

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RAIMUNDO FRANCISCO LEAL NETO**

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE**  
**MÁXIMA POTÊNCIA**

**JOÃO PESSOA, NOVEMBRO DE 2016**

**RAIMUNDO FRANCISCO LEAL NETO**

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO  
PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal da Paraíba como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Sistemas de Energia

Orientador:

Professor Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

João Pessoa, Novembro de 2016

B237eNeto, Raimundo Francisco Leal

Estudo de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência./  
Raimundo Francisco Leal Neto./ - João Pessoa, 2016.

50f. il.:

Orientador: Dr. Kleber Carneiro de Oliveira

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) CGEE./  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis / Campus I /  
Universidade Federal da Paraíba

1. Energia fotovoltaica 2. Conversores c.c.-CA. 3. Corrente de  
dispersão. I . Título.

BS/CT/UFPB

CDU:2ed.621.3(043)

**RAIMUNDO FRANCISCO LEAL NETO**

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO  
PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal da Paraíba como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

**DATA DA APROVAÇÃO:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**NOTA:** \_\_\_\_

**APROVADO POR:**

---

Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Orientador)

Universidade Federal da Paraíba

---

Prof. Dr. João Marcelo Dias Ferreira

Universidade Federal da Paraíba

---

Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes

Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, Junho de 2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar sabedoria, saúde e condições favoráveis para concluir vários desafios ao longo da minha graduação.

Aos meus pais, por todo incentivo, dedicação, carinho, amor. Ao meu pai, meu torcedor número um, que sempre falou orgulhosamente a todos que seu filho fazia engenharia elétrica na Universidade Federal da Paraíba, e que com seu grande caráter, me ensinou com palavras e atitudes como ser um homem digno e honesto. A minha mãe, que foi fonte de amor em todos os momentos da minha vida, minha real incentivadora, que com suas orações revigoravam minhas forças e entusiasmos nos momentos de dificuldades.

As minhas irmãs, que me apoiaram, e ajudaram com suas palavras, que com um simples olhar compreendiam toda minha árdua luta durante minha graduação, e me escutavam atentamente quando eu precisava.

A minha namorada, que me ajudava, me apoiava e me dava ideias para melhorar certos projetos e trabalhos. Que me compreendia quando eu estava preocupado com os deveres da universidade, sendo assim, meu braço direito em todo os momentos.

Ao meu cunhado Felipe que com palavras incentivadoras me encorajava a continuar nessa caminhada. Aos meus amigos de graduação em especial Rafael Macedo, Lucas Brito, José Hemerson, Alex Feliz, Alysson Domingos, Jonas Leonel que me ajudaram e que passamos noites estudando, fazendo projetos e trabalhos juntos. Aos amigos que adquiri no decorrer da minha vida, que entediam os muitos momentos de ausência decorrente do elevado grau de dificuldade do curso de engenharia elétrica. Aos meus tios e primos por toda ajuda.

Aos professores João Alves e Kleber Carneiro que acreditaram em mim e me permitiram participar de um seleto grupo de bolsistas de Iniciação Científica. Agradecer em especial a Kleber por toda ajuda e dedicação, e por sua orientação durante meu trabalho de conclusão de curso.

Ao professor Rogerio, que sempre demonstrou amor e dedicação em passar conhecimento, e me auxiliou sempre que precisei. Aos demais professores por todos os ensinamentos compartilhados.

A Yuri que me orientou no HU, que com sua experiência me ajudou e deu dicas para me tornar um profissional melhor.

Aos demais que diretamente e indiretamente contribuíram na minha graduação.

## RESUMO

Dentre as diversas fontes de energias renováveis, os sistemas fotovoltaicos (PV) apresentam-se em ascensão devido aos seus baixos índices poluentes e pela quantidade de energia disponível, atraindo, dessa forma, diversas pesquisas e investimentos. A geração de energia PV exibe características não-lineares nos eixos de corrente (I)–tensão (V) e potência (P)–tensão (V). A máxima potência produzida varia de acordo com a irradiância e temperatura. Como a eficiência de conversão dos arranjos fotovoltaicos é baixa, é necessário técnicas de controle de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência são algoritmos de controle automático que ajustam as interfaces da potência para alcançar a maior quantidade de potência possível, durante as variações dos níveis de luz, sombreamento, temperatura e características do módulo fotovoltaico. O objetivo do MPPT é ajustar a tensão de funcionamento do painel solar próxima do ponto de máxima potência (MPP) para cada alteração das condições atmosféricas. Isso se tornou um componente essencial para avaliar o desempenho dos projetos dos sistemas de energia PV. A meta deste trabalho de conclusão de curso é realizar um estudo comparativo das técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, com o intuito de encontrar a técnica de melhor desempenho mediante o seu comportamento durante a variação das condições ambientais (irradiância e temperatura), resumindo todas as técnicas estudadas com suas vantagens e desvantagens.

**Palavras-chave:** rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), energia fotovoltaica, eficiência.

## ABSTRACT

Among the diversity of renewable energy sources, the photovoltaic systems are in ascension due to the low pollution rate and for the amount of energy available, inviting, in this way, a sort of researches and profits. The PV energy generation shows non-linear characteristics in the current (I)–voltage (V) and power (P)–voltage (V) edges. The maximum power provided, changes according the irradiance and temperature. As the PV strings` conversion efficiency is low, is necessary control technics of maximum power point tracking (MPPT). The maximum power point tracking techniques are automatic control algorithm that adjusts the power interfaces to reach the maximum amount possible power, during the light rate variation, shading, temperature and the photovoltaic module characteristics. The MPPT goal is to adjust the solar panel operation voltage next to the maximum power point (MPP) to each atmospheric conditions variation. This has become an essential element to classify the project`s performance of the PV power systems. The purpose of this term paper is to realize a comparative study of the maximum power point tracking technics. The intention to seek the technic of the best performance by its behavior while the environmental conditions variations (irradiation and temperature), summing up all the technics researched with advantages and disadvantages.

**Key Words:** Maximum Power Point Tracking, photovoltaic energy, efficiency.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros do módulo fotovoltaico Kyocera KC200GT.....	22
Tabela 2: Eficiência entre os métodos de MPPT com passo de incremento de 1,0V.....	38
Tabela 3: Eficiência entre os métodos de MPPT com passo de incremento de 0,1V.....	41



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Capacidade instaladas de sistemas fotovoltaicos no mundo. Fonte: [7].	17
Figura 2: Capacidade de energia solar fotovoltaica em cada país. Fonte: [7].	18
Figura 3: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real (modelo de um diodo). Fonte: [22].	20
Figura 4: Curva característica I-V de um painel fotovoltaico em condições padrões. Fonte:[22].	20
Figura 5: Corrente de saturação do diodo de referência. Representação da Equação 6 no simulink. Fonte: Autor.	23
Figura 6: Corrente de saturação do diodo. Representação da Equação 5 no simulink. Fonte: Autor.	23
Figura 7: Corrente gerada pela incidência de luz. Representação da Equação 4 no simulink. Fonte: Autor.	24
Figura 8: Corrente de saída do painel fotovoltaico. Representação da Equação 3 no simulink Fonte: Autor.	24
Figura 9: Conversor Boost. Fonte: [24].	25
Figura 10: Tensão no indutor L. Fonte: [23].	26
Figura 11: Conversor boost representado pelo Simulink. Fonte: Autor.	26
Figura 12: Controlador boost com modulação PWM. Fonte: Adaptado de [24].	27
Figura 13: Conversor boost alimentado por um módulo fotovoltaico. Fonte: Autor.	28
Figura 14: Controle do sistema. Fonte: Autor.	28
Figura 15: Características corrente x tensão de um painel fotovoltaico. Fonte: [3].	29
Figura 16: Curva característica da potência de um painel solar. Fonte: [26].	30
Figura 17: Fluxograma do método P&O. Fonte: [6].	31
Figura 18: Fluxograma do MPPT Condutância Incremental. Fonte: [6].	32
Figura 19: Fluxograma $dP/dV$ [3]. Fonte: Adaptado de [4].	34
Figura 20: Controle de tensão do painel. (a) A tensão preta é a tensão de referência; (b) A tensão cinza é a tensão controlada (tensão de saída do painel PV). Fonte: Autor.	35
Figura 21: Zoom do trecho de 9 ms a 10 ms da Figura 20.	35
Figura 22: Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método $dP/dV$ . Fonte:Autor.	36
Figura 23: Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método IC. Fonte:Autor.	36
Figura 24: Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método P&O. Fonte:Autor.	36
Figura 25: Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método da Tensão Constante. Fonte:Autor...	37
Figura 26:Variação de Irradiância no método P&O. Fonte:Autor.	38
Figura 27: Variação de Irradiância no método IC. Fonte:Autor.	39
Figura 28: Variação de Irradiância no método $dP/dV$ . Fonte:Autor.	39
Figura 29: Variação de Irradiância no método da Tensão Constante. Fonte:Autor.	39
Figura 30: Variação de temperatura no método P&O. Fonte:Autor.	40
Figura 31: Variação de temperatura no método IC. Fonte: Autor.	40
Figura 32: Variação de temperatura no método $dP/dV$ . Fonte:Autor.	41

Figura 33: Variação de temperatura no método da tensão constante. Fonte:Autor.....	41
Figura 34: P&O com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.....	42
Figura 35: IC com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.....	42
Figura 36: dP/dV com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.....	42
Figura 37: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica IC com passo de incremento de 1,0 V. Fonte:Autor. ....	43
Figura 38: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica P&O com passo de incremento de 1,0 V. Fonte:Autor. ....	43
Figura 39: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica dP/dV com passo de incremento de 1,0 V. Fonte:Autor.....	44
Figura 40: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica IC com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor. ....	45
Figura 41: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica P&O com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor. ....	45
Figura 42: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica dP/dV com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.....	46

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

c.c.	Corrente contínua
IC	Condutância Incremental
$I_{MPP}$	Corrente no ponto de máxima potência
$I_{PV}$	Corrente gerada pela incidência de luz solar
$I_{SC}$	Corrente de curto circuito do módulo fotovoltaico
MPP	Ponto de máxima potência
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> – Rastreamento do ponto de máxima potência.
$P_{MPP}$	Potência no ponto de máxima potência
P&O	Pertuba e Observa
PV	<i>Photovoltaic</i> - Fotovoltaico
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modula�o por largura de pulso
$V_{MPP}$	Tensão no ponto de máxima potência
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico

## SÚMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Energias Renováveis .....	14
1.2 Energia Solar Fotovoltaica .....	15
1.3 Objetivos .....	18
1.4 metodologia .....	18
<b>2. MODELAGEM Dos PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>19</b>
2.1 Célula fotovoltaica ideal .....	19
2.2 Modelando um arranjo fotovoltaico .....	20
2.3 Modelando o painel fotovoltaico no SIMULINK .....	22
<b>3. CONVERSORES c.c.-c.c. ....</b>	<b>25</b>
3.1 Conversor boost .....	25
3.2 Modelo simulado do conversor boost .....	26
3.3 Controle do conversor boost.....	27
3.4 Modelando via Simunlink.....	27
<b>4. MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA .....</b>	<b>29</b>
4.1 Perturba & Observa (P&O) .....	30
4.2 Condutância Incremental .....	31
4.3 Tensão constante .....	32
4.4 $dP/dV$ ou $dP/dI$ e Outros métodos.....	33
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>6. DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>7. CONCLUSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>8. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>48</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil convive com a escassez de água, devido ao baixo índice de chuvas nos últimos tempos, o que acarreta um baixo nível de água nos reservatórios, ocasionando racionamento de água entre a população e também, uma menor geração de energia nas usinas hidroelétricas. Com uma menor geração de eletricidade das usinas hidroelétricas e com um consumo, no melhor caso, sendo mantido constante, uma nova fonte de energia é necessária. Atualmente o governo tem buscado utilizar as usinas termoelétricas, as quais, além de serem poluentes possuem um custo elevado, e este custo adicional devido ao uso destas usinas termoelétricas são repassados ao consumidor.

Assim, o Brasil precisa de uma fonte mais viável. E nessa busca, a energia solar fotovoltaica se adequa, pois, além de ser uma fonte renovável de energia, não é poluente, não agride o meio-ambiente, não possui ruídos e possui uma fonte inesgotável de energia, o Sol.

O sol é a principal fonte de energia do nosso planeta, ele fornece anualmente para a atmosfera terrestre  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia radiante. Trata-se de um valor correspondente a dez mil vezes o consumo mundial no mesmo período. Infelizmente uma pequena parcela dessa energia é aproveitada, mesmo assim, com poucas exceções, praticamente toda energia usada pelo ser humano tem origem no sol [1].

A energia da biomassa, das águas dos rios, dos ventos e dos combustíveis fósseis são exemplos de energias provenientes do sol. Biomassa é a energia da matéria orgânica, tem origem da energia captada do sol através da fotossíntese, que é a conversão de energia da luz solar em energia química. A energia das águas dos rios, são utilizadas para mover turbinas de usinas hidroelétricas, que tem sua origem na evaporação da chuva e no degelo provocados pelo calor solar. Energia dos ventos origina das diferenças de temperatura e pressão na atmosfera ocasionada pelo aquecimento solar. Os combustíveis fósseis como o carvão, o gás natural e o petróleo também derivam da energia solar, pois são resultados da decomposição da matéria orgânica produzida há milhares de anos [1].

O crescimento contínuo da demanda de energia ao redor do mundo, tem impulsionado a sociedade a buscar energias alternativas, devido ao esgotamento dos recursos energéticos convencionais e seus indesejáveis impactos ao meio ambiente [2]. O planeta inteiro está enfrentando os obstáculos da crise energética. A diminuição nas reservas dos recursos energéticos não renováveis, tais como carvão, gás natural, e os combustíveis fósseis tem

aumentado esse tipo de preocupação [2]. Portanto, entre as energias alternativas disponíveis, a energia solar fotovoltaica é uma das energias renováveis mais promissoras.

A energia solar fotovoltaica é limpa, seu projeto é simples e necessita de pouquíssima manutenção, além da sua maior vantagem que é a construção como sistema independente para dar saídas de microwatts para megawatts de potência. Conseqüentemente, eles são usados como fonte de potência, bombeamento de água, construções remotas, sistema solar residencial, comunicação, satélites e veículos espaciais, em plantas de osmose inversa, e até usinas de escalas de megawatts de potência. Com isso, um vasto arranjo de aplicações está aumentando cada ano, e conseqüentemente, a demanda por energia solar fotovoltaica [3].

No entanto, existem duas principais desvantagens do sistema PV, o alto custo da instalação e a baixa eficiência na conversão dos módulos PV que varia entre 9-17%. Além disso, as características PV são não lineares e dependentes do clima [4]. Devido à baixa eficiência é necessário adotar algumas medidas, como por exemplo o uso de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês, *Maximum Power Point Tracking*), que fará que o sistema fotovoltaico sempre extraia sua máxima potência, de acordo com as condições ambientais.

## 1.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As fontes de energia renováveis, são aquelas em que a sua utilização e uso é renovável e pode-se manter e ser aproveitado ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento dessa mesma fonte. Estas fontes encontram-se já em difusão em todo o mundo e a sua importância tem vindo a aumentar ao longo dos anos representando uma parte considerável da produção de energia mundial [5].

Energia limpa geralmente é associada ao termo energia renovável, pois, em comparação com os combustíveis fósseis apresentam reduzidos impactos ambientais e praticamente não originam resíduos ou emissões de poluentes [1].

O incentivo do governo em vários países do mundo tem contribuído para o crescente uso da geração, a partir de fontes renováveis nas últimas décadas. Dentre estas fontes, a energia solar fotovoltaica tem se destacado no cenário mundial como uma das fontes com maior crescimento em potência instalada. Os investimentos em energia solar fotovoltaica têm sido consideráveis. A partir da década de 80, inúmeras aplicações foram desenvolvidas com a utilização da energia solar fotovoltaica e entre essas aplicações, destaca-se a alimentação de satélites. O mercado terrestre em aplicações em energia solar fotovoltaica começou a tornar-se

expressivo apenas no fim da década de 80, com a diminuição dos preços, graças à produção em larga escala dos módulos fotovoltaicos [6]. Devido ao seu carácter ecologicamente correto, sua evolução tem se dado de maneira rápida, nos últimos 20 anos, tornando-se viável até em locais onde já se tem a energia elétrica convencional. Assim, houve um crescimento na demanda de painéis fotovoltaicos e, conseqüentemente, nos números de painéis fabricados no mundo.

Existem vários tipos de energias renováveis, e cada vez mais, com o constante desenvolvimento das tecnologias e inovações, se descobrem novas formas de produção de energia elétrica utilizando como fonte os fenômenos e recursos naturais.

A principal fonte de energia existente hoje é o petróleo, mas além de não ser renovável, e ser um dos principais responsáveis pelo efeito estufa, o petróleo ainda causa grandes conflitos entre os países.

Diversas nações do mundo inteiro estão investindo muito em projetos que utilizam as fontes de energia alternativa como a energia solar, a energia eólica, a energia geotérmica, o biodiesel, a energia obtida através do hidrogénio, a energia das marés, o etanol e a biomassa.

Essas fontes de energia alternativas citadas são as mais abordadas em projetos para uma menor contribuição para o aquecimento da Terra e também para tentar alcançar cada vez mais uma independência com relação ao petróleo.

O ano de 2015 foi extraordinário para as energias renováveis. Acordos foram feitos entre as autoridades do G7 e do G20 para acelerar o acesso à energia renovável e avançar em termo de eficiência energética. A Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou uma meta de Desenvolvimento Sustentável da Energia Sustentável para Todos (SDG 7). Apesar de um declínio mundial drástico nos preços dos combustíveis fósseis, o mundo teve o maior acréscimo de capacidade global de energias renováveis até a hoje [7].

## **1.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Com o crescimento das preocupações sobre o déficit de combustíveis fósseis, a variação dos preços do petróleo, o aquecimento global, e os danos no meio ambiente e ecossistema, os incentivos promissores para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia com alta eficiência e baixa emissão de gases poluentes são de grande importância. Devido a essa problemática, a energia através do efeito fotovoltaico é considerada um pré-requisito primordial para as fontes renováveis, por suas características de onipresença, abundância e sustentabilidade da energia proveniente da radiação solar. Independentemente da intermitência da luz solar, a radiação solar é amplamente disponível e completamente livre de custos. Atualmente, o sistema

de energia solar fotovoltaica é bastante reconhecida e amplamente utilizada na vanguarda de aplicações em energia elétrica. Ela pode gerar eletricidade em corrente contínua sem impacto ambiental e contaminação quando é exposta à radiação solar. O painel fotovoltaico é um dispositivo semiconductor estático, livre de partes com movimento, tornando-o assim pouquíssimos gastos sua operação e manutenção [8].

A energia solar fotovoltaica é resultado da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, a unidade fundamental desse processo de conversão, que basicamente é um dispositivo fabricado com material semiconductor [9].

O material básico de formação de uma célula é o silício, e o campo elétrico é obtido introduzindo-se impurezas de maneira controlada (dopando) com materiais que apresentam excesso ou falta de elétrons com relação ao silício. Assim, se em um dos lados da célula introduzir átomos doadores, isso é, com excesso de elétrons, como o fósforo, dessa forma obtém-se o lado tipo N da célula, que é uma área com maior densidade de elétrons. Se em outro lado inserir átomos receptores, isso é, com falta de elétrons, como o boro, obtém-se uma área com densidade maior de lacunas do que o restante do material. A diferença de concentrações entre elétrons e lacunas cria um campo elétrico, e o conjunto assim formado denomina-se junção P-N. A maioria das células solares são formadas a partir de uma junção P-N, a qual se adicionam contatos metálicos para poder extrair a corrente em um circuito externo [10].

Como dito anteriormente, cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P. Separadamente, ambas as partes são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os espaços vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” [11].

Por meio de um condutor externo, ligando a camada negativa à positiva, gera-se um fluxo de elétrons (corrente elétrica). Enquanto a luz incidir na célula, manter-se-á este fluxo. A intensidade da corrente elétrica gerada variará na mesma proporção conforme a intensidade da luz incidente. Uma célula fotovoltaica não armazena energia elétrica. Apenas mantém um fluxo de elétrons estabelecidos num circuito elétrico enquanto houver incidência de luz sobre ela. Este fenômeno é denominado “Efeito fotovoltaico” [11].

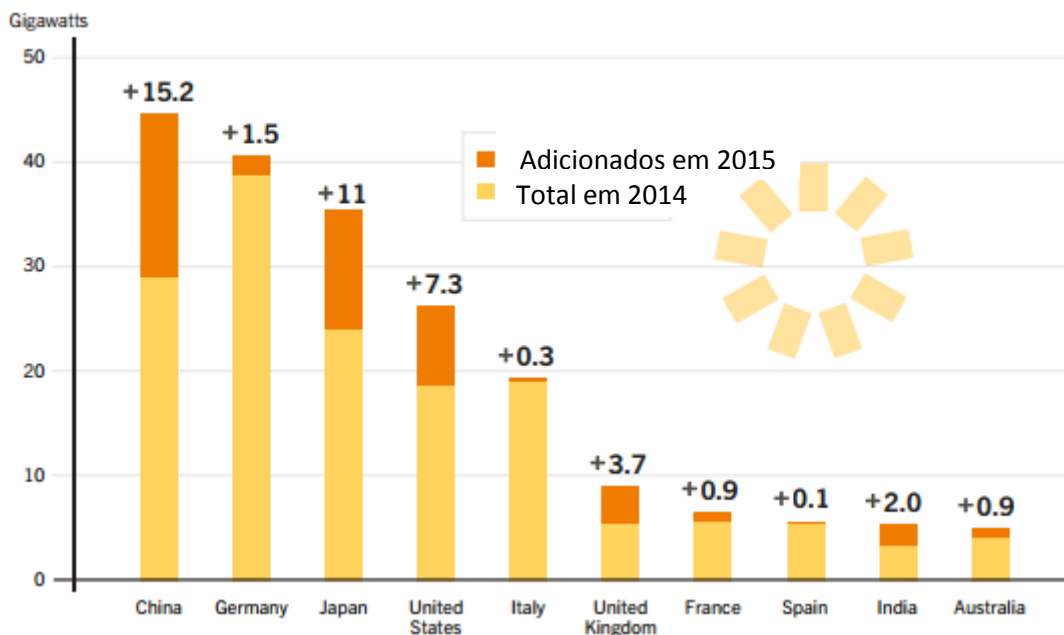
A área de energia solar expande mais a cada ano, e em 2015 experimentou mais um ano de crescimento recorde, o mercado anual trouxe uma nova capacidade de mais de 25% sobre o



ano de 2014. Mais que 50 GW foram adicionados (equivalente a uma estimativa de 185 milhões de painéis solares), trazendo a capacidade mundial para cerca de 227 GW, como mostrada na Figura 1. Até recentemente, a demanda basicamente era concentrada nos países desenvolvidos; agora os mercados emergentes em todos os continentes têm contribuído significativamente para o crescimento global. Ao mesmo tempo, no entanto, países que cresceram bastante ultimamente na Europa tiveram pouca capacidade instalada ou nenhuma em 2015, como mostrada na Figura 2. A expansão do mercado em grande parte ao redor do mundo é devido à grande parte do aumento da competitividade da energia solar, bem como os novos programas de incentivos dos governos, o crescimento contínuo da demanda em eletricidade e uma ampliação da consciência do potencial solar com uma busca para aliviar a poluição e as emissões de CO<sub>2</sub>. [7].



**Figura 1: Capacidade instaladas de sistemas fotovoltaicos no mundo. Fonte: [7].**



**Figura 2: Capacidade de energia solar fotovoltaica em cada país. Fonte: [7].**

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo desta monografia foi realizar um estudo comparativo das técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, visando encontrar a técnica de melhor eficiência mediante o seu comportamento nas condições ambientais padrões ( $1000 \text{ W/m}^2$  e  $25^\circ\text{C}$ ) e durante as mudanças no valor do passo de incremento, além de observar o comportamento das técnicas nas variações de irradiância e temperatura.

### 1.4 METODOLOGIA

Primeiramente houve um estudo teórico sobre as energias renováveis, energia solar fotovoltaica, aprofundando em técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT). Os métodos utilizados foram Pertuba e Observa, Condutância Incremental, Tensão Constante e  $dP/dV$  para assim, poder comparar esses métodos.

Para alcançar os objetivos propostos foram utilizados artigos científicos, livros, computadores, juntamente com o orientador do projeto ajudando em cada fase da monografia. As simulações foram feitas no software MATLAB, mais precisamente no Simulink, para posterior análises.

## 2. MODELAGEM DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O dispositivo básico de um sistema fotovoltaico é a célula fotovoltaica. Células podem ser agrupadas para formar painéis ou módulos. Painéis podem ser agrupados para formar um grande arranjo fotovoltaico. O termo “arranjo” é usualmente empregado para descrever um painel fotovoltaico (com muitas células conectadas em series e/ou paralelas) ou um grupo de painéis [1].

### 2.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA IDEAL

As Figuras 3 e 4 mostram o circuito equivalente da célula fotovoltaica ideal, e a curva característica corrente  $x$  tensão de um módulo fotovoltaico ( $I-V$ ), respectivamente. A Figura 4 traz importantes variáveis de um painel fotovoltaico  $I_{SC}$  e  $V_{OC}$ .  $I_{SC}$  é a corrente de curto circuito de um painel fotovoltaico, na qual, é a máxima corrente que o módulo pode produzir sob determinadas condições de irradiância e temperatura, quando seus terminais são curto-circuitados.  $V_{OC}$  é a tensão de circuito aberto, na qual, é a máxima tensão que o módulo pode produzir sob determinadas condições de irradiância e temperatura, e acontece quando seus terminais estão abertos. A equação básica da teoria dos semicondutores que descreve as características  $I-V$  de uma célula fotovoltaica ideal é [12]:

$$I = I_{PV,célula} - I_{0,célula} \left[ \exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_d = I_{0,célula} \left[ \exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

Onde  $I_{PV,célula}$  é a corrente gerada pela incidência de luz (é diretamente proporcional à irradiação solar),  $I_d$  é a equação de Shockley do diodo,  $I_{0,célula}$  é a corrente de saturação reversa ou a corrente de fuga do diodo,  $q$  é a carga do elétron ( $1,60217646 \cdot 10^{-19}C$ ),  $k$  é a constante de Boltzmann ( $1,3806503 \cdot 10^{-23} J/K$ ),  $T$  é a temperatura da junção P-N em Kelvin, e  $a$  é a constante de idealidade do diodo.

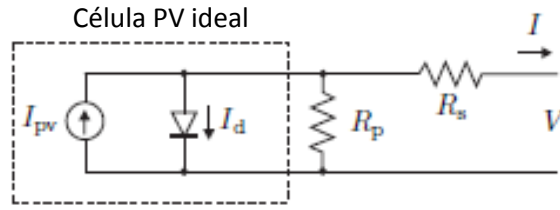


Figura 3: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica real (modelo de um diodo). Fonte: [22].

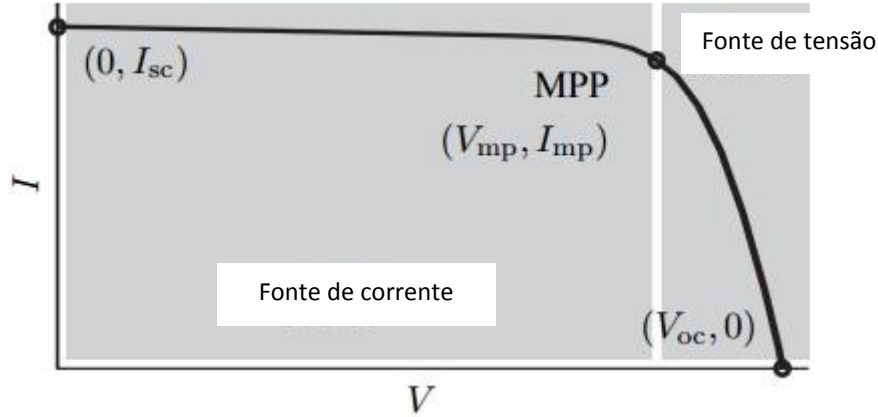


Figura 4: Curva característica I-V de um painel fotovoltaico em condições padrões. Fonte:[22].

## 2.2 MODELANDO UM ARRANJO FOTOVOLTAICO

A equação básica (1) da célula fotovoltaica elementar não representa a característica I-V de um arranjo fotovoltaico prático (real). Um arranjo prático é composto de muitas células fotovoltaicas conectadas e as observações das características nos terminais dos arranjos fotovoltaicos requerem a inclusão de parâmetros adicionais na equação básica [12]:

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3)$$

Onde  $I_{pv}$  e  $I_0$  são as correntes fotogerada e de saturação, respectivamente, do arranjo e  $V_t = N_s k T / q$  é a tensão termal,  $N_s$  é o número as células conectadas em série. Células conectadas em paralelo aumenta a corrente e células conectadas em serie fornece uma maior tensão de saída. Se o arranjo (PV) é composto de células em conexão paralelas  $N_p$ , as correntes fotovoltaicas e de saturação podem ser expressas como:  $I_{pv} = I_{pv,célula} N_p$ ,  $I_0 = I_{0,célula} N_p$ . Em (3)  $R_s$  é a resistência equivalente em série de um módulo e  $R_p$  é a resistência equivalente em paralelo. A curva característica (I-V) do módulo fotovoltaico mostrado na Figura 4, depende

das características internas do módulo ( $R_s$ ,  $R_p$ ) e das influências externas, tais como níveis da irradiância e temperatura. A quantidade de luz incidente afeta diretamente a intensidade dos portadores de carga e conseqüentemente a corrente gerada pelo módulo. O pressuposto  $I_{SC} \cong I_{PV}$  é geralmente usado nos modelos de painéis fotovoltaicos, pois, nos dispositivos práticos a resistência série ( $R_s$ ) é baixa e a resistência paralela ( $R_p$ ) é alta. Portanto,  $I_{PV}$  depende linearmente da irradiância solar e da influência da temperatura, de acordo com a seguinte equação [13]-[16]:

$$I_{PV} = (I_{PV,n} + K_1 \Delta_T) \frac{G}{G_n} \quad (4)$$

Onde  $I_{PV,n}$  é a corrente gerada pela incidência de luz nas condições nominais (usualmente 25°C e 1000W/m<sup>2</sup>),  $\Delta_T = T - T_n$  (sendo  $T$  e  $T_n$  as temperaturas [K] atual e nominal, respectivamente),  $G$  [W/m<sup>2</sup>] é a irradiância sobre a superfície do módulo, e  $G_n$  é a irradiância nominal.

A corrente de saturação do diodo  $I_0$ , expressa em função da temperatura pode ser expressa por [14]-[20]:

$$I_0 = I_{0,n} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{ak} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

Onde  $E_g$  é o gap de energia (do inglês, *bandgap*) ou banda proibida do semiconductor ( $E_g \cong 1,12$  eV para o silício policristalino em 25°C [14], [21]), e a corrente de saturação nominal é:

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n}}{\exp \left( \frac{V_{oc,n}}{aV_{t,n}} \right) - 1} \quad (6)$$

Com  $V_{t,n}$  sendo a tensão térmica de células conectadas em série na temperatura nominal  $T_n$ ,  $I_{SC,n}$  é a corrente de curto circuito nominal e  $V_{oc,n}$  é a tensão de circuito aberto nas condições nominais.

Uma maneira de encontrar  $R_s$  e  $R_p$  é igualar  $P_{max,m} = P_{max,e}$  resolver a equação em função de  $R_s$ , como mostram as equações (7) e (8) :

$$P_{\max,m} = V_{mp} \left\{ I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{a N_S} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{R_p} \right\} = P_{\max,e} \quad (7)$$

$$R_p = \frac{V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_S)}{\left\{ V_{mp} I_{pv} - V_{mp} I_0 \exp \left[ \frac{q}{kT} \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{a N_S} \right] + V_{mp} I_0 - P_{\max,e} \right\}} \quad (8)$$

Onde  $P_{\max,m}$  é a máxima potência experimental da folha de dados do painel fotovoltaico e  $P_{\max,e}$  é o ponto de máxima potência. De acordo com [22], para o modelo do painel fotovoltaico Kyocera KC200GT, utiliza-se o método iterativo para solucionar o valor de  $R_s$ , encontrando-se um valor de  $0,221\Omega$  para  $R_s$  e  $415,405\Omega$  para  $R_p$ . Os dados obtidos da folha de dados para o painel fotovoltaico Kyocera KC200GT em condições padrões ( $25^\circ\text{C}$  e  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) é mostrado na tabela a seguir:

**Tabela 1: Parâmetros da folha de dados do KC200GT. Fonte: [22].**

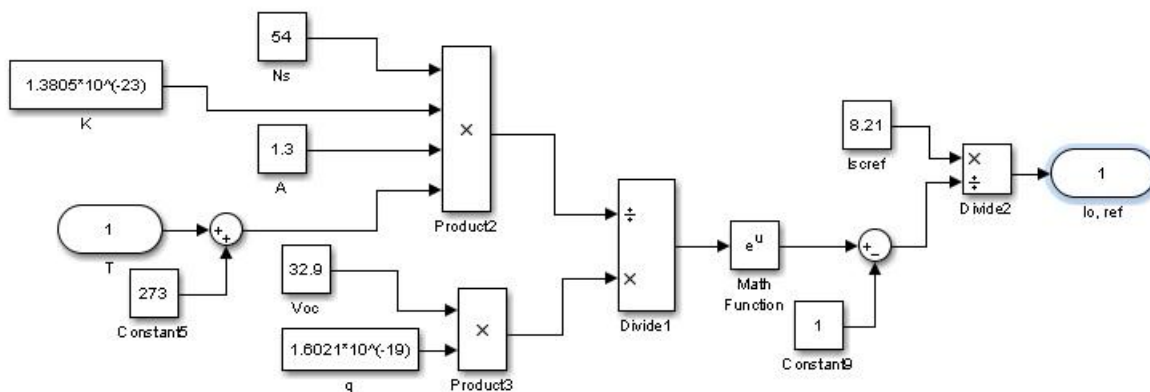
$I_{MPPT}$	7,61 A
$V_{MPPT}$	26,3 V
$P_{\max,e}$	200,143 W
$I_{sc}$	8,21 A
$V_{oc}$	32,9 V
$K_v$	-0,1230 A/k
$K_i$	0,0032 A/K
$N_s$	54

### 2.3 MODELANDO O PAINEL FOTOVOLTAICO NO SIMULINK

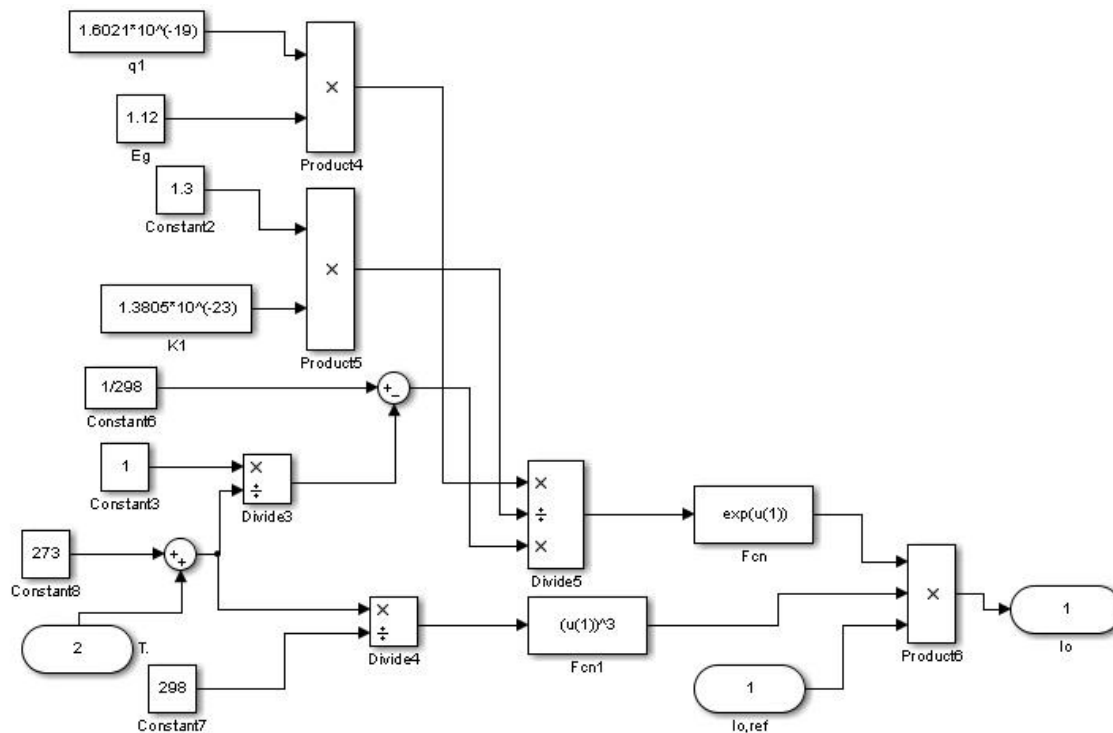
O modelo desenvolvido do painel fotovoltaico tem como alicerce a Equação (3), na qual apresenta como variáveis as resistências em série  $R_s$  e paralelo  $R_p$ , a corrente fotogerada  $I_{pv}$ , a corrente de saturação do diodo  $I_0$ , a constante de idealidade do diodo  $a$ , a tensão do painel  $V$  e como variável de saída a corrente  $I$  do painel fotovoltaico. Como pode notar, as Equações (4) – (6) são dependentes da temperatura do painel  $T$  e da irradiância  $G$  incidente no painel.

De acordo com as equações desenvolvidas (3) – (6) é possível criar um painel fotovoltaico que tem como variáveis de entrada a irradiância incidente no painel  $G$ , a temperatura sobre o painel  $T$ , a tensão terminal  $V$ , gerando assim, a corrente de saída  $I$  do painel fotovoltaico.

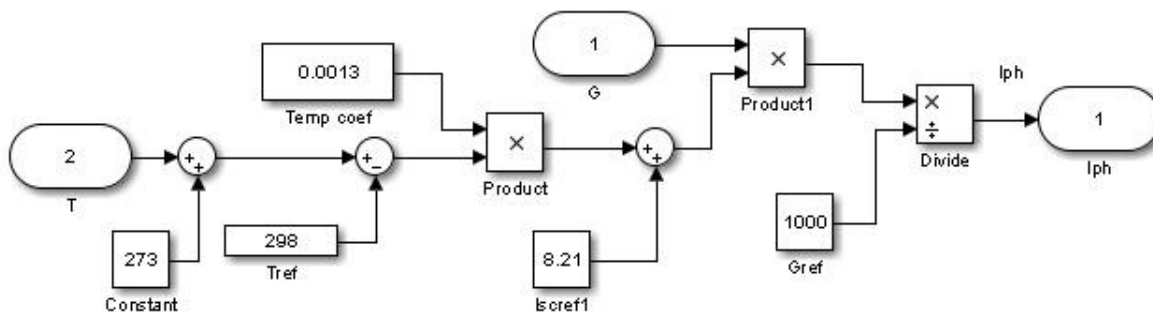
O painel desenvolvido no Simulink é o modelo KC200GT, cujos valores dos parâmetros que não variam são a constante de Boltzman  $k$ , a carga do elétron  $q$ , o gap de energia  $E_g$  e os parâmetros de referência fornecidos pelo fabricante do painel na Tabela 1. As Equações (6), (5), (4) e (3) são representadas respectivamente no Simulink nas Figuras 5, 6, 7 e 8.



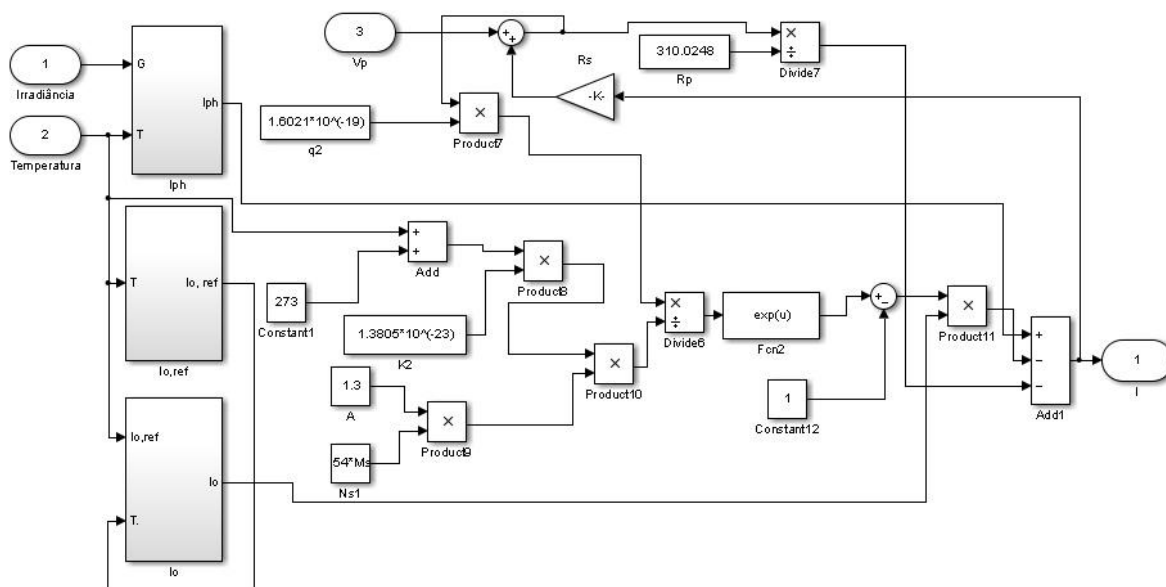
**Figura 5: Corrente de saturação do diodo de referência. Representação da Equação 6 no simulink. Fonte: Autor.**



**Figura 6: Corrente de saturação do diodo. Representação da Equação 5 no simulink. Fonte: Autor.**



**Figura 7: Corrente gerada pela incidência de luz. Representação da Equação 4 no simulink. Fonte: Autor.**



**Figura 8: Corrente de saída do painel fotovoltaico. Representação da Equação 3 no simulink. Fonte: Autor.**

A Figura 8 representa o desenvolvimento completo do painel fotovoltaico, cuja a corrente de saída do painel é representado por  $I$ .

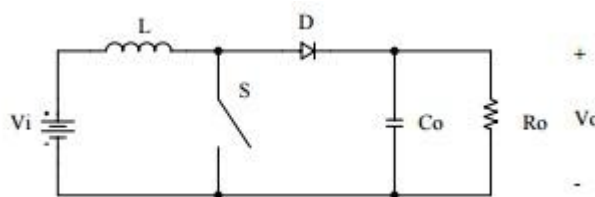


### 3. CONVERSORES C.C.-C.C.

Conversores c.c.- c.c. são sistemas formados por semicondutores de potência, operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída [23].

#### 3.1 CONVERSOR BOOST

O conversor c.c.-c.c. elevador de tensão, é chamado de conversor Boost, onde, sua tensão de alimentação, geralmente, é menor que a tensão de saída. As principais aplicações do conversor Boost são em retificadoras com elevado fator de potência, acionamento de motor de corrente contínua com frenagem regenerativa e em fontes de alimentação [24]. Ele é caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. O diagrama elétrico do conversor Boost é mostrado na Figura 9 :



**Figura 9: Conversor Boost. Fonte: [24].**

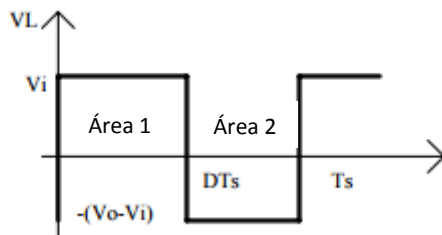
As etapas de funcionamento do conversor boost será mostrada a seguir:

**1ª Etapa ( 0,  $DT_s$  ):** A chave  $S$  está fechada. A fonte  $V_i$  fornece energia ao indutor, portanto,  $L$  é magnetizado.

**2ª Etapa ( $DT_s$  ,  $(1-D)T_s$  ):** A chave  $S$  abre. O diodo entra em condução. Agora, o indutor  $L$  e a fonte  $V_i$  fornecem energia à saída. Aumenta a tensão na carga.

Onde  $D$  é a razão cíclica, e  $T_s$  é o período de amostragem.

A forma de onda da tensão sobre o indutor  $L$  é mostrada na Figura 10 a seguir:



**Figura 10: Tensão no indutor L. Fonte: [23].**

De acordo com a Figura 10, a quantidade de energia da área 1 é igual a área 2, portanto, a tensão média sobre o indutor é nula, logo:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_{DT_s}^{T_s} (V_o - V_i) dt \quad (9)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

Onde \$V\_o\$ é a tensão de saída e \$V\_i\$ a tensão de entrada.

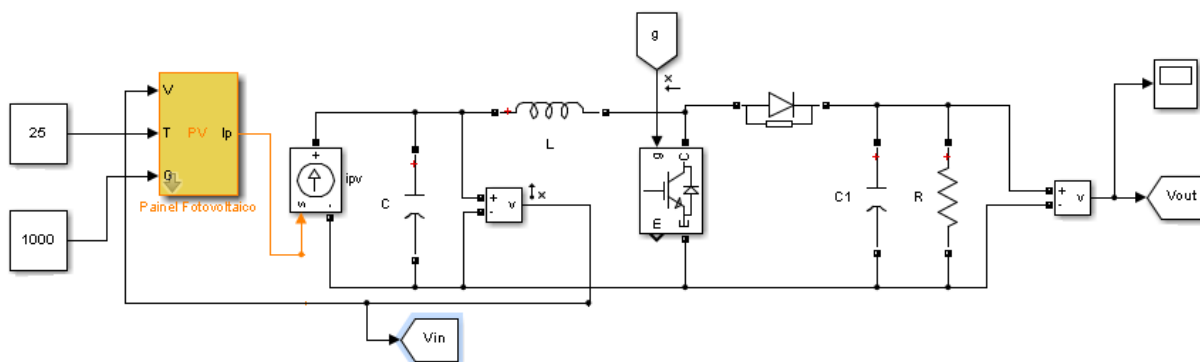
O capacitor (\$C\$) do filtro de saída é determinado da seguinte forma [27] :

$$C = \frac{I_o}{f \Delta V_c} \frac{(V_o - V_i)}{V_o} \quad (11)$$

Na qual, \$\Delta V\_c\$ é a ondulação da tensão de saída, \$f\$ é a frequência em Hertz.

### 3.2 MODELO SIMULADO DO CONVERSOR BOOST

O conversor boost simulado é mostrado na Figura 11.



**Figura 11: Conversor boost representado pelo Simulink. Fonte: Autor.**

Os parâmetros utilizados foram  $L=1\text{mH}$ , frequência de chaveamento  $f_s = 100\text{kHz}$ , resistência  $R$  de  $200\ \Omega$ , a tensão de entrada do painel é o próprio  $V_{\text{MPP}}$ , o capacitor de saída é de  $3,75\ \mu\text{F}$  e o capacitor de entrada de  $10\ \text{nF}$ .

### 3.3 CONTROLE DO CONVERSOR BOOST

A Figura 12 mostra o conversor c.c.-c.c. elevador de tensão, utilizando um controlador de tensão de entrada com modulação PWM. Com essa estrutura é possível regular a tensão média de entrada variando-se a razão cíclica  $D$ .

A tensão média de entrada é regulada através do controle do tempo de condução  $t_c$  da chave  $S$ . Se a corrente de carga tender a aumentar, automaticamente o tempo  $t_c$  deverá aumentar de forma a suprir a energia solicitada pela carga.

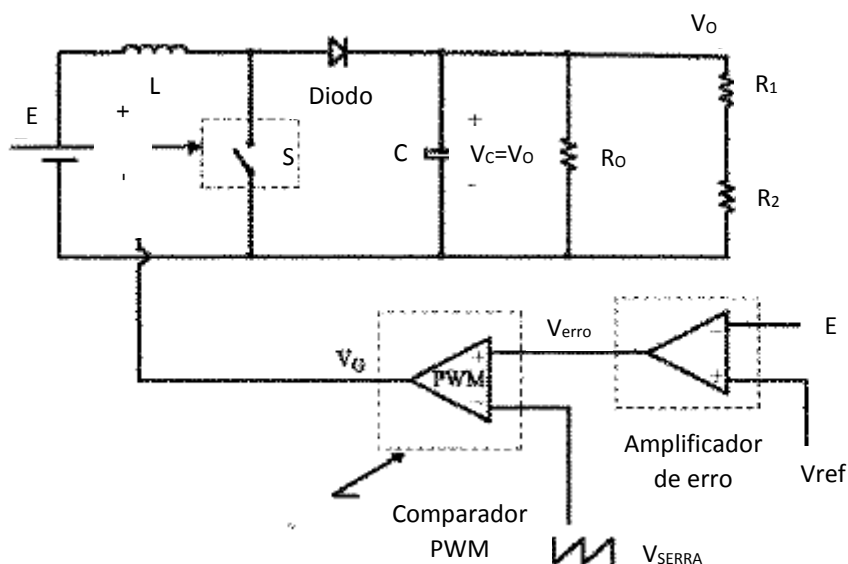


Figura 12: Controlador boost com modulação PWM. Fonte: Adaptado de [24].

### 3.4 MODELANDO VIA SIMUNLINK

O objetivo do controle PWM é controlar a chave do conversor Boost de forma que a fonte de alimentação (que no caso do projeto é o módulo fotovoltaico) opere com sua tensão e corrente de MPP. O sistema completo simulado é mostrado na Figura 13 e na Figura 14 é o diagrama elétrico do seu controle.

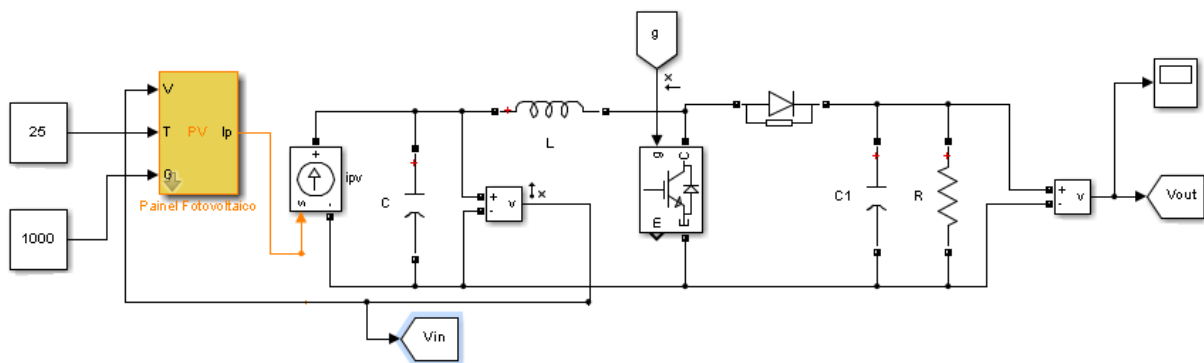


Figura 13: Conversor boost alimentado por um módulo fotovoltaico. Fonte: Autor.

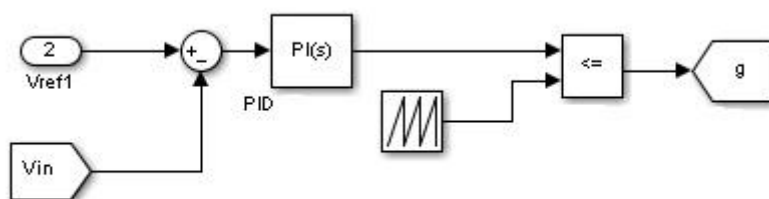


Figura 14: Controle do sistema. Fonte: Autor.

#### 4. MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) têm como objetivo a obtenção da máxima potência do módulo fotovoltaico.

Apesar de todas as vantagens presentes na geração de energia através do uso de painéis fotovoltaicos, a eficiência da conversão de energia é relativamente baixa e seus custos para a implementação pode ser considerado elevado, e assim torna-se necessário o uso de técnicas para extrair a máxima potência desses painéis, com o intuito de alcançar a máxima eficiência durante sua operação. Deve-se notar que existe apenas um único ponto de máxima potência (MPP), no qual opera com a máxima eficiência e produz a máxima potência de saída, e esse varia de acordo com as condições de irradiância e temperatura [25].

Um painel fotovoltaico com irradiância constante possui um gráfico de corrente-tensão (I-V) característico como na Figura 15. A Figura 16 mostra a problemática geral das técnicas de MPPT, que é encontrar automaticamente a tensão  $V_{MPPT}$  ou corrente  $I_{MPPT}$ , no qual, o painel fotovoltaico deve operar para obter a máxima potência de saída  $P_{MPPT}$ , dentro de uma dada temperatura e irradiância [26].

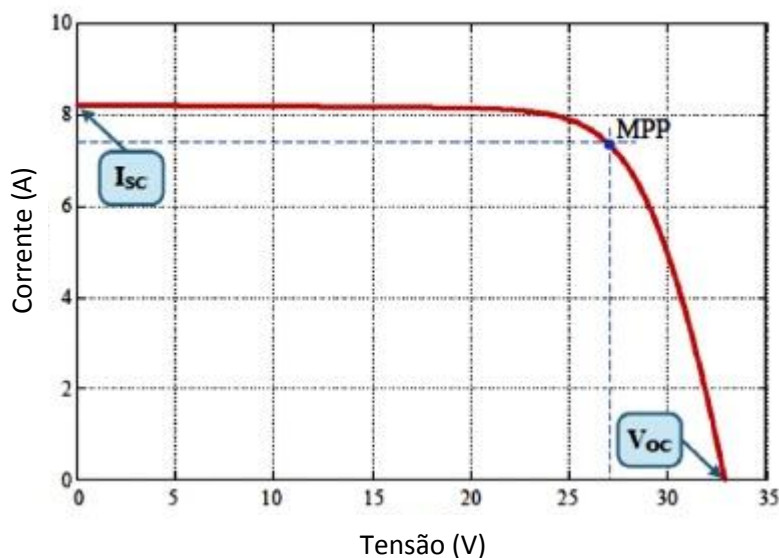
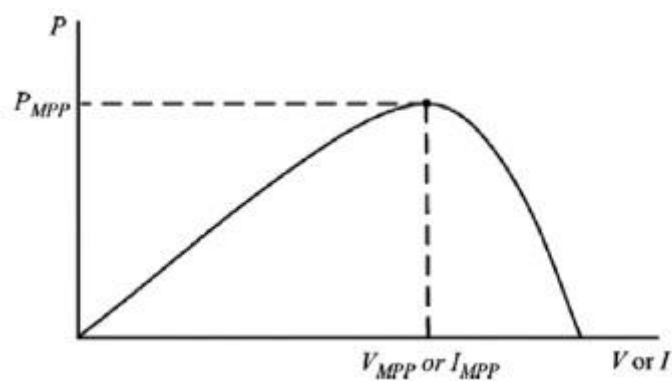


Figura 15: Características corrente x tensão de um painel fotovoltaico. Fonte: [3].



**Figura 16: Curva característica da potência de um painel solar. Fonte: [26].**

#### 4.1 PERTURBA & OBSERVA (P&O)

É o algoritmo MPPT mais usual, constitui basicamente em perturbar o sistema através do incremento e decremento do ciclo de trabalho do conversor c.c. e observar se essa modificação ocasiona um aumento ou diminuição da potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico. Caso ocorra um acréscimo de potência fornecida, realiza-se outro incremento no mesmo sentido e mede-se a potência novamente. Caso a potência fornecida pelos módulos seja inferior à da última iteração, perturba-se o ciclo de trabalho no sentido inverso, e realiza-se a análise novamente. Dessa forma, o sistema fica oscilando nas proximidades do ponto de máxima potência. A Figura 17 mostra o fluxograma da técnica P&O.

De acordo com o fluxograma abaixo, é necessário medir a corrente e tensão na saída do arranjo fotovoltaico, com o intuito de determinar a potência fornecida pelos módulos a cada iteração.

Um parâmetro a ser considerado ao se utilizar a técnica P&O é o passo de incremento do ciclo de trabalho. O tamanho deste passo deve ser escolhido como um compromisso entre a velocidade do rastreamento do ponto de máxima potência e o *ripple* em regime permanente neste ponto. Quanto maior o incremento, maior será a velocidade com a qual se aproximará assintoticamente do MPP, porém maior será também a amplitude da oscilação nos arredores do mesmo [27].

Quando é desejado rastrear o ponto de máxima potência com um algoritmo de controle não muito complexo e um bom desempenho, pode-se usar o P&O. Seu maior problema é o erro em regime permanente devido às oscilações ao redor do ponto de máxima potência.

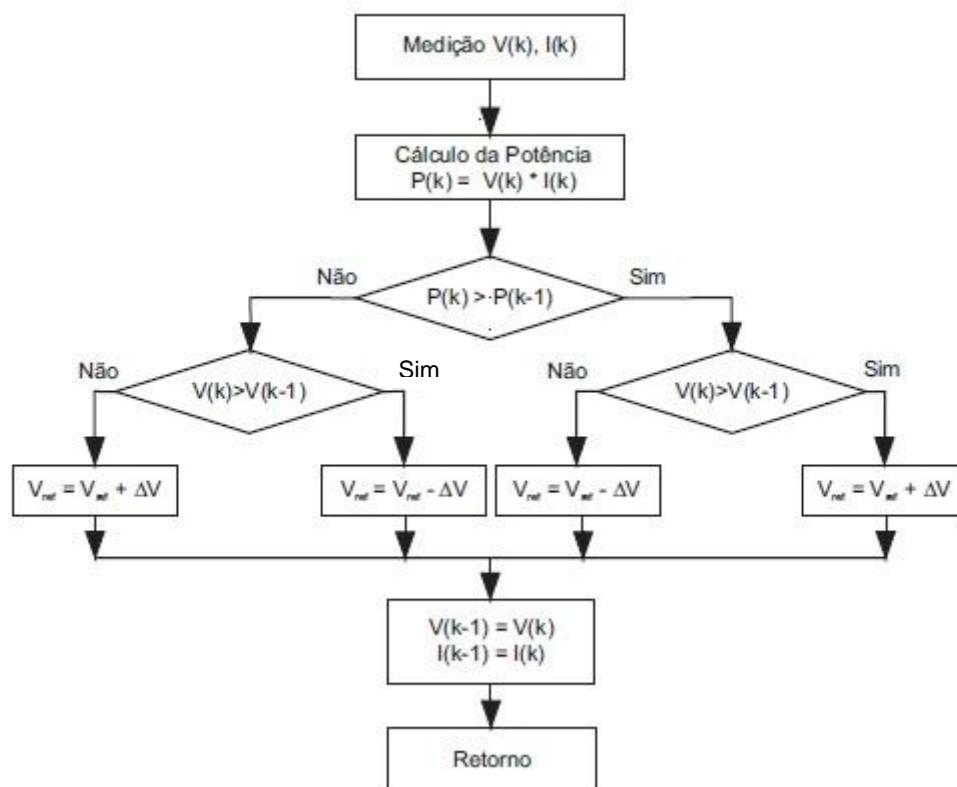


Figura 17: Fluxograma do método P&O. Fonte: [6].

## 4.2 CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

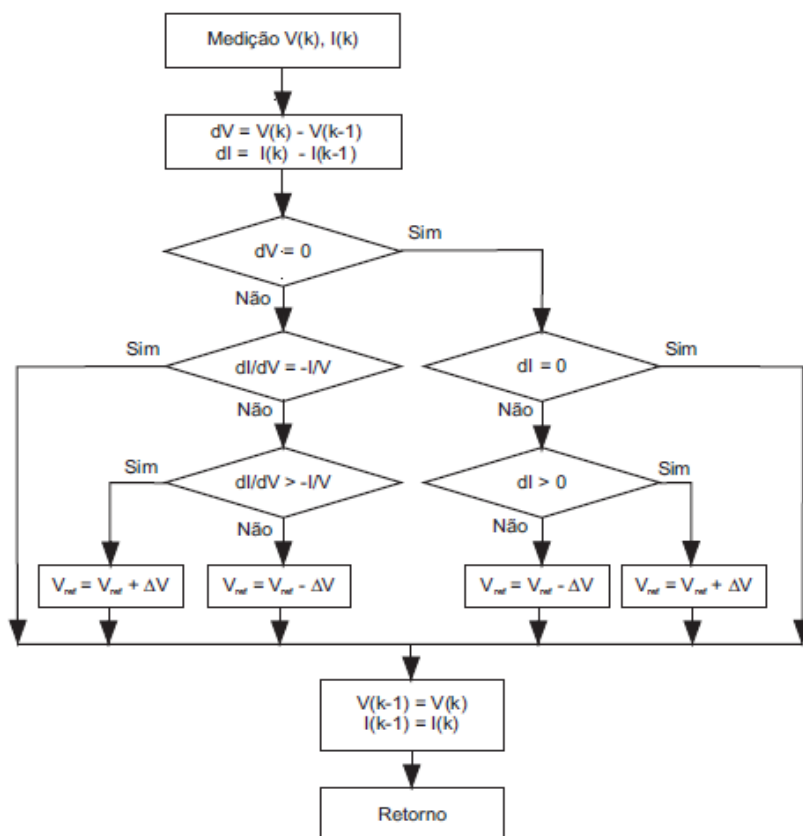
Essa técnica diminui o problema com oscilação e sua complexidade é maior que a técnica P&O. É o algoritmo de MPPT que leva em consideração a condutância instantânea do módulo em comparação com sua condutância incremental.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (12)$$

O ponto da tensão na curva do arranjo fotovoltaico pode ser ajustado para rastrear  $V_{MPP}$ . Desenvolvendo a Equação (12):

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (13)$$

Quando  $dP/dV < 0$ , diminui a tensão de referência forçando  $dP/dV$  a se aproximar de zero, quando  $dP/dV > 0$ , aumenta a tensão de referência forçando  $dP/dV$  a se aproximar de zero. Quando  $dP/dV = 0$ , a tensão de referência não precisa de qualquer mudança [6]. Abaixo é mostrado fluxograma desse método.



**Figura 18: Fluxograma do MPPT Condutância Incremental. Fonte: [6]**

O tamanho do incremento ( $\Delta V$ ) determina a velocidade que o MPP é rastreado. Um rápido rastreamento pode ser encontrado com um maior incremento, mas o sistema perde precisão, ocasionando uma maior oscilação no MPP [4].

### 4.3 TENSÃO CONSTANTE

A relação quase linear entre  $V_{MPP}$  e  $V_{OC}$  de um arranjo fotovoltaico, sob diferentes níveis de temperatura e irradiância, deu origem ao método de tensão constante.



$$V_{MPP} \approx k_1 \cdot V_{oc} \quad (14)$$

Onde  $k_1$  é uma constante de proporcionalidade que depende das características do arranjo fotovoltaico que é utilizado e usualmente é calculado de forma empírica, determinando o  $V_{MPP}$  e  $V_{OC}$  para os diferentes níveis de temperatura e irradiância. Nas literaturas o valor de  $k_1$  tem sido relatado entre 0,71 e 0,78 [26].

Sabendo o valor de  $k_1$ ,  $V_{MPP}$  pode ser calculado usando a Equação (14), com  $V_{OC}$  sendo medido periodicamente no momento que o conversor c.c. é desligado. Há uma perda de energia pela amostragem de  $V_{OC}$  que é considerada insignificante, porém é necessário calcular essa energia para quantificar as perdas e conseqüentemente a diminuição da eficiência dessa técnica. Células pilotos podem ser utilizadas para obter  $V_{OC}$  e são essenciais para evitar perda de energia. Para representar corretamente as características do arranjo fotovoltaico, estas células pilotos devem ser escolhidas meticulosamente. Outra desvantagem da utilização desse método é o crescimento do erro em regime permanente, pois o MPP não é localizado sempre na faixa ajustada [6].

#### 4.4 DP/DV OU DP/DI E OUTROS MÉTODOS

Com os microcontroladores e DSP sendo capazes de resolver calculos complexos, um novo método de MPPT é calcular a inclinação ( $dP/dV$  ou  $dP/dI$ ) da curva de potência da célula fotovoltaica e realimentar o conversor de potência com algum controle para levá-lo a zero. A forma que a inclinação é calculada, difere de autor para autor. O fluxograma da Figura 19 resume esse método.

De acordo com [4] a variável *Step* é atribuído 0,1mV e a frequência de amostragem da tensão e corrente do arranjo fotovoltaico é 0,1ms. O algoritmo de MPPT desenvolvido pode fornecer a tensão de referência do MPP para o arranjo fotovoltaico rapidamente e sem problemas, o que reduz as perdas do arranjo fotovoltaico.

Vários outros métodos existem, como o método da capacidade parasita, que utiliza a capacitância do arranjo PV, para melhorar o método de condutância incremental. Outra técnica, para diferentes condições de irradiância, que combina condutância incremental com tensão constante foi elaborada para melhorar a eficiência do sistema de geração fotovoltaica. Com o passar do tempo, novos métodos são implementados ou fazem modificações nos já existentes.

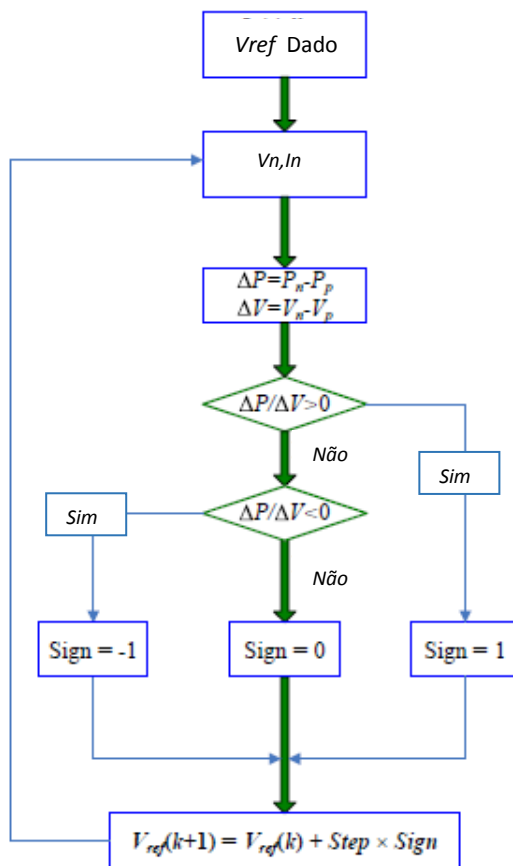
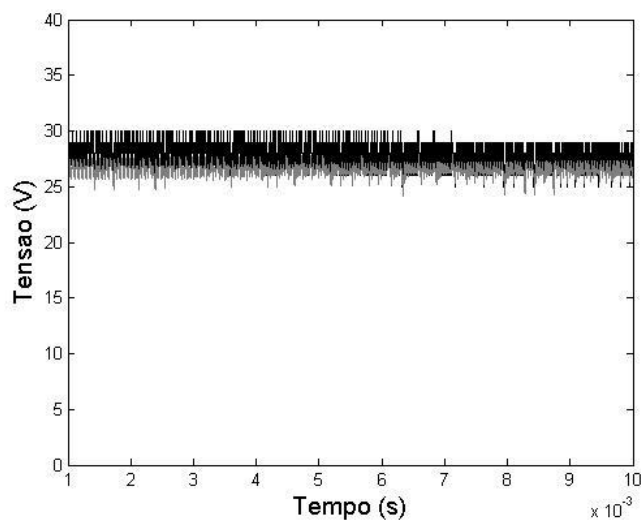


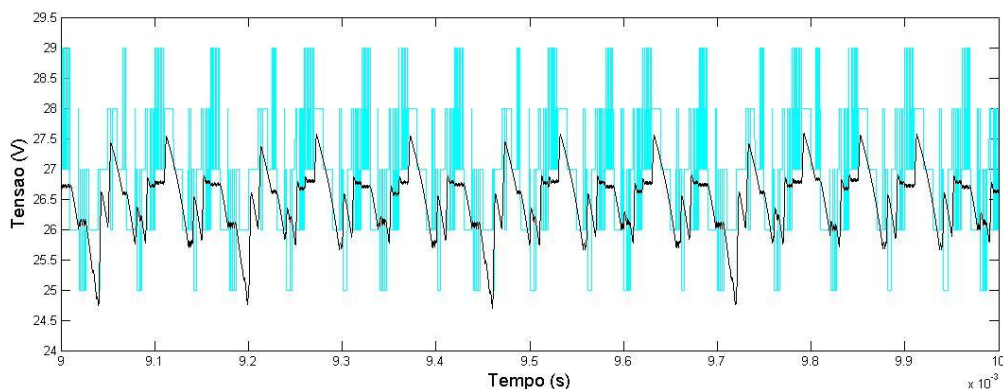
Figura 19: Fluxograma dP/dV[3]. Fonte: Adaptado de [4].

## 5. RESULTADOS

O objetivo do controle da tensão de entrada do conversor boost, é controlar a tensão de saída do painel, para que possa ser a própria tensão do ponto de máxima potência. Na Figura 20 é mostrado o controle da tensão do painel seguindo a tensão de referência (tensão de saída da técnica de MPPT) para o método condutância incremental (As simulações das demais técnicas são semelhantes).

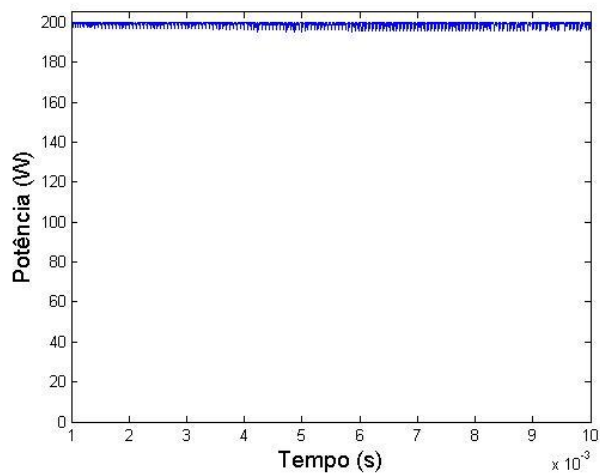


**Figura 20: Controle de tensão do painel. (a) A tensão preta é a tensão de referência; (b) A tensão cinza é a tensão controlada (tensão de saída do painel PV). Fonte: Autor.**

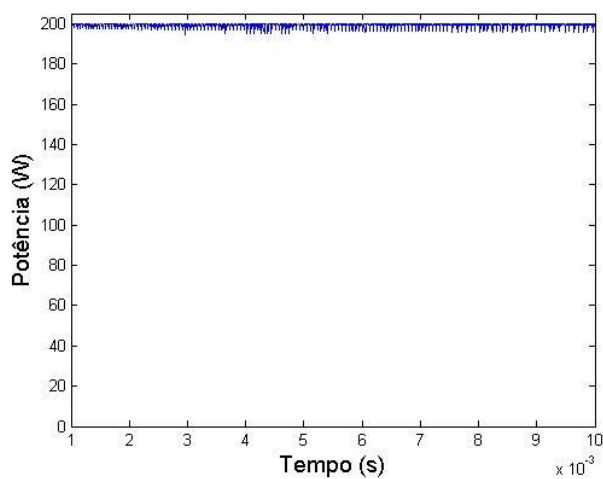


**Figura 21: Zoom do trecho de 9 ms a 10 ms da Figura 20.**

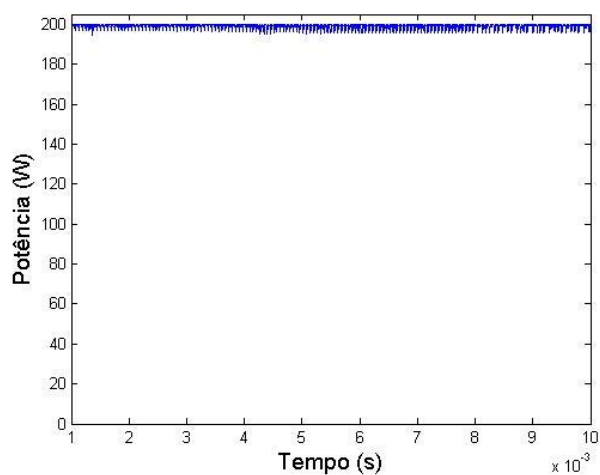
As Figuras 22, 23, 24 e 25 são as simulações da potência de cada método estudado. Dado os valores de irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$  para um passo de incremento de 1,0 V.



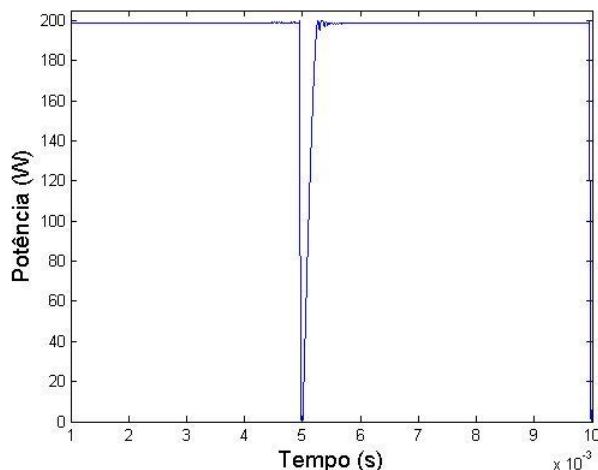
**Figura 22:** Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método dP/dV. Fonte:Autor.



**Figura 23:** Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método IC. Fonte:Autor.



**Figura 24:** Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método P&O. Fonte:Autor.



**Figura 25: Potência de saída do arranjo fotovoltaico do método da Tensão Constante.**

**Fonte: Autor.**

Para comparar os métodos de MPPT, algumas características foram estudadas, como: a influência da irradiância, temperatura, período de amostragem, e o incremento em cada uma das técnicas.

Primeiramente, fez-se uma análise da eficiência de cada método nas suas condições padrões (irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ ). A eficiência ( $\eta$ ) é definida como:

$$\eta = \frac{P}{P_{\max}} \quad (15)$$

Onde  $P$  - Potência de saída do arranjo fotovoltaico e  $P_{\max}$  - Potência máxima do arranjo fotovoltaico.

O painel fotovoltaico utilizado é do modelo KC200GT da Kyocera, cujo, os dados de placa são listados abaixo:

$$P_{\text{MPPT}} = 200,143 \text{ W}$$

$$V_{\text{MPPT}} = 26,3 \text{ V}$$

$$I_{\text{MPPT}} = 7,61 \text{ A}$$

$$V_{\text{OC}} = 32,9 \text{ V}$$

$$I_{\text{sc}} = 8,21 \text{ A}$$

$$N_s = 54$$

$$K_v = -0,123 \text{ V/K}$$

$$K_i = 0,00318 \text{ A/K}$$

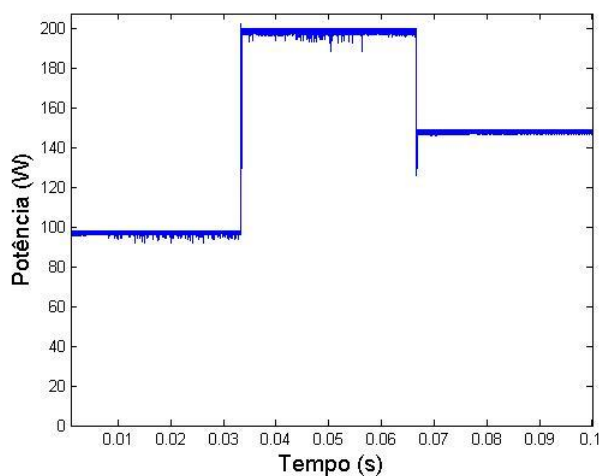
Onde,  $N_s$  é número de células em série por modulo,  $K_v$  é o coeficiente de Tensão/Temperatura e  $K_i$  é coeficiente de corrente/temperatura.

Como o valor de  $P_{MPP}$  é especificado nos dados da placa, por meio de simulações (Figuras 22, 23, 24 e 25) obtém-se a potência que sai do arranjo fotovoltaico e assim é possível calcular a eficiência de cada método, como mostrado na Tabela 2. Nota-se que na Figura 25 ocorrem perdas, devido ao cálculo de  $V_{MPP}$ , como explicado no Tópico 4.3.

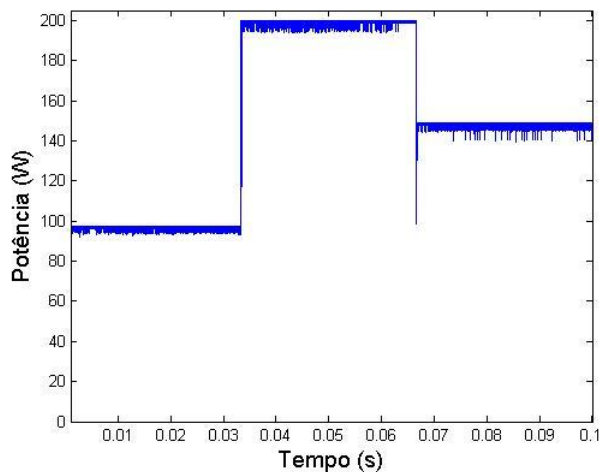
**Tabela 2: Eficiência para os métodos de MPPT para as condições ambientais padrões ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) e passo de incremento de  $1,0\text{V}$ . Fonte: Autor.**

Método	dV/dP	IC	P&O	Tensão Const.
$\eta(\%)$	99,57%	99,69%	99,58%	96,78%

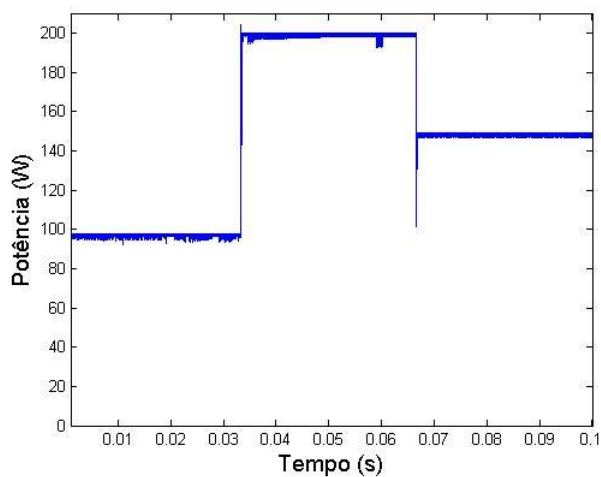
As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram a influência da variação de irradiância nas potências em cada método. Usou-se uma variação na irradiância de  $500\text{-}1000\text{-}750\text{ W}/\text{m}^2$  para uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .



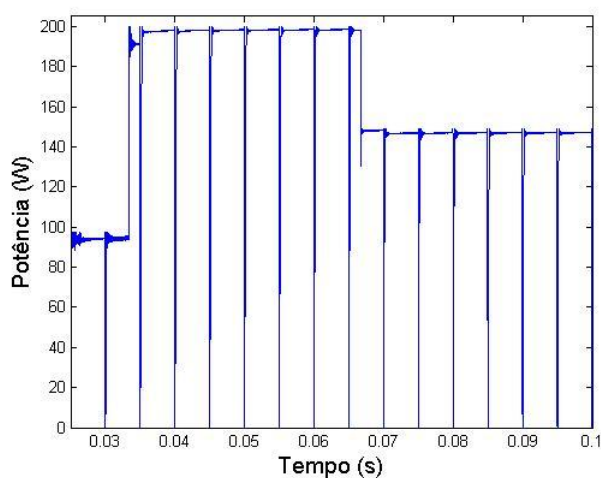
**Figura 26: Variação de Irradiância no método P&O. Fonte: Autor.**



**Figura 27: Variação de Irradiância no método IC. Fonte:Autor.**

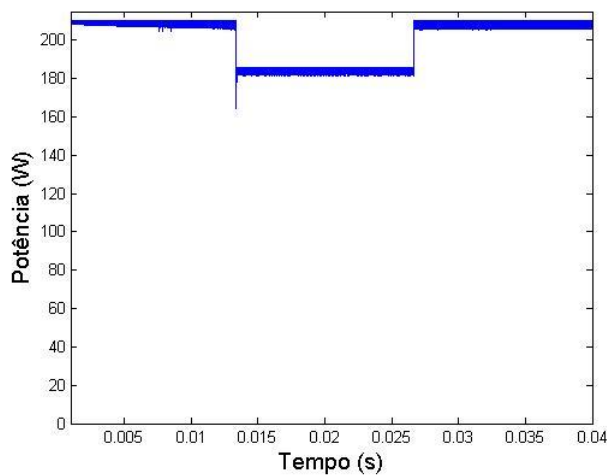


**Figura 28: Variação de Irradiância no método dP/dV. Fonte:Autor.**

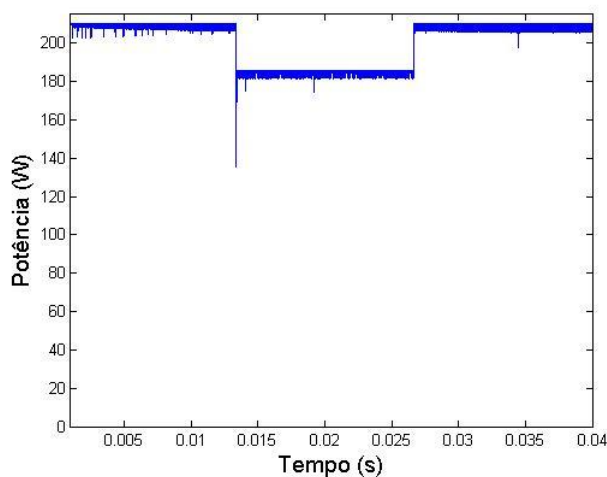


**Figura 29: Variação de Irradiância no método da Tensão Constante. Fonte:Autor.**

As Figuras 30, 31, 32 e 33 mostram a influência da variação de temperatura nas potências em cada método. Usou-se uma variação de temperatura de 15-40-15 °C para 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância.

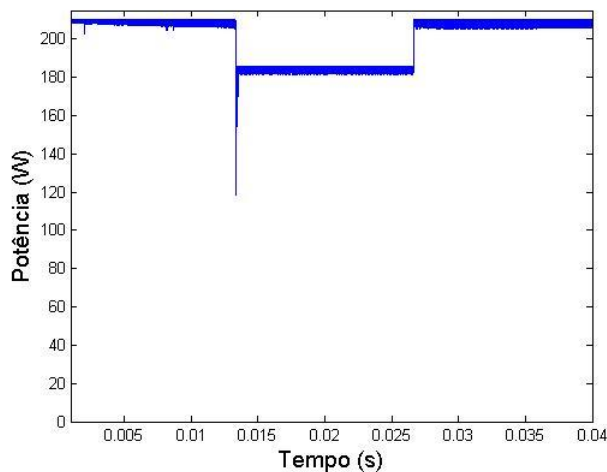


**Figura 30: Variação de temperatura no método P&O. Fonte: Autor.**

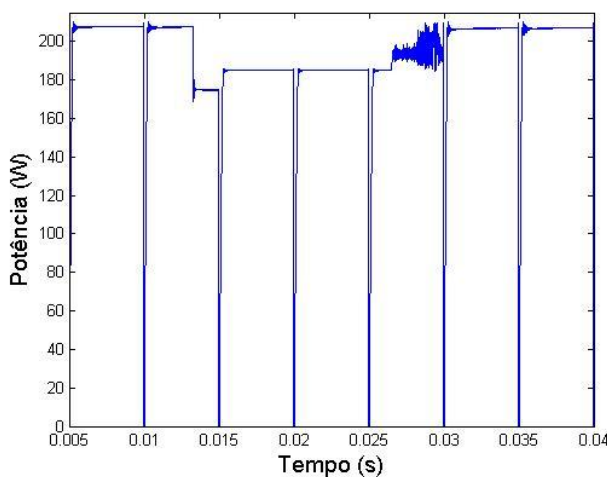


**Figura 31: Variação de temperatura no método IC. Fonte: Autor.**





**Figura 32: Variação de temperatura no método dP/dV. Fonte:Autor.**



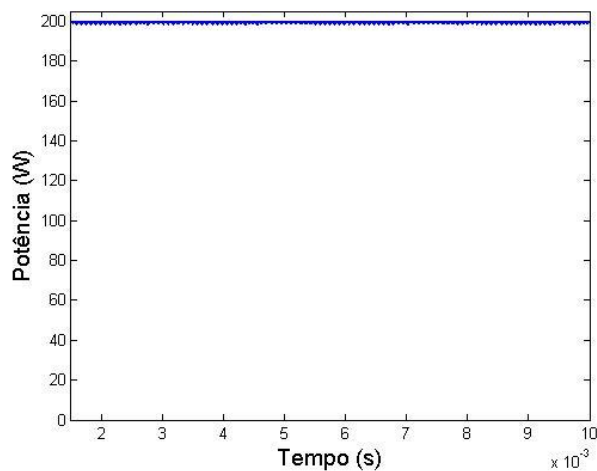
**Figura 33: Variação de temperatura no método da tensão constante. Fonte:Autor.**

As Figuras 34, 35 e 36 fazem uma variação do passo incremento para 0,1V. A Tabela 3 mostra a eficiência das técnicas de MPPT com passo de incremento de 0,1V.

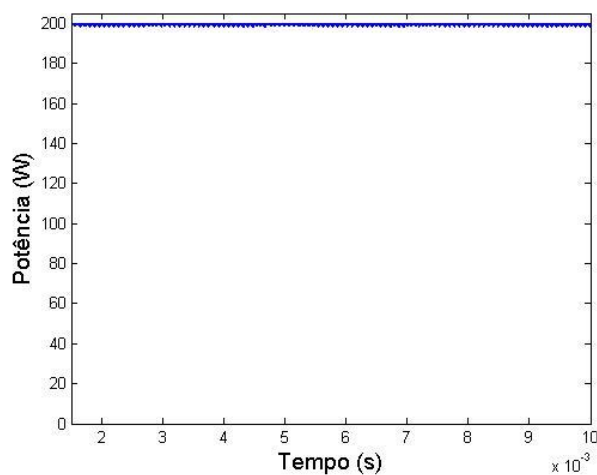
**Tabela 3: Eficiência para os métodos de MPPT para as condições ambientais padrões (1000W/m<sup>2</sup>, 25°C) e passo de incremento de 0,1V. Fonte: Autor.**

Método	dV/dP	IC	P&O
$\eta(\%)$	99,80%	99,81%	99,79%

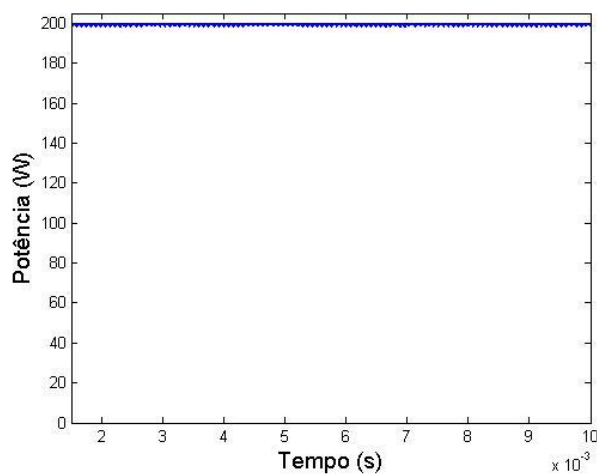
Como o método da tensão constante não há passo de incremento, o valor da eficiência para esse método com passo de incremento de 0,1V foi desconsiderado.



**Figura 34: P&O com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**



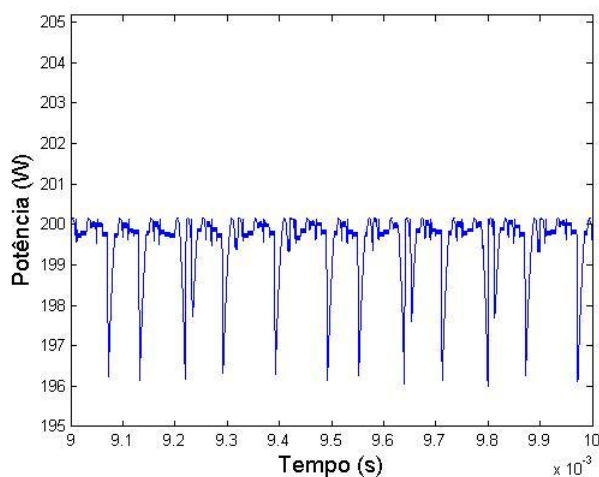
**Figura 35: IC com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**



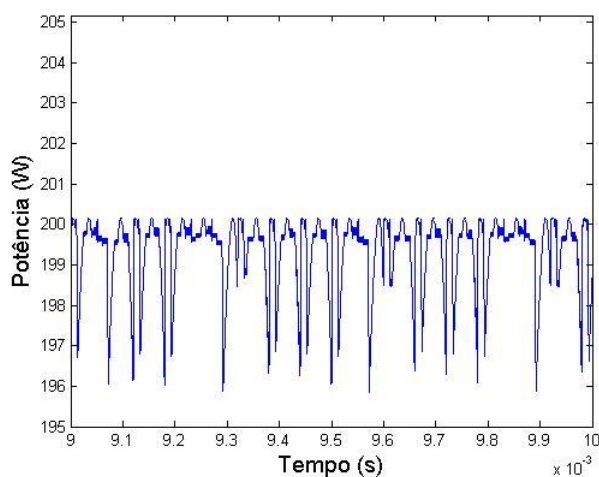
**Figura 36: dP/dV com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**

## 6. DISCUSSÕES

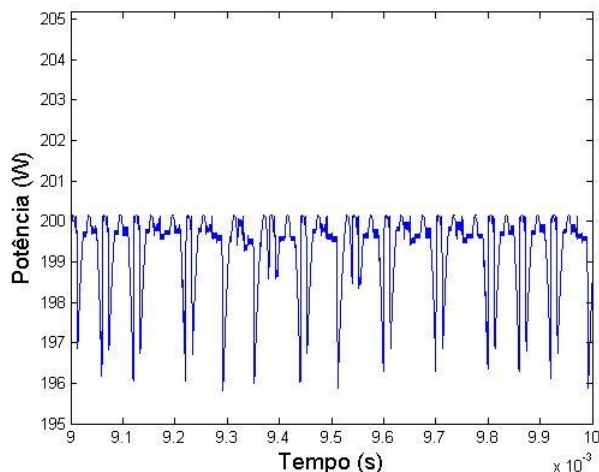
A Tabela 2 mostra os valores referentes a eficiência de cada método com um passo de incremento de 1,0 V, como esperado, a técnica da tensão constante apresenta a maior perda de potência, P&O possui uma maior oscilação em torno do MPP e o método condutância incremental mostrou uma melhor eficiência em relação a potência de MPP nas condições ambientais padrões. As Figuras 37, 38 e 39 mostram o trecho de 9 ms até 10 ms das potências de saída das técnicas de IC, P&O e dP/dV, respectivamente, com passo de incremento de 1,0 V, nota-se que o método condutância incremental sofre menos oscilações em comparação ao P&O e ao dP/dV, por isso apresenta uma melhor eficiência.



**Figura 37: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica IC com passo de incremento de 1,0 V. Fonte:Autor.**



**Figura 38: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica P&O com passo de incremento de 1,0 V. Fonte:Autor.**

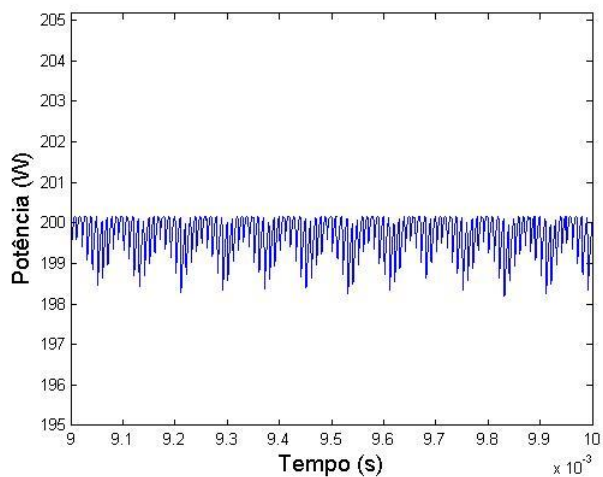


**Figura 39: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica dP/dV com passo de incremento de 1,0 V. Fonte: Autor.**

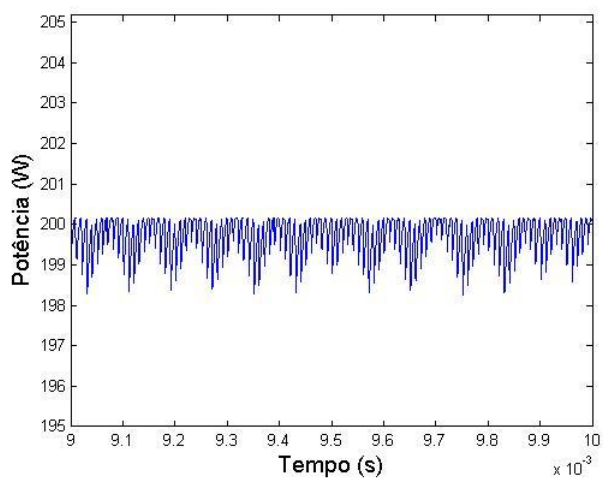
As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram a influência da variação de irradiância nas potências de cada método, observa-se que a variação de irradiância afeta de forma considerável a variação de potência, pois, neste caso a tensão é pouco afetada, mas a corrente sofre uma grande mudança, portanto, a corrente é a grande responsável pela variação da potência com a mudança de irradiância; observa-se que todos os métodos sofrem um aumento brusco e uma queda brusca de variação de irradiância, mesmo assim se comportaram de forma coerente alcançando rapidamente o regime permanente. Quando há uma diminuição de irradiância, ocorre uma queda no valor da potência, já um aumento, ocasiona uma elevação. Quanto à variação da temperatura ocorre o contrário, um aumento de temperatura ocasiona uma queda no valor da potência, e uma diminuição gera um crescimento como mostrado nas Figuras 30, 31, 32 e 33, novamente é importante frisar que todos os métodos sofrem um aumento brusco e uma queda brusca de variação de temperatura, mesmo assim se comportaram de forma coerente alcançando rapidamente o regime permanente.

As Figuras 34, 35 e 36 mostram o que acontece quando há uma diminuição no passo de incremento, nota-se que ocorre uma menor oscilação com relação ao valor de  $P_{MPP}$ , e consequentemente melhora a eficiência em cada método. As Figuras 40, 41 e 42 mostram o trecho de 9 ms até 10 ms das potências de saída das técnicas de IC, P&O e dP/dV, respectivamente, com passo de incremento de 0,1 V, nota-se que há uma pequena diferença nas oscilações, e consequentemente uma diferença mínima entre as eficiências dos métodos, como mostrado na Tabela 3. Uma desvantagem do decremento no passo é a velocidade para entrar em regime permanente, pois, sua diminuição acarretará em pequenos acréscimos para alcançar

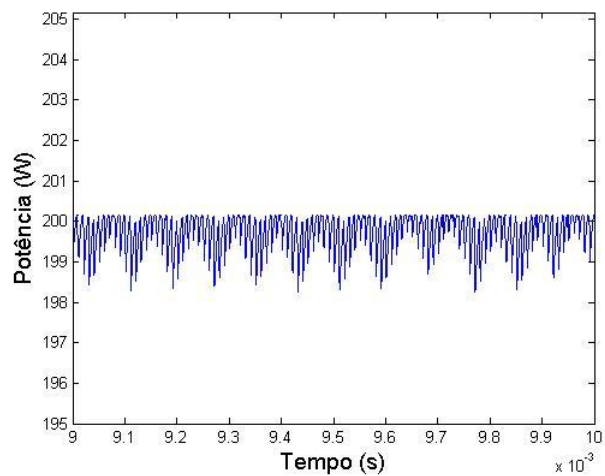
o valor desejado. Como o algoritmo da técnica tensão constante não possui passo de incremento, seu gráfico foi desconsiderado.



**Figura 40: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica IC com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**



**Figura 41: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica P&O com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**



**Figura 42: Trecho de 9 ms até 10 ms da potência de saída da técnica dP/dV com passo de incremento de 0,1 V. Fonte:Autor.**

## 7. CONCLUSÃO

Uso eficiente de energia não só poupa combustíveis fósseis e energia, mas também traz vantagens financeiras. Fornecer soluções eficientes de energia pode ajudar a resolver alguns dos grandes problemas de energia. O uso de energia solar de painéis fotovoltaicos é uma realidade, e seu uso intensivo será em breve extremamente importante na procura de soluções para energia e problemas ambientais. Eficiência de energia corresponde a todo o ciclo de conversão de energia — da geração eficaz, transmissão e distribuição de energia elétrica até o seu uso econômico.

A potência de saída entregue por um arranjo PV pode ser maximizado usando controles de MPPT no sistema. Várias técnicas de MPPT extraídas da literatura são discutidas neste artigo, os princípios de operação e as características principais foram abordados para uma melhor compreensão de cada possibilidade, cada qual, com seus aspectos positivos e negativos.

Observa-se na Tabela 2 uma boa eficiência dos métodos para o passo de incremento de 1,0 V, porém, com a diminuição do passo de incremento para 0,1 V as eficiências de todos os métodos melhoraram ainda mais, como visto na Tabela 3, pois, o ponto de oscilação em torno do ponto de máxima potência foi diminuído. O método de condutância incremental se mostrou melhor em ambas as situações, no entanto, os demais métodos apresentaram valores bem próximos ao do método de condutância incremental, logo, se o objetivo é construir uma técnica de MPPT não muito complexa e que possua boa eficiência, o método perturba & observa é uma boa alternativa.

Nota-se que todas as técnicas tiveram um comportamento parecido em relação as influências do ambiente, mesmo com uma variação tão drástica nos seus valores de temperatura e irradiação, o controle foi capaz de suportar as perturbações provenientes do clima, dessa forma, conclui-se que as técnicas possuem uma boa confiabilidade em variações ambientais.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Gradella Villalva, Marcelo; Gazoli, Jonas Rafael. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados À Rede. São Paulo, SP: Editora Érica. 2012.
- [2] KACHHIYA, K.; PATEL, M. e LOKHANDE, M. **MATLAB/Simulink Model of Solar PV Module and MPPT** In: National Conference on recent trends in Engineering and Technology Algorithm. B. V. M, 2011, India. Engineering College, 2011.
- [3] PARIDA, B.; INIYAN, S. e GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 15, p. 1625-1636, 2011.
- [4] ELTAWIL, M. A. e ZHAO, Z. MPPT techniques for photovoltaic applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 793-813, 2013.
- [5] JACOBSON, M. Z. e DELUCCHI, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, part I: technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p.1154-1169, 2011.
- [6] OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da Conversão da energia Fotovoltaica em Sistemas Isolados**. 2007. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- [7] RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT – revista
- [8] ANGRIST, S. W. *Direct Energy Conversion*: series in mechanical engineering e applied mechanics. 4th edition. Boston: Allyn and Bacon, 1982, 468 p.
- [9] PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Grupo de trabalho de energia solar, 2014, 529 p.
- [10] SILVA, M. A. **Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Apostila do curso Sunconnect, 2016.
- [11] NASCIMENTO, C. A. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (especialização). Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.
- [12] RAUSCHENBACH, H. S. *Solar cell array design handbook*. 4th edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 1980, 559 p.
- [13] SERA, D.; TEODORESCU, R.; RODRIGUEZ, P. **PV panel model based on datasheet values**. In Proc. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, p. 2392–2396, 2007.
- [14] DE SOTO, W.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. **Solar Energy**, v. 80, n. 1, p. 78–88, 2006.



- [15] KOU, Q., KLEIN, S. A. Klein; BECMAN. A method for estimating the long-term performance of direct-coupled PV pumping systems. **Solar Energy**, v. 64 n. 1-3, p. 33–40, 1998.
- [16] DRIESSE, A.; HARRISON, S.; JAIN, P. Evaluating the effectiveness of maximum power point tracking methods in photovoltaic power systems using array performance models. In Proc. **IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC**, p. 145–151, 2007.
- [17] MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. Photovoltaic systems engineering. CRC Press, 2004.
- [18] NAKANISHI, F. et al. **Modeling and operation of a 10 kW photovoltaic power generator using equivalent electric circuit method**. In Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 1703–1706, 2000.
- [19] CRISPIM, J.; CARREIRA, M.; CASTRO, R. **Validation of photovoltaic electrical models against manufacturers data and experimental results**. In Proc. International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG, p. 556–561, 2007.
- [20] HUSSEIN, K.H. **Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions**. In Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, v. 142, p. 59–64, 1995.
- [21] WALKER, G. Evaluating MPPT converter topologies using a matlab PV model. **Journal of Electrical & Electronics Engineering**, Australia, v. 21, n. 1, p.49- 55, 2001.
- [22] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaics arrays. **Brazilian Journal of Power Electronics**, v. 14, n. 1, p. 35-45, 2009.
- [23] PETRY, C. **Introdução aos Conversores c.c.-c.c.**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2001. (apostila).
- [24] MARTINS, D. C. e BARBI, I. **Eletrônica de potência: conversores c.c.- c.c. básicos não isolados**. 2ª edição. Florianópolis: Ed. dos autores, 2006, 377 p.
- [25] BRITO, M. A. G. et al. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. **Industrial Electronics, IEEE Transactions**, V. 60, n. 3, p.1156-1167, 2013.
- [26] ESRAM, T. e CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 2, p. 439-449, 2007.
- [27] COLLARES, F. S. **Comparação quantitativa de métodos de paralelismo de módulos fotovoltaicos com a rede elétrica para geração distribuída através do controle de**

**conversores de potência.** 2012. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia da Faculdade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.