruptor, fazendo com que a energia que percorre o indutor seja armazenada em seu campo magnético. A corrente então cresce linearmente, de  $I_{min}$  até atingir seu valor de pico  $I_{max}$ . A corrente do interruptor  $i_s$  é igual a corrente que passa no indutor  $i_L$  (14), e a corrente que passa no diodo  $i_{D1}$  é nula, conforme ilustrado na Figura 17 (a).

Figura 17 – Etapas de operação do conversor *Boost* (a) Interruptor fechado (b) Interruptor aberto



Fonte: Autor.

Figura 18 – Formas de onda do conversor *Boost*



Fonte: Autor.

Durante esta etapa, o capacitor fornece energia a carga. As principais equações que regem essas etapas estão apresentadas abaixo.

A corrente no indutor pode ser representada por:

$$I_L(t) = I_{Lmin} + \frac{V_i}{L}t \quad (14)$$

A tensão no indutor:

$$V_L = V_i - 0 = V_i \quad (15)$$

A corrente no interruptor:

$$i_s = I_L \quad (16)$$

A tensão no interruptor

$$V_s = 0 \quad (17)$$

A corrente no diodo:

$$i_{D1} = 0 \quad (18)$$

A tensão no diodo:

$$V_D = -V_o \quad (19)$$

E assim essa etapa termina.

### 3.1.2 Segunda etapa de operação ( $DT_s < t < T_s$ )

Nesta etapa de operação do conversor, o interruptor  $S$  é aberto e, o diodo fica polarizado diretamente, desmagnetizando o indutor. A corrente do indutor  $i_L$  (20) e a corrente do diodo  $i_{D1}$  são iguais, e a corrente no interruptor  $i_s$  é nula. Conforme pode ser observado na Figura 17 (b). A energia armazenada no indutor é transferida para a saída, recarregando o capacitor e alimentando a carga. A corrente no indutor decresce linearmente até no instante  $T_s$ , onde o interruptor entra em condução novamente.

Durante esta etapa a corrente no indutor é dada por:

$$I_L(t) = I_{Lmax} - \frac{(V_i - V_o)}{L}(t) \quad (20)$$

A tensão no indutor:

$$V_L = V_i - V_o \quad (21)$$

A corrente no interruptor:

$$i_s = 0 \quad (22)$$

A tensão no interruptor:

$$V_s = V_o \quad (23)$$

A corrente no diodo:

$$i_{D1} = i_L \quad (24)$$

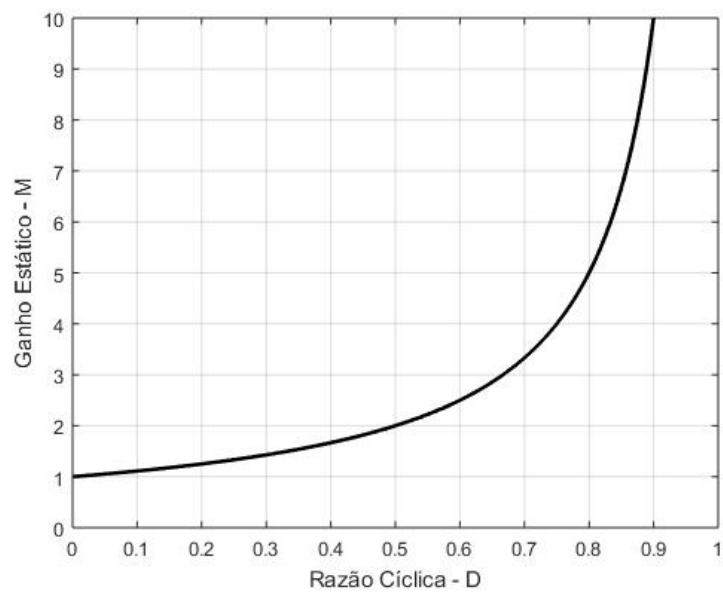
A tensão no diodo:

$$V_D = 0 \quad (25)$$

### 3.2 CÁLCULO DO GANHO ESTÁTICO

Para encontrar o ganho estático do conversor *Boost* (Figura 19), o balanço de energia do indutor em um período de chaveamento deve ser avaliado, conforme pode ser visto a seguir.

Figura 19 – Ganho estático do conversor *Boost*



Fonte: Autor.

$$\int_0^{T_s} V_L dt = 0 \quad (26)$$

A partir das formas de onda e das etapas de operação sabe-se que:

$$\int_0^{T_s} V_L dt + \int_{DT_s}^{T_s} V_L dt = 0 \quad (27)$$

$$\int_0^{T_s} V_i dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_i - V_o) dt = 0 \quad (28)$$

Resolvendo a equação (28) tem-se a fórmula do ganho estático (32):

$$V_i(DT_s - 0) + (V_i - V_o)(T_s - DT_s) = 0 \quad (29)$$

$$V_i(D) + (V_i - V_o)(1 - D) = 0 \quad (30)$$

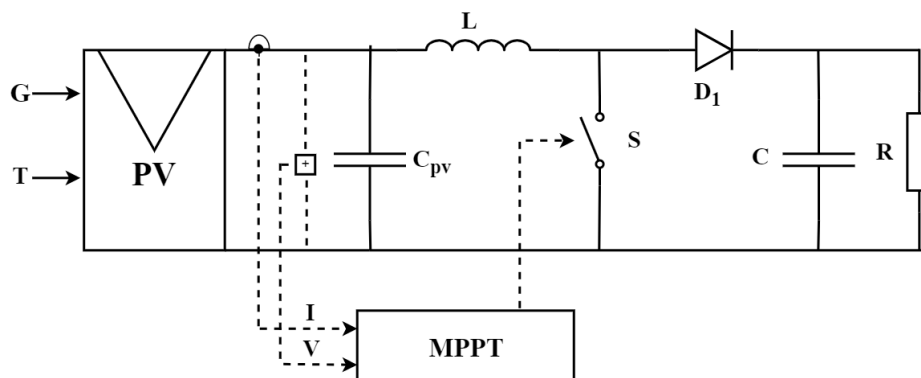
$$V_i = V_o(1 - D) \quad (31)$$

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (32)$$

### 3.3 METODOLOGIA DE PROJETO

Para avaliar o conversor *Boost* é colocado um capacitor de entrada  $C_{pv}$  no lugar da fonte de tensão como pode ser visto na Figura 20. O capacitor é recomendado quando se conecta na entrada do conversor um módulo fotovoltaico, com a finalidade de estabilizar a tensão deste, de modo que a variação na corrente do indutor não interfira de maneira indesejada no ponto de operação do painel solar. Serve para estabilizar a tensão do painel solar, de modo que está não varie rapidamente devido a comutação da chave (RIBEIRO, 2011).

Figura 20 – Esboço de um sistema fotovoltaico com o conversor *Boost*



Fonte: Autor.

Como foi discutido no Quadro 1, a célula com melhor aspecto é a de silício monocristalino, portanto a mesma será utilizada no projeto. O Quadro 3 apresenta os parâmetros

referentes ao modelo de painel solar escolhido para o ajuste da simulação. São características disponibilizadas no *datasheet* do módulo CS6K – 300MS (Anexo A) manufaturada pela *Canadian Solar* avaliados a uma temperatura de 25°C e irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>.

Quadro 3 – Parâmetros do módulo fotovoltaico

<b>Modelo</b>	CS6K – 300MS
<b>Tipo</b>	monocristalino
<b>Potência nominal (<math>P_{max}</math>)</b>	300 W
<b>Tensão de circuito aberto (<math>V_{oc}</math>)</b>	39,7 V
<b>Corrente de curto circuito (<math>I_{sc}</math>)</b>	9,83 A
<b>Tensão de máxima potência (<math>V_{mp}</math>)</b>	32,5 V
<b>Corrente de máxima potência (<math>I_{mp}</math>)</b>	9,24 A
<b>Eficiência</b>	18,33 %
<b>Número de células</b>	60 (6 x 10)

Fonte: Autor.

### 3.3.1 Capacitor de entrada $C_{pv}$

O cálculo do capacitor de entrada  $C_{pv}$  é realizado definindo como critério um valor máximo de ondulação para a tensão do barramento CC. Considerando que o painel está operando em regime, podendo ser representado por uma fonte de corrente com valor  $I_{pv}$ , o sistema pode ser simplificado por duas fontes de corrente e um capacitor  $C_{pv}$  conectados em paralelo como pode ser visto na Figura 21.

A corrente através do capacitor é dada por:

$$I_{cp} = I_{pv} - I_{L1} = C_{pv} \frac{dv_{pv}}{dt} \quad (33)$$

Sendo  $I_{pv}$  a corrente do painel solar e  $I_{L1}$  a corrente do indutor de entrada do conversor *Boost*.

Resolvendo a equação (33) tem-se que:

$$\int_0^{DT_s} dv_{pv} = \int_0^{DT_s} \frac{(I_{pv} - I_{L1})}{C_{pv}} dt \quad (34)$$

Simplificando a equação (34) considerando (35), quando o interruptor  $S$  está desligado, obtém-se a variação da tensão do painel em (36):



$$I_{L1} = I_{pv}(1 - D) \quad (35)$$

$$\Delta v_{pv} = \frac{I_{pv}D}{C_{pv}}DT_s \quad (36)$$

Onde:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (37)$$

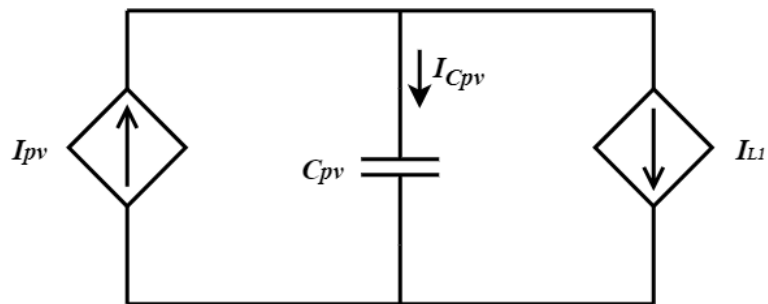
A substituição de (37) em (36) resultará em (38):

$$C_{pv} = \frac{I_{pv}D^2}{\Delta v_{pv}f_s} \quad (38)$$

Onde:

$$\Delta v_{pv} = \% V_{pv} \quad (39)$$

Figura 21 – Simplificação do capacitor de entrada



Fonte: Autor.

### 3.3.2 Projeto do indutor

O valor da indutância é definido com base na relação entre a tensão de entrada e a corrente no indutor, onde  $V_i$  é a tensão de entrada,  $L$  a indutância e  $i_L$  a corrente de entrada, conforme a equação (40):

$$V_i = L \frac{di_L}{dt} \quad (40)$$

Analisando a 1ª etapa, com o indutor magnetizado:

$$V_L = V_i \quad (41)$$

$$i_L(t) = \frac{V_i(t)}{L} + i_{Lmin} \quad (42)$$

$$i_{Lmax} - i_{Lmin} = \frac{V_i(t)}{L} \quad (43)$$

Substituindo  $t = DT_s$ :

$$i_{Lmax} - i_{Lmin} = \frac{V_i(DT_s)}{L} \quad (44)$$

E  $T_s = 1/f_s$ :

$$\Delta i_L = \frac{V_i D}{L f_s} \quad (45)$$

$$L = \frac{V_i D}{\Delta i_L f_s} \quad (46)$$

Onde  $\Delta i_L$  (47) e  $f_s$  são valores escolhidos pelo projetista, e  $I_i$  é o valor médio da corrente no indutor, entre  $i_{Lmax}$  e  $i_{Lmin}$ .

$$\Delta i_L = \% I_i \quad (47)$$

### 3.3.3 Projeto do capacitor de saída

O capacitor de saída influencia na taxa de variação da carga. A tensão de saída deste elemento ( $\Delta V_c$ ) é dado pela equação:

$$C = \frac{1}{\Delta V_c} \int i_c(t) dt \quad (48)$$

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \rightarrow I_o = C \frac{\Delta V_c}{\Delta t} \quad (49)$$

Ou seja:

$$\Delta V_c = I_o \frac{\Delta t}{C} = I_o \frac{t}{C} \quad (50)$$

onde  $t = DT_s$  e  $T_s = 1/f_s$ :

$$\Delta V_c = \Delta V_o = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot C} \quad (51)$$

A partir da expressão encontra-se o valor da capacitância (52):

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_o} \quad (52)$$

sendo  $\Delta V_o$  a variação da tensão na saída, também escolhida pelo projetista.

$$\Delta V_o = \% V_o \quad (53)$$

### 3.3.4 Semicondutores (interruptor e diodo)

Conforme o princípio de operação de  $V_o$  e  $i_L$ , a máxima tensão que o interruptor e o diodo devem suportar, é a tensão de saída do conversor, ou seja, deve-se escolher um interruptor e um diodo que suportem uma tensão superior a  $V_o$ . O esforço máximo sobre o interruptor se dá quando o diodo entra em condução, conectando a tensão no capacitor de saída. A tensão reversa máxima que o diodo sofre é a própria tensão máxima de saída.

$$V_{Smax} > V_o \quad (54)$$

$$V_{D1max} > V_o \quad (55)$$

A corrente para o interruptor e para o diodo, deve ser maior que a corrente de entrada  $i_i = i_L$ .

A corrente máxima no interruptor ocorre quando está em condução e tem o mesmo valor da máxima corrente no indutor. Já para o diodo, a corrente máxima ocorre apenas na segunda etapa de operação, quando a corrente que circulava pelo interruptor passa a circular pelo diodo. Os esforços do diodo e do interruptor devem ser calculados para a situação de maior esforço nos componentes.

$$i_{D1} > i_i \quad (56)$$

$$i_s > i_i \quad (57)$$

## 3.4 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES

Com os parâmetros fundamentais do projeto, visto no Quadro 3, definidos a partir dos dados fornecidos pelo PV, pode-se através das equações demonstradas nas seções anteriores, calcular os valores dos componentes do circuito. Assim como também os valores de outras grandezas necessárias para os cálculos citados, como mostrado no Quadro 4, sendo estas as

mesmas para todos os conversores CC-CC. Os conversores foram projetados para a máxima potência do painel, ou seja, para uma irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Quadro 4 – Parâmetros escolhidos para o projeto dos conversores *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*

<b>Parâmetros</b>	<b>Conversores</b>
$V_{mp} = V_i = V_{pv}$	32,5 V
$f_s$	50 kHz
$P_{max} = P_o = P_i$	300 W
$i_{mp} = i_i = i_{pv}$	9,24 A

Fonte: Autor.

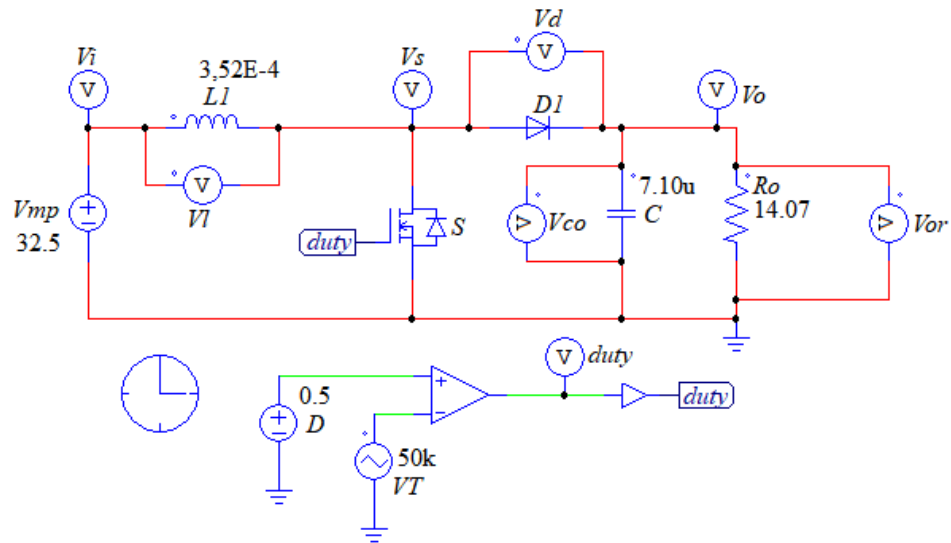
O modelo do circuito visto na Figura 22 do conversor *Boost*, foi desenvolvido e simulado utilizando o *software* Psim, com os parâmetros calculados, visto no Quadro 5. Para isso nessa etapa foi desconsiderado o capacitor  $C_{pv}$ , no qual foi substituído pela fonte de tensão  $V_{mp}$ , fornecida anteriormente no Quadro 4 e também foi utilizado um gerador de sinal PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação de Largura de Pulso) que faz a comparação da frequência de chaveamento com a razão cíclica, para controlar o interruptor. Logo, para validar o projeto dos componentes do conversor foram então simuladas suas formas de onda de tensão e corrente, como pode ser observado a seguir.

Quadro 5 – Parâmetros calculados para o conversor *Boost*

<b>Parâmetros</b>	<b><i>Boost</i></b>
$C_{pv}$	14,2 $\mu\text{F}$
$R_o$	14,08 $\Omega$
<b>L</b>	352 $\mu\text{H}$
<b>C</b>	7,10 $\mu\text{F}$
<b>D</b>	0,5

Fonte: Autor.

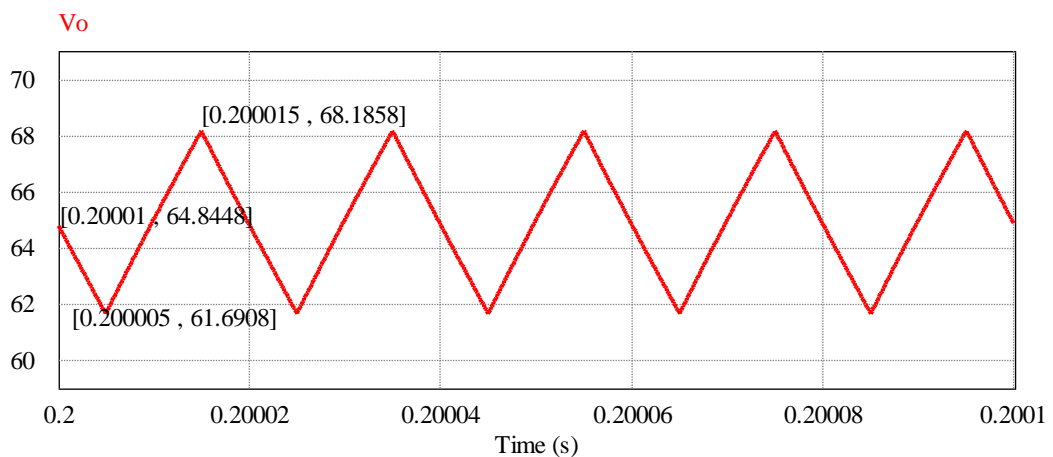
Figura 22 – Simulação do conversor *Boost*



Fonte: Autor.

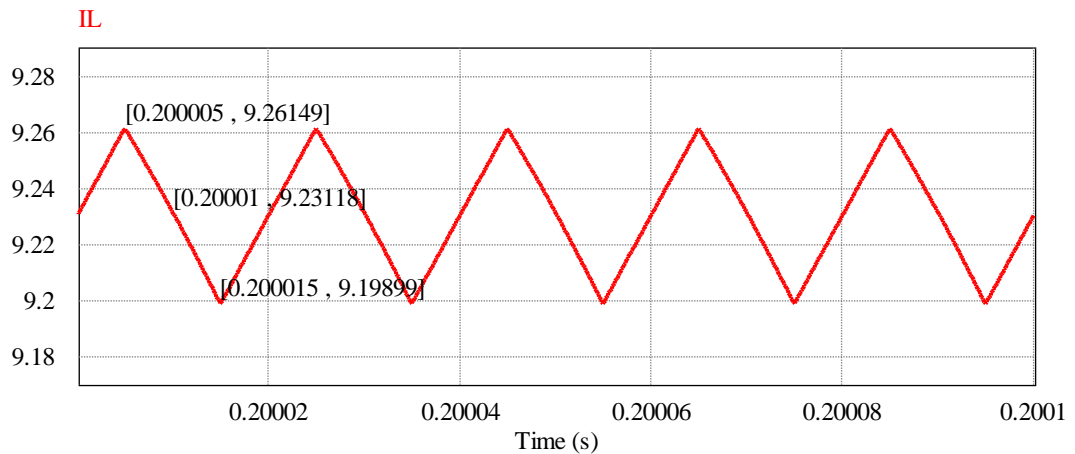
Na Figura 23 pode ser observado a tensão de saída do conversor que se aproxima dos 65 V definidos anteriormente, assim como a sua variação de 6,5 V. Conforme visto na Figura 24 a corrente média no indutor equivale a corrente de entrada do conversor, além de possuir uma baixa ondulação. A corrente máxima é de 9,26 A obtida durante a primeira etapa de operação, ela é descarregada, na segunda etapa, para o capacitor e a carga.

Figura 23 – Tensão de saída do conversor *Boost*



Fonte: Autor.

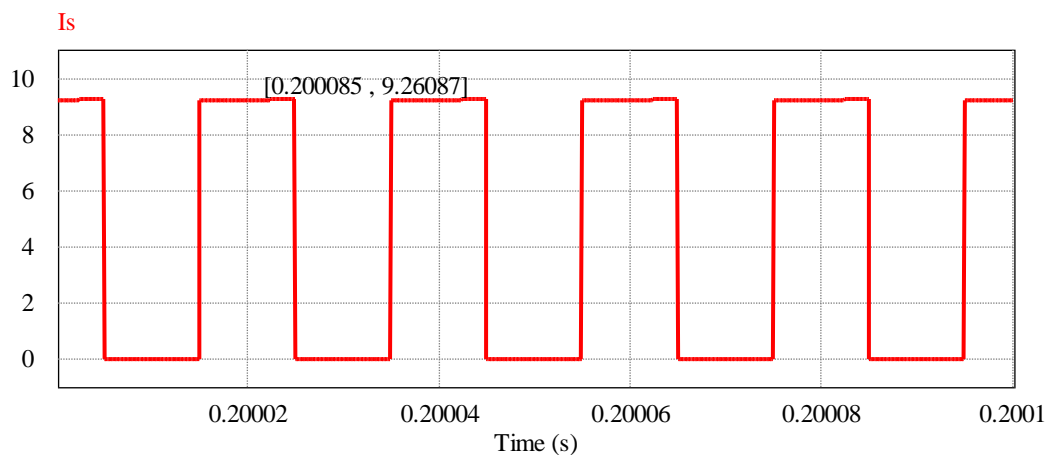
Figura 24 – Corrente no indutor do conversor *Boost*



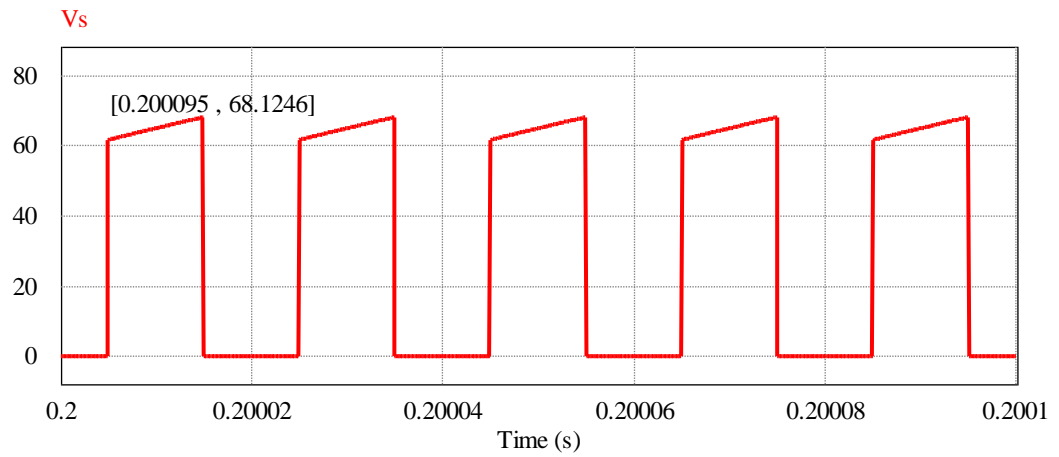
Fonte: Autor.

A corrente no interruptor de 9,26 A na primeira etapa de operação, visto na Figura 25, possui o mesmo valor da corrente de pico do indutor, possui também uma baixa ondulação. A tensão média do interruptor, Figura 26, na segunda etapa de operação é os 65 V com uma leve ondulação. A corrente do diodo Figura 27, na segunda etapa de operação possui também os 9,26 A de pico assim como o indutor. A tensão média no diodo Figura 28 é negativa, e equivale aos 65 V da primeira etapa de operação, onde a tensão sobre o catodo é a tensão de saída negativa. A tensão do capacitor de saída Figura 29, é igual a tensão da carga, pois ambos estão em paralelo. O capacitor filtra o *ripple* da tensão CA e fornece a tensão CC para a saída.

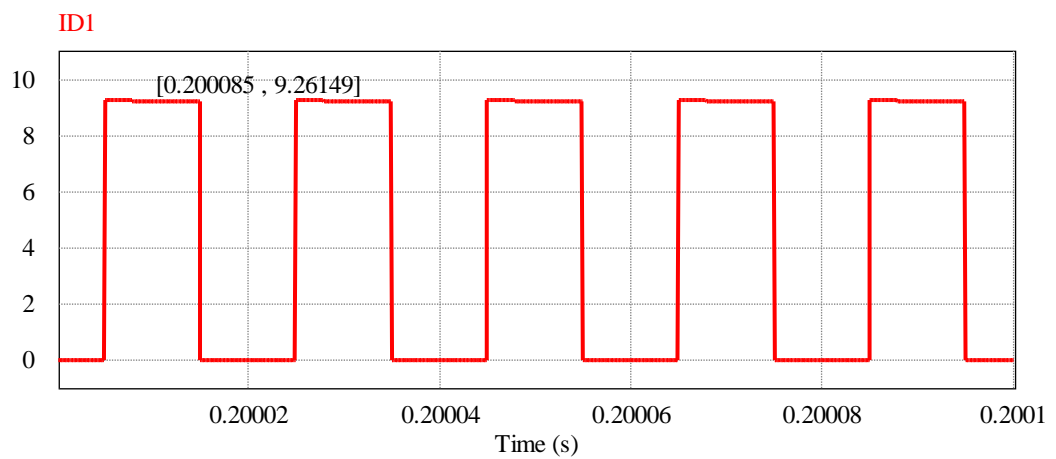
Figura 25 – Corrente no interruptor do conversor *Boost*



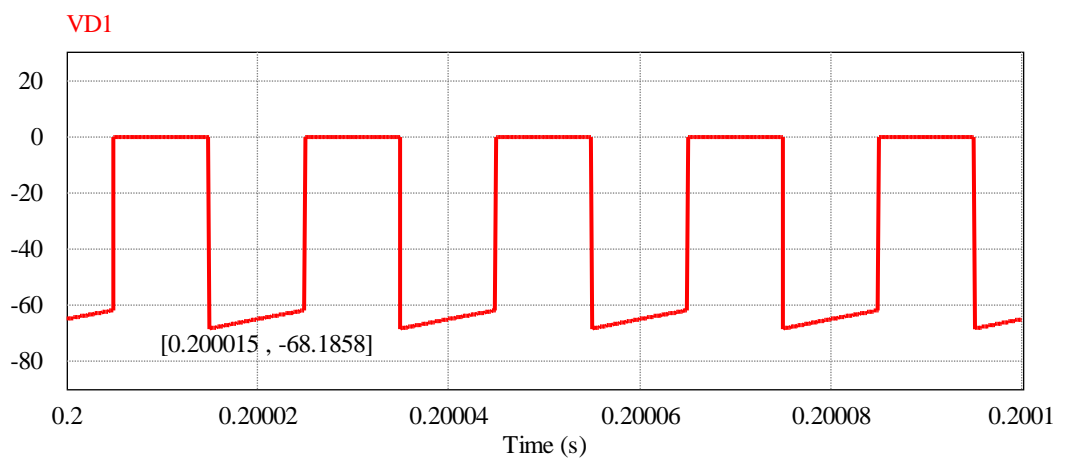
Fonte: Autor.

Figura 26 – Tensão no interruptor do conversor *Boost*

Fonte: Autor.

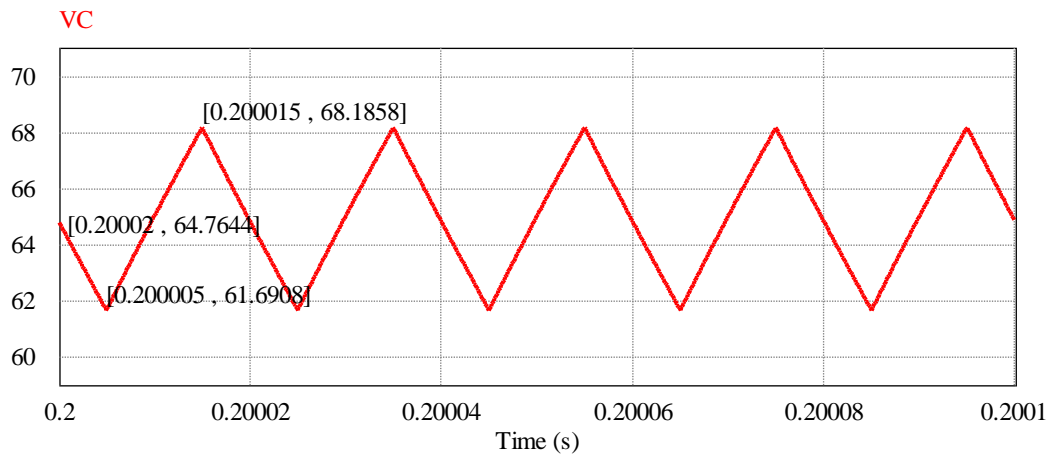
Figura 27 – Corrente no diodo do conversor *Boost*

Fonte: Autor.

Figura 28 – Tensão no diodo do conversor *Boost*

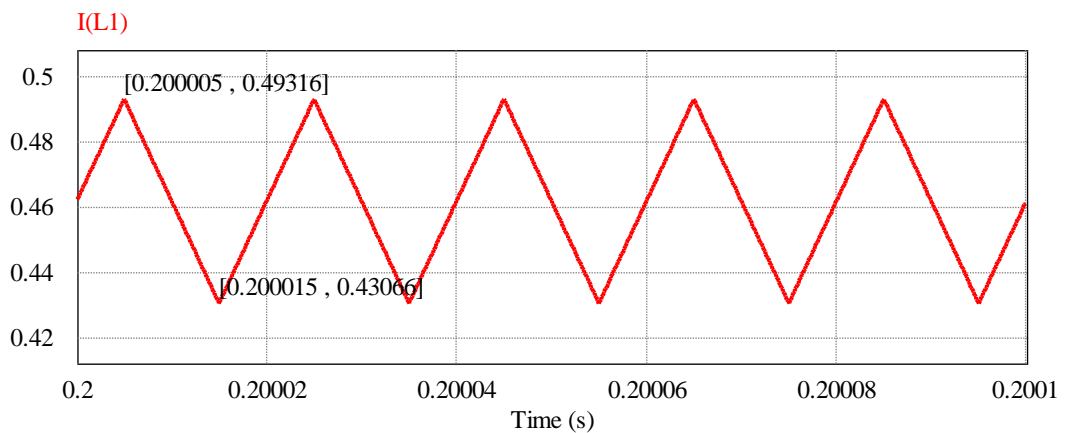
Fonte: Autor.

Figura 29 – Tensão no capacitor de saída



Fonte: Autor.

Figura 30 – Corrente no indutor para uma potência mínima



Fonte: Autor.

Como pode ser visto através das simulações o projeto do conversor *Boost* é válido. Pois através das equações foi possível deduzir os valores dos componentes, indutor e capacitor. Com o auxílio das simulações foi confirmada a validação das equações a partir da corrente nos componentes e tensão na saída do conversor. O conversor ainda atua no modo CCM para toda faixa de operação do painel solar, conforme foi apresentado na Figura 30.

Por fim, no Quadro 6 podem ser observados os valores calculados para os conversores *Buck* e *Buck-Boost*, como dito anteriormente, foram calculados com as fórmulas apresentadas no livro de Eletrônica de Potência (Barbi, 2006). Estes valores serão utilizados para as simulações das técnicas de HC, P&O e InC, no qual também deverão ser aplicadas nas entradas e saídas desses conversores. Os resultados de simulação para esses conversores, assim como suas análises, podem ser observados no Anexo B.



Quadro 6 – Parâmetros calculados para os conversores *Buck* e *Buck-Boost*

<b>Parâmetros</b>	<b><i>Buck</i></b>	<b><i>Buck-Boost</i></b>
<b><math>C_{pv}</math></b>	14,2 $\mu\text{F}$	14,2 $\mu\text{F}$
<b><math>R_o</math></b>	1 $\Omega$	3,52 $\Omega$
<b>L</b>	176 $\mu\text{H}$	352 $\mu\text{H}$
<b>C</b>	1,42 $\mu\text{F}$	28,4 $\mu\text{F}$
<b>D</b>	0,5	0,5

Fonte: Autor.

#### 4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Os seguintes resultados de simulação foram obtidos através do *software* de simulação PSIM®. É importante salientar que os valores de capacitância de entrada  $C_{pv}$  e  $\Delta D$ , foram os mesmo para todas as simulações, a fim de se observar seus impactos no rastreamento do MPP. No Anexo C desse trabalho pode ser observado os circuitos utilizados e os códigos de MPPT.

Primeiramente, no Quadro 7 podem ser observados os resultados obtidos para o método de P&O aplicado na entrada e saída do conversor *Boost*. Como pode ser visto, o conversor *Boost* obteve melhores resultados, no geral, quando o MPPT foi simulado na entrada. Para este MPPT, aplicado tanto na entrada quanto na saída, percebe-se que quando há uma rápida variação de irradiação, há uma perda da eficiência. Com isso tem-se uma grande oscilação da potência e um maior tempo de convergência, principalmente quando aplicado na saída. Já em relação com a temperatura este método consegue obter os melhores resultados, como: baixa oscilação de potência, elevada eficiência e baixo tempo de convergência.

Quadro 7 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor *Boost*

<i>Boost</i> P&O	Entrada					Saída				
	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
W/m <sup>2</sup>	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
°C	25	25	25	20	40	25	25	25	20	40
Potência Painel (W)	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
Potência Conversor (W)	299,70	233,86	299,64	304,88	283,53	299,70	220,47	299,26	304,88	283,64
Tensão (V)	32,36	30,53	33,09	32,87	31,26	64,95	55,67	64,86	65,50	63,14
Corrente (A)	9,264	7,66	9,03	9,27	9,06	4,61	3,95	4,61	4,65	4,48
D	0,50	0,48	0,49	0,49	0,51	0,50	0,49	0,50	0,50	0,51
Oscilação de Potência (W)	0,00	-5,74	-0,06	-0,00	-0,50	0,00	-19,11	-0,43	0,00	-0,39
Eficiência (%)	100,00	97,60	99,9	100	99,9	100,00	92,02	99,85	100,00	99,82
Tempo de Convergência (s)	-	0,73	0,1	0,05	0,07	-	0,94	0,1	0,05	0,06

Fonte: Autor.

No Quadro 8 podem ser observados os resultados do método de HC, aplicado na entrada e saída do conversor *Boost*. No geral, os melhores resultados são obtidos quando o MPPT é aplicado na entrada do conversor *Boost*. Nesse método ainda se percebe o mesmo problema do algoritmo de P&O, que é a queda da eficiência quando há uma rápida variação da irradiação. Para o algoritmo aplicado na entrada do conversor, quando se tem uma queda brusca da irradiação, há uma baixa eficiência, já quando a irradiação aumenta, se consegue obter ótimos resultados. E para a variação da temperatura mantendo a mesma irradiação, foi possível obter a máxima potência. Já para o MPPT, na saída do conversor, quando se tem uma elevação da temperatura, há uma queda na eficiência.

Quadro 8 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor *Boost*

<b>Boost HC</b>	<b>Entrada</b>					<b>Saída</b>				
<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>1000</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
<b>°C</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>Potência Painel (W)</b>	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
<b>Potência Conversor (W)</b>	299,70	216,24	299,70	304,83	282,16	299,70	222,91	299,70	304,73	272,22
<b>Tensão (V)</b>	32,48	27,70	32,55	32,75	31,75	64,93	55,98	64,93	65,45	61,86
<b>Corrente (A)</b>	9,22	7,80	9,20	9,30	8,93	4,61	3,97	4,61	4,64	4,39
<b>D</b>	0,50	0,49	0,49	0,50	0,5	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48
<b>Oscilação de Potência (W)</b>	0,00	-23,35	0,00	-0,05	-1,86	0,00	-16,68	0,00	-0,15	-11,80
<b>Eficiência (%)</b>	100,00	90,25	100,00	99,98	99,34	100,00	93,04	100,00	99,94	95,84
<b>Tempo de Convergência (s)</b>	-	0,1	0,12	0,01	0,03	-	0,11	0,1	0,07	0,08

Fonte: Autor.

No Quadro 9 pode ser observado os resultados do método de InC aplicado apenas na entrada do conversor *Boost*. Pois, quando aplicado na saída não houve convergência, devido ao capacitor  $C_{pv}$ , que fica em paralelo ao painel ser muito pequeno. Visto que é utilizado o mesmo valor de capacitor para todos os conversores. Como pode ser observado quando há uma queda

na irradiação e/ou elevação na temperatura o método apresenta uma baixa eficiência, com uma grande oscilação de potência e maior tempo para a convergência. Já para as outras condições se obtiveram resultados satisfatórios.

Quadro 9 – Resultados de simulação da técnica InC aplicada na entrada do conversor *Boost*

<b>Boost InC</b>	<b>Entrada</b>				
<b>W/m<sup>2</sup></b>	<b>1000</b>	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
<b>°C</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>20</b>	<b>40</b>
<b>Potência Painel (W)</b>	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
<b>Potência Conversor (W)</b>	298,67	221,40	299,46	302,70	267,76
<b>Tensão (V)</b>	32,98	28,37	32,56	33,81	32,93
<b>Corrente (A)</b>	9,05	7,80	9,19	8,95	8,13
<b>D</b>	0,49	0,50	0,50	0,49	0,47
<b>Oscilação de Potência (W)</b>	-1,03	-18,18	-0,24	-2,18	-16,26
<b>Eficiência (%)</b>	99,65	92,40	99,91	99,28	94,27
<b>Tempo de Convergência (s)</b>	-	1,08	0,15	0,13	0,91

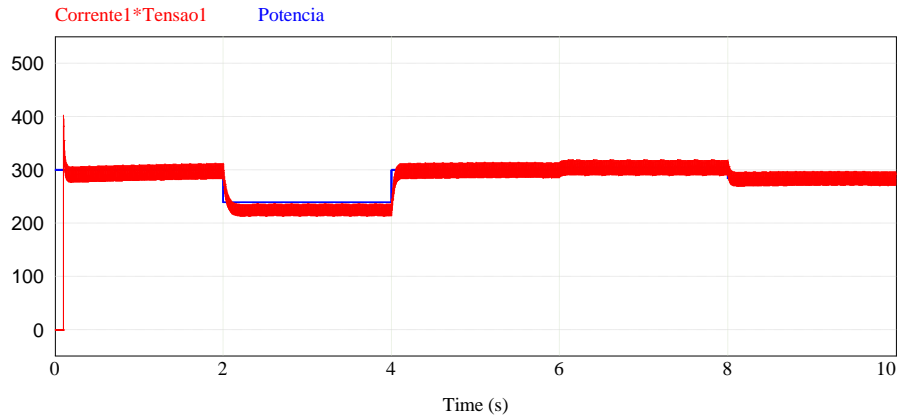
Fonte: Autor.

Os outros resultados de simulação, assim como suas análises, aplicados nos conversores *Buck* e *Buck-Boost*, podem ser observados no Anexo B deste trabalho. Sendo estes representados pelos (Quadro 11, Quadro 12, Quadro 13 e Quadro 14). Também pode ser observado que para esses conversores, utilizando o mesmo valor capacitância de entrada  $C_{pv}$  e  $\Delta D$ , o método de InC não convergiu.

Para demonstrar o comportamento dos algoritmos de MPPT aplicados nos conversores, no software PSIM®, as Figuras 31, 32 e 33, apresentam os melhores resultados de simulação obtidos. No qual pode-se destacar que o método HC, teve um bom desempenho para ambos conversores. Nas curvas em vermelho é feito a multiplicação da corrente e tensão do conversor e em azul a potência do painel. A partir disso, fica claro que para as variações de irradiação solar ([0 – 2]s – 1000 W/m<sup>2</sup> e 25 °C, [2 – 4]s – 800 W/m<sup>2</sup> e 25 °C e [4 – 6]s – 1000 W/m<sup>2</sup> e

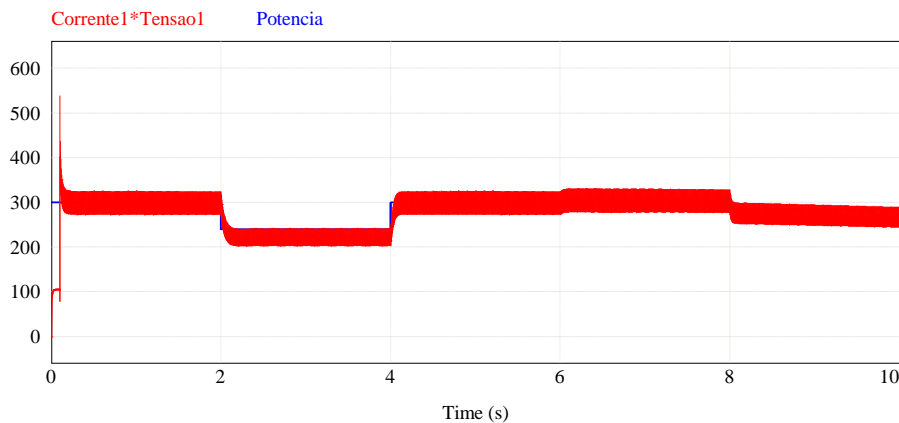
25°) e de temperatura ([6 – 8]s – 20°C e 1000 W/m<sup>2</sup>, [8 – 10]s – 40°C e 1000 W/m<sup>2</sup>), todos os conversores alcançaram o MPP.

Figura 31 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Buck



Fonte: Autor.

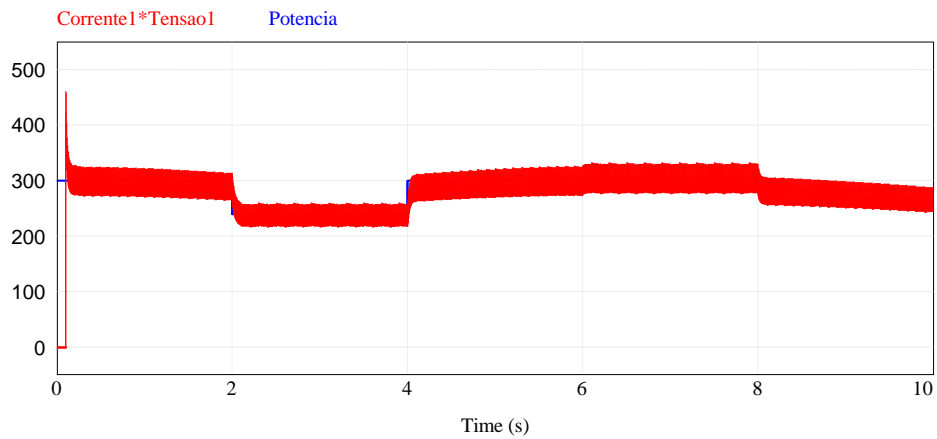
Figura 32 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Boost



Fonte: Autor.

Os resultados de simulação apresentaram bons desempenhos, mas como pode ser observado no Quadro 10, quando o MPPT é aplicado na entrada do conversor, o *Boost* foi quem apresentou as melhores características, entre elas: eficiência, tempo de convergência, variação de temperatura e oscilação de potência. Já quando aplicado na saída, o conversor *Buck*, obteve os melhores resultados para oscilação de potência, tempo de convergência e para variação de temperatura. Além disso, os resultados mostram que os algoritmos de MPPT P&O e HC possuem um melhor desempenho. Enquanto que o InC não convergiu para a maioria das simulações, considerando os mesmos parâmetros de simulação.

Figura 33 – Simulação do método de HC aplicado na saída do conversor Buck-Boost



Fonte: Autor.

Quadro 10 – Avaliação qualitativa

Características	MPPT	
	Entrada	Saída
Oscilação de Potência	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> P&O
Eficiência	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck-Boost</i> HC
Tempo de Convergência	<i>Boost</i> HC	<i>Buck</i> HC
Variação de Irradiação	<i>Buck-Boost</i> P&O	<i>Buck-Boost</i> HC
Variação de Temperatura	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> P&O
Melhor Desempenho	<i>Boost</i> P&O	<i>Buck</i> HC

Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÃO

Inicialmente foi contextualizado a demanda de energia elétrica no Brasil e no mundo, para assim destacar a importância da utilização de energias provindas de fontes limpas e renováveis. No qual a energia solar se destaca, pois é um recurso abundante e capaz de suprir nossas necessidades de consumo sem poluição. Como pode ser observado o Brasil possui um elevado potencial para a geração de energia solar fotovoltaica, pois está localizado próximo a linha do equador, propiciando uma alta incidência de irradiação solar.

O estudo dos painéis é essencial para se obter uma melhor eficiência. Então nesse trabalho foram estudadas suas características de funcionamento para a produção de energia elétrica, assim como os painéis mais eficientes atualmente e os fatores que afetam suas características elétricas de tensão e corrente, que são a irradiação e a temperatura. Devido a estas características de funcionamento dos painéis, o ponto de operação onde a máxima potência é gerada não é constante. Desta forma, para um sistema fotovoltaico aproveitar ao máximo a energia gerada, o seu ponto de operação deve ser constantemente alterado. Logo, é fundamental extrair a máxima potência gerada pelos painéis fotovoltaicos, aumentando assim a eficiência do sistema e reduzindo os custos da energia gerada. Para que este aproveitamento ocorra, faz-se necessário garantir que o sistema opere o maior tempo possível sobre o ponto de máxima potência. No qual os algoritmos de MPPT são a melhor maneira de coletar a potência máxima disponível dos painéis fotovoltaicos.

No entanto foi realizado um estudo comparativo entre as principais técnicas clássicas de MPPT. Essa comparação é baseada na avaliação de desempenho desses MPPTs, para diferentes condições, a fim de se observar quais métodos apresentaram um melhor resultado. Para isso, foi utilizado os conversores CC-CC, no qual os MPPTs foram aplicados na entrada e saída dos mesmos, a fim de se observar o melhor desempenho, visto que o conversor *Boost* possui fonte de corrente na entrada e o conversor *Buck* na saída.

A partir da revisão bibliográfica constatou-se que o conversor *Boost* é o mais utilizado para realizar o MPPT. Por essa razão, realizou-se a metodologia de projeto apenas para esse conversor. Foram definidos os parâmetros de funcionamento. Os conversores precisam atuar no modo CCM pra garantir a confiabilidade do projeto. Para definição dos parâmetros dos conversores, foi utilizado a máxima potência fornecida pelo painel, assim o valor da indutância é menor, o que garante menos perdas, menor volume, menor número de espiras e se torna mais barato. Para garantir que o indutor seja fixo, a corrente de entrada e o valor do *ripple* devem ser

inversamente proporcionais. De acordo com as simulações a menor potência que o conversor *Boost* garante totalmente o modo CCM é para 20 W.

Os resultados de simulação para os conversores apresentaram bons desempenhos, mas como pode ser observado no Quadro 10, quando o MPPT é aplicado na entrada do conversor, o *Boost* foi quem apresentou as melhores características, entre elas: oscilação de potência, eficiência, tempo de convergência e variação de temperatura. Já quando aplicado na saída, o conversor *Buck*, obteve os melhores resultados. Além disso, os resultados mostram que os algoritmos de MPPT, P&O e HC possuem um melhor desempenho, enquanto que o InC não convergiu para a maioria dos casos.



## 6 REFERÊNCIAS

GRUNDEMANN, W. T. **MPPT Perturba e Observa Aplicado ao Conversor Boost**. Universidade Federal do Pampa, Trabalho de Conclusão do Curso, Alegrete, 2017.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação de Mestrado, p. 146, Santa Maria, RS, 2007.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. Universidade Federal de Minas Gerais, n. Dissertação de Mestrado, p. 222, Belo Horizonte, 2009.

BASTO, W. S. **Estudo de Caso de um Projeto Fotovoltaico Integrado à Edificação**. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Departamento de Engenharia Elétrica, Trabalho de Conclusão do Curso, Paraíba, PB, 2018.

TAVARES, C. A. P. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2009.

OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da Conversão da Energia Fotovoltaica em Sistemas Isolados**. Universidade Federal de Pernambuco, Dissertação de mestrado, Recife, 2007.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 2ª ed. rev. e atual, São Paulo, Brasil: Érica, 2015.

ZIENTARSKI, J. R. R. **Contribuições ao Estudo de Conversores CC-CC com Processamento Parcial de Energia Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**. Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Doutorado, Santa Maria, RS, 2017.

CONFESSOR, S. L. M. **Análise Comparativa de Controladores MPPT Aplicados a um Sistema Fotovoltaico**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Dissertação de Mestrado, Mossoró, RN, 2014.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Brasil Ultrapassa Marca de 1GW em Geração Distribuída**, 2019. Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877) >. Acesso em: 13 ago. 2019.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **ABSOLAR Projeta Fonte Solar Liderando Matriz em 2040**, 2018. Disponível em: < <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/absolar-projeta-fonte-solar-liderando-matriz-em-2040.html> >. Acesso em: 15 ago. 2019.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Energia Solar Fotovoltaica Atinge Marca Histórica de 500 MW em Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil**, 2019a. Disponível em: < <http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-atinge-marca-historica-de-500-mw-em-microgeracao-e-minigeracao-distribuida.html> >. Acesso em: 15 ago. 2019.

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Fonte Solar Fotovoltaica Assume 7ª Posição na Matriz Elétrica Brasileira e Ultrapassa Nucleares**, 2019b. Disponível em: < <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/fonte-solar-fotovoltaica-assume-7a-posicao-na-matriz-eletrica-brasileira-e-ultrapassa-nucleares.html> >. Acesso em: 13 ago. 2019.

**Atlas Brasileiro de Energia Solar – LABREN / CCST / INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)**, 2017.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar ganha nova edição após dez anos**, 2017. Disponível em: < <http://www.inpe.br/informativo/08/nota03> >. Acesso em: 30 ago. 2019.

SOUSA, Y. R. **Estudo do Rastreamento do Ponto de Máxima Potência -MPPT- em Sistemas de Geração Fotovoltaica**. Universidade de Brasília (UnB), Monografia, Brasília, 2017.

SILVA, L. R. C. **Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para a Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Dissertação de Mestrado, MG, 2015.

SOUSA, S. M.; RODRIGUES, G. G.; LUZ, C. M. A. **Estudo Comparativo de Técnicas de MPPT Baseadas em Controlador Fuzzy e o Algoritmo Beta para Sistemas Fotovoltaicos Utilizando Conversor CC-CC SEPIC**. Journal of Chemical Information and Modeling, [s. l.], v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

SAUAIA, R. L. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica: Status, Oportunidades e Desafios**. Nosso Trabalho. Seminário Agro em Questão- Energias Renováveis, ABSOLAR, 2019.

SOUZA, R. di. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. Blue Sol, 2017. Disponível em: < <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em 14 set. 2019.

SOARES, E. A. P. **Uma nova perspectiva de eletrificação rural em corrente contínua: uma experiência no estado do PiauÍ**, 2011. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Dissertação (mestrado), Fortaleza, 2011.

ALMEIDA, E. et al. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016.

SILUK, A. R. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos aplicados à edificação**, 2017. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Dissertação (mestrado), Santa Maria, RS, Brasil, 2017.

ALBUQUERQUE, L. D. **Sistema de conexão e supervisão de painéis solares em Microgrid de corrente contínua**, 2017. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Dissertação de Mestrado, Natal, RN, 2017.

NOVAIS, H. H. B. **Análise e implementação de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos**, 2016. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Engenharia Elétrica, Trabalho de Conclusão de Curso, Pato Branco, 2016.

LEMOS, D. C. **Algoritmo MPPT para conversor CC-CC para aplicação em painéis fotovoltaicos**, 2015. Técnico Lisboa, engenharia eletrotécnica e de computadores, Dissertação (mestrado), 2015.

MOÇAMBIQUE, N. E. M. **Aplicação de algoritmos de busca do ponto de máxima potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos**, 2012. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-26072012-091641/pt-br.php>> Acesso em 22 set. 2019.

TERÁN, E. M. M. **Sistema fotovoltaico de pequeno porte interligado à rede elétrica**, 2012. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação (mestrado), Fortaleza, 2012.

RAMBO, C. E. B. **Estudo e desenvolvimento de um método de MPPT para sistema PV, baseado na técnica P&O aplicado a um micro-inversor do tipo Flyback**, 2015. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia, Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica), Porto Alegre, 2015.

CHOWDHURY, A. et al. **A Complete Comparison of the two Maximum Power Point Tracking Technique (MPPT) for Photovoltaic systems**. Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Energy Systems, ICEES 2018, p. 72–76, 2018.

AMARA, K. et al. **Improved Performance of a PV Solar Panel with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ANFIS based MPPT**. 7th International IEEE Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2018, v. 5, p. 1098–1101, 2018.

FARHAT, M. et al. **A stable FLC-based MPPT technique for photovoltaic system.** Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, v. 2015-June, n. June, p. 890–895, 2015.

BOUDARAIA, K. et al. **Buck Converter MPPT Control of a Photovoltaic.** 2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), p. 783–787, 2016.

HICHAMI, N. et al. **Comparison between both commands photovoltaic MPPT of the system: Algorithm P&O and IncCond, using converter BOOST.** Proceedings of 2017 International Conference on Engineering and Technology, ICET 2017, v. 2018- January, p. 1–6, 2018.

AHMAD, S. et al. **A technical comparison among different PV-MPPT algorithms to observe the effect of fast changing solar irradiation.** 2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering, WIECON-ECE 2015, p. 155–158, 2016.

RADHIA, G. et al. **MPPT controller for a photovoltaic power system based on increment conductance approach.** Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013, [s. l.], n. October, p. 73–78, 2013.

HARTMANN, M. A. **Estudo comparativo de técnicas de controle para extração de máxima potência de painéis solares fotovoltaicos,** 2018. Universidade Federal do Paraná, Trabalho de Conclusão de Curso, Curitiba, Paraná, 2018.

LOBATO, S. de C. **Análise comparativa entre as principais técnicas de MPPT com foco experimental,** 2015. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Monografia, Juiz de Fora, 2015.

STANKIEWICZ, A. et al. **Estudo comparativo de técnicas de rastreamento de máxima potência para geração de energia solar fotovoltaica,** 2014. Conferencia: Seminário de Eletrônica de Potência e Controle (SEPOC 2014), Santa Maria, Brasil, Volume: 1. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/280134088> >. Acesso em 06 out. 2019.

RIBEIRO, R. V. **Sistema fotovoltaico autônomo baseado em conversores CC-CC boost**, 2011. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – UFRJ, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2011.

BARBI, I. “**Eletrônica de Potência**”. 5ª Ed. Florianópolis, 2006.







## 7 ANEXO A – DATASHEET DO MÓDULO SOLAR CS6K DA CANADIAN SOLAR



### SUPERPOWER CS6K-290 | 295 | 300 | 305MS

Canadian Solar's new SuperPower modules with Mono-PERC cells significantly improve efficiency and reliability. The innovative technology offers superior low irradiance performance in the morning, in the evening and on cloudy days, increasing the energy output of the module and the overall yield of the solar system.

#### KEY FEATURES

-  11 % more power than conventional modules
-  Excellent performance at low irradiance of up to: 97.5 %
-  High PTC rating of up to: 91.90 %
-  Improved energy production due to low temperature coefficients
-  IP68 junction box for long-term weather endurance
-  Heavy snow load up to 6000 Pa, wind load up to 4000 Pa \*



\*Black frame product can be provided upon request.

**25** years linear power output warranty

**10** years product warranty on materials and workmanship

#### MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES\*

ISO 9001:2008 / Quality management system  
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system  
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

#### PRODUCT CERTIFICATES\*

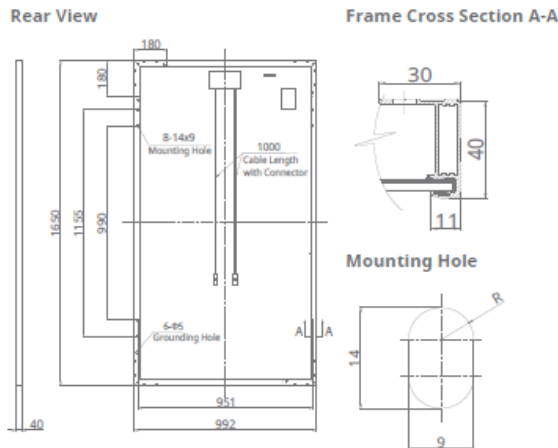
IEC 61215 / IEC 61730: TÜV-Rheinland / VDE / CE / MCS / CEC AU / JET  
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / FSEC (US Florida)  
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE  
UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1  
IEC 60068-2-68: SGS  
Take-e-way



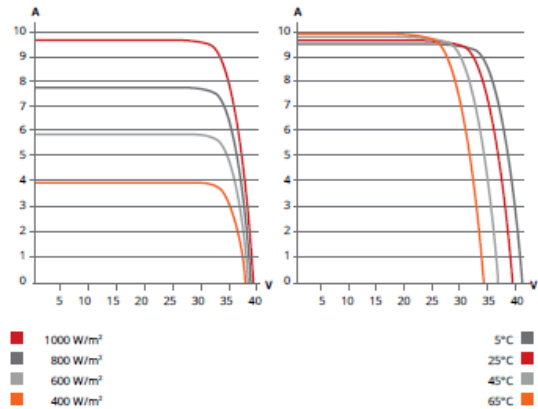
\* Please contact your local Canadian Solar sales representative for the specific product certificates applicable in your market.

**CANADIAN SOLAR INC.** is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading PV project developer and manufacturer of solar modules with over 21 GW deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

**ENGINEERING DRAWING (mm)**



**CS6K-295MS / I-V CURVES**



**ELECTRICAL DATA | STC\***

CS6K	290MS	295MS	300MS	305MS
Nominal Max. Power (Pmax)	290 W	295 W	300 W	305 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	32.1 V	32.3 V	32.5 V	32.7 V
Opt. Operating Current (Imp)	9.05 A	9.14 A	9.24 A	9.33 A
Open Circuit Voltage (Voc)	39.3 V	39.5 V	39.7 V	39.9 V
Short Circuit Current (Isc)	9.67 A	9.75 A	9.83 A	9.91 A
Module Efficiency	17.72%	18.02%	18.33%	18.63%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

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

**MECHANICAL DATA**

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (6×10)
Dimensions	1650×992×40 mm (65.0×39.1×1.57 in)
Weight	18.2 kg (40.1 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL), 1000 mm (39.4 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	27 pieces, 538 kg (1186.1 lbs)
Per Container (40' HQ)	756 pieces

**ELECTRICAL DATA | NMOT\***

CS6K	290MS	295MS	300MS	305MS
Nominal Max. Power (Pmax)	215 W	218 W	222 W	226 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	29.7 V	29.8 V	30.0 V	30.2 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.24 A	7.32 A	7.40 A	7.48 A
Open Circuit Voltage (Voc)	36.8 V	37.0 V	37.2 V	37.4 V
Short Circuit Current (Isc)	7.81 A	7.87 A	7.93 A	8.00 A

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

**TEMPERATURE CHARACTERISTICS**

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.39 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.29 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	42 ± 2 °C

**PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE**

Excellent performance at low irradiance, with an average relative efficiency of 97.5 % for irradiances between 200 W/m² and 1000 W/m² (AM 1.5, 25°C).

The aforesaid datasheet only provides the general information on Canadian Solar products and, due to the on-going innovation and improvement, please always contact your local Canadian Solar sales representative for the updated information on specifications, key features and certification requirements of Canadian Solar products in your region.

Please be kindly advised that PV modules should be handled and installed by qualified people who have professional skills and please carefully read the safety and installation instructions before using our PV modules.

**PARTNER SECTION**





## 8 ANEXO B – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DOS CONVERSORES BUCK E BUCK-BOOST

Visto que não foi feita uma análise completa para os conversores *Buck* e *Buck-Boost*, os resultados e análises de simulação podem ser observados a seguir.

No Quadro 11 pode ser visto os resultados de simulação do método P&O aplicado na entrada e saída do conversor *Buck*. Como pode ser observado, o algoritmo de P&O obteve os melhores resultados quando aplicado na entrada do conversor *Buck*. No geral, a oscilação de potência e eficiência foi boa para todas as perturbações de irradiação e temperatura. Porém quando houve uma queda na irradiação, ocorreu um maior tempo de convergência para ambas simulações, e também para a elevação da irradiação na entrada do conversor.

Quadro 11 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor *Buck*

<i>Buck</i> P&O	Entrada					Saída				
W/m <sup>2</sup>	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
°C	25	25	25	20	40	25	25	25	20	40
Potência Painel (W)	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
Potência Conversor (W)	299,07	239,52	298,22	304,84	283,27	295,49	230,38	295,20	304,88	283,20
Tensão (V)	32,8	32,25	33,16	32,95	31,22	17,18	15,17	17,17	17,46	16,82
Corrente (A)	9,12	7,42	8,99	9,25	9,07	17,18	15,17	17,17	17,49	16,82
D	0,53	0,48	0,52	0,53	0,54	0,51	0,51	0,51	0,53	0,54
Oscilação de Potência (W)	-0,63	-0,06	-1,47	-0,04	-0,76	-4,21	-9,21	-4,50	0,00	-0,82
Eficiência (%)	99,7	99,9	99,5	99,9	99,7	98,59	96,15	98,49	100,00	99,70
Tempo de Convergência (s)	-	5,41	4,14	0,08	0,52	-	0,96	0,15	0,06	0,09

Fonte: Autor.

O Quadro 12 apresenta os resultados de simulação da técnica de HC aplicada na entrada e saída do conversor *Buck*. Para essa técnica o MPPT aplicado na saída do conversor obteve os

melhores resultados. Com o MPPT na entrada houve uma maior perda na eficiência, tanto para a variação da irradiação quanto para a variação da temperatura. No caso do MPPT aplicado na saída apenas se teve uma queda na eficiência, quando houve uma queda na irradiação. Em relação ao tempo de convergência, todas as simulações obtiveram bons resultados.

Quadro 12 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor *Buck*

<i>Buck</i> HC	Entrada					Saída				
	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
W/m <sup>2</sup>	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
°C	25	25	25	20	40	25	25	25	20	40
Potência Painel (W)	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
Potência Conversor (W)	291,11	235,4	290,16	297,13	268,27	295,52	225,20	299,49	304,59	283,93
Tensão (V)	34,08	30,77	34,16	34,57	32,91	17,18	15	17,3	17,44	16,84
Corrente (A)	8,54	7,64	8,49	8,59	8,14	17,19	15	17,3	17,45	16,85
D	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,519	0,51	0,53	0,53	0,54
Oscilação de Potência (W)	-8,59	-4,19	-9,53	-7,75	-15,75	-4,18	-14,39	-0,21	-0,29	-0,09
Eficiência (%)	97,13	98,24	96,81	97,45	94,45	98,6	93,99	99,93	99,90	99,96
Tempo de Convergência (s)	-	0,07	0,15	0,03	0,08	-	0,11	0,13	0,06	0,10

Fonte: Autor.

No Quadro 13 pode ser observada a técnica de P&O aplicada na entrada e saída do conversor *Buck-Boost*. Nesse caso, para esta técnica os melhores resultados obtidos foram na entrada do conversor. Com quase uma eficiência de 100%. No entanto o tempo de convergência para a variação de irradiação foi maior que o tempo para a variação da temperatura. Quando aplicado na saída, obteve grande perda na eficiência quando houve a queda da irradiação. Já para a temperatura obteve resultados positivos. Ou seja, obteve uma eficiência de 100% quando aplicado na saída do conversor além de um tempo de convergência menor, e uma eficiência de quase 100% quando aplicado na entrada, com um tempo de convergência maior.

Quadro 13 – Resultados de simulação da técnica P&O aplicada na entrada e saída do conversor *Buck-Boost*

<i>Buck - Boost</i> P&O	Entrada					Saída				
W/m <sup>2</sup>	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
°C	25	25	25	20	40	25	25	25	20	40
<b>Potência Painel (W)</b>	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
<b>Potência Conversor (W)</b>	299,68	237,91	297,49	304,80	283,99	299,70	228,00	296,68	304,88	284,03
<b>Tensão (V)</b>	32,42	31,47	33,19	32,91	30,72	32,52	28,34	32,33	32,79	31,64
<b>Corrente (A)</b>	9,24	7,55	8,96	9,26	9,24	9,21	8,03	9,16	9,28	8,96
<b>D</b>	0,50	0,48	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,50	0,50	0,50
<b>Oscilação de Potência (W)</b>	-0,01	-1,68	-2,21	-0,08	-0,03	0,00	-11,59	-3,02	0,00	0,00
<b>Eficiência (%)</b>	99,9	99,2	99,2	99,9	99,8	100,00	95,16	98,99	100,00	100,00
<b>Tempo de Convergência (s)</b>	-	2,11	1,59	0,18	0,7	-	1,00	0,12	0,09	0,11

Fonte: Autor.

No Quadro 14 pode ser visto os resultados de simulação da técnica de HC aplicada na entrada e saída do conversor *Buck-Boost*. Nesse caso, para esse método o melhor resultado foi na saída do conversor, pois na entrada houve uma queda da eficiência quando a irradiação diminuiu. O tempo de convergência, quando o MPPT é aplicado na entrada é menor, já quando aplicado na saída do conversor é maior. Em relação a mudança de irradiação, o MPPT aplicado na saída do conversor obteve os melhores resultados. Pois como pode ser visto quando houve uma queda na irradiação no MPPT da entrada, este obteve uma perda de eficiência de 10%, porém quando houve uma elevação da temperatura o MPPT na entrada obteve uma maior eficiência. Já em relação a mudança de temperatura, pode ser observado no MPPT da saída, que quando houve uma queda da temperatura se obteve uma eficiência de 100%, e quando houve uma elevação na temperatura a eficiência do MPPT na entrada foi maior.

Quadro 14 – Resultados de simulação da técnica HC aplicada na entrada e saída do conversor *Buck-Boost*

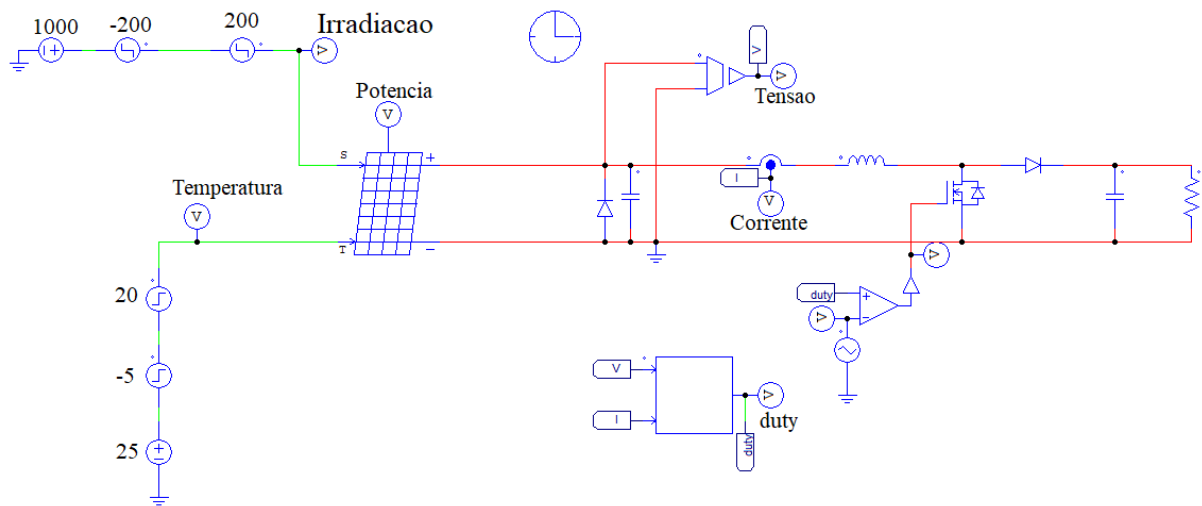
<i>Buck - Boost</i> HC	Entrada					Saída				
W/m <sup>2</sup>	1000	800	1000	1000	1000	1000	800	1000	1000	1000
°C	25	25	25	20	40	25	25	25	20	40
<b>Potência Painel (W)</b>	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03	299,70	239,59	299,70	304,88	284,03
<b>Potência Conversor (W)</b>	299,69	217,63	299,47	304,87	280,62	295,55	237,95	295,38	304,88	274,85
<b>Tensão (V)</b>	32,49	27,90	32,73	33,03	31,81	32,27	28,96	32,26	32,79	31,12
<b>Corrente (A)</b>	9,22	7,79	9,14	9,23	8,81	9,14	8,20	9,14	9,29	8,81
<b>D</b>	0,50	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,49	0,50	0,49
<b>Oscilação de Potência (W)</b>	-0,01	-21,96	-0,22	-0,01	-3,40	-4,15	-1,64	-4,31	0,00	-9,17
<b>Eficiência (%)</b>	99,99	90,83	99,92	99,99	98,80	98,61	99,31	98,56	100,00	96,77
<b>Tempo de Convergência (s)</b>	-	0,1	0,08	0,02	0,1	-	0,1	0,15	0,05	0,18

Fonte: Autor.

## 9 ANEXO C – CIRCUITOS ELÉTRICOS E CÓDIGOS DE MPPT

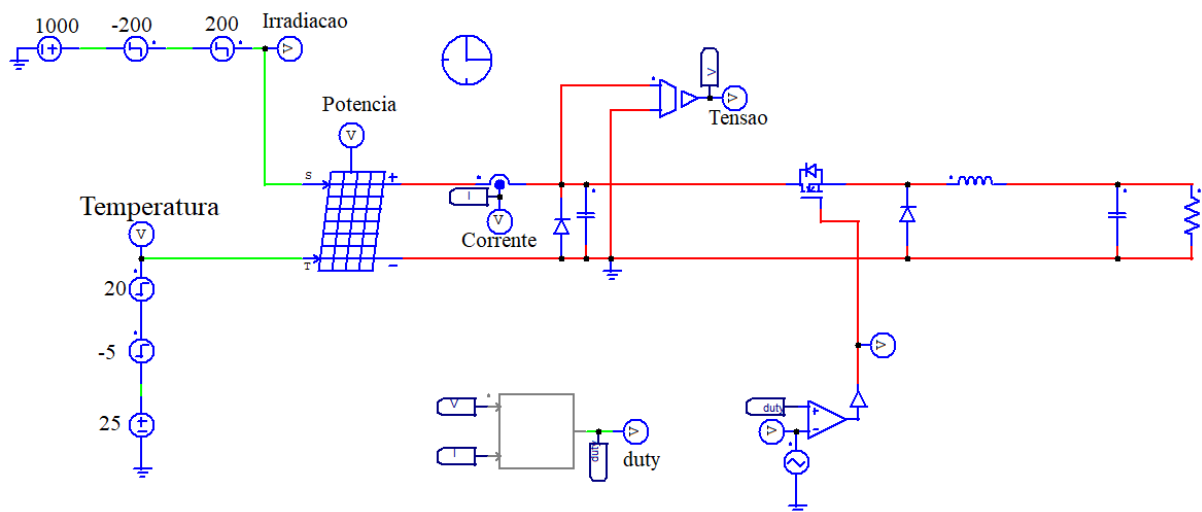
Aqui são apresentados os circuitos elétricos que foram gerados através do *software* Psim, para cada conversor, sendo eles: *Buck*, *Boost* e o *Buck-Boost*, para aplicação dos códigos de MPPT. É demonstrado a aplicação de sensores de corrente e tensão na entrada e saída para todos os conversores. Na Figura 34, Figura 35 e Figura 36 pode ser observado os sensores na entrada. Já na Figura 37, Figura 38 e Figura 39 são aplicados os sensores na saída dos conversores.

Figura 34 – Conversor Boost com MPPT na entrada



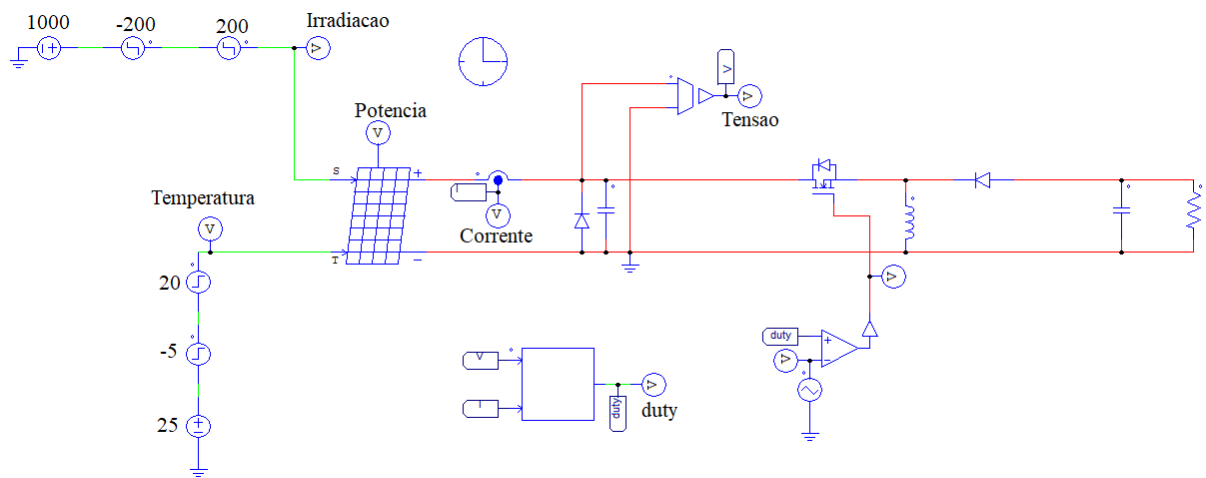
Fonte: Autor.

Figura 35 – Conversor Buck com MPPT na entrada



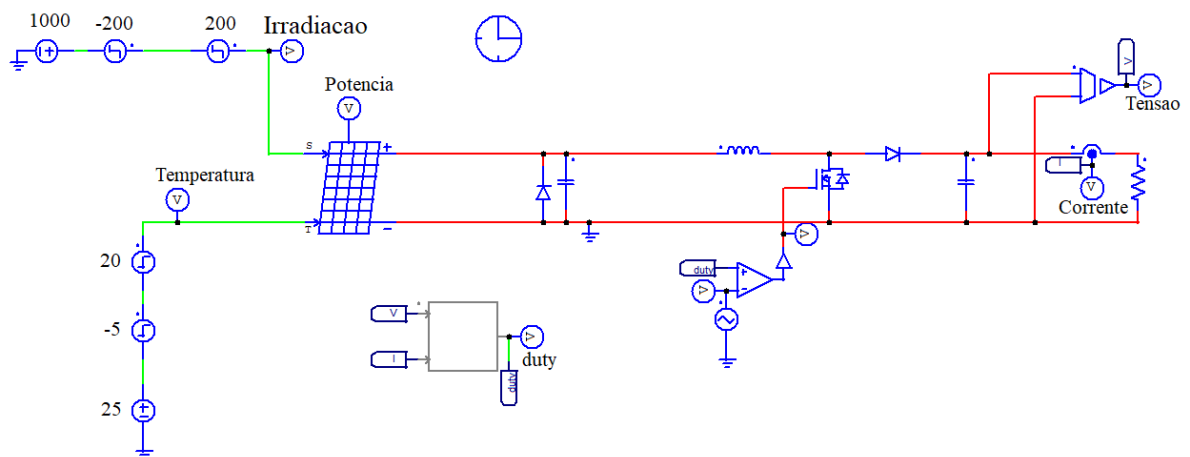
Fonte: Autor.

Figura 36 – Conversor Buck-Boost com MPPT na entrada



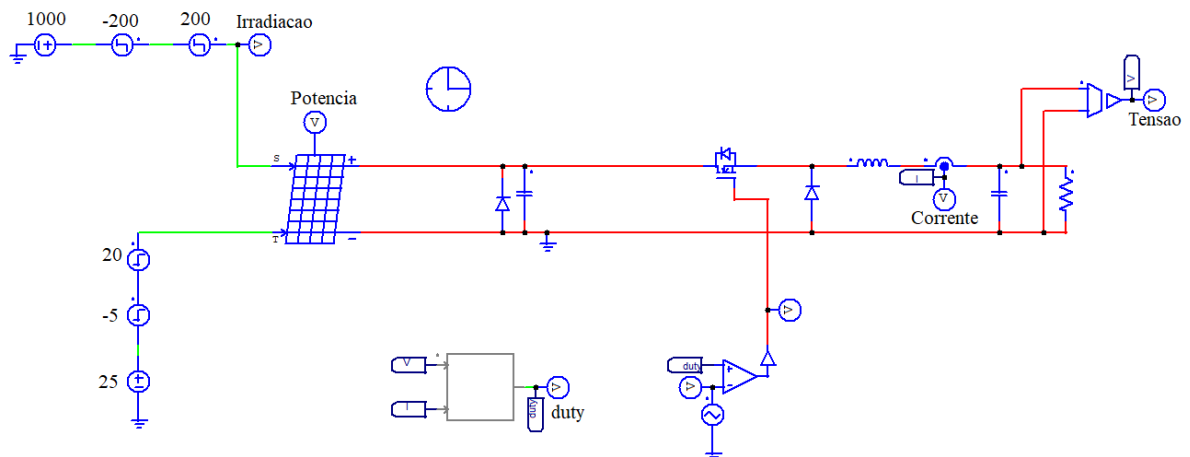
Fonte: Autor.

Figura 37 – Conversor Boost com MPPT na saída



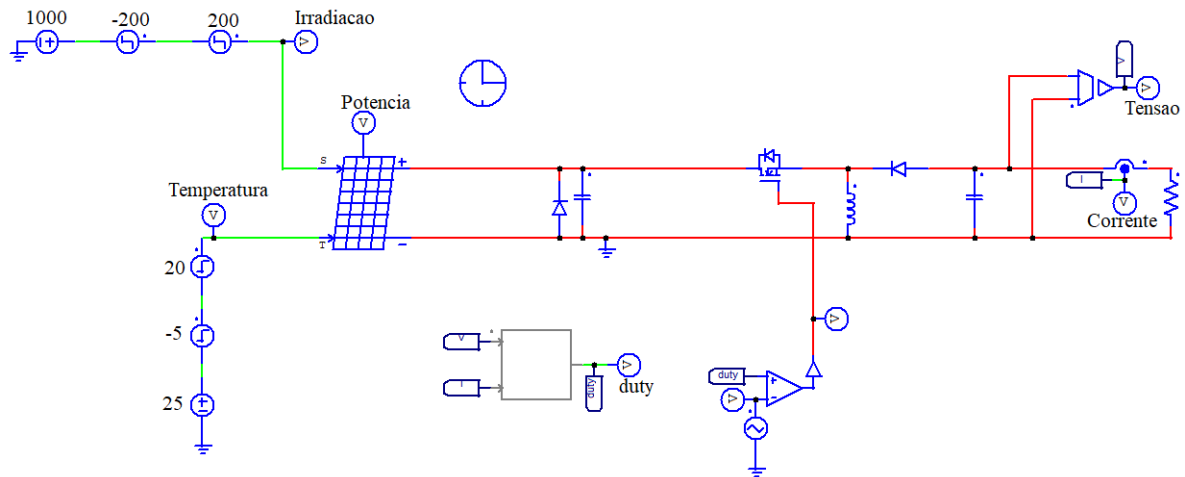
Fonte: Autor.

Figura 38 – Conversor Buck com MPPT na saída



Fonte: Autor.

Figura 39 – Conversor Buck-Boost com MPPT na saída



Fonte: Autor.

Podemos observar a seguir os códigos em C dos algoritmos de MPPT dos métodos de Perturba e Observa, Hill Climbing e Condutância Incremental.

- Método de Perturba e Observa

```
// Variáveis para triangular
static int cont = 0;
float y1;
float onda=0;
float freq=50000;
float a=2;
float T=1/freq;
float fracionario;
int teste = 0;

// Variáveis para o método P&O
float vpv_k = 0;
float ipv_k = 0;
float ppv_k = 0;
```

```

float vpv_k1 = 0;
float ipv_k1 = 0;
float ppv_k1 = 0;
static float D_k = 0.5;
static float D_k1 = 0;
static float deltaD = 0.001;

// Código para o Método P&O
fracionario = (t/T) - (int)(t/T);

if (fracionario<0.5) {
    onda=a*fracionario;
    teste = 1;
}
if (fracionario>0.5) {
    onda = a - a*fracionario;
    if (teste == 1) {
        cont = cont+1;
    }
    teste = 2;
}
if (cont == 5000)
{
    vpv_k = in [0];
    ipv_k = in [1];

    ppv_k = vpv_k*ipv_k;

    if (ppv_k > ppv_k1) {
        if (D_k > D_k1) {
            D_k1 = D_k;
            D_k = D_k + deltaD;
        }
    }
}

```



```

        else {
            D_k1 = D_k;
            D_k = D_k - deltaD;
        }
    }
else {
    if (D_k > D_k1) {
        D_k1 = D_k;
        D_k = D_k - deltaD;
    }
    else {
        D_k1 = D_k;
        D_k = D_k + deltaD;
    }
}
cont = 0;
vpv_k1 = vpv_k;
ipv_k1 = ipv_k;
ppv_k1 = ppv_k;

if (D_k > 1) {D_k = 0.9;}
if (D_k < 0.1) {D_k = 0.1;}
out [0] = D_k;
}

```

- Método de Hill Climbing

```

// Variáveis para triangular
static int cont = 0;
float y1;
float onda = 0;
float freq = 50000;
float a = 2;

```

```

float T = 1/freq;
float fraccionario;
int teste = 0;

// Variáveis para o método HC
float vpv_k = 0;
float ipv_k = 0;
float ppv_k = 0;
float vpv_k1 = 0;
float ipv_k1 = 0;
float ppv_k1 = 0;
static float D_k = 0.5;
float D_k1 = 0;
float deltaD = 0.001;

// Código para o método de HC
fraccionario = (t/T) - (int)(t/T);
if(fraccionario<0.5) {
    onda=a*fraccionario;
    teste = 1;
}
if(fraccionario>0.5) {
    onda = a - a*fraccionario;
    if (teste == 1) {
        cont = cont+1;
    }
    teste = 2;
}
if (cont == 5000)
{
    vpv_k = in [0];
    ipv_k = in [1];
    ppv_k = vpv_k * ipv_k;
    if (ppv_k == ppv_k1) {

```

```

        D_k = D_k;
    }
    else {
        if (vpv_k > vpv_k1) {
            D_k = D_k + deltaD;
        }
        else {
            D_k = D_k - deltaD;
        }
    }
    cont = 0;
    vpv_k1 = vpv_k;
    ipv_k1 = ipv_k;
    ppv_k1 = ppv_k;

    if (D_k > 1) {D_k = 0.9;}
    if (D_k < 0.1) {D_k = 0.1;}
    out [0] = D_k;
}

```

- Método de Condutância Incremental

// Variáveis para triangular

```

static int cont = 0;
float y1;
float onda = 0;
float freq=50000;
float a = 2;
float T = 1/freq;
float fracionario;
int teste = 0;

```

// Variáveis para o método InC

```

float vpv_k = 0;

```

```

float ipv_k = 0;
float vpv_k1 = 0;
float ipv_k1 = 0;
static float D_k = 0.5;
static float D_k1 = 0;
float dv = 0;
float di = 0;
float x = 0;
float y = 0;
static float deltaD = 0.001;

// Código para o método InC
fraccionario = (t/T) - (int)(t/T);
if (fraccionario < 0.5) {
    onda = a*fraccionario;
    teste = 1;
}

If (fraccionario>0.5) {
    onda = a - a*fraccionario;
    if (teste == 1) {
        cont = cont+1;
    }
    teste = 2;
}

if (cont == 5000) {

vpv_k = in [0];
ipv_k = in [1];

dv = vpv_k - vpv_k1;
di = ipv_k - ipv_k1;

```

```
x = di/dv;  
y = ((-ipv_k) / vpv_k);  
  
if (dv == 0) {  
    if (di == 0) {  
        D_k1 = D_k;  
    }  
    else {  
        if(di>0) {  
            D_k1 = D_k;  
            D_k = D_k - deltaD;  
        }  
        else {  
            D_k1 = D_k;  
            D_k = D_k + deltaD;  
        }  
    }  
}  
else {  
    if (x == y) {  
        D_k1 = D_k;  
    }  
    else {  
        if (x > y) {  
            D_k1 = D_k;  
            D_k = D_k + deltaD;  
        }  
        else {  
            D_k1 = D_k;  
            D_k = D_k - deltaD;  
        }  
    }  
}  
}
```

```
cont = 0;
vpv_k1 = vpv_k;
ipv_k1 = ipv_k;

if (D_k > 1) {D_k=0.9;}
if (D_k < 0.1) {D_k = 0.1;}
out [0] = D_k;
}
```