

Vitor Querino Palhano de Souza

**COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE  
RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Elétrica/Eletrônica  
Orientador: Prof. Dr. Roberto Francisco  
Coelho  
Coorientador: Eng. Douglas Haupt

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Souza, Vitor Querino Falhano de  
Comparação Experimental de Métodos de  
Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de Módulos  
Fotovoltaicos / Vitor Querino Falhano de Souza ;  
orientador, Roberto Francisco Coelho, coorientador,  
Douglas Haupt, 2018.

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,  
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Engenharia Elétrica.  
3. Módulos Fotovoltaicos. 4. Métodos de Rastreamento  
de Máxima Potência. 5. Conversor CC-CC . I. Coelho,  
Roberto Francisco. II. Haupt, Douglas. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Elétrica. IV. Titulo.



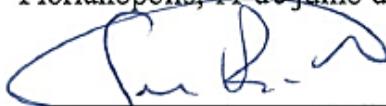


Vitor Querino Palhano de Souza

**COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DE MÉTODOS  
DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA  
POTÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado  
para obtenção do Título de “Engenheiro Eletricista” e  
aprovado em sua forma final pelo Programa de  
Graduação

Florianópolis, 11 de julho de 2018.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.

Orientador, Universidade Federal de Santa Catarina



Douglas Haupt, Eng.

Coorientador, Universidade Federal de Santa Catarina



**Banca Examinadora:**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Rafael Eckstein – M. Eng.

Instituto Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Lenon Schmitz – M. Eng.

Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Tecnólogo José Augusto Anderson, Tecg.

Este trabalho é dedicado à minha  
família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, em especial à minha mãe Rosilane Maria Querino e meus avós Jaime Querino e Edegair Nascimento Querino, que trabalharam arduamente para que eu pudesse ter uma boa educação e me ensinaram todos os valores que levo comigo. À minha namorada Maria Luiza Jacinto por todo o companheirismo, força e apoio que me proporciona em todos os momentos.

Ao orientador Roberto Francisco Coelho pela amizade, ajuda, paciência e por seu entusiasmo com a área de estudo que inspira os alunos. Ao coorientador Douglas Haupt por se fazer muito presente na elaboração desse trabalho.

Aos colegas de turma do semestre 13.2, em especial aos grandes amigos Thiago Fonseca Rech, Lucas Biava Lazare e Joana Ventura, por estarem sempre dispostos a discutir os assuntos das matérias e por todo o companheirismo durante os 5 anos de curso. Ao colega e amigo Márcio Moura sempre disposto a ajudar em questões referentes à área desse projeto.

Aos colegas de apartamento da maior parte desse período da minha vida, Felipe André Pavan e Douglas Ricardo Briske, por todas as conversas, cafés e momentos de descontração que me ajudaram a tirar a cabeça dos estudos por alguns momentos.

À todas as outras pessoas que indiretamente contribuíram para que eu conseguisse essa conquista pessoal, muito obrigado.



Fracasso é uma possibilidade por aqui. Se as coisas não estão fracassando, você não está inovando o suficiente. (Elon Musk, 2017)



## RESUMO

Esse trabalho apresenta a análise e comparação de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas de geração fotovoltaica através de um conversor *Boost*. Esse conversor é bastante utilizado para essa finalidade devido a sua característica de ganho, pois a saída de tensão de módulos geralmente precisa ser elevada para utilização em sistemas geradores. Mesmo em trabalhos cuja a geração é transformada em corrente alternada através de inversores, essa topologia é aplicada como um estágio intermediário, buscando a elevação da tensão e efetuando o rastreamento do ponto de máxima potência. O princípio de funcionamento e o dimensionamento dos elementos do conversor são apresentados, também são abordadas as vantagens e as desvantagens do uso dessa topologia nessa aplicação. Os métodos de rastreamento comparados são: Perturba e Observa, Condutância Incremental e Condutância Incremental Modificado. O último método analisado se trata de um recente método proposto por professores da UFSC em parceria com outras universidades. Toda a análise comparativa é realizada através de simulações computacionais e de resultados experimentais.

**Palavras-chave:** Conversor CC-CC não isolado. Geração Fotovoltaica. Rastreamento do ponto de máxima potência.



## ABSTRACT

The present study aims to analyze and compare maximum power point tracking algorithms in photovoltaic generation systems through a Boost converter. This converter is widely used for this purpose due to its voltage gain property, since the modules output voltage usually needs to be stepped up to become usable in generation systems. Even in alternated outputs systems, this topology is applied as intermediary stage, seeking to increase the voltage level and performing maximum power point tracking. The operation principles and the components calculations for the converter are presented. The advantages and disadvantages from using this topology are also addressed in this specific use. The *MPPT* methods analyzed are: Perturb and Observe; Incremental Conductance and Modified Incremental Conductance. The last one is a recent method developed by UFSC professors in collaboration with other universities. All the analysis is based on computational simulations and experimental results.

**Keywords:** Non Isolated cc-cc Converter. Photovoltaic Generation. Maximum power point tracking.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Matriz Energética Brasileira. ....	29
Figura 2.2 – Representação dos Tipos de Irradiância. ....	30
Figura 2.3 – Curva de Geração Característica para Diferentes Irradiâncias. .....	31
Figura 2.4 – Curva de Geração para Diferentes Temperaturas. ....	31
Figura 2.5 – Trajetória dos Raios de Sol na Atmosfera e Definição do Coeficiente de "Massa de Ar" (AM). ....	33
Figura 2.6 – Estrutura de Silício Dopado: A) Positivamente. B) Negativamente. ....	35
Figura 2.7 - Ilustração da Junção de Substratos e Formação da Camada de Depleção. ....	35
Figura 2.8 – Ilustração do Efeito Fotovoltaico. ....	36
Figura 2.9 – Estrutura Ilustrativa de uma Célula Fotovoltaica. ....	37
Figura 2.10 – Formação de Estruturas a Partir da Célula Fotovoltaica. ....	38
Figura 2.11 – Estrutura de Célula Multijunção. ....	39
Figura 2.12 – Circuito Elétrico Equivalente da Célula Fotovoltaica. ....	40
Figura 2.13 - Combinação Série de Células Fotovoltaicas. ....	41
Figura 2.14 – Combinação Paralela de Células Fotovoltaicas. ....	41
Figura 2.15 – Efeito da Ligação Série nas Características Elétricas. ....	42
Figura 2.16 - Efeito da Ligação Paralelo nas Características Elétricas. ....	42
Figura 2.17 – Circuito Elétrico Equivalente de Associação Mista. ....	43
Figura 3.1 - Módulo com Carga Conectada. ....	44
Figura 3.2 - Efeito da Carga no Ponto de Operação. ....	45
Figura 3.3 – Inclusão do Conversor no Circuito. ....	45
Figura 3.4 - Circuito Equivalente Conversor/Carga nos Terminais do Módulo. ....	46
Figura 3.5 - Circuito do Conversor Boost. ....	47
Figura 3.6 – Definição da Região de Rastreamento Possível para Topologia Boost. Região 1 – Área onde o boost consegue operar como rastreador. Região 2 – Área onde o boost não consegue efetuar o rastreamento. ....	48
Figura 4.1 - Circuito do conversor com módulo e sensores para medição das grandezas na simulação. ....	51
Figura 4.2 – Circuitos que implementam a variação de temperatura e irradiância. O tempo ao lado das fontes indica o instante em que são conectadas ao sistema de geração para fins de simulação. ....	52
Figura 4.3 - Circuito e bloco que simulam as operações realizadas no microprocessador. ....	52
Figura 4.4 - Potência gerada durante intervalo de tempo simulado. ....	53

Figura 4.5 – Simulação com carga resistiva.....	54
Figura 4.6 - Detalhe para zona de transição e perdas causadas pela falta de rastreamento. ....	54
Figura 4.7 - Alimentação para Banco de Baterias.....	55
Figura 4.8 – Detalhe na Transição e Perdas.....	55
Figura 4.9 - Fluxograma para Método da Tensão Constante. ....	56
Figura 4.10 - Funcionamento de algoritmo de tensão constante.....	57
Figura 4.11 - Detalhe na zona de transição entre a condição 1 e 2. ....	57
Figura 4.12 - Detalhe na zona de transição entre a condição 2 e 3. ....	57
Figura 4.13 – Fluxograma para método Perturba e Observa.....	58
Figura 4.14 – Ilustração do rastreio através do P&O. ....	59
Figura 4.15 – Ilustração de problema no rastreamento. ....	59
Figura 4.16 – Funcionamento do método P&O para as condições simuladas. ....	60
Figura 4.17 – Detalhe para o momento em que o módulo entra em ação. ....	60
Figura 4.18 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.....	61
Figura 4.19 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.....	61
Figura 4.20 – Fluxograma método Condutância Incremental.....	62
Figura 4.21 – Funcionamento do método Condutância Incremental. ...	63
Figura 4.22 – Detalhe para o momento em que o módulo entra em ação. ....	63
Figura 4.23 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.....	63
Figura 4.24 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.....	64
Figura 4.25 – Fluxograma método Condutância Incremental Modificado. ....	65
Figura 4.26 – Funcionamento nas condições de simulação. ....	66
Figura 4.27 – Detalhe no momento que o módulo entra em ação.....	66
Figura 4.28 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.....	67
Figura 4.29 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.....	67
Figura 5.1 – Protótipo utilizado para aquisição dos resultados experimentais. O retângulo A representa o estágio de potência, o retângulo B a leitura de tensão e corrente do módulo e o retângulo C representa o circuito de filtragem e controle.....	68
Figura 5.2 – Módulo em operação. Detalhe no retângulo para o leitor de irradiância. ....	69
Figura 5.3 - Potência simulada para condição experimental.....	70
Figura 5.4 – Corrente e Tensão para condição experimental. ....	70
Figura 5.5 – Resultados obtidos experimentalmente em regime e transitório. Escala: Tensão Elétrica em amarelo – 10 V/div, Corrente Elétrica em azul – 2 A/div, Potência elétrica em laranja – 50 W/div....	71

Figura 5.6 – Operação em regime do sistema. Escala: Tensão Elétrica em amarelo – 10 V/div, Corrente Elétrica em azul – 2 A/div, Potência elétrica em laranja – 50 W/div. ....	72
Figura 5.7 – Potência simulada para condição experimental. ....	73
Figura 5.8 – Tensão e Corrente para condição experimental. ....	73
Figura 5.9 – Resultado Condutância Incremental para transitório e Regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div. ....	74
Figura 5.10 – Operação em regime permanente. Escala: .....	75
Figura 5.11 – Potência para condições experimentais.....	76
Figura 5.12 - Tensão e Corrente para condições experimentais.....	76
Figura 5.13 – Resultados experimentais para transitório e regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, .....	77
Figura 5.14 – Operação em regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div. ....	78
Figura 5.15 – Comparação entre diferentes velocidades de rastreamento. ....	79



## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Efeito da Associação Mista nos Elementos.....	43
Quadro 3.1 - Características principais de projeto. ....	49
Quadro 4.1 - Condições Avaliadas na Simulação. ....	52
Quadro 5.1 - Apresentação dos resultados obtidos. ....	79



## LISTA DE SÍMBOLOS

CC – Corrente Contínua  
CA – Corrente Alternada  
 $W/m^2$  – Watts por Metro Quadrado  
B – Coeficiente de Circuito Aberto  
 $mV/^\circ C$  – Milivolts por Grau Celsius  
 $^\circ C$  – Grau Celsius  
m/s – Metros por Segundo  
 $K_t$  – Coeficiente Térmico do Módulo  
 $T_{mod}$  – Temperatura de Operação Aproximada do Módulo  
 $T_{amb}$  – Temperatura Ambiente  
S – Irradiância Incidente no Módulo  
T – Temperatura na Superfície do Módulo  
 $\Theta$  – Ângulo de Incidência  
 $V_{pn}$  – Diferença de Potência Gerada  
 $\hbar$  – Constante de Planck  
 $\nu$  - Frequência de Vibração  
eV – Elétron-Volt  
Hz – Hertz  
 $I_L$  – Corrente Fotogerada  
 $R_p$  – Resistência Paralela  
 $R_s$  – Resistência Série  
 $V_o$  – Tensão de Saída  
 $\eta_s$  – Número de Células em Série  
 $\eta_p$  – Número de Células em Paralelo  
 $I_{out}$  – Corrente de Saída do Arranjo  
 $V_{pv}$  – Tensão nos Terminais do Módulo  
 $I_{pv}$  – Corrente Fornecida nos Terminais do Módulo  
 $\Theta_n$  – Ângulo da Carga n  
RL – Resistência de Carga  
VRL – Tensão na Carga  
 $V_i$  – Tensão de Entrada  
 $L_i$  – Indutância de Entrada  
S1 – Interruptor  
 $C_o$  – Capacitância de Saída  
D – Razão Cíclica  
P – Potência Elétrica  
C – Capacitância  
 $V_c$  – Tensão no Capacitor  
VL – Tensão no Indutor

IL – Corrente no Indutor

L – Indutância

Cpv – Capacitor de Filtragem

Kinc – Constante de Limitação

$\Delta D$  – Variação de Razão Cíclica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>2</b>	<b>A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....</b>	<b>29</b>
2.1	FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO .....	29
2.1.1	<b>Irradiância Solar .....</b>	<b>30</b>
2.1.2	<b>Irradiância Solar .....</b>	<b>31</b>
2.1.3	<b>Massa de Ar .....</b>	<b>33</b>
2.2	DISPOSITIVOS GERADORES .....	34
2.2.1	<b>O Efeito Fotovoltaico .....</b>	<b>34</b>
2.2.2	<b>Célula, Módulo e Arranjo.....</b>	<b>37</b>
2.2.2.1	Condições de Teste .....	38
2.2.2.2	Rendimento das Células.....	38
2.2.3	<b>Circuitos Equivalentes.....</b>	<b>40</b>
<b>3</b>	<b>SISTEMAS RASTREADORES DE MÁXIMA POTÊNCIA.....</b>	<b>44</b>
3.1	ANÁLISE TEÓRICA DO CONVERSOR APLICADO AO RASTREAMENTO .....	44
3.2	O CONVERSOR <i>BOOST</i> COMO RASTREADOR.....	47
3.2.1	<b>Funcionamento .....</b>	<b>47</b>
3.2.2	<b>O Funcionamento como Rastreador.....</b>	<b>47</b>
3.2.3	<b>Dimensionamento do Conversor <i>Boost</i> .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA .....</b>	<b>51</b>
4.1	MÉTODO DA RAZÃO CÍCLICA CONSTANTE.....	53
4.2	MÉTODO DA RAZÃO CÍCLICA CONSTANTE.....	55
4.3	MÉTODO PERTURBA E OBSERVA.....	58
4.4	MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL .....	61
4.5	MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADA .....	64
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>68</b>

5.1	RESULTADOS PARA O MÉTODO PERTURBA E OBSERVA.....	69
5.2	RESULTADOS PARA MÉTODO DA CONDUCTÂNCIA INCREMENTAL.....	72
5.3	RESULTADOS PARA O MÉTODO DA CONDUCTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADO .....	75
5.4	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>83</b>
8.1	CÓDIGO ALGORITMO PERTURBA E OBSERVA .....	83
8.2	CÓDIGO ALGORITMO CONDUCTÂNCIA INCREMENTAL 85	
8.3	CÓDIGO ALGORITMO CONDUCTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADO .....	87

## 1 INTRODUÇÃO

Na última década o aproveitamento da energia solar para conversão em energia térmica ou elétrica vem crescendo a taxas elevadas ao redor do mundo. Estima-se que entre 2010 e 2016 a produção de energia através dessa fonte renovável cresceu em média 40%, enquanto eólica e hidráulica apresentam crescimento de 16% e 3% respectivamente [1]. O uso sustentável de recursos naturais possui grande apelo social, visto a conscientização da sociedade sobre os impactos ambientais e a preocupação com as gerações futuras.

A geração de energia elétrica através da energia solar depende principalmente de fatores como a irradiância incidente e a temperatura na superfície do módulo, pois quando a temperatura, a irradiância ou ambas variam, as curvas de geração do módulo são alteradas. Em um circuito o ponto de operação na curva de geração é determinado pela carga a qual o módulo está conectado.

Nesse cenário, o processamento da energia fotogerada por conversores estáticos é indispensável e tornou-se possível graças à evolução da eletrônica de potência. Dentro dessa área de estudo há duas grandes vertentes: os conversores CC-CC e CC-CA. Ambas podem ser aplicadas em sistemas fotogeradores, dependendo da finalidade do projeto.

Como as características de geração de um módulo podem variar significativa e abruptamente, é necessário que o sistema de processamento adeque o ponto de operação do sistema, garantindo que a carga seja alimentada com a tensão adequada e que a fotoconversão ocorra com o maior rendimento possível. Em outras palavras, além de alimentar a carga nos níveis desejados os conversores são responsáveis por fazer com que os módulos fotovoltaicos sempre operem no ponto de máxima transferência de potência.

Além disso, o baixo rendimento dos módulos, também é motivo para uso de métodos que garantam o aproveitamento da máxima potência disponível. Por essa razão, há na literatura diversas referências de métodos que realizam o rastreamento do ponto de máxima potência, além de diversos estudos sobre a aplicação desses algoritmos nas diferentes topologias de conversores [12]-[14].

Algumas estratégias de rastreamento utilizam como parâmetro a potência máxima gerada pelo módulo, e a partir disso definem uma razão cíclica fixa para o conversor, ou uma tensão fixa que deve ser estabelecida, como citado em [4]. O método perturba e observa é comumente citado por apresentar baixo custo computacional e boa

resposta, como apresentado em [5], [6]. Além dele, o algoritmo de condutância incremental é outro método que apresenta baixo custo [6]. Tratando-se da análise de algoritmos, ambos costumam aparecer como soluções concretizadas e baixa complexidade [6], [8], [9].

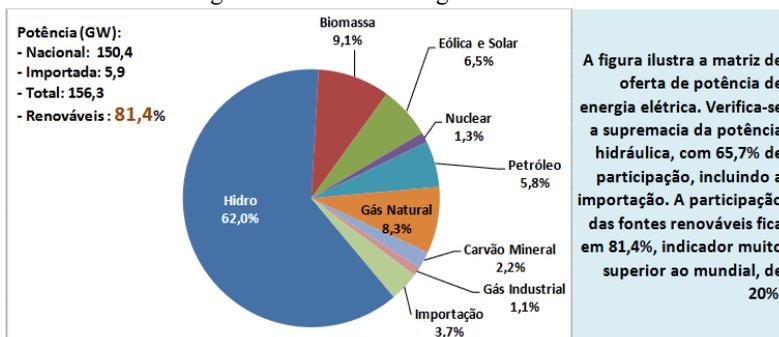
Há também o estudo de algoritmos de complexidade significativamente mais elevada [10], [11], ou do uso de informações obtidas a partir de métodos mais simples como entrada para um sistema de controle mais robusto, como em [7]. A escolha entre o melhor algoritmo a ser implementado levando em conta custo, tempo de resposta e complexidade de implementação, é então uma das características de projeto que devem ser observadas de acordo com a necessidade.

Este trabalho busca realizar uma comparação experimental entre métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em sistemas de geração fotovoltaica. Esses métodos são implementados digitalmente em um microprocessador, que controlarão um conversor CC-CC *boost* para aplicação prática da tarefa.

## 2 A GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR

A importância da geração por meio da energia solar pode ser analisada de diversas formas. Especificamente, no caso do Brasil, representa a diversidade na matriz energética apresentada na Figura 2.1, e a redução nas perdas de transmissão que consequentemente traz uma vantagem econômica considerável.

Figura 2.1 - Matriz Energética Brasileira.



Fonte: Ministério de Minas e Energia.

O crescimento do uso de energia solar no Brasil representa principalmente um uso mais eficiente dos recursos disponíveis. Por ser um país subtropical, o potencial para esse tipo de geração é bastante significativo, porém, existem impedimentos que ainda atrasam a adoção desse tipo de tecnologia, como o tempo de retorno de investimento de longo prazo e a intermitência de geração, havendo necessidade de uma segunda fonte de geração ou um sistema de armazenamento robusto.

### 2.1 FATORES DE INFLUÊNCIA NA GERAÇÃO

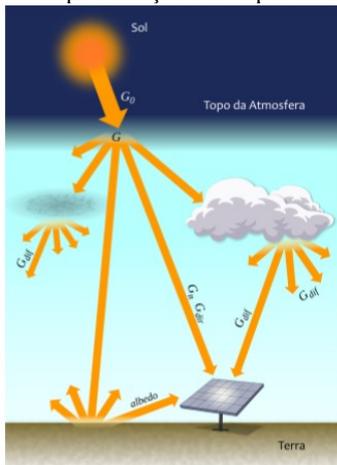
A geração fotovoltaica é dependente de fatores climáticos como a radiação e a temperatura e também da angulação do ponto onde o módulo está instalado em relação ao sol. Além desses fatores externos, quando considerado um sistema de geração operando por longo período, este sofre com a redução de desempenho devido a degeneração dos dispositivos.

### 2.1.1 Irradiância Solar

O sol é uma fonte de ondas eletromagnéticas que se propagam pelo vácuo à velocidade da luz e chegam a atmosfera terrestres. Essa onda é chamada de radiação solar, medida em joules. Dados informam que a irradiância média incidente fora da atmosfera é de  $1366 \text{ W/m}^2$  e devido aos efeitos reflexivos e de absorção ocorridos, a incidência média quando medida na linha do Equador ao meio dia, é de  $1000 \text{ W/m}^2$  [2].

A irradiância incidente em uma superfície é composta por duas componentes principais, a direta e difusa. A direta é, como próprio nome sugere, diretamente recebida na superfície, sem sofrer nenhum tipo de reflexão. Já a componente difusa é resultado da reflexão na atmosfera ou em qualquer outro meio entre a atmosfera e a superfície, como as nuvens, conforme ilustrado na Figura 2.2.

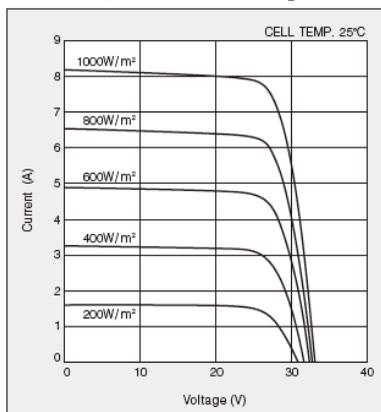
Figura 2.2 – Representação dos Tipos de Irradiância.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, p. 19, 2ª Edição.

A influência da irradiância na geração fotovoltaica, é definida por estar associada à energia máxima que pode ser gerada caso não houvesse perdas no processo de geração. Essa grandeza está diretamente relacionada à corrente gerada no processo fotovoltaico, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Curva de Geração Característica para Diferentes Irradiâncias.

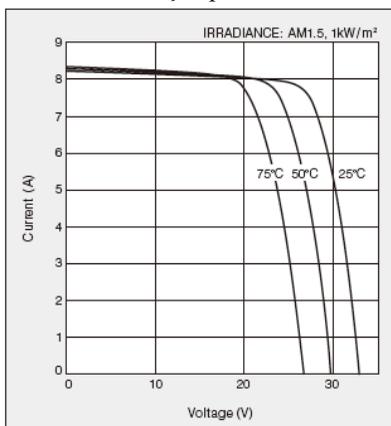


Fonte: Data Sheet do Módulo Kyocera KC200GT.

## 2.1.2 Irradiância Solar

A temperatura, por definição, é o grau de agitação das partículas. Como a geração fotovoltaica ocorre por um fenômeno eletrônico, é esperado que a temperatura na superfície do módulo tenha uma característica que influencie o processo fotovoltaico. Precisamente, quando a temperatura na superfície é elevada, a tensão fotogerada decresce, assim como a potência por ele entregue, conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 – Curva de Geração para Diferentes Temperaturas.



Fonte: Data sheet do Módulo Kyocera KC200GT.

A partir da variação da temperatura nos terminais do gerador fotovoltaico é possível determinar sua tensão de circuito aberto. O coeficiente  $\beta$  que relaciona a tensão com a temperatura é negativo e depende da característica do material que constitui a célula. Para células de Silício Cristalino (c-Si) o valor típico de  $\beta$  é de  $-2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  e para as de silício amorfo (a-Si) é de  $-2,8 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  [3]. Com o conhecimento dessa grandeza é possível calcular a tensão de circuito aberto para determinada temperatura através de:

$$V_{oc}(T) = V_{oc,STC} + \beta \cdot (T-25) \quad (2.1)$$

É possível estimar a temperatura de operação do módulo através de algumas simplificações. Se conhecida a temperatura NOCT (*Nominal Operation Cell Temperature*), condição de teste para irradiância de  $800 \text{ W}/\text{m}^2$ , temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$  e ventos constantes com velocidade de  $1 \text{ m}/\text{s}$ , é possível aproximar o coeficiente térmico do módulo através de (2.2). A partir dessa equação, a temperatura de operação do módulo para dada irradiância pode ser aproximada por (2.3).

$$K_t = \frac{\text{NOCT}-20}{800} \quad (2.2)$$

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{amb}} + K_t \cdot S \quad (2.3)$$

Onde:

$K_t$  – Coeficiente térmico do módulo

$T_{\text{mod}}$  – Temperatura de operação aproximada do módulo

$T_{\text{amb}}$  – Temperatura ambiente

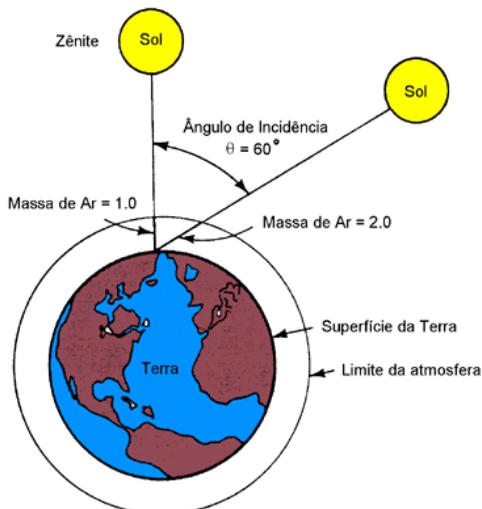
$S$  – Irradiância incidente no módulo

A equação (2.3) apresenta de maneira aproximada a grande influência que a irradiância possui na temperatura de operação do módulo, sendo um dos fatores cruciais para que seja difícil de atingir a condição de teste STC (*Standard Test Condition*) que é definida como  $25^\circ\text{C}$  e  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

### 2.1.3 Massa de Ar

Corresponde à espessura da camada de ar entre a radiação advinda do sol normalizada com relação ao menor caminho (ângulo de zênite) até a superfície analisada, conforme ilustra a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Trajetória dos Raios de Sol na Atmosfera e Definição do Coeficiente de "Massa de Ar" (AM).



Fonte: “Radiação Solar”, CRESESB website, acesso em 27 de junho de 2018.

Se o ângulo zenital estiver entre a faixa de 0 até 75°, a massa ao nível do mar pode ser definida por (2.4), fazendo a aproximação de que uma porção pequena da superfície da Terra seja plana. Para ângulos maiores que a faixa citada, os efeitos da curvatura tornam-se mais influentes e devem ser considerados.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (2.4)$$

Vale destacar que quanto maior o ângulo  $\theta$ , menor será a componente direta da irradiância. Fora da atmosfera a irradiância média é constante e nomeada pelo índice AM0.

## 2.2 DISPOSITIVOS GERADORES

Nessa seção são abordadas as principais características concernentes à geração de energia fotovoltaica, abordando também os problemas das tecnologias utilizadas atualmente, tais como o rendimento das células e os circuitos elétricos equivalentes associados ao fenômeno fotovoltaico.

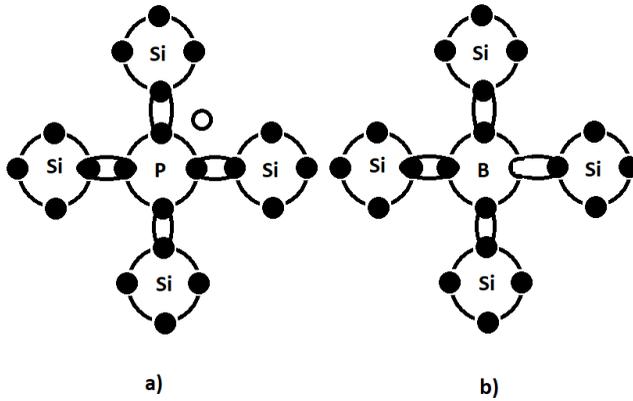
### 2.2.1 O Efeito Fotovoltaico

A transformação de energia solar em energia elétrica é realizada através do fenômeno chamado efeito fotovoltaico. Esse efeito foi notado primeiramente por Alexander Edmond Becquerel em 1839, ao observar uma diferença de potencial em placas metálicas mergulhadas em um eletrólito quando havia incidência de luz sobre a mesma [21]. As explicações teóricas do efeito fotovoltaico só puderam ser deduzidas após o surgimento da mecânica quântica e da teoria da dualidade onda-partícula, em meados do século XX.

Ao longo do tempo outros estudos se estenderam para outros materiais, até que por volta de 1954 a célula de silício semelhante às utilizadas atualmente, foi produzida. A corrida espacial foi um importante fator na evolução da tecnologia fotovoltaica, sendo a principal aplicação para as técnicas de geração com custo elevado.

As explicações do efeito fotovoltaico aqui serão concernentes ao silício cristalino, o qual possui o mesmo número de elétrons e lacunas, devido à ionização térmica causada por uma temperatura diferente de zero Kelvin. Quando o silício recebe impurezas e fica dopado positivamente (Fósforo) ou negativamente (Boro), a combinação com esses elementos faz com que a estrutura passe a possuir elétrons livres em um substrato, classificado como tipo n e tenha falta de elétrons em outro, classificado como tipo p. A Figura 2.6 ilustra as duas configurações para a rede de Silício.

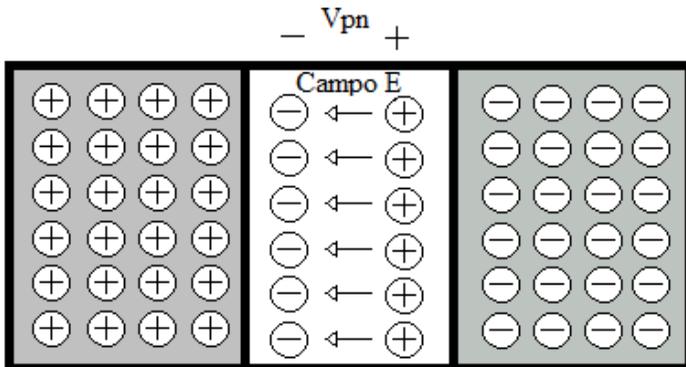
Figura 2.6 – Estrutura de Silício Dopado: A) Positivamente. B) Negativamente.



Fonte: Autor.

A junção dos dois substratos forma uma junção pn, separados por uma camada de depleção gerada pela recombinação entre elétrons e lacunas que acontece até o equilíbrio do sistema, conforme Figura 2.7. Com a polarização dos elétrons e lacunas nas extremidades das camadas, um campo elétrico é gerado, logo, surge uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial age como uma barreira à troca de elétrons e lacunas e quanto maior a difusão dos portadores, maior a diferença de potencial, e logo, há aumento da intensidade de campo.

Figura 2.7 - Ilustração da Junção de Substratos e Formação da Camada de Depleção.



Fonte: Autor.

Dessa forma, somente haverá essa troca quando o sistema for influenciado por um fator externo. No caso da foto geração, os fótons. É conhecido o fato de que a luz se comporta como onda-partícula [20], porém a parte importante para a geração de energia fotovoltaica é o comportamento como partícula. A luz é, sob esse ponto de análise, constituída de pacotes de energia chamados fótons, tal como (2.5).

$$E_{\text{fóton}} = h\nu \quad (2.5)$$

Onde:

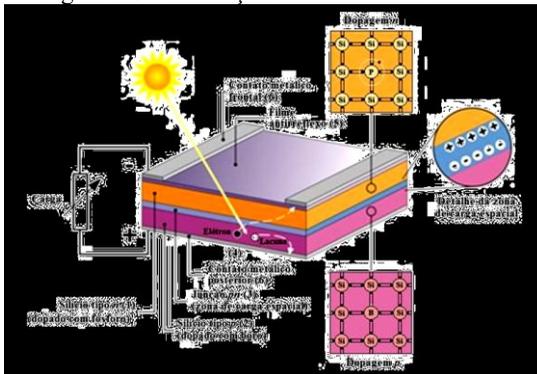
$h$  – Constante de Planck ( $4,138 \times 10^{-15}$  eV.s).

$\nu$  – Frequência de Vibração.

Quando uma célula fotovoltaica é colocada sob a ação da luz solar, os fótons se chocam com os elétrons da rede cristalina do material, fornecendo-lhes energia e tornando-os excitados. Se a energia do fóton for maior do que a que mantém os elétrons presos aos átomos, haverá a liberação do elétron e logo, o efeito fotovoltaico, representado pela Figura 2.8. Para o átomo de silício essa energia mínima é 1,12 eV. A partir disso, é possível determinar a frequência mínima que um fóton deve ter para gerar energia através desse fenômeno (2.6).

$$\nu \geq \frac{1,12}{4,138 \times 10^{-15}} = 270,66 \times 10^{12} \text{ Hz} \quad (2.6)$$

Figura 2.8 – Ilustração do Efeito Fotovoltaico.

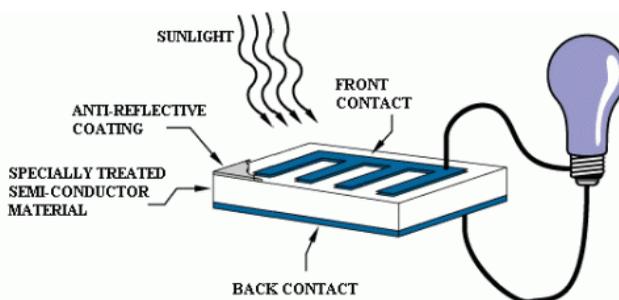


Fonte: Adaptada de (Moehlecke e Zanesco, 2005).

### 2.2.2 Célula, Módulo e Arranjo

O elemento básico para a construção de módulos e arranjos fotovoltaicos são as células fotovoltaicas. Um elemento desse tipo é composto por várias camadas, como apresentado na Figura 2.9. Os substratos tipo p e n representam o silício dopado e estão ligados através de contatos elétricos para a conexão e circulação da corrente. A parte inferior da célula é protegida por um suporte rígido, já na parte superior é colocado um adesivo antirreflexo, além de um revestimento em vidro para proteção física da célula.

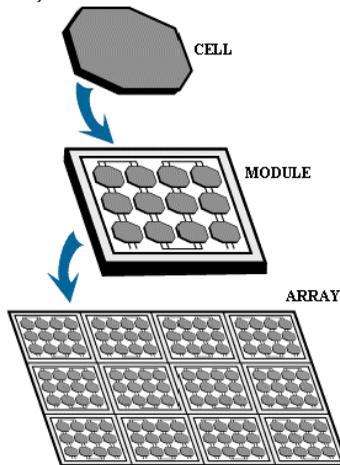
Figura 2.9 – Estrutura Ilustrativa de uma Célula Fotovoltaica.



Fonte: “How do Photovoltaics Works?”, NASA website, acesso em 20/03/2018.

As células são elementos que produzem baixa tensão, em torno de 0,5 Volts. Porém, como a maior parte dos elementos elétricos, é possível aumentar ou diminuir essa capacidade através de associações. Partindo desse princípio foi obtido o conceito de módulo e arranjo fotovoltaico, conforme Figura 2.10. Sendo assim, essas ligações permitem que a tensão gerada possua níveis aplicáveis aos circuitos práticos e que a potência gerada seja relevante para diversas aplicações.

Figura 2.10 – Formação de Estruturas a Partir da Célula Fotovoltaica.



Fonte: How do Photovoltaics Works? NASA website, acesso em 20/03/2018.

#### 2.2.2.1 Condições de Teste

Para padronizar as medidas relacionadas aos módulos fotovoltaicos foram criadas duas principais condições de teste. A primeira condição é a STC (*Standard Test Conditions*) definida como medidas realizadas a  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  na superfície do módulo. Contudo, essa condição é difícil de ser alcançada devido à condução térmica dos materiais que compõem o módulo.

A outra condição de teste criada é a NOCT, mencionada anteriormente. Como o próprio nome induz, essa condição é mais realista para a operação dos módulos, sendo um ótimo parâmetro para testes envolvendo um funcionamento em regime.

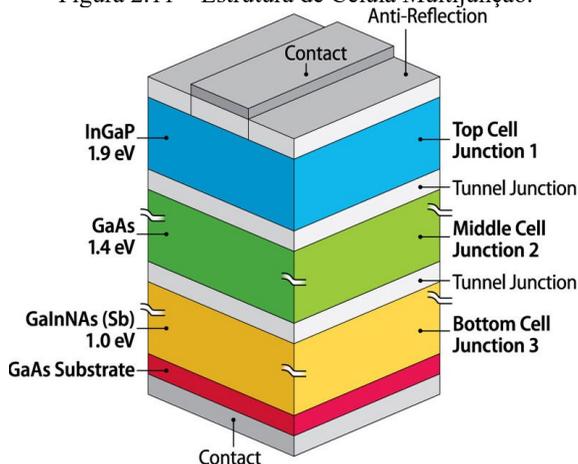
#### 2.2.2.2 Rendimento das Células

As células fotovoltaicas comerciais apresentam um problema limitador relacionado ao rendimento dessa tecnologia. Para o silício monocristalino o máximo rendimento em laboratório é de 25% da potência incidente. Os módulos e arranjos comercializados possuem rendimento ainda menor devido ao custo produtivo associado.

Ainda existe um limite teórico definido por Shockley-Queisser em [17], o qual apresenta que utilizando apenas uma junção na construção da célula para criar o campo elétrico, o máximo rendimento é limitado em 33,3%. Nesse caso, apenas fótons com energia igual ou superior à energia de banda proibida (*Energy Gap*) do material da célula podem liberar elétrons. Sendo assim, a tecnologia fotovoltaica fica limitada a uma parte do espectro da luz solar e os fótons com menor energia não são aproveitados.

Uma maneira de contornar esse limite é a utilização de múltiplas junções ou através de fissão [18]. As células de multijunção constituídas de maneira similar a Figura 2.11, chegam a obter rendimento de até 44 % para concentrações de 418 sois (razão entre a área de captação e a área da célula). Devido ao alto custo associado à produção de células desse tipo, seu uso é mais comum em pesquisas e aplicações em sistemas espaciais.

Figura 2.11 – Estrutura de Célula Multijunção.



Fonte: “Design and Analysis of Indium Gallium Nitride based PIN solar cell”, IJRER website, acesso em 27/06/2018.

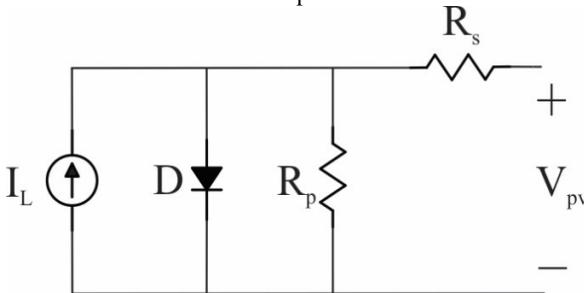
Há também o desenvolvimento das chamadas células de terceira geração, aqui incluídas tecnologias como as células orgânicas e de corantes. As células de corante demonstraram um potencial para produção de módulos com alto rendimento, porém o custo ainda é elevado. Devido à estrutura tridimensional dos materiais, as células que utilizam essas tecnologias não sofrem com a inclinação do módulo, pois conseguem absorver perfeitamente a irradiância difusa [3].

### 2.2.3 Circuitos Equivalentes

Para o entendimento das conexões realizadas nas células buscando o aumento da potência gerada, é necessário analisar o circuito equivalente da célula fotovoltaica. As ligações apresentadas assemelham-se às utilizadas comercialmente, com as células ligadas em série e os módulos em paralelo. O circuito apresentado na Figura 2.12 modela os efeitos físicos dos semicondutores e as demais características de circuito.

Através das explicações apresentadas anteriormente sobre o funcionamento da célula fotovoltaica, pode-se representar o fenômeno físico de maneira simplificada a uma célula que quando incide sobre sua superfície irradiância solar, é capaz de gerar corrente elétrica. Na implementação prática haverá perdas, dessa forma é feita a inclusão de resistências no circuito equivalente. Idealmente, o circuito conteria somente a fonte de corrente que representa a geração fotovoltaica e um diodo, modelando a característica semicondutora do material de junção. A resistência  $R_p$  representa as perdas internas ou por corrente de fuga e a resistência  $R_s$  a queda de tensão nos terminais.

Figura 2.12 – Circuito Elétrico Equivalente da Célula Fotovoltaica.



Fonte: Autor.

Os circuitos elétricos da célula podem ser agrupados em série ou em paralelo, conforme apresentam as Figuras 2.13 e 2.14, respectivamente. Essas combinações entre células dão origem ao conceito do módulo fotovoltaico.

Figura 2.13 - Combinação Série de Células Fotovoltaicas.

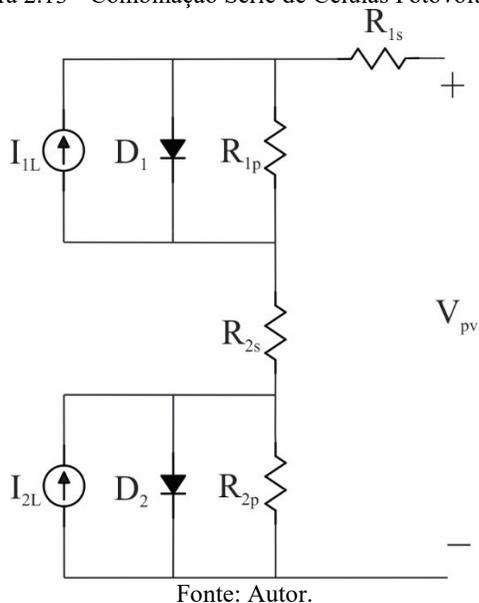
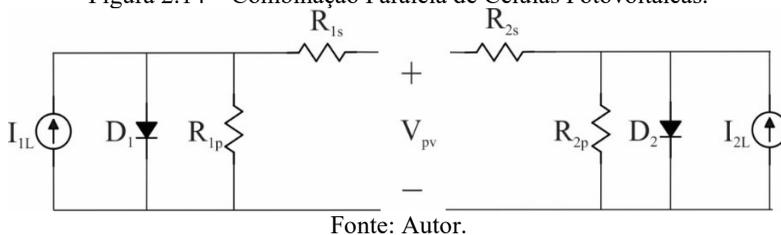
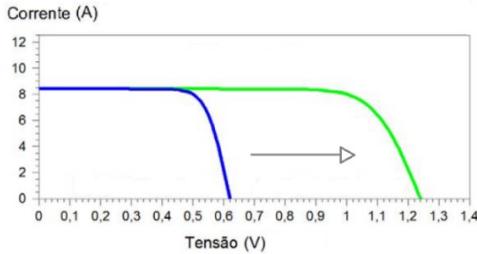


Figura 2.14 – Combinação Paralela de Células Fotovoltaicas.



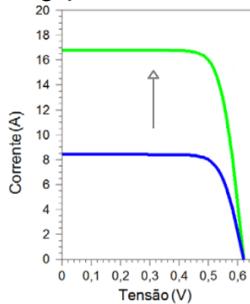
As vantagens dessas conexões são que a ligação em série permite que a tensão seja aumentada proporcionalmente ao número de células colocadas em série, apresentado na Figura 2.15. O efeito similar acontece na ligação em paralelo, porém, havendo aumento da corrente, conforme Figura 2.16.

Figura 2.15 – Efeito da Ligação Série nas Características Elétricas.



Fonte: Adaptado de Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, p. 124.

Figura 2.16 - Efeito da Ligação Paralelo nas Características Elétricas.

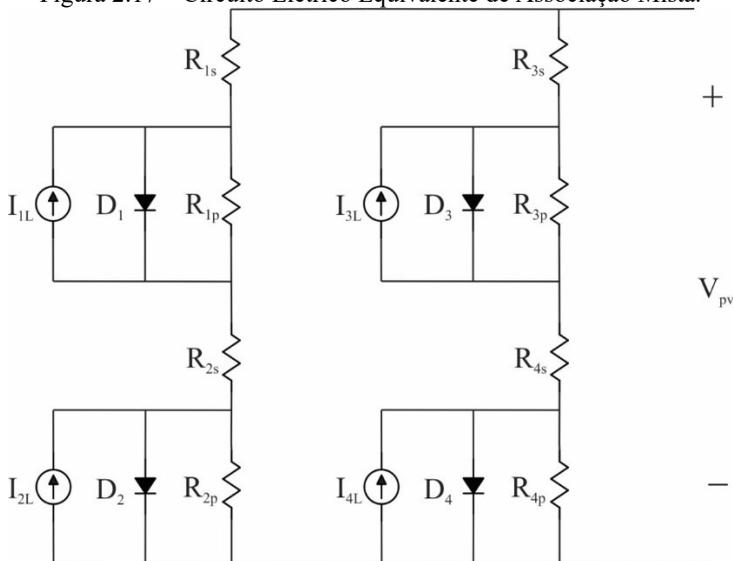


Fonte: Adaptado de Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, p. 124.

Dessa forma, como a saída em tensão da célula é muito baixa para quaisquer aplicações, se faz necessário que essa grandeza tenha seu valor elevado para a utilização em circuitos comerciais. Sendo assim, é realizada a combinação série da célula, conforme ilustrado nas figuras já apresentadas. Considerando que a corrente fotogerada já possui um valor aceitável para algumas aplicações, módulos fotovoltaicos usualmente são constituídos apenas de ligações séries.

O conceito de arranjo fotovoltaico tem origem nas associações de módulos fotovoltaicos de maneira semelhante ao apresentado referente às células. Comercialmente os arranjos são constituídos de ligações paralelas de módulos, aumentando o nível de corrente disponível. Porém, assim como nos módulos, nada impede que outros tipos de ligação sejam utilizados. Do ponto de vista da célula, esses arranjos são associações mistas, incrementando tensão e corrente elétrica, ilustrado na Figura 2.18.

Figura 2.17 – Circuito Elétrico Equivalente de Associação Mista.



Fonte: Autor.

O circuito resultante é igual ao equivalente já apresentado para a célula na Figura 2.12, porém com os valores dos elementos conforme Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Efeito da Associação Mista nos Elementos.

	<b>Célula Fotovoltaica</b>	<b>Módulo Fotovoltaico</b>	<b>Arranjo Fotovoltaico</b>
<b>Resistência Série</b>	$R_{s_{cel}}$	$R_{s_{mod}} = n_s R_{s_{cel}}$	$R_{s_{arranjo}} = \frac{R_{s_{mod}}}{n_p}$
<b>Resistência Paralela</b>	$R_{p_{cel}}$	$R_{p_{mod}} = n_s R_{p_{cel}}$	$R_{p_{arranjo}} = \frac{R_{p_{mod}}}{n_p}$
<b>Corrente Gerada</b>	$I_{l_{cel}}$	$I_{l_{mod}} = I_{l_{cel}}$	$I_{l_{arranjo}} = n_p I_{l_{mod}}$
<b>Tensão de Saída</b>	$V_{co}$	$V_{mo} = n_s V_{co}$	$V_{arranjo} = V_{mo}$
<b>Corrente de Saída</b>	$I_{cs}$	$I_{out_{mod}} = I_{cs}$	$I_{arranjo_{out}} = n_p I_{out_{mod}}$

Fonte: Adaptada de [22].

### 3 SISTEMAS RASTREADORES DE MÁXIMA POTÊNCIA

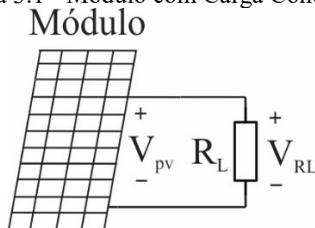
Como mencionado anteriormente, a produção de energia fotovoltaica depende de fatores como a irradiância solar e a temperatura. Sendo assim, devido às variações dessas grandezas é necessário um método ativo de busca para variar o ponto de operação de acordo com as características momentâneas de geração. O objetivo é fazer com que o módulo sempre produza a máxima potência disponibilizada pelas condições ambientais.

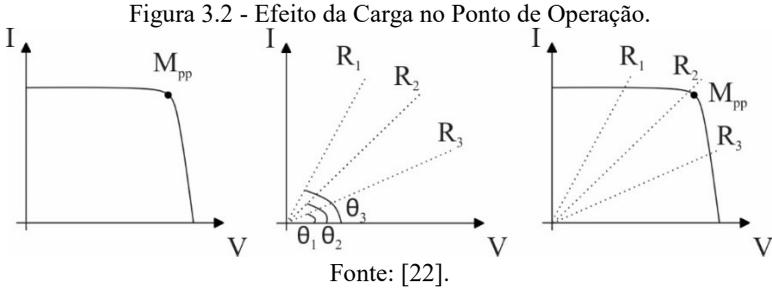
Um sistema ativo de busca pode ser dividido em alguns pontos igualmente importantes. O primeiro deles é o algoritmo de rastreamento a ser utilizado, foco desse trabalho. Este é responsável por receber as informações das grandezas elétricas do módulo, efetuar os cálculos e enviar os sinais de controle para o estágio de potência, que por sua vez tem a tarefa de alterar o ponto de operação para o ponto calculado pelo algoritmo.

#### 3.1 ANÁLISE TEÓRICA DO CONVERSOR APLICADO AO RASTREAMENTO

Ao efetuar a conexão do módulo com uma carga, como apresentado na Figura 3.1, o circuito equivalente nos terminais do módulo é constituído apenas por essa carga. É notável que módulo e carga estão sob a mesma tensão e corrente. A análise matemática através da lei de ohm infere que uma reta em um gráfico tensão por corrente terá unidade de resistência, visto que tensão pode ser escrita em função de corrente e vice-versa, com o coeficiente angular sendo dependente do valor da resistência. Sendo assim, a análise experimental apresenta que a intersecção entre essa reta de carga e a curva de geração define o ponto de operação do módulo.

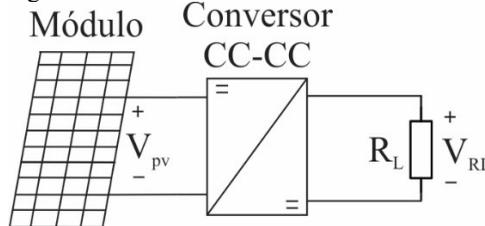
Figura 3.1 - Módulo com Carga Conectada.





Contudo, as curvas de geração variam muito, conforme já apresentado nas Figuras 2.3 e 2.4, o que faz com que para uma mesma carga, o ponto de operação do sistema seja diferente do ponto de máxima potência. Portanto, um sistema conectando apenas fonte e carga não garantirá essa condição. Assim, faz-se necessário a inclusão de uma estrutura capaz de processar a energia e alterar essa característica, conforme Figura 3.3.

Figura 3.3 – Inclusão do Conversor no Circuito.



Fonte: Autor.

Os conversores estáticos CC-CC possuem a principal finalidade de alterar os níveis de tensão e de corrente em um circuito. Essa característica é modelada como um ganho definido aqui como  $G$ . Quando eleva-se a tensão, a corrente diminui na mesma proporção e vice-versa, para que haja conservação de energia. Portanto, ficam definidas as seguintes equações para os conversores:

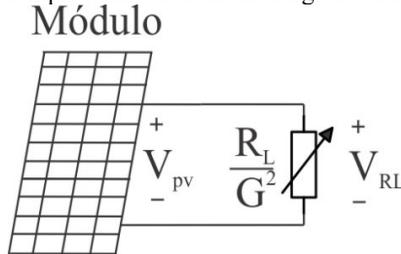
$$V_o = V_{in} \cdot G \quad (3.1)$$

$$I_o = \frac{I_{in}}{G} \quad (3.2)$$

Realizando uma análise sobre a tensão de saída do circuito da Figura 3.3, substituindo as relações acima na Lei de Ohm aplicada para a carga, é obtida (3.3), que define o circuito equivalente dos terminais do módulo quando é inserido o estágio de potência. É obtido então o circuito equivalente da Figura 3.4 com a inclusão do estágio intermediário.

$$\frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{R_L}{G^2} \quad (3.3)$$

Figura 3.4 - Circuito Equivalente Conversor/Carga nos Terminais do Módulo.



Fonte: Autor.

A inserção do conversor para o processamento da energia funciona então como uma resistência variável nos terminais do módulo, dependendo do ganho aplicado ao conversor e como apresentado na Figura 3.2, isso altera o ponto de operação do módulo fotovoltaico.

O ganho de um conversor estático é uma função dependente da razão cíclica aplicada na comutação dos semicondutores utilizados no circuito. Para o controle desses elementos, é utilizada a modulação por largura de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) que possui duas importantes características a serem definidas: a frequência e a largura do pulso. A frequência do PWM será a frequência de comutação do conversor e a largura do pulso é a própria razão cíclica. Esse tipo de modulação é amplamente utilizado devido à facilidade de implementação através de circuitos osciladores ou em microprocessadores.

Nesse trabalho o conversor estático escolhido é o conversor *boost*. Essa topologia é bastante utilizada nesse tipo de sistema, pois ao mesmo tempo que implementa o rastreamento junto ao sistema de controle, eleva o nível de tensão na saída. Esse é um aspecto importante para aplicações práticas, pois para sistemas cuja a geração desejada é alternada, anteriormente ao estágio de inversão é necessário um ganho em tensão, assim como sistemas onde é necessária a elevação da tensão contínua para alimentação direta de cargas CC.

## 3.2 O CONVERSOR *BOOST* COMO RASTREADOR

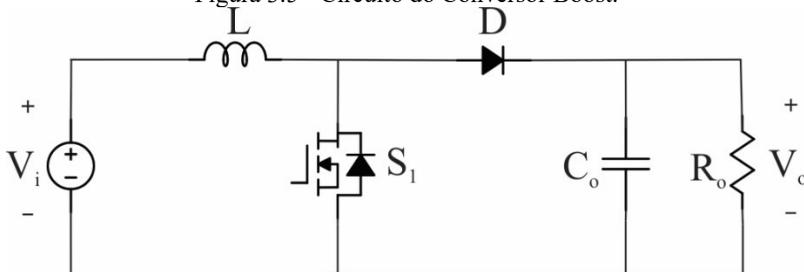
### 3.2.1 Funcionamento

Essa topologia tem como principal característica o ganho e saída em tensão. O circuito básico de um conversor *boost* é apresentado na Figura 3.5. A partir desse circuito é possível analisar as principais etapas de funcionamento, apresentadas abaixo.

Quando o interruptor  $S_1$  conduz uma malha é fechada entre a fonte e o indutor, fazendo com que a corrente no indutor aumente linearmente, armazenando energia. O diodo  $D_1$  se encontra reversamente polarizado e o capacitor de saída é responsável por suprir energia à carga.

Quando  $S_1$  é comandado para abrir o circuito, o indutor libera a energia para carregar o capacitor e também para a carga, devido à polarização do diodo  $D_1$ . Dessa forma durante o quando o próximo ciclo é iniciado, o capacitor será capaz de suprir a carga. Essa transição entre ciclos se inicia antes de a corrente armazenada no indutor ser extinta. Essa consideração é chamada de Modo de Condução Contínua.

Figura 3.5 - Circuito do Conversor Boost.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 O Funcionamento como Rastreador

O conversor *boost* possui ganho conforme a equação (3.4) [15]. Portanto, a carga equivalente nos terminais do módulo é (3.5). Como visto na Figura 3.2, a resistência de carga representa uma reta com ângulo de inclinação  $\theta$  que define o ponto de operação na intersecção com a curva de geração. Esse ângulo de inclinação para o conversor *boost* fica definido como (3.6).

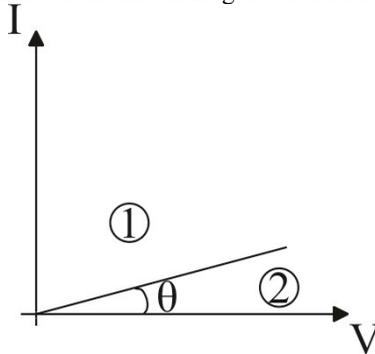
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.4)$$

$$\frac{V_{pv}}{I_{pv}} = R_L \cdot (1-D)^2 \quad (3.5)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{G^2}{R_L}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{(1-D)^2 \cdot R_L}\right) \quad (3.6)$$

Por meio de (3.6), pode-se avaliar os máximos ângulos possíveis para a operação do conversor. Para uma razão cíclica unitária, o ângulo é 90 °. Para uma razão cíclica nula, o ângulo é proporcional ao inverso do valor da resistência de carga, definindo assim o intervalo angular onde o *boost* consegue operar como rastreador, Figura 3.6. Esse intervalo é diferente para outras topologias, e pode ser calculado apenas aplicando o ganho estático de cada uma em (3.6).

Figura 3.6 – Definição da Região de Rastreamento Possível para Topologia Boost. Região 1 – Área onde o boost consegue operar como rastreador. Região 2 – Área onde o boost não consegue efetuar o rastreamento.



Fonte: Autor.

Calculando esse limite para as características desejadas, o ângulo delimitador de regiões da topologia é aproximadamente 4,9°. Ao avaliar as situações de aplicações reais, é possível constatar que trata-se de uma pequena região a qual não deve interferir no bom funcionamento do sistema.

### 3.2.3 Dimensionamento do Conversor *Boost*

Para realizar as simulações dos métodos de rastreamento, é utilizado o *software* PSIM (*PowerSIM*). Para que o conversor possa ter seu comportamento avaliado em conjunto ao algoritmo em ambiente computacional, é preciso dimensionar o valor de cada um dos elementos do conversor.

As características de projeto do *boost* são escolhidas para a utilização conjunta com o módulo KC200GT da Kyocera, cujas grandezas elétricas relevantes para o projeto do conversor são apresentadas no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Características principais de projeto.

Performance no STC	
Potência Máxima	200 W
Tensão de Máxima Potência	26,3 V
Corrente de Máxima Potência	7,61 A

Fonte: Autor.

Os valores são definidos como parâmetros de entrada do conversor em conjunto com a tensão de saída de 48 V. A partir dessas definições pode-se encontrar a resistência de saída, a corrente de saída e a razão cíclica, definidas através das seguintes equações:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P} = 11,52 \Omega \quad (3.7)$$

$$I_o = \frac{P}{V_o} = \frac{V_o}{R_o} = 4,17 \text{ A} \quad (3.8)$$

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} = 0,452 \quad (3.9)$$

Com isso, resta a definição dos valores da indutância e da capacitância do conversor. Para que seja definido o valor da capacitância pode-se avaliar a situação mais crítica de operação para esse elemento, que é a primeira etapa de operação. Se analisada a malha de saída, é possível definir a capacitância a partir da equação da corrente no capacitor.

$$i_c = C_o \cdot \frac{dV_c}{dt} = C_o \cdot \frac{\Delta V_c}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Considerando a etapa de operação mencionada, a corrente no capacitor é a própria corrente de saída  $I_o$ . A variação de tensão permitida deve ser definida, sendo que nesse caso escolheu-se 2 % de variação. A variação de tempo é a duração do segundo ciclo, ou seja, a unidade diminuída da razão cíclica multiplicando o período de comutação. Então, (3.10) pode ser reescrita como:

$$C_o = \frac{I_o \cdot (V_o - V_{in})}{V_o \cdot f_s \cdot \Delta V_o} = 49,054 \mu\text{F} \quad (3.11)$$

A análise para o dimensionamento da indutância pode ser determinada através do pior caso, que nesse caso, também é referente a mesma etapa de operação. De maneira semelhante ao dimensionamento do capacitor, faz-se o dimensionamento do indutor.

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} = L \cdot \frac{\Delta I_L}{\Delta t} \quad (3.12)$$

Durante a primeira etapa de operação, a tensão aplicada ao indutor é a própria tensão de entrada. A ondulação da corrente permitida será definida como 10 % de seu valor médio. Assim, a indutância passa a ser expressa por (3.13). Com isso, têm-se todo o dimensionamento do conversor para as simulações.

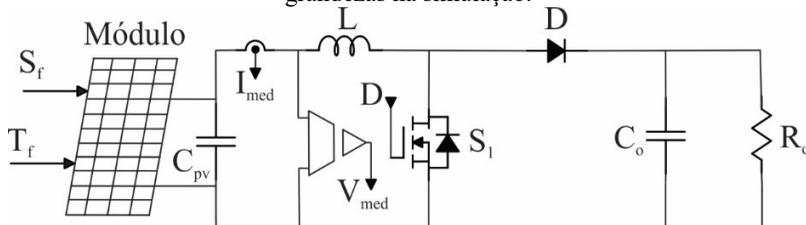
$$L = \frac{I_{in} \cdot R_o}{f_s \cdot \Delta I} \cdot D \cdot (1-D)^2 = 390,877 \text{ mH} \quad (3.13)$$

## 4 MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Há na literatura uma grande quantidade de algoritmos e métodos para definir o ponto de operação para máxima potência. Essa tarefa pode ser implementada de maneira estática, apenas configurada para determinada curva  $V$  por  $I$  do módulo, ou dinâmica, adequando o ponto de operação para cada alteração na curva de geração.

Esse capítulo se destina à análise computacional entre os métodos através de simulações no PSIM. Para isso, é utilizado o circuito do conversor, Figura 4.1, com os valores dos elementos encontrados na seção anterior.

Figura 4.1 - Circuito do conversor com módulo e sensores para medição das grandezas na simulação.



Fonte: Autor.

Os testes são realizados variando a irradiância e a temperatura no módulo. Com essa variação, diferentes valores de potência são disponibilizados na saída do elemento gerador. Para simular essas variações são utilizados os blocos apresentados na Figura 4.2. O bloco da Figura 4.3 representa todas as funções realizadas no microprocessador para o rastreamento, envolvendo a leitura e amostragem, cálculos de algoritmo e geração do PWM.

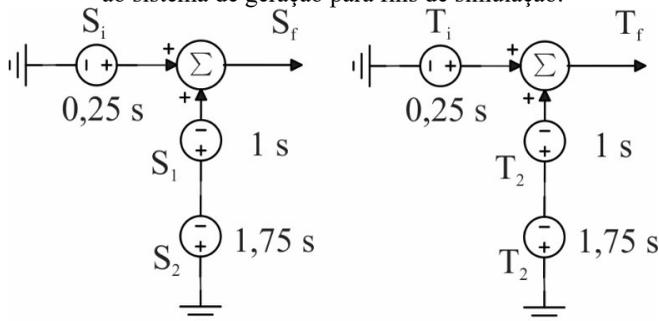
As condições do Quadro 4.1 de temperatura e irradiância são simuladas para todos os métodos. As simulações são feitas atentando sempre aos valores de tensão e corrente disponibilizadas pelo módulo. O elemento de circuito do módulo disponível no simulador possui um terminal que apresenta a potência máxima gerada para as condições de entrada. Dessa forma, é possível avaliar se a potência rastreada é de fato a máxima potência possível para os dados de entrada inseridos.

Quadro 4.1 - Condições Avaliadas na Simulação.

	<b>Irradiância – <math>S</math></b>	<b>Temperatura – <math>T</math></b>	<b>Potência – <math>P</math></b>
<b>Condição 1</b>	1000 W/m <sup>2</sup>	25 °C	200 W
<b>Condição 2</b>	500 W/m <sup>2</sup>	30 °C	97,52 W
<b>Condição 3</b>	700 W/m <sup>2</sup>	60 °C	117,03 W

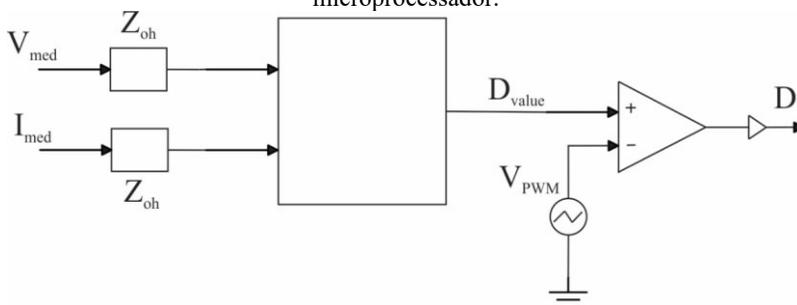
Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Circuitos que implementam a variação de temperatura e irradiância. O tempo ao lado das fontes indica o instante em que são conectadas ao sistema de geração para fins de simulação.



Fonte: Autor.

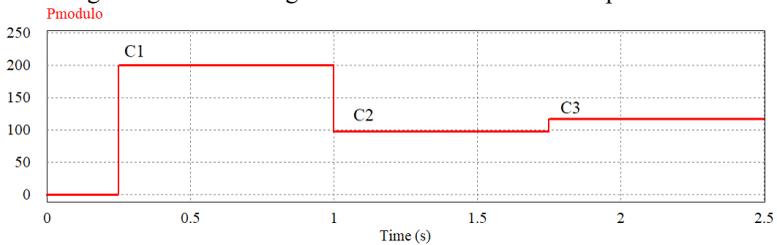
Figura 4.3 - Circuito e bloco que simulam as operações realizadas no microprocessador.



Fonte: Autor.

A potência gerada pelo módulo nas três situações é apresentada na Figura 4.4. Cabe ressaltar que a situação 2 e 3 são as que mais se assemelham a operação normal de um módulo, visto que para 1000 W/m<sup>2</sup> a temperatura do módulo será superior aos 25 °C definidos no STC.

Figura 4.4 - Potência gerada durante intervalo de tempo simulado.



Fonte: Autor.

#### 4.1 MÉTODO DA RAZÃO CÍCLICA CONSTANTE

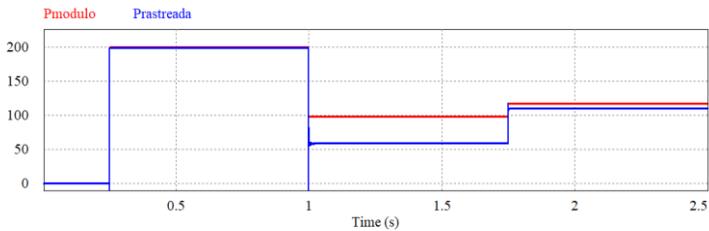
Para iniciar uma análise sobre métodos de rastreamento diferentes, se faz necessário uma avaliação sobre o funcionamento do conversor sob operação com razão cíclica fixa. A escolha dessa razão cíclica geralmente é feita para coincidir com as características padrões de teste, ou seja, as características nominais do conversor.

Essa técnica tem comportamento estático, uma vez que não possui realimentação no sistema de controle, se a curva de geração é alterada o conversor não operará no ponto de máxima potência. Esse método funciona melhor se o circuito é utilizado com um banco de baterias na saída, pois se considera a razão cíclica para refletir a tensão do banco na entrada do conversor. Dessa forma, pela tensão de máxima potência variar pouco ou não variar para pequenas variações de irradiância, essa técnica pode ser considerada um método de rastreamento.

A razão cíclica nominal foi calculada em (3.9) e a partir disso é possível apresentar uma análise através de simulação sobre os efeitos desse método na transferência de máxima potência. O estudo é realizado considerando dois cenários: um com a carga resistiva na saída e o segundo simulando a alimentação de um banco de baterias na saída, ambos com as condições de irradiância e temperatura já apresentadas.

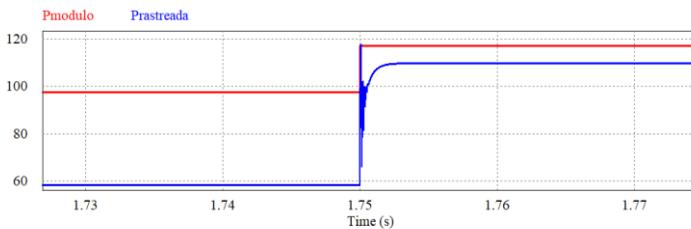
As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os resultados obtidos para o primeiro cenário, onde considera-se uma carga puramente resistiva na saída do circuito.

Figura 4.5 – Simulação com carga resistiva.



Fonte: Autor.

Figura 4.6 - Detalhe para zona de transição e perdas causadas pela falta de rastreamento.

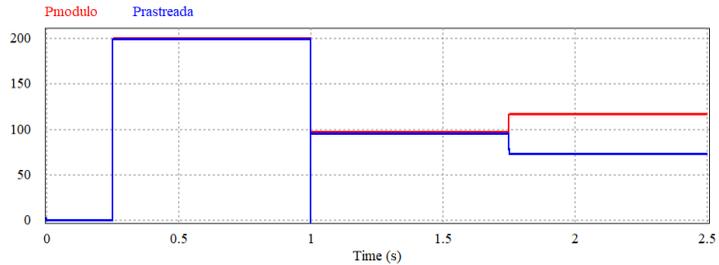


Fonte: Autor.

Através dos resultados acima fica claro que quando ocorrem variações para o ponto no qual a razão cíclica foi definida, a operação sai do ponto de máxima potência. Ou seja, não está sendo extraído toda a potência disponível do módulo por conta da falta de rastreamento.

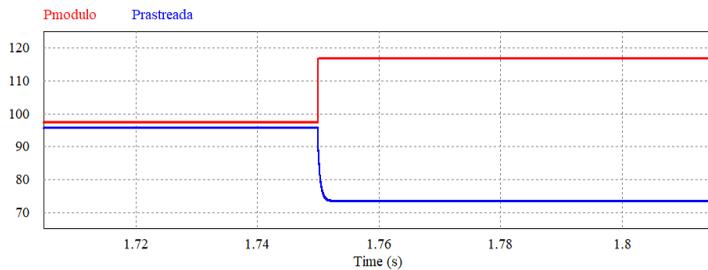
A análise agora se estende à simulação de alimentação de um banco de baterias. É esperado que para pequenas variações de temperatura, como é o caso da passagem da condição 1 para 2, não cause perdas tão grandes na operação do conversor. Porém, entre a condição 2 e 3 as perdas devem aumentar devido à grande variação de temperatura. A Figura 4.7 apresenta a simulação para esse tipo de carga.

Figura 4.7 - Alimentação para Banco de Baterias.



Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Detalhe na Transição e Perdas.



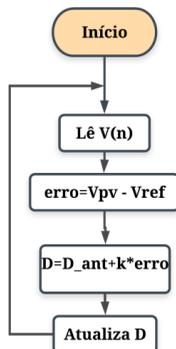
Fonte: Autor.

Os resultados computacionais comprovaram as teorias referentes ao método. Para a utilização deste, é indicado que o circuito seja para alimentação de cargas com característica de fonte de tensão, como baterias. Mesmo assim, sob variações de temperatura consideráveis o método não apresenta bom funcionamento.

## 4.2 MÉTODO DA RAZÃO CÍCLICA CONSTANTE

Ao analisar o problema relacionado ao rastreamento, uma alternativa é grampear a tensão de máxima potência. Definindo o valor da tensão de referência como a tensão nas condições padrões de teste, é possível que o método tenha um resultado melhor do que apenas fixando a razão cíclica. A Figura 4.9 apresenta o fluxograma desse algoritmo.

Figura 4.9 - Fluxograma para Método da Tensão Constante.



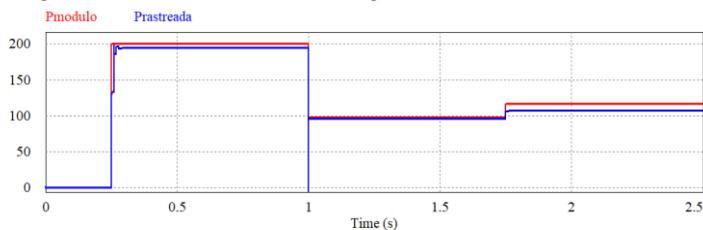
Fonte: Autor.

Para que haja o grampeamento, é necessária a leitura do valor da tensão nos terminais do módulo para que seja definido se a razão cíclica deve ser aumentada ou reduzida. Esse método já é considerado um método dinâmico, pois há realimentação e envolve alterações do valor da razão cíclica de acordo com os valores obtidos do sistema.

Se considerado apenas o aumento de irradiância, o ponto de máxima potência tem uma mudança significativa em relação a corrente e varia pouco para tensão. Logo, o método abordado poderia funcionar de maneira correta, ou com um erro bastante pequeno. Porém, se a temperatura varia, a curva muda significativamente a tensão de máxima potência, e pouco para a corrente, logo o método não apresenta bom desempenho.

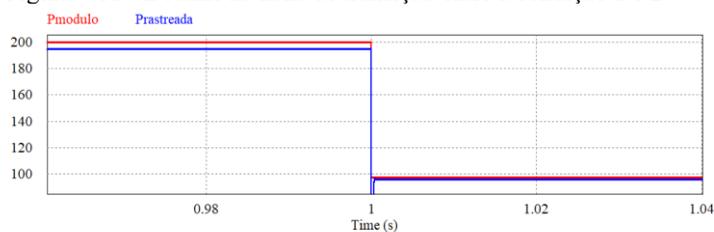
Por simplificação os resultados para o método de grampeamento da tensão serão apresentados apenas para funcionamento com fonte de tensão constante na saída. Similarmente ao método com razão cíclica fixa, os resultados para carga resistiva não são satisfatórios para considerar como método de rastreamento. As Figuras 4.10 à 4.12 apresentam o funcionamento do método com uma fonte constante na saída.

Figura 4.10 - Funcionamento de algoritmo de tensão constante.



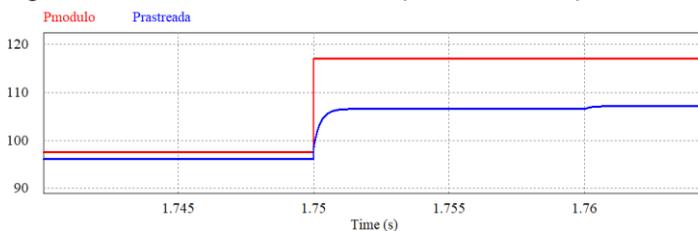
Fonte: Autor.

Figura 4.11 - Detalhe na zona de transição entre a condição 1 e 2.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 - Detalhe na zona de transição entre a condição 2 e 3.



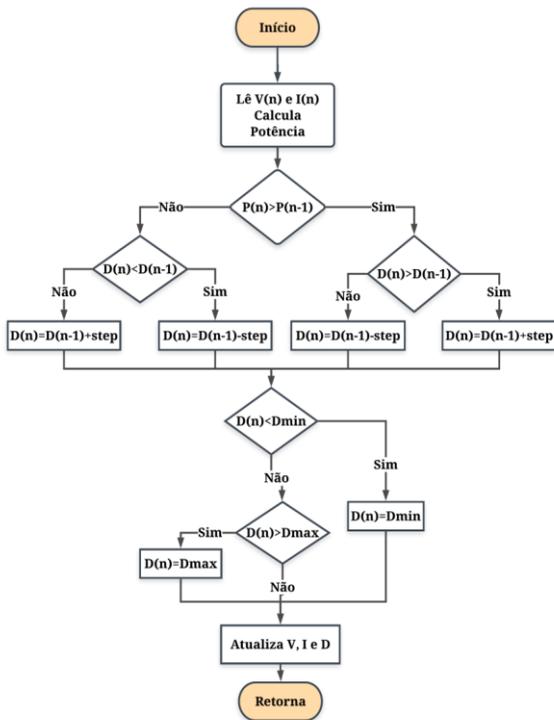
Fonte: Autor.

Com os resultados apresentados é possível perceber que esse método apresenta um funcionamento aceitável para baixas variações de temperatura. Nesse caso, o ponto de operação estará próximo ao ponto de máxima potência. Porém, para variações de temperatura essa técnica também apresenta um funcionamento que não maximiza a potência gerada, assim como a fixação da razão cíclica analisada anteriormente.

### 4.3 MÉTODO PERTURBA E OBSERVA

O método Perturba e Observa (P&O) consiste de um algoritmo mais robusto em relação aos anteriormente apresentados, necessitando das leituras de tensão e corrente, além de um número maior de tomadas de decisões e cálculos no programa. Esse algoritmo não possui uma fundação matemática complexa, sendo constituído apenas pela elevação ou redução da tensão para o encontro do ponto de máxima potência através de um passo fixo. O fluxograma do método proposto é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Fluxograma para método Perturba e Observa.



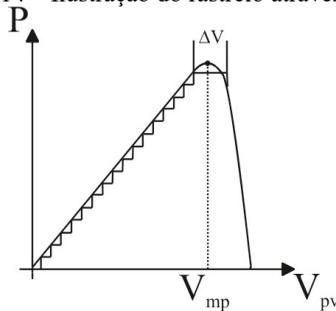
Fonte: Autor.

Cada vez que o algoritmo é iniciado, a diferença entre a potência atual e a anterior é calculada. Como resultado é possível definir se a tensão será incrementada ou reduzida. Se a diferença entre potências for positiva, significa que a operação está sendo realizada na direção de

máxima potência. Se for negativa, o ponto de máxima potência já foi ultrapassado e o ponto de operação está à direita do MPP (*Maximum Power Point*).

Para esse algoritmo é necessário que seja definido um passo para o incremento ou decremento da razão cíclica. O valor escolhido afeta diretamente o comportamento dinâmico de rastreamento. Se o passo for grande, a velocidade de busca do método será elevada, porém a variação ao redor do MPP será maior. Se o passo for menor, prejudica a velocidade porém ajuda o comportamento em torno dos pontos desejados.

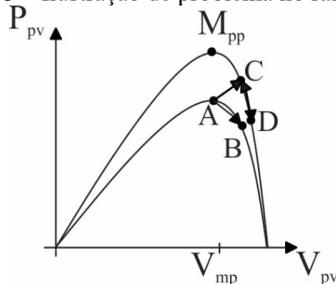
Figura 4.14 – Ilustração do rastreamento através do P&O.



Fonte: Adaptado de [22].

Outra característica importante a ser notada é que a curva apresentada na Figura 4.14 leva em consideração uma geração com irradiância e temperatura constantes. Porém, essa condição não pode ser garantida na prática e devido a isso, o método pode não obter resultados adequados, isso pode ser explicado pela Figura 4.15.

Figura 4.15 – Ilustração de problema no rastreamento.

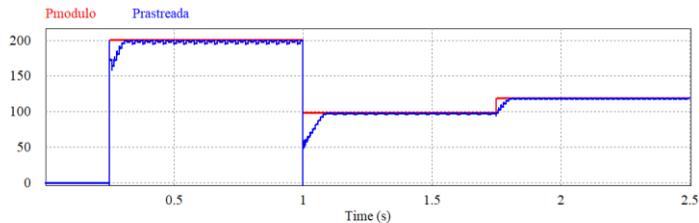


Fonte: Adaptado de [22].

Se a irradiância varia rapidamente, alterando a curva de geração, o método pode não identificar a origem correta desse aumento de potência disponível. Na Figura 4.15 esse fenômeno é ilustrado através dos pontos A, B, C e D. Pela incapacidade de distinguir o motivo do aumento de potência, o método leva o módulo a operar em um ponto fora do ponto de máxima potência para a nova curva característica de geração, apresentado pelo ponto C. Entretanto, esse ponto gera mais potência que o anterior, logo pelo algoritmo, deve se elevar a tensão, alterando o ponto de operação para o ponto D. Com essa elevação, a diferença entre potências será negativa então o próximo incremento será negativo, em direção ao ponto C novamente e o seguinte será negativo pelo acréscimo de potência, até que se chegue no MPP novamente.

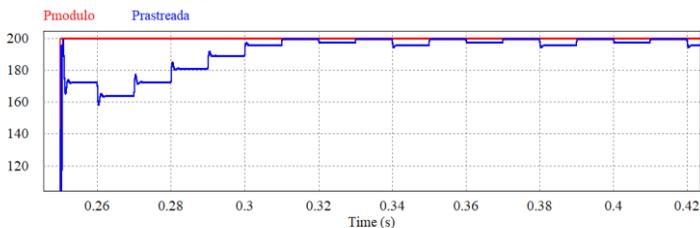
Mesmo com esses problemas dinâmicos, o método P&O possui o benefício de ser um algoritmo simples e apresentar resultados satisfatórios. É um algoritmo consolidado na comunidade científica e certamente um dos mais citados quando o assunto é sobre MPPT. As Figuras 4.16 à 4.19 apresentam o funcionamento sob as condições de simulação utilizadas.

Figura 4.16 – Funcionamento do método P&O para as condições simuladas.



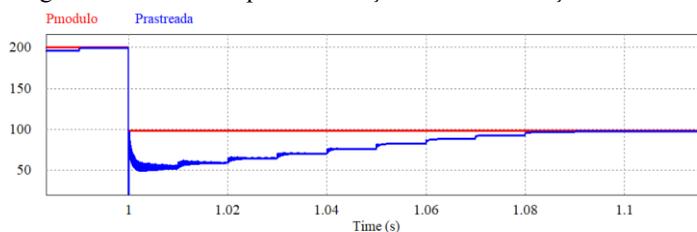
Fonte: Autor.

Figura 4.17 – Detalhe para o momento em que o módulo entra em ação.



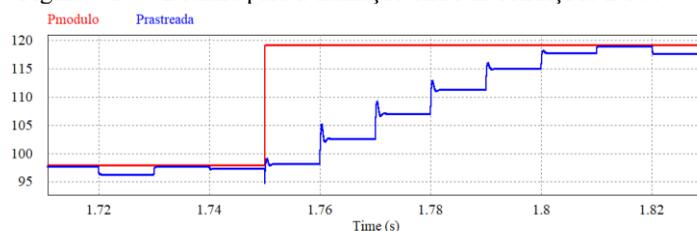
Fonte: Autor.

Figura 4.18 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.



Fonte: Autor.

Figura 4.19 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.



Fonte: Autor.

As características do método podem ser confirmadas através dos resultados obtidos na simulação. A variação durante o funcionamento em regime permanente pode ser observada em todas as figuras, porém o método conseguiu rastrear o ponto de operação desejado para cada uma das condições de maneira satisfatória.

#### 4.4 MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

Desenvolvido com o objetivo de conciliar desempenho dinâmico e baixas oscilações em regime devido à utilização de passo de cálculo variável, esse método tem como base teórica a fundamentação matemática da operação do módulo e o conceito de derivada.

Avaliando as curvas PV de um módulo, é possível definir as regiões onde a derivada é positiva e negativa. De maneira similar a análise realizada na seção 4.3, a esquerda do ponto de máxima potência (derivada positiva), a tensão do módulo deve ser incrementada e a direita (derivada negativa), decrementada.

No ponto de máxima potência a derivada da potência em relação a tensão é nula, constituindo o ponto de interesse para o sistema de

rastreamento. As equações abaixo apresentam como esse método pode ser implementado digitalmente.

$$P = V \cdot I \quad (4.1)$$

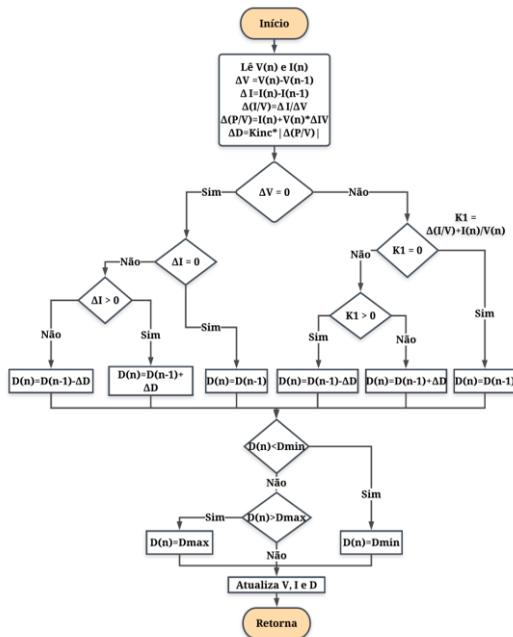
$$\frac{dP}{dV} = \frac{dV \cdot I}{dV} = I_n + \frac{\Delta I}{\Delta V} \cdot V_n = I_n + \left( \frac{I_n - I_{n-1}}{V_n - V_{n-1}} \right) \cdot V_n \quad (4.2)$$

$$\frac{I(n)}{V(n)} + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (4.3)$$

$$\Delta D = K_{inc} \cdot \left| \frac{dP}{dV} \right| \quad (4.4)$$

Logo, quanto maior for o módulo da derivada de potência, mais longe do MPP está o ponto de operação. Então, é possível definir a variação da razão cíclica através do valor dessa divisão, conforme (4.4). O fluxograma desse método é apresentado a seguir.

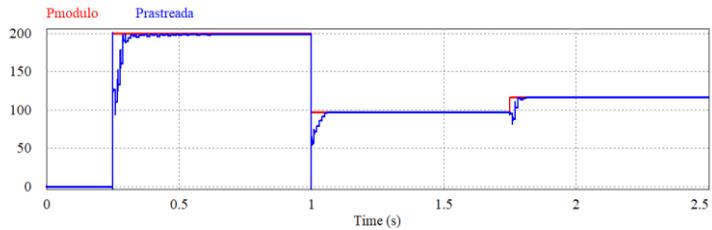
Figura 4.20 – Fluxograma método Condutância Incremental.



Fonte: Autor.

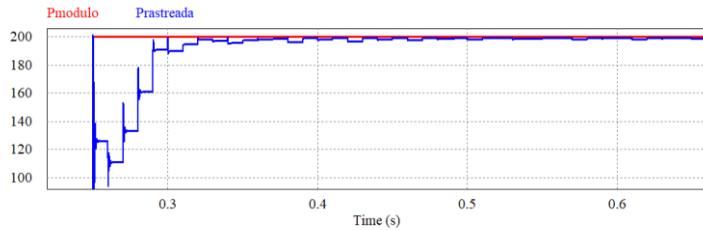
Os resultados devem aliar a velocidade mais elevada de rastreamento e o bom desempenho em regime. As complicações desse método se dão por dificuldades práticas de se obter a derivada igual a zero, devido as aproximações nos cálculos. Usualmente, considera-se uma margem pequena para a derivada no ponto de máxima potência para que possa ser implementado na prática. As figuras 4.21 à 4.24 apresentam o funcionamento do método da Condutância Incremental para as variações ambientais simuladas.

Figura 4.21 – Funcionamento do método Condutância Incremental.



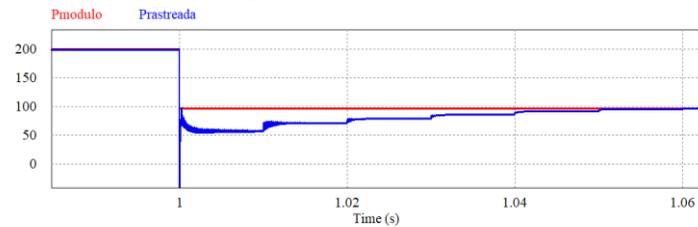
Fonte: Autor.

Figura 4.22 – Detalhe para o momento em que o módulo entra em ação.



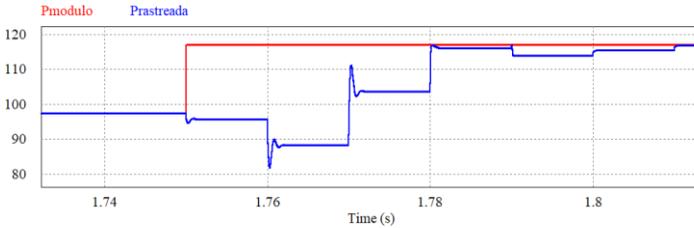
Fonte: Autor.

Figura 4.23 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.



Fonte: Autor.

Figura 4.24 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos apresentam as principais características dessa técnica. É possível observar uma velocidade de rastreamento mais elevada em comparação ao método anterior, assim como uma boa resposta em regime, apresentando baixas oscilações. Contudo, é notável uma pequena oscilação em torno do ponto de máxima potência para a condição nominal de operação. Essa oscilação é causada pelas aproximações realizadas para a implementação e a margem para a derivada da potência.

#### 4.5 MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADA

Esse método utiliza alguns conceitos do algoritmo de condutância incremental clássico, porém busca uma abordagem diferente através da equação da potência. No método proposto [19], é necessária somente a leitura de tensão, eliminando o custo de um sensor de corrente no sistema. As equações que definem o funcionamento desse método são apresentadas:

$$P = \frac{V_{pv}^2}{R_i} \quad (4.5)$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d\left(\frac{V_{pv}^2}{R_i}\right)}{dV} = \frac{2 \cdot V_{pv}}{R_i} - \left(\frac{V_{pv}}{R_i}\right)^2 \cdot \frac{dR_i}{dV_{pv}} \quad (4.6)$$

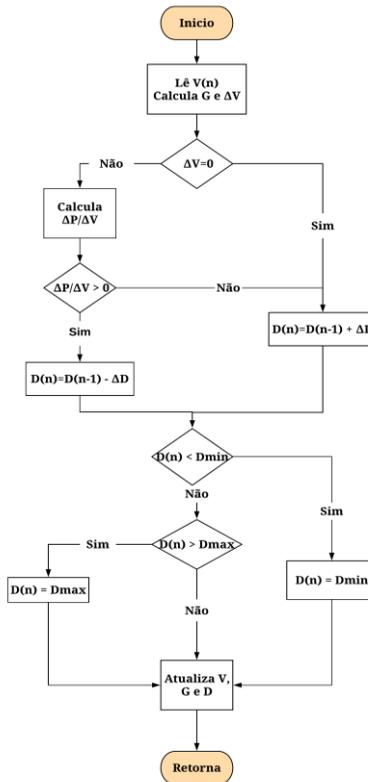
$$R_i = \frac{R_o}{G^2} \quad (4.7)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{G_n^2 \cdot V_n}{R_o} \cdot \left[ 2 \cdot \frac{V_n \cdot (G_{n-1}^2 - G_n^2)}{G_{n-1}^2 \cdot (V_n - V_{n-1})} \right] \quad (4.8)$$

Por meio de (4.6) seria necessário que a resistência variasse obrigatoriamente. Porém, pode-se reescrever a resistência de entrada pela resistência de carga através de (4.7). Substituindo essa relação em (4.6) é obtida (4.8). Sendo assim, (4.8) evidencia que a derivada depende da carga  $R_o$ , da tensão  $V_{pv}$  e do Ganho do conversor nos instantes  $n$  e  $n-1$ .

A resistência de carga tem influência na velocidade de rastreamento, porém como é uma grandeza que não muda de sinal, não influenciará na direção de incremento ou decremento. É importante notar que ao contrário do método tradicional, aqui não é utilizada a derivada da potência para variar o passo de incremento. Pois, aplicando o passo variável no método, o tamanho do incremento ficaria dependente da carga  $R_o$ . O fluxograma desse método é apresentado na Figura 4.25.

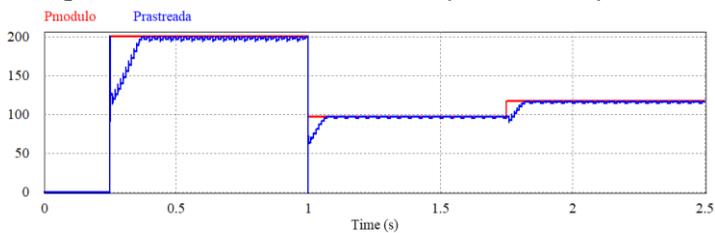
Figura 4.25 – Fluxograma método Condutância Incremental Modificado.



Fonte: Autor.

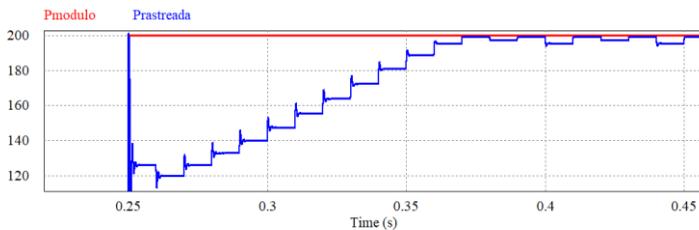
Para avaliação do funcionamento do algoritmo são apresentados os resultados computacionais nas Figuras 4.26 à 4.29. É possível notar uma velocidade de rastreamento semelhante ao método Perturba e Observa pois para fins comparativos, o passo fixo para ambos foi escolhido como o mesmo valor. O algoritmo apresenta as variações características de métodos de passo fixo em regime permanente, porém é valido ressaltar que esses resultados são obtidos apenas com um sensor de tensão, diminuindo consideravelmente a dificuldade de execução do *Hardware* do sistema de rastreamento.

Figura 4.26 – Funcionamento nas condições de simulação.



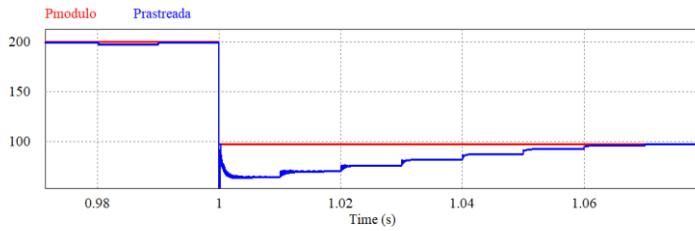
Fonte: Autor.

Figura 4.27 – Detalhe no momento que o módulo entra em ação.



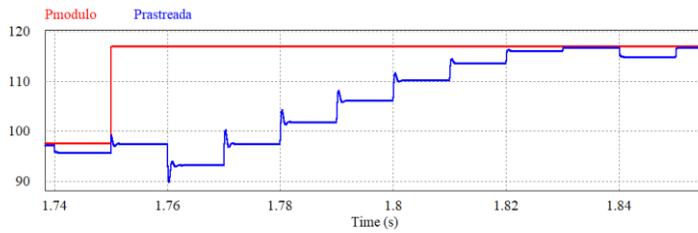
Fonte: Autor.

Figura 4.28 – Detalhe para a transição entre as condições 1 e 2.



Fonte: Autor.

Figura 4.29 – Detalhe para a transição entre as condições 2 e 3.



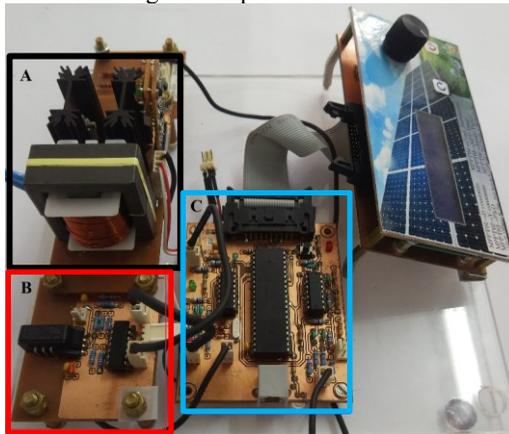
Fonte: Autor.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Essa seção trata da comparação entre os métodos de rastreamento implementados no conversor CC-CC para obtenção de resultados experimentais. A comparação é apresentada utilizando esses resultados e as simulações para as condições testadas.

Para a obtenção dos resultados experimentais, foi utilizado um protótipo desenvolvido disponível em laboratório, apresentado na Figura 5.1. O protótipo já possui todas as entradas de sinal necessárias para análise dos métodos comparados. Todo o dimensionamento foi feito com base nas mesmas características de projeto do módulo KC200GT e cálculos já apresentados para o conversor *Boost*.

Figura 5.1 – Protótipo utilizado para aquisição dos resultados experimentais. O retângulo A representa o estágio de potência, o retângulo B a leitura de tensão e corrente do módulo e o retângulo C representa o circuito de filtragem e controle.



Fonte: Autor.

Durante a realização dos testes foi utilizado o instrumento de ensaio *ProfiTest PV* da empresa *Grossen Metrawatt* para medir a irradiância. A medição com essa ferramenta é realizada através de uma pequena célula fotovoltaica colocada ao lado do módulo. A leitura de temperatura é realizada através do mesmo instrumento, porém, também é conferida com uma pistola de medição térmica durante a obtenção das formas de onda. A Figura 5.2 apresenta o *setup* de realização dos testes com o módulo em destaque a célula utilizada para medição da irradiância.

Figura 5.2 – Módulo em operação. Detalhe no retângulo para o leitor de irradiância.



Fonte: Autor.

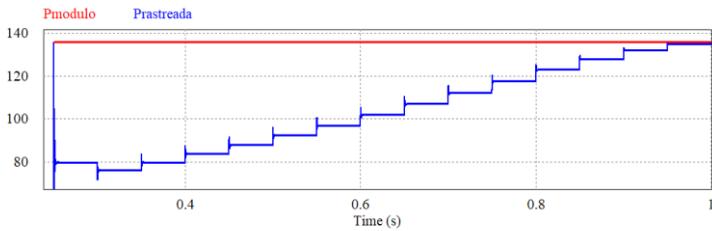
Com o intuito comparativo, os testes deveriam ser realizados sob as mesmas condições ambientais. Porém, não há disponível um emulador capaz de gerar a tensão referente a um único módulo fotovoltaico para o teste com o conversor. Sendo assim, os resultados foram obtidos com temperatura e irradiância mais próximos possível. Todos os códigos implementados no microprocessador PIC18F4550 para os três métodos apresentados nessa seção são disponibilizados nos apêndices desse documento.

Na parte experimental foi utilizada uma frequência de amostragem de 10 Hz, sendo considerada o suficiente para suprir as variações possíveis em operação normal. O sistema experimental é conectado à uma carga resistiva de valor 11,5  $\Omega$ .

## 5.1 RESULTADOS PARA O MÉTODO PERTUBA E OBSERVA

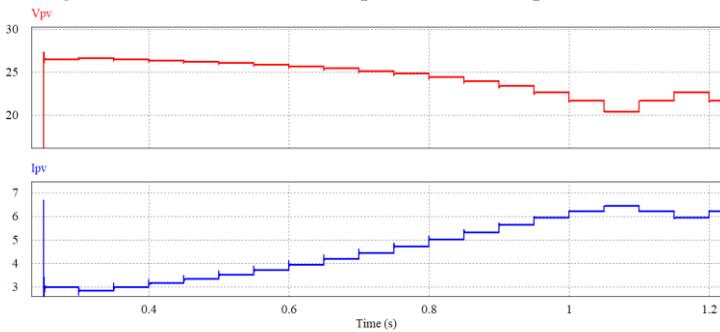
As condições de teste medidas no momento que os resultados são obtidos foram: Irradiância 817 W/m<sup>2</sup> e Temperatura 60 °C. Para essas condições a geração simulada utilizando os valores de catalogo do módulo KC200GT e o modelo no *software* PSIM, é de 136,72 W. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam o comportamento obtido computacionalmente para a condição.

Figura 5.3 - Potência simulada para condição experimental.



Fonte: Autor.

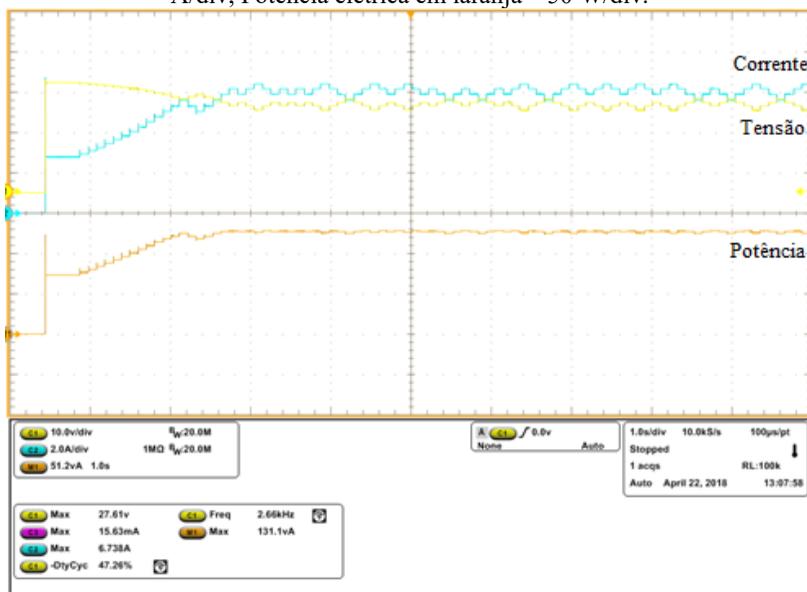
Figura 5.4 – Corrente e Tensão para condição experimental.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos computacionalmente apresentam o rastreamento do ponto de operação desejado de maneira eficiente. A Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para a condição de ensaio.

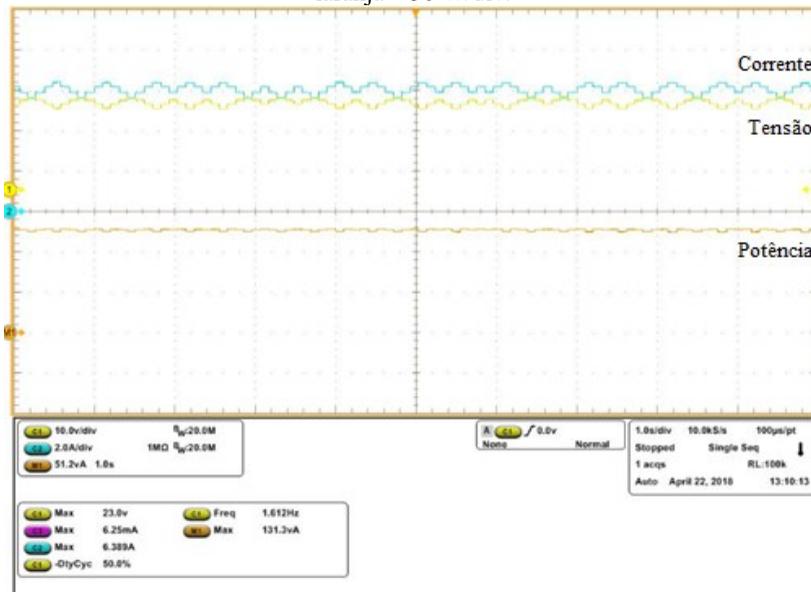
Figura 5.5 – Resultados obtidos experimentalmente em regime e transitório. Escala: Tensão Elétrica em amarelo – 10 V/div, Corrente Elétrica em azul – 2 A/div, Potência elétrica em laranja – 50 W/div.



Fonte: Autor.

É possível notar através do resultado experimental a deformação na forma de onda da tensão e corrente causada por pequenas variações de condições climáticas. No ambiente computacional não são apresentados esses detalhes, porém é conhecido o fato de ser impossível na prática que irradiância e temperatura se mantenham a níveis perfeitamente constantes. A Figura 5.6 apresenta o comportamento em regime permanente.

Figura 5.6 – Operação em regime do sistema. Escala: Tensão Elétrica em amarelo – 10 V/div, Corrente Elétrica em azul – 2 A/div, Potência elétrica em laranja – 50 W/div.



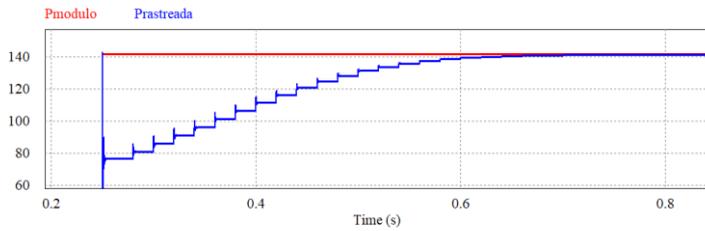
Fonte: Autor.

Outro fator a ser ressaltado é a diferença entre os valores máximos entre a potência simulada e a apresentada experimentalmente. O erro percentual é de 3,96 %. Alguns fatores podem ser apresentados como motivos para as perdas no módulo, como os contatos elétricos, superfície não perfeitamente limpa e possíveis erros de leitura de irradiância e temperatura.

## 5.2 RESULTADOS PARA MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

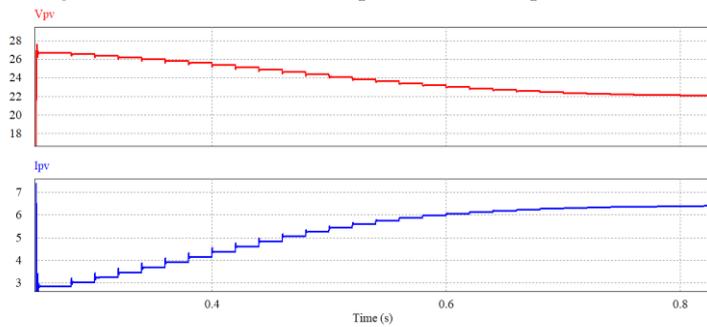
As condições de teste medidas no momento da obtenção dos resultados são: Irradiância de  $856 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $62 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para essas condições a geração simulada utilizando os valores de catalogo do módulo KC200GT e o modelo no software PSIM, é de 141,62 W. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os detalhes computacionais para o transitório.

Figura 5.7 – Potência simulada para condição experimental.



Fonte: Autor.

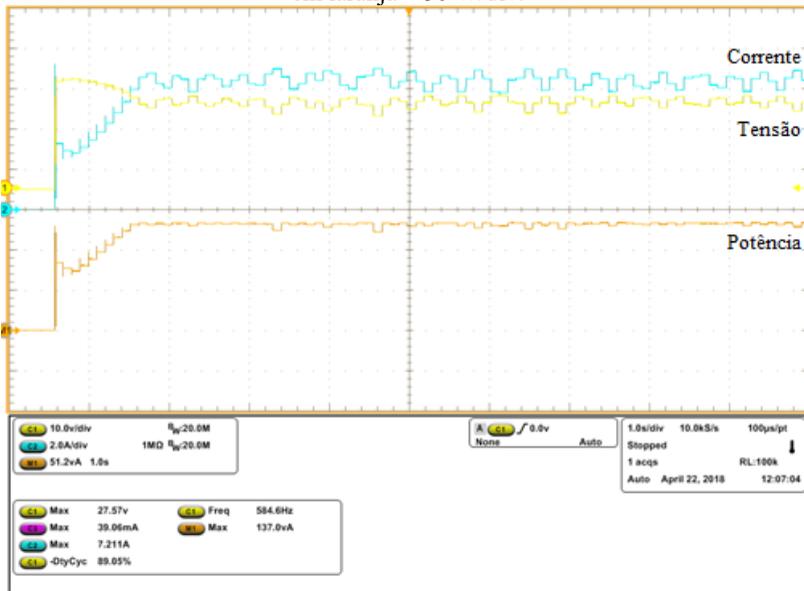
Figura 5.8 – Tensão e Corrente para condição experimental.



Fonte: Autor.

Os resultados computacionais apresentam uma boa velocidade de rastreamento e uma pequena oscilação em regime permanente. As formas de onda obtidas experimentalmente são apresentadas na Figura 5.9.

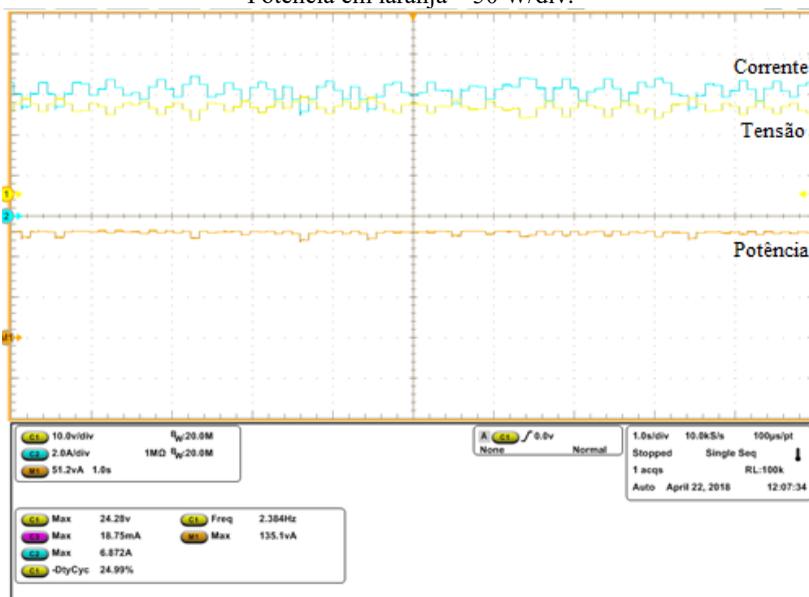
Figura 5.9 – Resultado Condutância Incremental para transitório e Regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div.



Fonte: Autor.

Os resultados experimentais sofrem a influência das pequenas variações, assim como no item 5.1. É possível visualizar através da Figura 5.10 uma variação não encontrada na simulação na forma de onda da tensão e corrente.

Figura 5.10 – Operação em regime permanente. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div.



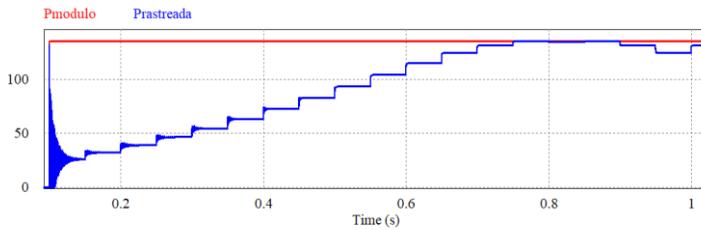
Fonte: Autor.

De maneira semelhante ao método anterior, a potência rastreada encontra-se abaixo da simulada, o erro percentual é de 4,6 % aproximadamente. Devido à característica de passo variável, na simulação o erro em regime é pequeno, sobretudo na prática é possível notar variações na potência mesmo em regime permanente, o que pode reforçar a influência das variações de irradiância em curtíssimo prazo.

### 5.3 RESULTADOS PARA O MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADO

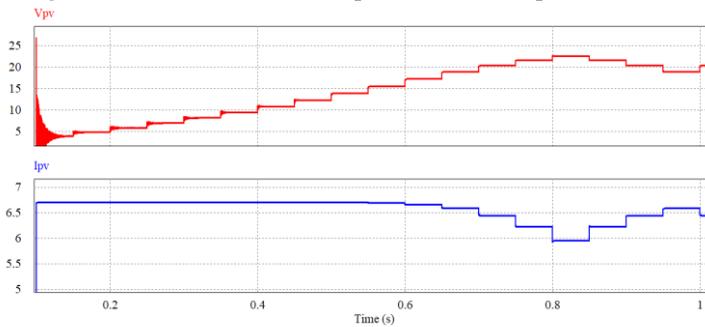
As condições de teste medidas no momento do ensaio são: Irradiância de  $846 \text{ W/m}^2$  e  $T = 61 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para essas condições a geração simulada utilizando os valores de catalogo do módulo KC200GT e o modelo no software PSIM, é de 140,77 W.

Figura 5.11 – Potência para condições experimentais.



Fonte: Autor.

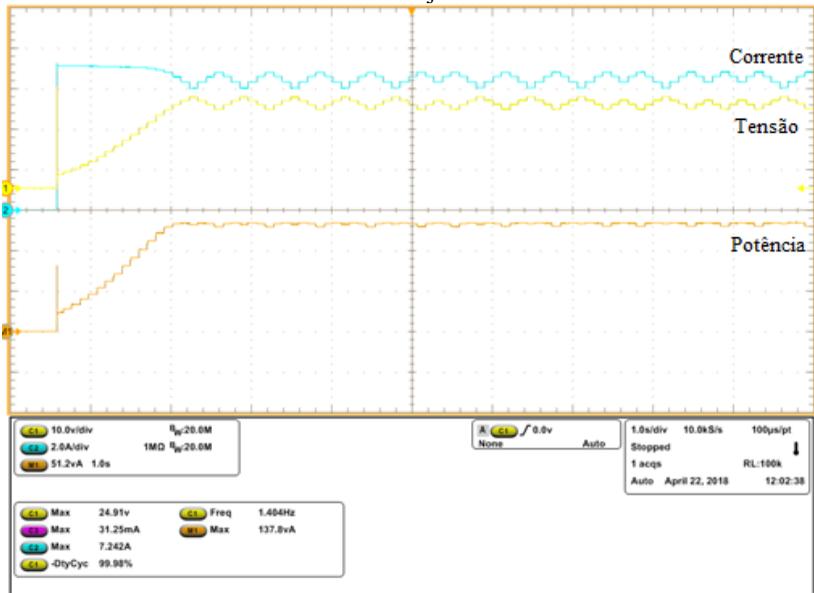
Figura 5.12 - Tensão e Corrente para condições experimentais.



Fonte: Autor.

O resultado acima mostra a variação em regime característica para algoritmos com passo fixo e para o passo escolhido, uma velocidade de rastreamento relativamente baixa. A Figura 5.13 apresenta os resultados experimentais para esse método.

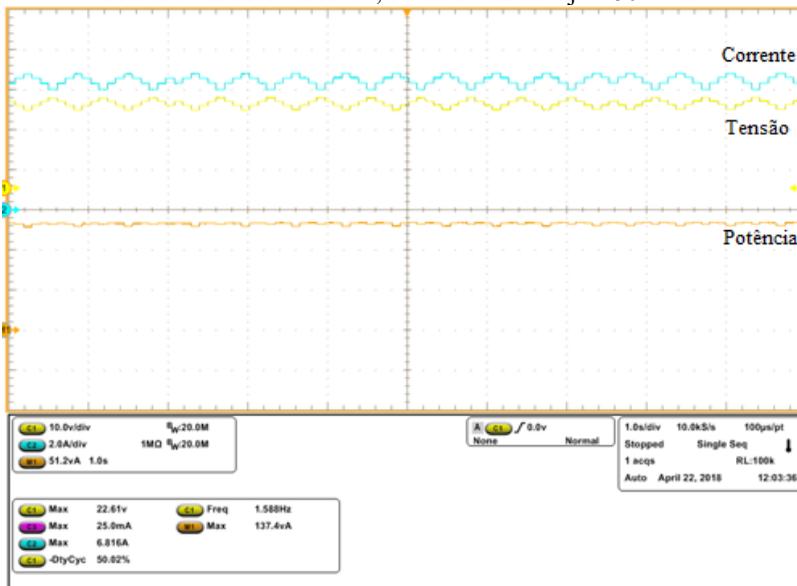
Figura 5.13 – Resultados experimentais para transitório e regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos apresentam os mesmos problemas dos anteriores. Com um erro relativo de 2,39 % e uma variação além da esperada durante a operação em regime, mostra a influência da grande volatilidade das condições climáticas. A Figura 5.14 apresenta o comportamento em regime permanente para o método modificado.

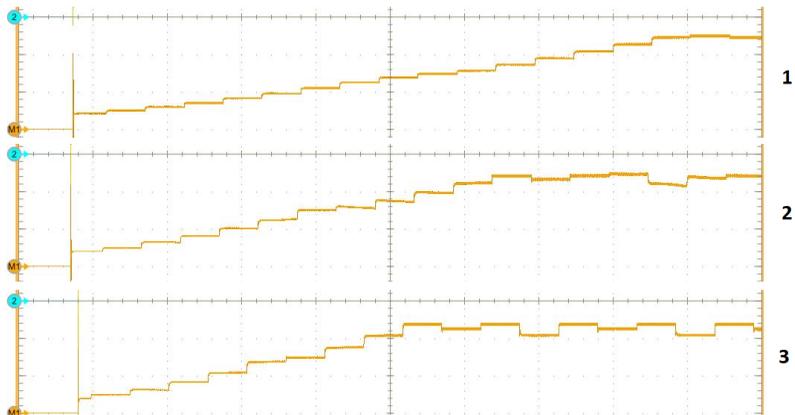
Figura 5.14 – Operação em regime. Escala: Tensão em amarelo – 10 V/div, Corrente em azul – 2 A/div, Potência em laranja – 50 W/div.



Fonte: Autor.

Para esse método, com fins ilustrativos, são apresentados os resultados diferentes obtidos com uma variação de passo de cálculo na velocidade de rastreamento e regime. A Figura 5.15 ilustra a diferença transitória para variação nos passos do código da condutância incremental modificada.

Figura 5.15 – Comparação entre diferentes velocidades de rastreamento.  
1)  $D = 0,025$ ; 2)  $D = 0,030$ ; 3)  $D = 0,040$ ;



Fonte: Autor.

É notável a diferença no tempo de resposta entre os três casos e consequentemente na variação durante a operação em regime entre o caso 2 e 3.

#### 5.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O quadro 5.1 apresenta um compilado dos resultados experimentais obtidos para os três métodos a fim de facilitar a visualização. Vale ressaltar que a eficiência foi calculada em relação ao valor máximo da potência medida em simulação e experimentalmente.

Quadro 5.1 - Apresentação dos resultados obtidos.

	<b>Perturba e Observa</b>	<b>Condutância Incremental</b>	<b>Condutância Incremental Modificado</b>
<b>Irradiância</b>	816 W/m <sup>2</sup>	856 W/m <sup>2</sup>	846 W/m <sup>2</sup>
<b>Temperatura</b>	60 °C	62 °C	61 °C
<b>Fatores de Passo</b>	$D = 0,025$	$K_{inc} = 0,0009375$	$D = 0,025$
<b>Eficiência</b>	96,04 %	95,39 %	97,60 %

Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

Com as análises e resultados obtidos é possível perceber a importância de um sistema de rastreamento ativo do ponto de máxima potência. Como o rendimento de módulos comerciais ainda é bastante baixo é fundamental que as perdas por má operação sejam minimizadas.

Com os resultados obtidos na prática, é possível perceber a influência das perdas de potência no conversor quando colocado em um sistema gerador. O conversor *boost* contudo, apresentou ótimos resultados no que tange a sua região de rastreamento, sendo capaz de rastrear nas condições analisadas.

Os algoritmos avaliados se mostraram capazes de rastrear o ponto de operação desejado nas mais diversas condições. É possível observar as características teóricas e comportamento esperado de cada método. Para a correta avaliação de qual algoritmo pode ser utilizado, é necessário que haja conhecimento das necessidades do projeto. A troca entre velocidade de rastreamento e desempenho em regime é bastante visível nos métodos com passo fixo.

O método Perturba e Observa apresenta bom funcionamento. O algoritmo é de simples implementação e necessita da leitura de tensão e corrente. Por haver necessidade de tomadas de decisões e algumas multiplicações, é recomendado para sistemas onde é necessário um método de custo computacional bastante reduzido.

Os resultados obtidos para o método da condutância incremental são satisfatórios nos aspectos analisados. A velocidade de rastreio é consideravelmente mais alta que o método perturba e observa, mas as pequenas variações em regime reduziram o desempenho. Porém, é um método que além de utilizar as mesmas leituras do anterior, possui a necessidade do cálculo da derivada da potência através de uma margem definida. Esse algoritmo seria indicado para projetos com bom poder computacional.

Por último, o método de condutância incremental modificado apresenta uma boa alternativa para um método com componentes simples, dispensando o leitor de corrente. O algoritmo demanda um custo computacional maior que o método perturba e observa. Apresenta também a variação esperada para os métodos de passo fixo em regime e tem essa característica em função do tamanho do incremento definido.

## 7 REFERÊNCIAS

- [1] REN 21 – Renewables 2016 – Global Status Report. Disponível em <<http://www.ren21.net/wp-content/uploads2016/05/GSR2016-FullReportlowres.pdf>>
- [2] PEREIRA E. B., et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ªed, 2017.
- [3] PINHO J. T., GALDINO M. A., Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 1ªed, 2014.
- [4] M. R. Al-Soeidat, D. D-C. Lu, J. Zhu, “A more accurate analog voltage-based photovoltaic maximum power point tracking technique”, *International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2017.
- [5] M. Tampubolon, et al., “A study and implementation of three-level boost converter with MPPT for PV application”, *International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 – ECCE Asia)*, 2017.
- [6] M. Ferchichi, N. Zaidi, A. Khedher, “Comparative analysis for various control strategies based MPPT technique of photovoltaic system using DC-DC boost converter”, *International Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, 2016.
- [7] A. Taouni, et al., “MPPT design for photovoltaic system using backstepping control with boost converter”, *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2016.
- [8] T. Esmar, P.L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 439-449, June 2007.
- [9] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva., ”Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems”, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol.1, no.3, pp.152162, Sep 2009.
- [10] S. Soltani, M. J. Kouhanjani, "Fuzzy logic type-2 controller design for MPPT in photovoltaic system", *Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, 2017.
- [11] S Messalti, A.G Harrag, A.E Loukriz, "A new neural networks mppt controller for PV Systems", *Renewable Energy Congress (IREC) 2015 6th International*, pp. 1-6, 2015.
- [12] R. Andouisi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, M. Annabi, "Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using mppt buck-boost converter", *International Conference on Systems Man and Cybernetics 2002* , vol. 3, pp. 6, 2002.

- [13] K. Boudaraia, H. Mahmoudi, A. Abbou, M. Hiliat, "Buck converter MPPT control of a photovoltaic system", *International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2016.
- [14] U. K. Renduchintala, et al, "Comparison of MPPT techniques for SEPIC converter based photovoltaic system", *Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*, 2016.
- [15] D. C. Martins, I. Barbi, "Conversores CC-CC Básicos Não Isolados", 4 ed, Florianópolis.
- [16] EPE. Balanço Energético Nacional 2016: Ano Base 2015. Rio de Janeiro, 2016. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. [<http://www.epe.gov.br>]
- [17] Shockley, W.; Queisser, H. J. J. Appl. Phys. 1961, 32, 510.
- [18] Tabachnyk, M., Musser, A. and Rao, A. (2015). "Beyond the Shockley-Queisser limit with singlet exciton fission". SPIE Newsroom.
- [19] R. F. Coelho et al., "Current Sensorless Incremental Conductance Tracking Algorithm", IET Research Journal Papers, 2018.
- [20] EINSTEIN, A., Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen Der Physik*, [s.l.], v. 322, n. 6, p.132-148, 1905.
- [21] BECQUEREL, E. *Memoires sur les effets electriques produits sous l'influence des rayons*.  
Action de la radiation sur les lames mettaliques. *Comptes Rendues* 9, 1839, pp. 561.
- [22] COELHO, R. C., "Estudo dos conversores Buck e Boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

## 8 APÊNDICES

### 8.1 CÓDIGO ALGORITMO PERTURBA E OBSERVA

```

include <main.h>
#fuses NOMCLR INTRC_IO
#use delay(clock = 8000000)

float Dpwm, out;
float in[2];
float Vm;
float Im;
float V_atual, V_anterior = 0;
float I_atual, I_anterior = 0;
float Delta_P, P_atual, P_anterior = 0;
float D = 0.5, step = 0.025;
const float Vconv=1;
const float Iconv=1;

void main(){
    setup_oscillator(OSC_8MHZ);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8);
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN2);
    set_adc_channel(2);
    delay_ms(100);

    while(TRUE){
        set_adc_channel(0);
        for(int i = 0; i <= 10; i++)
        {
            Vm += (read_adc());
        };
        Vm=Vm*0.1;
        in[0] = Vm;

        set_adc_channel(1);
        for(int i = 0; i <= 10; i++)
        {
            Im+=read_adc();
        };
        Im=Im*0.1;
        in[1] = Im

```

```

V_atual=in[0];
I_atual=in[1];

P_atual=V_atual*I_atual;

Delta_P=P_atual - P_anterior;

if(Delta_P>0)
{
  if(V_atual>V_anterior)
  {
    D=D-step;
  }
  else
  {
    D=D+step;
  }
}

else
{
  if(V_atual>V_anterior)
  {
    D=D+step;
  }
  else
  {
    D=D-step;
  }
}

V_anterior=V_atual;
I_anterior=I_atual;
P_anterior=P_atual;

if(D>0.8) D=0.8;
if(D<0.1) D=0.1;

Dpwm=D*200;
set_pwm1_duty((int16)Dpwm);

delay_ms((int16)100);

```

```

    }
}

```

## 8.2 CÓDIGO ALGORITMO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

```

#include <main.h>
#include <math.h>

#fuses NOMCLR INTRC_IO
#use delay(clock = 8000000)

float Tensao_final, Corrente_final;
float V_atual, I_atual;
float V_anterior, I_anterior;
float Delta_V, Delta_I;
float DeltaIV, DeltaPV;
float D = 0.5, Delta_D;
float D_anterior;
float Dpwm;
float calc;
const float Kinc = 0.0009375;
float Vm, Im;

void main(){
    setup_oscillator(OSC_8MHZ);
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8);
    setup_adc_ports(AN0_TO_AN2);
    set_adc_channel(2);
    delay_ms(100);

    while(TRUE){
        set_adc_channel(0);
        for(int i = 0; i <= 10; i++)
        {
            Vm += (read_adc());
        };
        Vm=Vm*0.1;
        Tensao_final = Vm;

        set_adc_channel(1);
        for(int i = 0; i <= 10; i++)
        {

```

```

Im+=read_adc();
};
Im=Im*0.1;
Corrente_final = Im;

V_atual = Tensao_final;
I_atual = Corrente_final;

Delta_V = V_atual - V_anterior;
Delta_I = I_atual - I_anterior;

DeltaIV = Delta_I/Delta_V;
DeltaPV = I_atual + V_atual*(DeltaIV);

Delta_D = Kinc*(float)abs(DeltaPV);

if(Delta_D > 0.05)
{
    Delta_D = 0.05;
}

if ( Delta_V == 0)
{
    if( Delta_I == 0)
    {
        D = D_anterior;
    }
    else
        if(Delta_I > 0)
        {
            D += Delta_D;
        }
        else
        {
            D -= Delta_D;
        }
    }
else
{
    calc = DeltaIV + (I_atual/V_atual);
    if(calc == 0)
    {
        D = D_anterior;
    }
}

```

```

    }
    else
        if (calc > 0)
        {
            D -= Delta_D;
        }
        else
        {
            D += Delta_D;
        }
    }
}

V_anterior = V_atual;
I_anterior = I_atual;

if(D > 0.8)
{
    D = 0.8;
}
if(D < 0.1)
{
    D = 0.1;
}
Dpwm=D*200;
set_pwm1_duty((int16)Dpwm);
delay_ms((int16)100);
}
}

```

### 8.3 CÓDIGO ALGORITMO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL MODIFICADO

```

#include <main.h>
#fuses NOMCLR INTRC_IO
#use delay(clock = 8000000)

float in[2];
float Vm;
float Dpwm;
float V_atual, V_anterior = 0;
float D = 0.5, D_anterior = 0.2, step = 0.025;
float Delta_V=0;

```

```

float k1 = 0, k2 =0, k3=0;
float G =2 , G_anterior = 1.25;
float K = 0, Kk = 0;
float k4 = 0, k5=0;

void main()
{
  setup_oscillator(OSC_8MHZ);
  setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8);
  setup_adc_ports(AN0_to_AN3);
  set_adc_channel(0);
  delay_ms(100);

  while(TRUE)
  {

    set_adc_channel(0);
    for(int i = 0; i <= 10; i++)
    {
      Vm += (read_adc());
    };
    Vm=Vm*0.1;
    in[0] = Vm;

V_atual=in[0];
G = 1/(1-D);
Delta_V=V_atual - V_anterior;

if (Delta_V == 0){
  D = D_anterior + step;
}
else{
  K = G*G;
  Kk = G_anterior*G_anterior;
  k1 = K*V_atual;
  k4 = Kk-K;
  k5 = Kk*Delta_V;
  k2 = V_atual*(k4/k5);
  k3 = k1*(2-k2);
  if (k3 > 0){
    D -= step;
  }
  else{

```

```
    D += step;
  }
}

V_anterior=V_atual;
G_anterior = G;
D_anterior = D;

if(D>0.8) D=0.8;
if(D<0.1) D=0.1;

Dpwm=D*200;
set_pwm1_duty((int16)Dpwm);

delay_ms((int16)100);
}
}
```

