

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
BACHARELADO ENGENHARIA ELETRÔNICA

LUCAS DE ALMEIDA BLESSA

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE  
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

CAMPO MOURÃO

2018

LUCAS DE ALMEIDA BLESSA

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE EXTRAÇÃO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE  
PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 (TCC2), do curso superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Campo Mourão como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Regis Monteiro  
Co-orientador: Prof. Me. Reginaldo Nunes de Souza

CAMPO MOURÃO

2018

---

**TERMO DE APROVAÇÃO**  
**DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO**  
Estudo de Técnicas de Extração de Máxima Potência de Painéis  
Fotovoltaicos  
por  
Lucas de Almeida Blessa

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 18 de Junho de 2018 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O Candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Louisie Aristides Staniszewski  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Gilson Junior Schiavon  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. André Luiz Regis Monteiro  
(UTFPR)  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Durante etapas de nossas vidas existem pessoas que se apresentam como partes importantes de nossas jornadas e é impossível esquece-las, também é difícil pensar em uma forma de expressar o quanto foi importante cruzar cada caminho e aproveitar cada lição e cada momento compartilhado.

Deixo aqui dito, nesta que posso considerar hoje minha mais importante conquista, que não seria possível chegar a tal mérito só. Aos pais que tanto exigiram e incentivaram, aos familiares que sempre acompanharam e deram suporte, aos tantos mentores os quais tive o prazer e honra ao ser aprendiz, aos muitos colegas de boas conversas e alento a jornada, os amigos de muito antes, os que se tornaram desde muito cedo irmãos e aqueles que já dividiam o seio da família e tantos outros abrigos.

A todos vocês o meu muito obrigado, é com muito apreço que lhes digo que vocês são parte disso. Que Deus os abençoe, e que a vida nos reserve prosperidade, vigor e conquistas ainda maiores.

## RESUMO

BLESSA, Lucas de Almeida. **Estudo de Técnicas de Extração de Máxima Potência de Painéis Fotovoltaicos**. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2018.

O processo de industrialização iniciado há alguns séculos trouxe a forte dependência de combustíveis fósseis muitas vezes ignorando o fator ambiental. Como alternativa à crescente demanda aparecem as fontes renováveis, que representaram nos últimos vinte anos um aumento considerável na matriz energética. Dentre as diversas fontes classificadas dentro desse escopo, a solar fotovoltaica é destaque a nível mundial. Em contrapartida, a simples implantação de sistemas fotovoltaicos não oferece a credibilidade operacional desejada, devido à baixa eficiência de conversão de energia solar em elétrica (18%); além disso, as condições adversas do clima tendem a influenciar negativamente, reduzindo a oferta de energia. Para maximizar a energia gerada encontram-se os métodos de rastreamento de máxima potência (MPPT), que aliados a eletrônica de potência resultam em sistemas de maior confiabilidade e eficiência, reduzindo o tempo de retorno do investimento. Dentre os métodos de MPPT, o da Perturbação e Observação (P&O) e o da Condutância Incremental (IC) se destacam por independem do tipo de painel acoplado e possuir alto fator de rastreamento (FR). Frente a isto, implementou-se no ambiente MatLab/Simulink® um modelo de sistema fotovoltaico em espaço de estados composto por um painel fotovoltaico (PV), conversor eletrônico de potência e métodos IC e P&O. Ambos os algoritmos foram testados frente às variações de irradiação, sendo posteriormente comparados aos resultados do uso da Razão Cíclica Fixa ( $D_{cte}$ ). Foi obtido FR de aproximadamente 80% para razão cíclica estática do conversor, enquanto os demais performaram em torno de 90%.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica, MPPT, Condutância Incremental, Perturbação e Observação.

## ABSTRACT

BLESSA, Lucas de Almeida. **Study of Maximum Power Extraction Techniques of Photovoltaic Panels**. 44 p. Term Paper – Electronic Engineering. Federal University of Technology - Paraná. Campo Mourão, 2018.

The industrialization process initiated a few centuries ago has brought great dependence on fossil fuels often ignoring the environmental factor. An alternative to the growing energetical demand are the renewable sources, which in the last twenty years have represented a considerable increase in the energetic matrix. Among the many sources classified within this scope, solar photovoltaic (PV) is highlighted worldwide. On the other hand, the simple implementation of PV systems does not offer the desired operational credibility due to the low efficiency at conversion of solar to electrical power (18%); In addition, adverse weather conditions tend to have negative influence, reducing the supply of energy. To maximize the generated energy the Maximum Power Point Tracking (MPPT) methods are used with power electronics, which together result in systems of greater reliability and efficiency, reducing the payback time. Among the MPPT methods, the Perturbation and Observation (P&O) and Incremental Conductance (IC) stand out because of its non-dependence of the coupled panel type and high Tracking Factor (Fator de Rastreamento - FR). Thus, a space-state model of a photovoltaic system, composed of a PV module, a power electronic converter and the methods IC and P&O, was implemented in MatLab/Simulink<sup>®</sup>. Both algorithms were tested for irradiance variation and compared with the Fixe Duty Cycle ( $D_{cte}$ ) result. FR was approximately 80% for the fixed cyclic ratio, while the other MPPT methods perform around 90%.

**Keywords:** Renewable Sources, MPPT, Incremental Conductance, Perturb and Observe.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva característica de tensão por corrente. ....	17
Figura 2 - Curva característica de tensão por potência. ....	18
Figura 3 - Sistema gerador fotovoltaico controlado por MPPT. ....	19
Figura 4 - Sistema gerador fotovoltaico com um estágio de conversão. ....	19
Figura 5 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica. ....	20
Figura 6 - Modelos de associações de painéis e conversores com a rede elétrica. ....	21
Figura 7 - Intersecção entre as curvas de geração e carga. ....	22
Figura 8 - Curva de tensão em função da potência em uma <i>String</i> . ....	26
Figura 9 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica. ....	27
Figura 10 - Arranjo fotovoltaico implementado no Simulink. ....	30
Figura 11 - Estrutura do conversor <i>BOOST</i> . ....	31
Figura 12 - Regiões de operação do conversor <i>BOOST</i> . ....	34
Figura 13 - Modelo em espaço de estados do conversor <i>BOOST</i> . ....	34
Figura 14 - Fluxograma do método P&O. ....	36
Figura 15 - Modelo em espaço de estados do método P&O. ....	36
Figura 16 - Fluxograma do método IC. ....	38
Figura 17 - Modelo em espaço de estados do método IC. ....	38
Figura 18 - Curvas de tensão por corrente padrão de <i>datasheet</i> . ....	39
Figura 19 - Curvas de tensão por corrente padrão geradas. ....	40
Figura 20 - Curva de geração e região de operação para o conversor <i>BOOST</i> . ....	40
Figura 21 - Arranjo elaborado no Simulink para realização de simulações. ....	41
Figura 22 - Intersecção entre as curvas de geração e carga a $600 \text{ W/m}^2$ , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	42
Figura 23 - Comparativo entre potência gerada na atuação da Razão Cíclica Fixa e máxima. ....	43
Figura 24 - Comparativo entre potência gerada na atuação do método P&O e a máxima. ....	43
Figura 25 - Comparativo entre potência gerada na atuação do método IC e a máxima. ....	44
Figura 26 - Comparativo de atuação das razões cíclicas. ....	44
Figura 27 - Fator de rastreamento dos métodos avaliados. ....	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades do painel KC200GT padrão de <i>datasheet</i> .....	29
Quadro 2 - Parâmetros para projeto do conversor <i>BOOST</i> . ....	32



## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul ( <i>South Africa</i> )
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSD	Comissão de Desenvolvimento Sustentável ( <i>Commission on Sustainable Development</i> )
FR	Fator de Rastreamento
IA	Inteligência Artificial
IC	Condutância Incremental ( <i>Incremental Conductance</i> )
MCC	Modo de Condução Contínua
MPP	Ponto de Máxima Potência ( <i>Maximum Power Point</i> )
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência ( <i>Maximum Power Point Tracking</i> )
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ONU	Organização das Nações Unidas
P&O	Perturbe e Observe ( <i>Perturb and Observe</i> )
PI	Proporcional Integral
PIB	Produto Interno Bruto
PV	Painel Fotovoltaico
STC	Condições de Teste Padrão ( <i>Standard Test Conditions</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta I_L$	Módulo da Variação de Corrente no Indutor
$\Delta V_c$	Módulo da Variação de Tensão no Capacitor
$D_c$	Passo de Incremento dos Métodos MPPT
$D_{cte}$	Razão Cíclica Fixa
$E_G$	Energia de Banda Proibida
$I_L$	Corrente no Indutor
$I_{mpp}$	Corrente no Ponto de Máxima Potência
$I_{ph}$	Fotocorrente
$I_r$	Corrente de Saturação Reversa
$I_{rr}$	Corrente de Saturação Reversa de Referência
$I_{sc}$	Corrente de Curto-Circuito
$P_i$	Potência de Entrada do Conversor
$P_{max}$	Potência Máxima
$P_o$	Potência de Saída do Conversor
$P_{sun}$	Intensidade de Radiação Solar
$R_p$	Resistência Paralelo
$R_s$	Resistência Série
$T_e$	Tempo de Estabelecimento
$T_r$	Temperatura de Referência
$V_c$	Tensão no Capacitor
$V_{cte}$	Tensão Constante
$V_i$	Tensão de Entrada do Conversor
$V_{mpp}$	Tensão no Ponto de Máxima Potência
$V_o$	Tensão de Saída do Conversor
$V_{oc}$	Tensão de Circuito Aberto
$f_s$	Frequência de Chaveamento do Conversor
$\theta_R$	Componente Angular da Resistência Equivalente do Sistema
$^{\circ}C$	Grau Celsius
$\Omega$	Ohm

$A$	Ampère
$C$	Capacitor
$D$	Razão Cíclica ( <i>Duty Cycle</i> )
$F$	Farad
$G$	Ganho Estático
$H$	Henry
$Hz$	Hertz
$I$	Corrente
$K$	Kelvin
$L$	Indutor
$R$	Resistência
$T$	Temperatura
$V$	Volt
$V$	Tensão
$W$	Watt
$k$	Constante de Boltzmann
$q$	Carga do Elétron
$\alpha$	Coefficiente de Temperatura
$\eta$	Fator de Qualidade

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. OBJETIVOS .....	15
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	15
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	15
1.2. JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1. MODELAGEM DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO .....	18
<b>2.1.1. Painel Fotovoltaico (PV)</b> .....	20
<b>2.1.2. Conversor de Potência</b> .....	21
<b>2.1.3. Capacitor de Desacoplamento</b> .....	23
2.2. OPERAÇÃO E MÉTODOS DE MPPT .....	23
<b>2.2.1. Métodos Convencionais</b> .....	24
<b>2.2.2. Métodos Inteligentes</b> .....	25
2.3. EFEITO DA ASSOCIAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS .....	25
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	27
3.1. MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA E ESTRUTURA DO PV .....	27
3.2. PROJETO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA .....	31
3.3. MODELO DOS ALGORITMOS MPPT .....	35
<b>3.3.1. Razão Cíclica Fixa (Dcte)</b> .....	35
<b>3.3.2. Perturbação e Observação (P&amp;O)</b> .....	35
<b>3.3.3. Condutância Incremental (IC)</b> .....	37
<b>4. RESULTADOS</b> .....	39
4.1. COMPORTAMENTO E OPERAÇÃO.....	39
4.2. MÉTODOS MPPT E TESTES .....	41
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	46
<b>6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	47
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48
<b>ANEXO I</b> .....	50

## 1. INTRODUÇÃO

A oferta de energia encontra-se no pilar da sociedade moderna, onde a disponibilidade de um abastecimento energético confiável é imprescindível para estabilidade de uma nação. Mais evidente ainda se considerada sua importância com relação à parâmetros industriais, em que o simples manutenção ou a capacidade de expansão desse potencial vão ditar qual o ritmo de crescimento do setor. Isso fica claro nos subseqüentes acontecimentos que historicamente converteram a sociedade rural pobre, em uma urbana de melhor poder aquisitivo, proporcionando às nações ocidentais o nível de industrialização e padrão de vida elevados atuais (HINRICHS et al., 2010).

Atualmente as nações ditas, segundo Furtado, como de segundo e terceiro mundo em caráter emergente, protagonizam um movimento similar, onde as etapas de mecanização para substituição de algumas tarefas manuais e o aumento da densidade populacional tendem a requisitar maior suprimento de energia, conforme proposto por Hinrichs et al. (2010). Limitando a avaliação à China, Índia e Brasil – as mais notáveis economias dentre muitas deste grupo – perceber-se que fazem parte de iniciativas ambientais como protocolo de Kyoto e acordo de Paris, além de compactuar com os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) e fazerem parte da Comissão de Desenvolvimento Sustentável (*Commission on Sustainable Development* – CSD) da Organização das Nações Unidas (ONU). Estes tratados visam, dentre outros fatores, combater o aumento de temperatura global e incentivar o uso de alternativas renováveis de geração energia (KOLLING et al.; ONUBR<sup>1</sup>; ONUBR, 2015<sup>2</sup>).

Dentro das economias destes três participantes do BRICS (Sigla para Brasil, Rússia, China, Índia, África do Sul – *South Africa*) tem-se grandes expectativas quanto ao aumento de seu Produto Interno Bruto (PIB), porém, atrelado a isso, uma alta estimada de mais de 70% em seu consumo energético para os próximos 12 anos. A China protagonizou um crescimento extraordinário na primeira década do século XXI, mesmo com cerca de 90% da energia que consome sendo provinda de combustíveis fósseis. Com as reservas de minerais ficando cada vez mais escassas e a demanda crescendo exponencialmente, presenciou-se a evolução limitada ao potencial energético, obrigando assim a busca de alternativas mais viáveis como as renováveis (HINRICHS et al., 2010). Já na Índia, de acordo com Sumathi et al. (2015), a maior

---

<sup>1</sup>17 Objetivos para Transformar Nosso Mundo. **ONUBR: Nações Unidas no Brasil.**

<sup>2</sup>Acordo de Paris Sobre o Clima. **ONUBR: Nações Unidas no Brasil**, Paris, 11 dez. 2015.

parte da demanda energética é suprida por carvão (56%), com apenas uma pequena parcela (5%) do potencial correspondente a fontes renováveis. É esperado que nos próximos anos esse país deva explorar todas as possíveis alternativas de geração, devido também ao fato de fontes fósseis estarem se tornando escassas e sua utilização caindo em desuso.

Mesmo comparada com as variadas outras fontes energéticas renováveis presentes no mercado a fotovoltaica ainda assim tende a compor grande parcela, isso pelo fato da conversão de energia solar em elétrica ser considerada limpa e livre de emissões. Outros pontos favoráveis que interessam muito são a vida útil média e a confiabilidade (BRITO et al., 2010). Em contrapartida a isso, alguns fatores com relação ao comportamento das células fotovoltaicas devem ser considerados. Segundo Villalva (2012), as condições climáticas e de instalação de painéis influenciam diretamente na potência energética gerada, além destes, a eficiência de uma célula comercializável padrão atinge um máximo de 18%.

Considerando que a eficiência na conversão de energia é baixa, maximizar a eficiência é algo desejado e perfeitamente possível com a utilização de técnicas de rastreamento do máximo ponto de potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT). Dentre os diversos métodos conhecidos para encontrar o máximo ponto de potência (*Maximum Power Point* - MPP) de um painel fotovoltaico (PV), aqueles que independem de suas características de construção monitorando apenas parâmetros externos se destacam. Além disso, a praticidade de implementação e alta eficiência obtida são determinantes, exemplos destas características são Perturbação e Observação (P&O) e Condutância Incremental (*Incremental Conductance* - IC).

É conhecido que cada PV possui apenas um ponto de máximo e que, dentre outras características intrínsecas, tem a potência por ele gerada variando principalmente de acordo com intensidade de irradiação solar e temperatura do ambiente. Isso torna o uso de simulações imprescindível para efetiva análise do sistema fotovoltaico e escolha do método de controle que permitirá a este arranjo fornecer mais acertadamente toda a potência instantânea a qual tem a capacidade de gerar. Além disso, este procedimento permite a verificação de parâmetros necessários para execução do método, como o número de sensores utilizado e a complexidade do MPPT em questão (BRITO, 2013).

Desta forma, este trabalho apresentará modelo e análise dos métodos IC e P&O. Estes são métodos convencionais que monitoram apenas corrente e tensão de saída do PV, tem o algoritmo que rege o rastreamento de máximo simplificado e ainda assim resultam em altos níveis de eficiência. No decorrer do trabalho ambos os modelos serão implementados em ambiente MatLab/Simulink<sup>®</sup> e dados da eficiência dos métodos extraídos para comparação com o método da Razão Cíclica Fixa ( $D_{cte}$ ).

## 1.1. OBJETIVOS

O campo para elaboração de pesquisa dentro das energias renováveis é amplo, portanto, em prol do melhor esclarecimento da área de interesse envolvida e o foco deste projeto, definem-se seus objetivos.

### 1.1.1. Objetivo Geral

Estudo das estruturas de sistemas fotovoltaicos em face das diversas aplicações palpáveis dentro do que a literatura abrange, sendo assim, as características dos elementos componentes e os fatores que delimitaram tais especificidades serão avaliadas de maneira a permitir resultados comparáveis.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Citados abaixo encontram-se pormenorizados, os objetivos específicos.

- Estudar as topologias básicas de sistemas fotovoltaicos e seus principais estágios;
- Pesquisar modelos de célula e painel fotovoltaico;
- Definir parâmetros e estrutura para o conversor de potência;
- Estudar os métodos de controle mais usuais para rastreamento de máximo;
- Modelar os elementos do sistema ambiente MatLab/Simulink®;
- Avaliar efetividade dos métodos baseado em seu comportamento sob condições experimentais.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

O Brasil possui grande potencial para crescimento e expansão do uso de fontes renováveis. Com o clima caracteristicamente tropical já era esperada que a geração fotovoltaica fosse a mais adequada ao nosso território. Os estudos que convergiram no Atlas Solarimétrico do Brasil (2000) indicavam dados de irradiação solar por grandes períodos do dia em uma porção considerável de nosso território – principalmente mais ao norte da região sul, nas regiões sudeste e nordeste, além de boa parte do centro-oeste do país. O fruto mais produtivo de

pesquisas e do acurado poder de geração nacional é a usina fotovoltaica de Pirapora, com expectativa de finalização das obras de expansão no primeiro semestre de 2018, assumindo o título de maior usina solar da América Latina (ABSOLAR<sup>3</sup>).

Como categoricamente a geração fotovoltaica necessita de grande extensão territorial e altos índices de irradiação solar, além de que os fatores que levam a instalação de um parque como este visam lucro, é preciso entender que a maximização do potencial deve ser elemento presente. Sendo assim as pesquisas voltadas ao desenvolvimento de técnicas de rastreamento de máximo ficam viabilizadas, sendo essenciais compondo um campo que deve se expandir nas próximas décadas.

---

<sup>3</sup>Pirapora, a Maior Usina de Energia Solar da América Latina. **Agence France Presse**. ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, São Paulo, 10 nov. 2017.

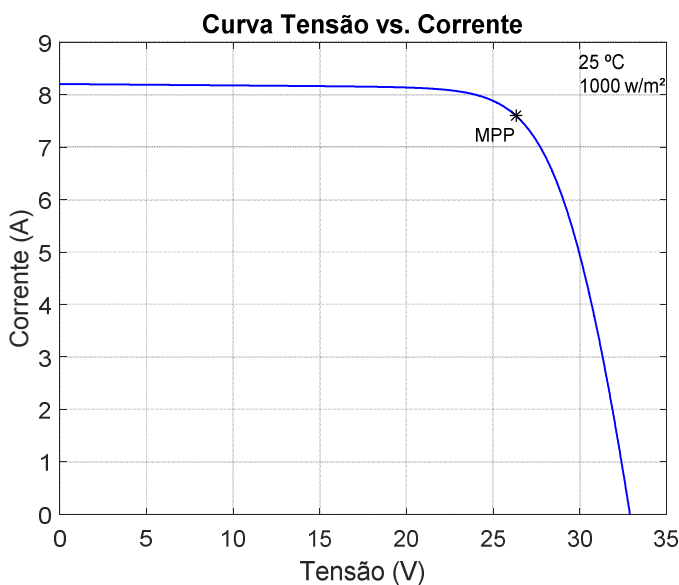


## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme Brito (2013), os elementos fotovoltaicos possuem princípio físico de caráter elétrico e por se tratarem de unidades de conversão de energia podem ser avaliados de acordo com suas grandezas resultantes, que são comumente restritas a tensão e corrente. Estas quando associadas, levando em consideração os parâmetros de construção, revelam uma evidente relação de não linearidade, melhor interpretada na curva padrão de tensão por corrente, disposta na Figura 1, e tensão por potência, conforme Figura 2, onde está a amostra também o MPP.

Para atendimento às necessidades de fornecimento de energia, utilizando como exemplo a fotovoltaica, é comum a associação de painéis em série (Também chamada de *String*) e paralelo formando um arranjo de inúmeras unidades (Conhecido como *Array*) com o objetivo de atingir o potencial requisitado. Devido à complexidade e capacidade deste tipo de associação é indispensável a utilização de um método MPPT, que por sua vez necessita ser incorporado com ao menos uma carga variável de aspecto controlado. A resultante é um sistema fotovoltaico, que terá seu potencial elétrico destinado a conexão direta com a rede elétrica ou alimentação de sistemas independentes (CASARO; MARTINS, 2008; BRITO, 2013).

Figura 1 - Curva característica de tensão por corrente.

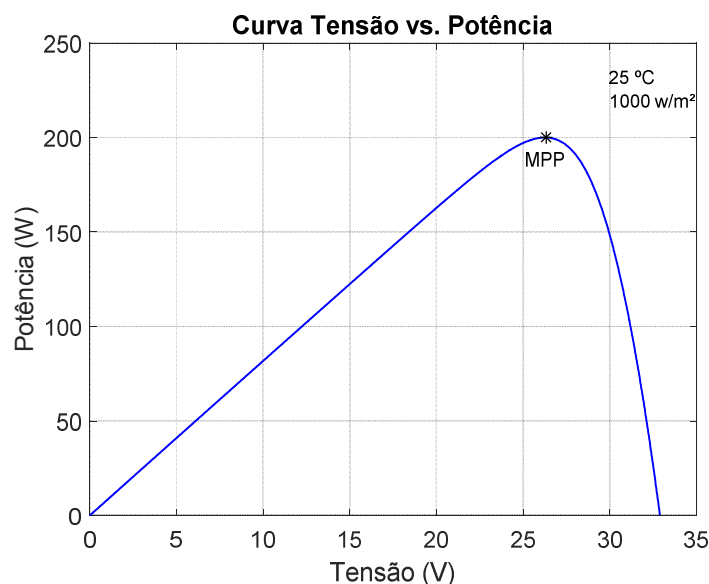


Fonte: Autoria própria.

A utilização de um método de MPPT, que nada mais é do que uma metodologia de controle, requer processamento eletrônico. Portanto, pode-se utilizar um programa simulador

para execução de testes e realização de ajustes no sistema, permitindo ainda uma melhor interpretação de seu comportamento.

Figura 2 - Curva característica de tensão por potência.



Fonte: Autoria própria.

Já no desenvolvimento do modelo simulador é necessário um modelo computacional de todo o arranjo fotovoltaico, que de maneira precisa deve variar de acordo com as características climáticas de forma análoga ao painel referência (CASARO; MARTINS, 2008).

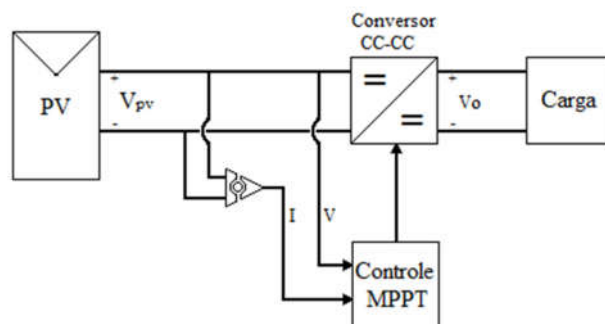
## 2.1. MODELAGEM DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO

Para a estrutura de um sistema fotovoltaico cada mínimo fator tem grande importância na composição do modelo final, principalmente quando se trata de um sistema simulado, modelado de acordo com os princípios de funcionamento de cada elemento. Sendo dentre estes os mais importantes a potência projetada, que implica na associação ou não de painéis, o método MPPT de escolha, que determina parâmetros a serem monitorados e por fim o modo de conexão do sistema, sendo isolado (*stand-alone*) ou conectado à rede elétrica (*grid-connected*).

Nos sistemas *stand-alone*, pela natureza das cargas a serem conectadas, é necessária uma saída com característica de fonte de tensão. Isso implica na necessidade de um estágio inversor para conversão da energia gerada, transformando-a assim em parâmetros de tensão e potência utilizáveis coerentes com a aplicação (BRITO, 2013).

Voltando esta análise para a parcela primária do sistema (Composta apenas pelo PV, pelo método de controle e pela carga de aspecto variável) e considerando a alimentação de uma carga básica pode-se entender mais facilmente seu funcionamento. A Figura 3 representa o diagrama de operação discutido, mostrando um método genérico que utiliza sensores de tensão e corrente para avaliação constante do PV, exercendo o estágio conversor o papel de atuador controlado (DRIR; BARAZANE; LOUDINI, 2014).

Figura 3 - Sistema gerador fotovoltaico controlado por MPPT.

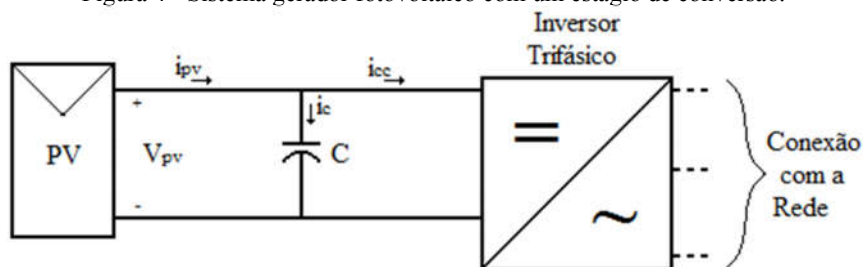


Fonte: Baseado em Drir et al., 2014.

Já em sistemas *grid-connected*, como mencionado por Brito (2013), a saída deve ser do tipo fonte de corrente, que possui um projeto um pouco mais complicado, bem como um controle mais complexo. Uma vantagem é a possibilidade de conexão de cargas prioritárias na saída do estágio inversor, antes de sua conexão com a rede. Este tipo de sistema ainda exige um atuador que trabalha independentemente do método e dos estágios de conversão para detectar interrupção da rede elétrica, cessando a injeção de energia e fazendo a reconexão após o fim do ilhamento.

Como o uso de sistemas fotovoltaicos varia, existem aplicações que permitem topologias com apenas um estágio de conversão CC-CA, demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema gerador fotovoltaico com um estágio de conversão.



Fonte: Baseado em Azevedo et al., 2008.

Isso remete a um aumento em sua eficiência. Neste caso um capacitor de desacoplamento é utilizado, tendo sua capacitância ajustada ao projeto para garantir um controle efetivo e injeção estável de potência na rede (AZEVEDO et al., 2008).

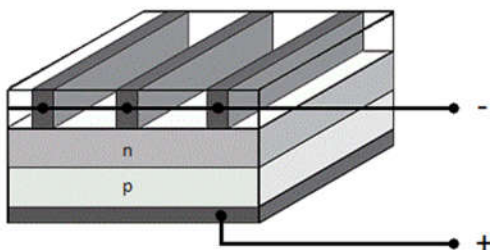
Em ambas as situações as variações na constituição do sistema devem ser avaliadas e um modelo equivalente elaborado. A partir deste ponto cabe apenas o estudo da operação do sistema e escolha do método que melhor se enquadre nas especificações, além claro, de sua representação no devido ambiente de simulação para que sejam consideradas as variáveis de cada elemento componente.

### 2.1.1. Painel Fotovoltaico (PV)

Comercialmente é usual encontrar painéis fotovoltaicos (também conhecido como módulo ou placa) a uma potência considerável, no entanto, a sua menor unidade constituinte é a célula fotovoltaica, que isolada possui valores de tensão ínfimos, e por isso é associada em arranjos em série e paralelo para construir um módulo que gere consideráveis valores de energia.

Em face da análise da célula fotovoltaica, percebe-se que essa pode ser descrita como o princípio físico de uma junção p-n, com conectores metálicos em ambas as extremidades. O modelo da Figura 5 permite observar uma característica de construção padrão. Uma superfície limpa com contatos metálicos de fina espessura, para incidência de maior radiação, fornece conexão ao terminal negativo da célula. Já uma base metálica, geralmente de alumínio ou prata, compõe a referência positiva de tensão (VILLALVA, 2012).

Figura 5 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Baseado em Villalva, 2012.

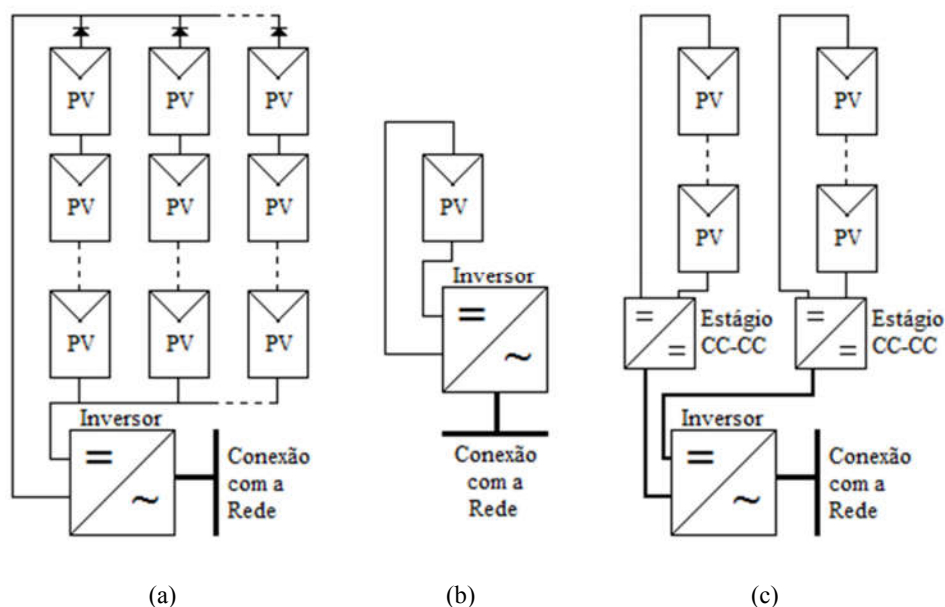
Ainda segundo Villalva (2012), esta estrutura se faz mais precisa ao considerar as propriedades específicas dos elementos utilizados, o que envolve também a disposição e

dimensão dos materiais. Para que seja atingida a máxima potência, painéis e células devem ter a melhor forma para receber maior quantidade de luz incidente e, por consequência, capacidade de atingir a geração máxima de energia elétrica proposta.

### 2.1.2. Conversor de Potência

Na topologia de sistemas de geração fotovoltaicos há diversas associações com elementos conversores de energia. Existem esquemas que consideram apenas um inversor (Conversor CC-CA) para um *array*, o que gera perda de energia pela inserção dos diodos em cada *string* que se associa em paralelo ao tentar evitar o fluxo de energia entre os ramos. Perde-se também eficiência devido à má distribuição de potência entre os mesmos e pela centralização do algoritmo MPPT, que não garante a máxima potência gerada em cada ramo, exemplificado na Figura 6.a. Quando avaliada a melhor hipótese, temos um conversor CC-CA associado a cada painel com um método individual para processamento da sua potência, no entanto isso seria muito caro e inconcebível, vide Figura 6.b. Uma opção mais viável está no uso de um inversor com múltiplos ramos, onde cada ramo tem seu conversor CC-CC dedicado com seu próprio algoritmo MPPT, com cada uma das saídas conectadas a este único inversor, conforme Figura 6.c. Fica melhor viabilizada ainda a expansão, onde para o aumento do sistema é necessário simplesmente inserir uma nova *string* com seus respectivos conversor e controlador.

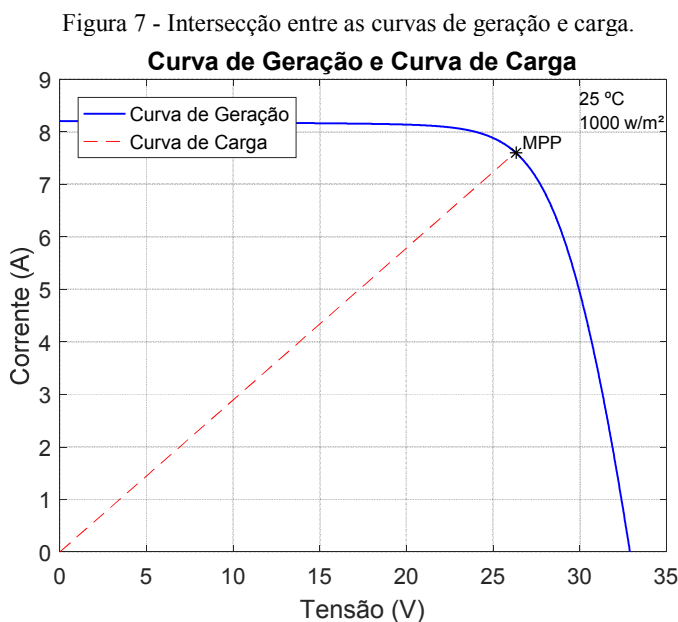
Figura 6 - Modelos de associações de painéis e conversores com a rede elétrica.



Fonte: Baseado em Brito, 2013.

Fica então evidente que para efetiva aplicação de um método MPPT é imprescindível a existência de um conversor, que pode ser tanto CC-CC, quanto CC-CA, sendo que este último geralmente implica em condições de projeto e teoria mais complexos. Devido a tal complexidade é mais comum encontrar na literatura (BRITO et al., 2010; BRITO et al., 2012; BRITO, 2013; DRIR et al., 2014; AZEVEDO et al., 2008; SHI et al., 2013; BENDIB et al., 2015; COELHO et al., 2009) análises contendo apenas conversores CC-CC, onde dentre as mais diversificadas topologias se destacam *BUCK (Step-up)* e *BOOST (Step-down)*, devido a simplicidade de suas estruturas e praticidade em sua utilização (BRITO, 2013).

Estes por sua vez, devem garantir ao método a amplitude de operação necessária para que mediante as condições climáticas diárias seja possível extrair do painel (ou arranjo) a máxima potência momentânea. Uma maneira de determinar isso se dá por meio da avaliação das características de projeto do conversor e na verificação de sua curva de carga, como pode ser exemplificado na Figura 7. Mesmo que não haja linearidade das condições de irradiação e temperatura, a corrente e tensão gerados podem ser representados em uma curva de geração delimitada em uma área que é restrita pelos parâmetros físicos do PV. Já a curva da carga varia linearmente de acordo com a razão do comutador, permitindo a extração do máximo sempre que intercepte o MPP (COELHO et al., 2009).



Fonte: Autoria própria.

Para conceder ao projetista avaliações tão detalhadas e pontuais exigidas para uma boa operação desta unidade conversora, que terá como função a execução do método MPPT de

escolha, é necessária sua modelagem em ambiente de simulação junto as demais unidades básicas de um sistema fotovoltaico. Desta forma, pode-se determinar as características estruturais e avaliar maiores informações referentes ao range de operação e perdas deste que foi o método de controle escolhido.

### **2.1.3. Capacitor de Desacoplamento**

O capacitor de desacoplamento é um elemento necessário em sistemas fotovoltaicos para garantir uma boa referência para o método de controle, uma vez que a tensão de saída do PV possui ondulações. Isso tende a distanciar o ponto de operação do MPP e dependendo amplitude desta oscilação comprometer a eficiência do método MPPT.

Em configurações de sistemas onde existem dois estágios conversores, o elo CC realiza o desacoplamento de potência de maneira ativa. Nesta topologia há ainda uma maior independência entre os estágios devido ao fato de que ambos podem operar com base nas flutuações de tensão do mesmo capacitor, o que permite que o controle seja ajustado à máxima eficiência (BRITO, 2013).

Ainda conforme Brito (2013), em abordagens com apenas um estágio, o capacitor deve ser colocado em paralelo com o painel, realizando um desacoplamento de potência passivo. A capacitância do componente neste caso, segundo Azevedo et al. (2008), precisa de um módulo mais elevado se comparado a abordagem anterior, ajustado a característica do sistema para que não injete uma potência pulsante na rede e também que evite a transmissão das ondulações da potência gerada no PV.

## **2.2. OPERAÇÃO E MÉTODOS DE MPPT**

É enfática a dependência de um modelo em simulação para certificação de detalhes mais complexos presentes na etapa de projeto de um sistema fotovoltaico, isso devido ao número de variáveis com os quais se trabalha. Para o PV basta apenas seguir parâmetros de geração em concordância com módulo físico, já para o conversor cabe a parcela mais complexa, que é execução ótima do método de controle, minimizando perdas e mantendo alta eficiência na conversão.

Em se tratando da eficiência desejada percebe-se que ela flutua dentro de limites aceitáveis, porém, a máxima é sempre o alvo. Como descrito por Brito et al. (2010), isso pode

ser determinado pelo fator de rastreamento (FR), que se trata do percentual de energia disponível que foi convertida pelo sistema.

Com relação ao método MPPT, como condição geral a sua aplicação vale ressaltar a necessidade da implementação de uma carga de aspecto variável. Para isso é crucial que o conversor possa de maneira eficaz variar sua impedância com base na razão cíclica (*Duty-Cycle* - D) de seu comutador, isso determinará a atuação da curva de carga e região de operação do método (BRITO et al., 2012; COELHO et al., 2009).

Além do supracitado, há classificações dentre os métodos, o que pode auxiliar na compreensão de suas resultantes ou até mesmo na escolha do mais indicado à aplicação. Segundo Bendib et al. (2015), subdividem-se em diretos e indiretos. Nos classificados como sendo indiretos é preciso um conhecimento prévio das características do PV, podendo também ser baseados em relações matemáticas que não abrangem toda a aleatoriedade assumida pelo comportamento em resposta ao clima. Já métodos diretos tem empregabilidade sob qualquer condição meteorológica com a utilização de variáveis de fácil monitoramento e obtenção. Como fator adicional a sua classificação é possível ainda designar os métodos como sendo convencionais, que são a grande maioria, ou inteligentes, que são baseados em inteligência artificial (IA).

### 2.2.1. Métodos Convencionais

Não há um modelo perfeito em metodologia para MPPT, no entanto é possível indicar a acurácia e principais características de cada abordagem. Amplos estudos tendem a mostrar a correlação entre os mais variados métodos de rastreamento analisando seus parâmetros, bem como a gama de dados que necessitam para operação.

Conforme Brito et al. (2012), os principais métodos de rastreamento são o da Razão Cíclica Fixa ( $D_{cte}$ ), da Tensão Constante ( $V_{cte}$ ), da Perturbação e Observação (*Perturb & Observe* - P&O), da Condutância Incremental (*Incremental Conductance* - IC), Beta ( $\beta$ ), da Oscilação do Sistema, Correlação de Ripple e da Temperatura. O mesmo autor complementa posteriormente (2013) citando ainda métodos da Tensão de Circuito Aberto, de Curto-Circuito por Pulsos e *Hill Climbing*, estes apenas para o que se entende como métodos convencionais. Dentre tantas abordagens para métodos MPPT, grande maioria dos pesquisadores consultados definem como os mais usuais o da IC e o P&O, quase sempre os comparando com  $D_{cte}$ .

O P&O consiste em operação periódica incrementando ou decrementando tensão de referência e comparando a potência obtida na análise com a do ciclo de operação anterior. Caso



haja aumento da potência pela variação da tensão o sistema de controle varia o ponto de operação nesta direção; caso haja redução na potência o sistema de controle muda o ponto de operação no sentido contrário.

Já o método da IC é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do painel solar é nula no MPP, positiva a esquerda e negativa a direita. Sua busca pelo ponto de máxima potência é igual à do método da Perturbação e Observação, no entanto, ao encontrar o ponto onde a potência é máxima as perturbações são cessadas até que hajam alterações na corrente produzida pelo painel.

Contudo, o método  $D_{cte}$  não é adaptativo, dispensando sinais de *feedback*. Este tem o ponto de operação fixado uma única vez no MPP do sistema, baseado na razão cíclica de projeto do conversor eletrônico de potência (BRITO, 2013).

### 2.2.2. Métodos Inteligentes

Além dos usuais métodos convencionais é comum encontrar proposições de associação entre estes e, também de melhoramentos nestas estruturas. Em Brito et al. (2012) é proposto um melhoramento para método P&O, alterando o módulo de seu passo baseado no quão distante o ponto de operação se encontra do MPP. Além deste, é sugerido também o uso de um controlador Proporcional Integral (PI) para minimização do erro entre as suas condutâncias no método da Condutância Incremental. Já para Yu et al. (2002) e Faranda et al. (2008), citados por Brito (2013), uma melhoria pode ser alcançada no método IC pela associação com o método da tensão constante operando em radiações que são menores que 30% da nominal, isso resultaria numa maior eficácia na extração de potência do PV.

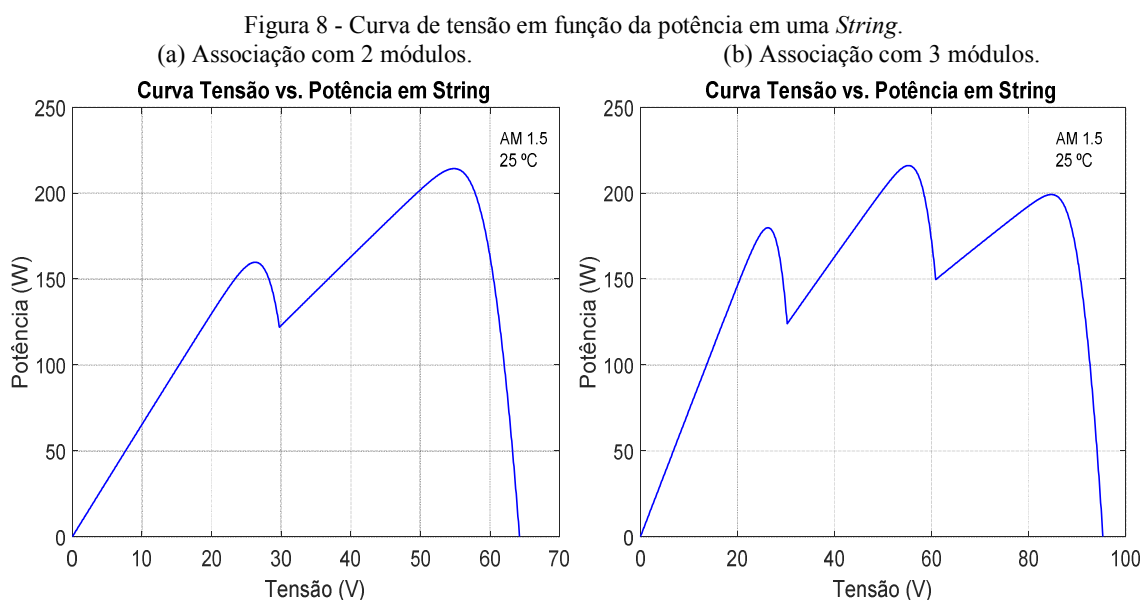
Como evolução a estes algoritmos tem-se os métodos inteligentes, que são aqueles baseados em IA; exemplos clássicos são a lógica *Fuzzy* e Redes Neurais. Por mais que sejam mais complexos e caros, têm o grande diferencial que é aplicar o aprendizado sob o problema, estes métodos obtêm na grande maioria dos casos uma resposta mais rápida, eficiente e menos oscilatória com relação a potência extraída dos módulos (BENDIB et al., 2015; DRIR et al., 2014; BRITO, 2013).

## 2.3. EFEITO DA ASSOCIAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Quando a construção de um sistema fotovoltaico visa atender cargas de alto consumo ou a produção é destinada à injeção de altas potências na rede, é comum observar associações

de arranjos contendo várias conexões série e paralelo de painéis. O efeito que estas associações produzem no comportamento da potência gerada sob condições ótimas de operação é imperceptível, porém, em condições reais onde a temperatura de cada PV tende a variar e a irradiação assume valores diferentes, devido fatores de sombreamento, a resposta do sistema gera mais de um ponto de máximo de operação, os ditos máximos locais e globais.

Este efeito pode ser também percebido na associação de uma única *String* de painéis, representada nas Figuras 8.a e 8.b. Nestas associações métodos de caráter convencional por incremento e ajuste de referência estabeleceriam operação em qualquer que fosse o primeiro máximo encontrado na curva de potência.



Fonte: Autoria própria.

Isso remete ao fato de que o máximo global aparece em posições diferenciadas, sendo assim há dificuldade em rastreá-lo com exatidão. Ante a tal limitação, é possível utilizar métodos mais complexos como os inteligentes, que conseguem manter eficiência e velocidade de resposta sob condições adversas de clima (BRITO, 2013).

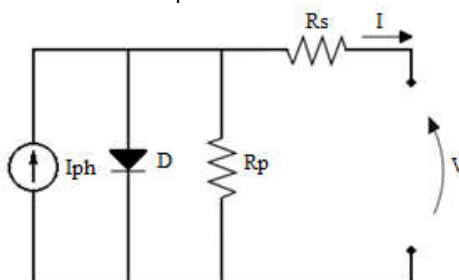
### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão pontuadas as etapas de desenvolvimento para comparação dentre as metodologias MPPT de análise. O estudo efetuado levou em conta um sistema fotovoltaico primário, contendo apenas os elementos necessários ao objetivo de pesquisa, sendo todo implementado em ambiente MatLab/Simulink®.

#### 3.1. MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA E ESTRUTURA DO PV

O modelo da célula fotovoltaica pode ser representado por uma fonte de corrente em anti-paralelo com um diodo associados às não idealidades como: a inserção de uma resistência série ( $R_s$ ), que equivale à queda de tensão interior da célula, e uma resistência em paralelo ( $R_p$ ), representando as fugas do sistema, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o proposto por Casaro e Martins (2008), como a célula é a parcela mínima componente de um PV, o equacionamento resultante devidamente adaptado pode ser compilado em simuladores para a avaliação das condições dos painéis solares. Sua teoria aborda o modelo da imagem acima partindo da equação (1).

$$I = I_{ph} - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

- V, I - Tensão e corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica, respectivamente;
- $I_{ph}$  - Fotocorrente;

- $I_r$  - Corrente de saturação reversa da célula;  
 $R_s, R_p$  - Resistência série e paralelo da célula, respectivamente;  
 $q$  - Carga do elétron,  $1,6 \times 10^{-19}$  C;  
 $k$  - Constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-38}$  J/K;  
 $\eta$  - Fator de qualidade da junção p-n;  
 $T$  - Temperatura ambiente, em Kelvin.

Os parâmetros  $I_{ph}$  e  $I_r$  são obtidos por meio das equações (2) e (3).

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha \cdot (T - T_r)] \cdot \frac{P_{sun}}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_{rr} \cdot \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_G}{\eta \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (3)$$

Onde:

- $I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito por célula;  
 $\alpha$  - Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ ;  
 $I_{rr}$  - Corrente de saturação reversa de referência;  
 $T_r$  - Temperatura de referência, 298 K;  
 $P_{sun}$  - Intensidade de radiação solar, em  $W/m^2$ ;  
 $E_G$  - Energia de banda proibida, 1,1 eV.

Com os parâmetros anteriores é determinado  $I_{rr}$ , sob condições de teste padrão (*Standard Test Conditions* - STC), em que  $P_{sun} = 1 \text{ kW}/m^2$  e  $T_r = 298 \text{ K}$  ( $25^\circ\text{C}$ ), além de ser conhecido que quando a corrente  $I = 0 \text{ A}$ , a tensão de saída é a tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ . Sendo assim obtém-se a equação (4).

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{\eta \cdot k \cdot T_r}} - 1} \quad (4)$$

Como as parcelas componentes da corrente final estão agora especificadas, volta-se a atenção para alterações possíveis na equação (1). Esta pode ser modificada para apresentar raiz nula quando a corrente  $I$  se tornar a corrente real do circuito, obtendo uma função da própria

corrente. Para a aproximação do valor da raiz de tal grandeza é utilizado o método numérico de Newton-Rhapson, matematicamente definido na equação (5). Esse busca o zero da função diferenciável através do cálculo da tangente em um ponto e sua posterior intersecção ao eixo das abscissas, sendo este ponto de intersecção o novo ponto de partida para a nova iteração (BRITO, 2013).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5)$$

Sendo assim, a função da corrente em relação a si própria e sua derivada podem ser descritas nas equações (6) e (7) respectivamente.

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \cdot \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (6)$$

$$f'(I) = -1 - I_r \cdot e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\eta \cdot k \cdot T}} \cdot \frac{q \cdot R_s}{\eta \cdot k \cdot T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (7)$$

Ainda aqui existem as não-linearidades do equivalente elétrico representadas pelas resistências série e paralelo, parâmetros intrínsecos dependentes do modelo e estrutura do PV. Baseado no painel KC200GT da Kyocera, que tem seus principais parâmetros mostrados no Quadro 1, estas foram devidamente testadas e delimitadas por Casaro e Martins (2008), bem como um modelo em simulação capaz de gerar potência equivalente a um *array*.

Quadro 1 - Propriedades do painel KC200GT padrão de *datasheet*.

Potência Máxima ( $P_{max}$ )	200 W (+10% / -5%)
Tensão de Máxima Potência ( $V_{mpp}$ )	26,3 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{mpp}$ )	7,61 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	32,9 V
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{sc}$ )	8,21 A
Coefficiente de Temperatura de $I_{sc}$	$3,18 \times 10^{-3} \text{ A}/^\circ\text{C}$

Fonte: Kyocera Corporation.

Com tais dados em mãos, o modelo base foi simplificado. Foram excluídos os fatores de multiplicidade série e paralelo, sendo assim possível representar com precisão um único PV

e extrair seus resultados para comparativo. O código em questão foi usado na implementação do modelo em ambiente MatLab/Simulink®, estando também disponível no Anexo I.

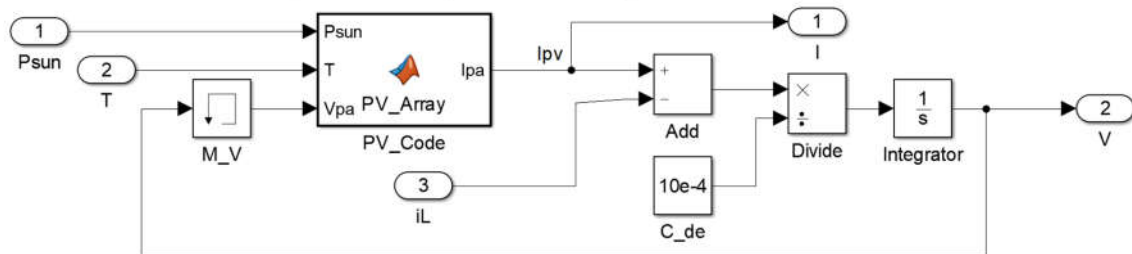
De acordo com a estrutura fotovoltaica de escolha há a necessidade do uso de um capacitor de desacoplamento, contudo, o tempo de simulação é algo precioso, sendo assim, trabalhar com os modelos matemáticos constitui uma boa opção. A equação (8) representa a característica de carga do capacitor, que determina a corrente instantânea  $i_c$  em função da capacitância  $C$  do componente e do diferencial de tensão  $V_c$  sobre seus terminais. Manipulando-a para obtenção da tensão de acordo com a corrente instantânea, obtém-se a equação (9).

$$i_c(t) = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (8)$$

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_c(t) dt \quad (9)$$

A posterior conexão com conversor eletrônico de potência acontece de modo a utilizar a tensão contida no capacitor como referência, sendo assim, há um nó de corrente. Tomando como base a Lei das Correntes de Kirchhoff, é necessário subtrair a corrente do indutor ( $I_L$ ), permitindo assim o cálculo exato de tensão. Como resultante as observações, tem-se a representação por espaço de estados elaborada na Figura 10.

Figura 10 - Arranjo fotovoltaico implementado no Simulink.



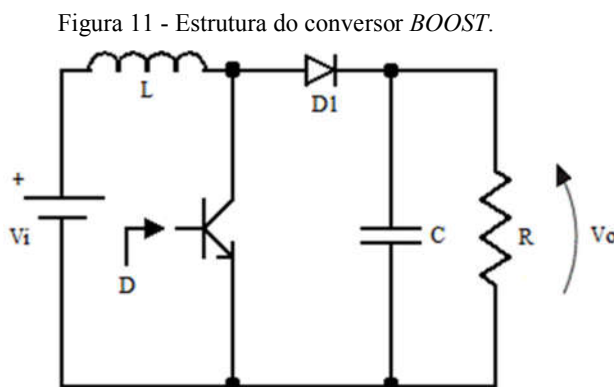
Fonte: Autoria própria.

Aqui, o principal elemento é o bloco *PV\_Code*, que permite a execução de um *script* com o modelo individual do painel. O bloco *Add* representa o elemento subtrator de corrente, o bloco *C\_de* representa o valor constante da capacitância que é multiplicado no bloco *Divide* para constituir a razão de  $1/C$ . O bloco *M\_V* é um bloco de memória para conservação do valor simulado no instante anterior de tempo e o bloco *Integrator* integra no tempo contínuo o módulo da corrente para determinação da tensão sob os terminais do painel. A representação dos

elementos  $P_{sun}$ ,  $T$  e  $iL$  como conectores de entrada e de  $V$  e  $I$  como conectores de saída apenas mostra que esta parcela do arranjo foi inserida em um *Subsystem*, o que permite melhor organização da janela de simulação do *software* Simulink.

### 3.2. PROJETO DO CONVERSOR DE POTÊNCIA

O elemento conversor é de tamanha importância neste sistema que seu funcionamento necessita assegurar execução assertiva do método de controle em análise, do contrário os dados gerados não refletem a real resposta do modelo, causando avaliação equivocada de resultados. Para tanto, a simplicidade tende a garantir o caminho mais seguro. Sendo assim, a topologia *BOOST* foi escolhida, vide Figura 11.



Fonte: Autoria própria.

Esta estrutura tem a característica elevadora. De acordo com Ahmad (2000), a proporção  $G$ , uma função de  $D$ , determina a razão de saída, visível na equação (10).

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

Quanto menor os valores da razão cíclica mais a tensão na saída  $V_o$  tende a se equivaler a da fonte  $V_i$ , já quando o *Duty-Cycle* se aproxima da unidade, a tensão na saída deve tender a valores infinitos. Essa condição se faz impossível devido a limitações práticas e físicas, sendo assim o módulo de tensão na saída fica restrito a um máximo em torno de 5 vezes a entrada.

Para um sistema de características ideais a potência de saída  $P_o$  é a mesma da entrada  $P_i$ , o que permite, usando a Lei de Ohm, determinar um valor de resistência que garanta operação do conversor. Manipulando um pouco as equações é possível obter a carga  $R$  em

função apenas da potência de saída e da tensão  $V_o$  de projeto, resultando na equação (11) (AHMAD, 2000).

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (11)$$

Como o conversor de potência trabalha baseado em razão de um comutador com tempo de acionamento e repouso, isso implica em uma frequência  $f_s$  de operação, o que significa oscilações nas grandezas de tensão ( $\Delta V_c$ ) e corrente ( $\Delta I_L$ ) de seu circuito. Portanto, para suavização disso são requeridos o indutor  $L$  na entrada e o capacitor  $C$  na saída, elementos de filtro presentes nesta estrutura, calculados de acordo com as equações (12) e (13) (BARBI; MARTINS, 2002).

$$L = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_L} \quad (12)$$

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_c} \quad (13)$$

Considerando a máxima eficiência, a operação em condução contínua (Modo de Condução Contínua - MCC) é a melhor opção. Foi então definida uma oscilação máxima para corrente no indutor, bem como tensão no capacitor de 1%. Baseado nos dados do painel KC200GT foram também especificados dados de entrada do *BOOST*. A partir daí foi determinada uma frequência genérica de operação e uma tensão de saída esperada, convergindo nos dados de projeto do conversor representados no Quadro 2.

Quadro 2 - Parâmetros para projeto do conversor *BOOST*.

$V_i$	26,3 V
$I_i$	7,61 A
$P_i$	200 W
$V_o$	80 V
$f_s$	30 kHz

Fonte: Autoria própria.

O valor da tensão na saída é definido de maneira a não extrapolar a máxima razão teórica, resultando em um ganho considerável admitindo máxima eficiência. Aplicando isso a



equação (10), obtém-se o ganho estático do conversor e a razão cíclica de projeto, demonstrados nas equações (14) e (15), respectivamente.

$$G = \frac{80}{26,3} = 3,04183 \quad (14)$$

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} = 1 - \frac{26,3}{80} = 0,67125 \quad (15)$$

Faz-se o mesmo para a carga e os elementos de filtro. Substituindo devidamente as grandezas nas equações (11), (12) e (13), tem-se como resultante as equações (16), (17) e (18).

$$R = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{80^2}{200} = 32 \Omega \quad (16)$$

$$L = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot \Delta I_L} = \frac{26,3 \cdot 0,67125}{30 \text{ k} \cdot 0,01 \cdot 7,61} = 7,73 \text{ mH} \quad (17)$$

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_c} = \frac{2,5 \cdot 0,67125}{30 \text{ k} \cdot 0,01 \cdot 80} = 69,92 \mu\text{F} \quad (18)$$

Os fatores de projeto determinam os elementos passivos, porém, por ser tão dependente de sua capacidade de rastreamento, uma análise mais detalhada foi realizada. De acordo com Coelho et al. (2009), pode haver regiões de não operação do conversor. Então, considerando a relação da razão cíclica unida com carga projetada e manipulando-as de forma a obter a resistência efetiva do sistema em componente angular, foi obtida a equação (19).

$$\theta_R(D, R) = \text{atg} \left( \frac{1}{(1-D)^2 \cdot R} \right) \quad (19)$$

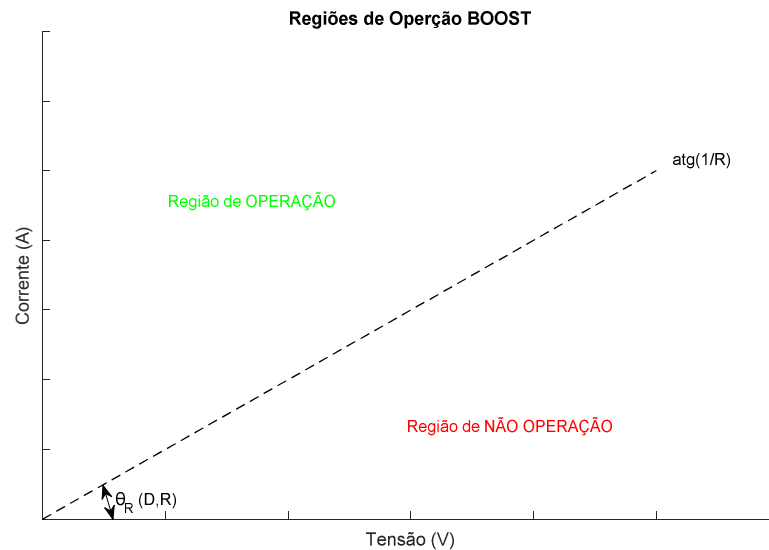
Por esse motivo e pelo modelo *BOOST* a região de operação fica definida entre os limites dispostos pela equação (20), graficamente indicados na Figura 12.

$$\text{atg} \left( \frac{1}{R} \right) < \theta_R(D, R) < 90^\circ \quad (20)$$

A região delimitada é própria desta topologia, com um limite inferior indicando o início da porção de trabalho. Para um *BUCK*, por exemplo, esta mesma região parte de um zero

indo até onde a razão cíclica atinge a unidade. Já em conversores *full range* como o *BUCK-BOOST* a região de operação abrange todo o espectro de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (COELHO et al., 2009).

Figura 12 - Regiões de operação do conversor *BOOST*.



Fonte: Baseado em COELHO et al., 2009.

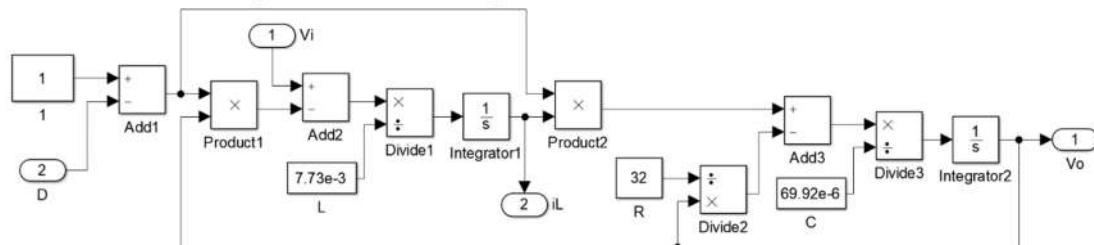
Para implementação em ambiente de simulação a velocidade de processamento é decisiva, sendo assim, mais uma vez foi desenvolvida uma representação em espaço de estados. Na abordagem tomada por Brito (2013), os estágios de condução e repouso para a corrente sobre o indutor  $L$  ( $I_L$ ) e tensão sobre o capacitor  $C$  ( $V_C$ ) se equivalem nas equações (21) e (22).

$$\frac{dI_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} [V_i(t) - V_c(t) \cdot (1 - D(t))] \quad (21)$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left[ I_L(t) \cdot (1 - D(t)) - \frac{V_C(t)}{R} \right] \quad (22)$$

Munido de tais dados foi possível o desenvolvimento do modelo da Figura 13.

Figura 13 - Modelo em espaço de estados do conversor *BOOST*.



Fonte: Baseado em BRITO, 2013.

### 3.3. MODELO DOS ALGORITMOS MPPT

Enquanto a Razão Cíclica Fixa permanece estática os métodos P&O e IC estudados reagem mediante perturbação do sistema, variando a tensão de referência terminal do painel a uma determinada razão, um passo de incremento ( $D_c$ ) que para este estudo foi determinado com base nas referências. Aqui novamente a representação por espaço de estados se mostrou a opção mais viável. Sendo assim os modelos apresentados a seguir foram implementados em ambiente MatLab/Simulink®.

#### 3.3.1. Razão Cíclica Fixa ( $D_{cte}$ )

O método parte da componente estática de operação, que permite obtenção de máxima potência para condições projetadas. Esperando obter do modelo a potência nominal de 200 W, a razão cíclica para o conversor *BOOST* é calculada na equação (15), tendo seu valor definido em aproximadamente 0,67.

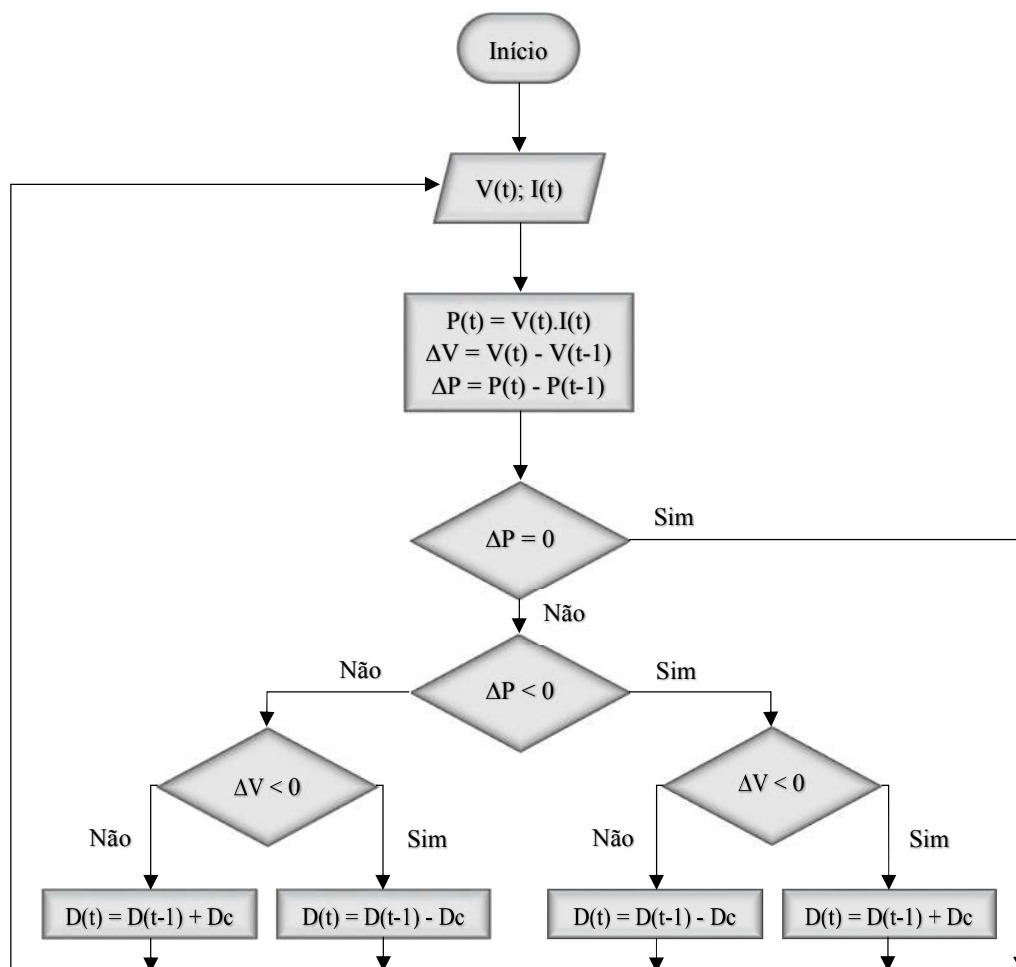
#### 3.3.2. Perturbação e Observação (P&O)

Este método tem características adaptativas de operação com execução periódica, além disso, sua implementação dependente de sensores de tensão e corrente. São realizadas leituras de corrente e tensão instantâneas e então a potência é calculada, essa. Essa potência atual é comparada com a do passo anterior. Caso aja acréscimo, o ponto de operação mantém sua direção, caso aja perda, o ponto de operação é direcionado em sentido oposto.

As perturbações são constantes e em virtude disso, há uma ligeira oscilação na potência resultante, o que prejudica em parte o FR. Para o método clássico as perturbações são fixas, contudo, variações no passo de incremento podem melhorar a eficiência do método. O método P&O otimizado usa uma média de amostras de potência para ajustar de maneira dinâmica o valor da perturbação. Enquanto isso, o P&O de três pontos usa de três pontos distintos na curva de tensão por potência para determinar direção e valor da próxima perturbação (BRITO, 2013).

O método implementado é representado no fluxograma da Figura 14. As leituras de tensão e corrente acontecem para que periodicamente seja obtida a potência instantânea, assim como determinado na teoria. De acordo com a variação resultante um passo fixo é incrementado ou decrementado por meio do ajuste da razão cíclica do controlador.

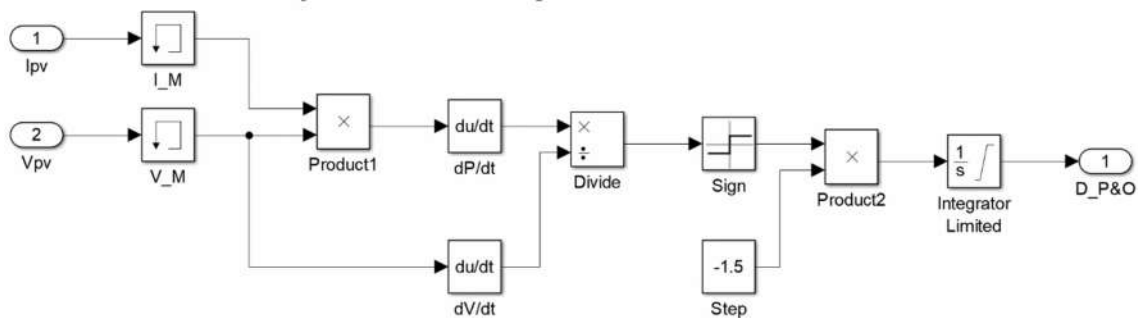
Figura 14 - Fluxograma do método P&amp;O.



Fonte: Baseado em BRITO, 2013.

Baseado neste princípio de operação foi elaborado também o modelo em espaço de estados contido na Figura 15.

Figura 15 - Modelo em espaço de estados do método P&amp;O.



Fonte: Baseado em BRITO, 2013.

### 3.3.3. Condutância Incremental (IC)

O método IC tem princípio de operação em torno do MPP do painel, baseando-se na variação de potência em relação a tensão, descrita de acordo com a equação (23).

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (23)$$

Este considera que na curva característica de potência, como a da Figura 2, a inclinação é nula no MPP, positiva a esquerda e negativa a direita. Estas são as condições fundamentais de operação do algoritmo, expressas matematicamente na equação (24).

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}, & \text{no MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}, & \text{à esquerda do MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}, & \text{à direita do MPP} \end{cases} \quad (24)$$

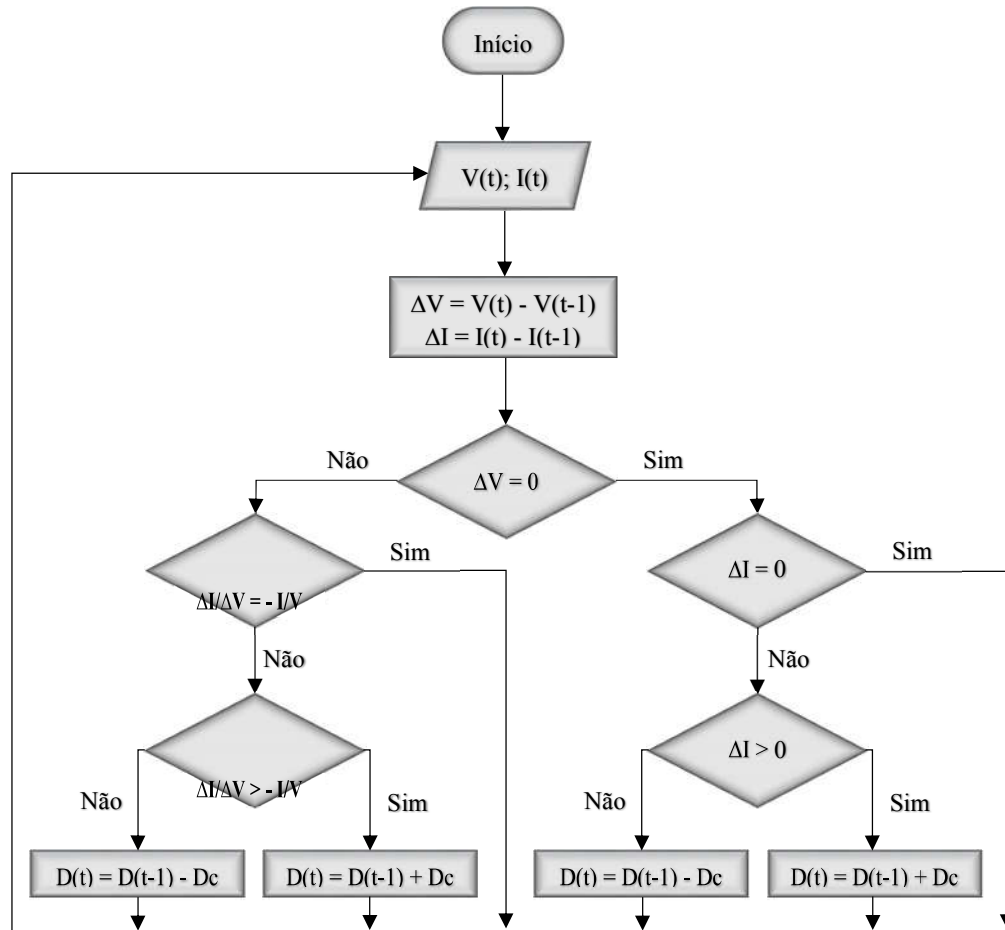
Onde:

- $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  - Condutância incremental;  
 $\frac{I}{V}$  - Condutância instantânea.

No que diz respeito a operação, há várias similaridades com o método P&O. São também necessários sensores de tensão e corrente, além do fato de o rastreamento ser muito parecido, havendo perturbações para busca do MPP. Entretanto, na IC não há necessidade de cálculo da potência e teoricamente as perturbações são cessadas ao se encontrar o ponto de máximo (BRITO et al., 2012).

O fluxograma que rege a operação do método está demonstrado na Figura 16. Periodicamente tensão e corrente são monitorados, assim, é possível registro da condutância instantânea e estimativa da condutância incremental. Uma vez que estas são obtidas é verificada a variação nas grandezas analisadas, aplicando então a resposta apropriada por meio do ajuste (ou não) da referência D do controlador.

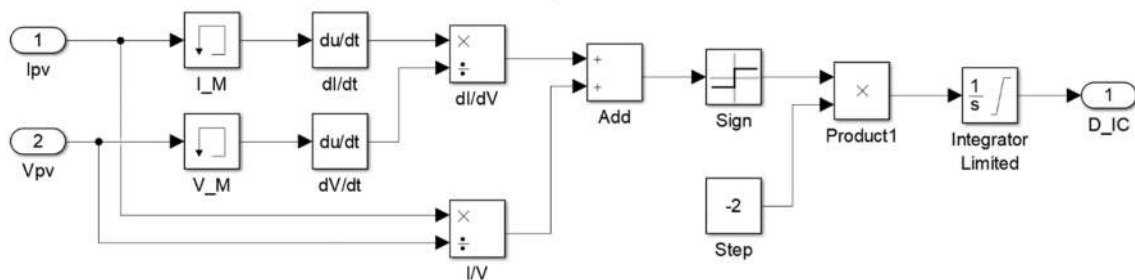
Figura 16 - Fluxograma do método IC.



Fonte: Baseado em BRITO, 2013.

Com a operação devidamente apresentada, foi desenvolvido o modelo em espaço de estados contido na Figura 17.

Figura 17 - Modelo em espaço de estados do método IC.



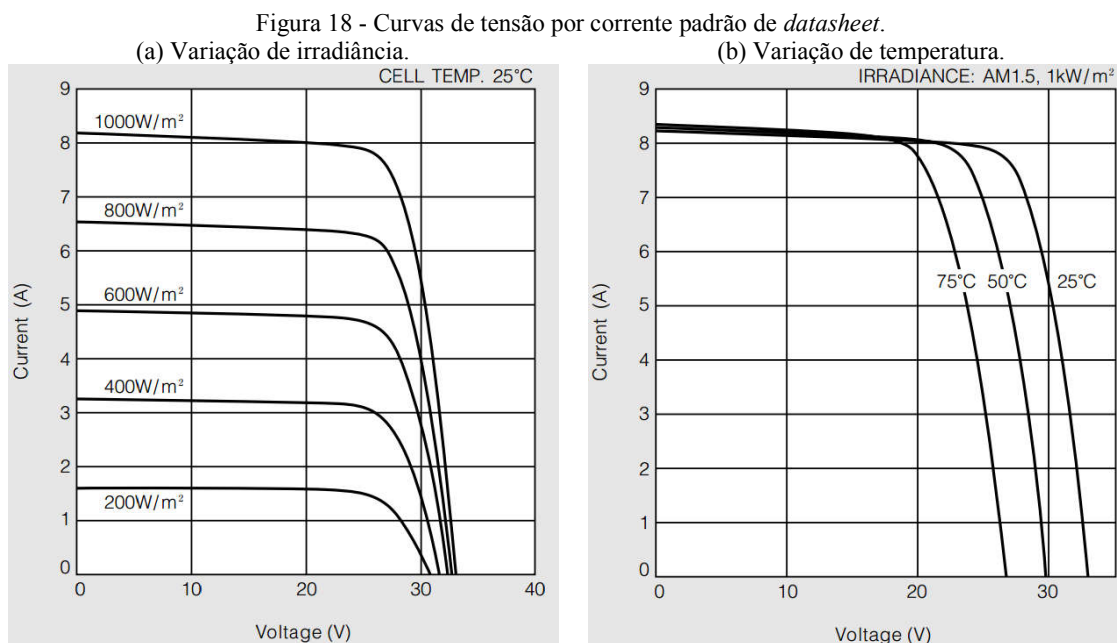
Fonte: Baseado em BRITO, 2013.

## 4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios e desenvolvimentos necessários à execução do objetivo deste trabalho.

### 4.1. COMPORTAMENTO E OPERAÇÃO

Com o modelo do PV funcional era necessário garantir que seu comportamento se assimilasse ao painel do qual foi projetado. Fixando os parâmetros desta representação do painel de acordo com os valores especificados por STC e realizando ensaios chegou-se a representações gráficas que poderiam ser comparadas a dados de catálogo. Respeitando-se os limites impostos pelo componente físico a irradiância foi alterada progressivamente em um primeiro momento, depois disso a temperatura passou por um processo similar, os espectros resultantes mostraram que variações são inexpressivas ou inexistentes. Posicionando lado a lado os dados de *datasheet*, das Figuras 18.a e 18.b, e curvas geradas, das Figuras 19.a e 19.b, é possível visualizar a fidelidade e confiabilidade obtidos.

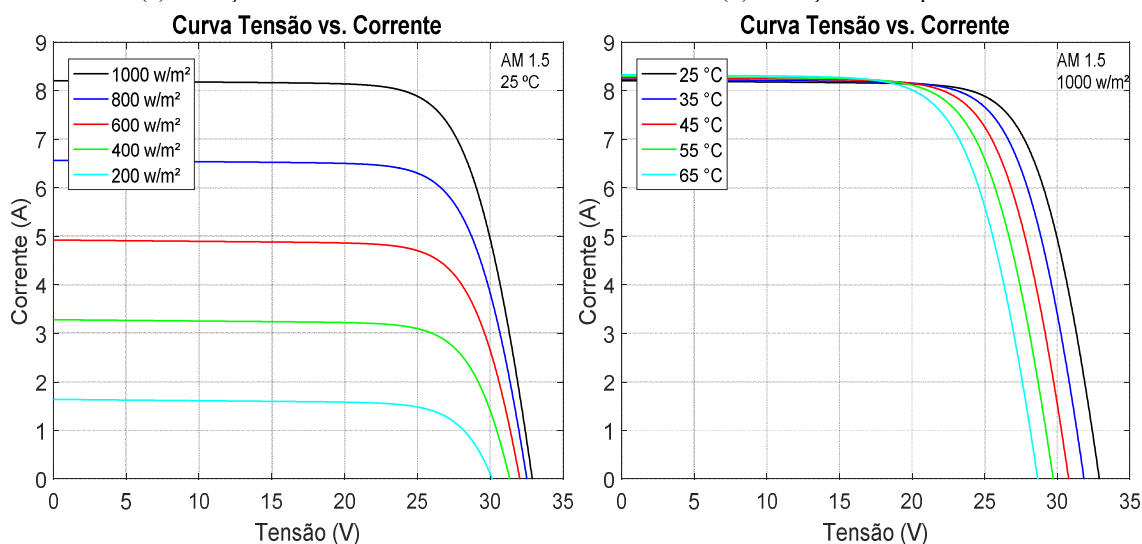


Fonte: Kyocera Corporation.

Figura 19 - Curvas de tensão por corrente padrão geradas.

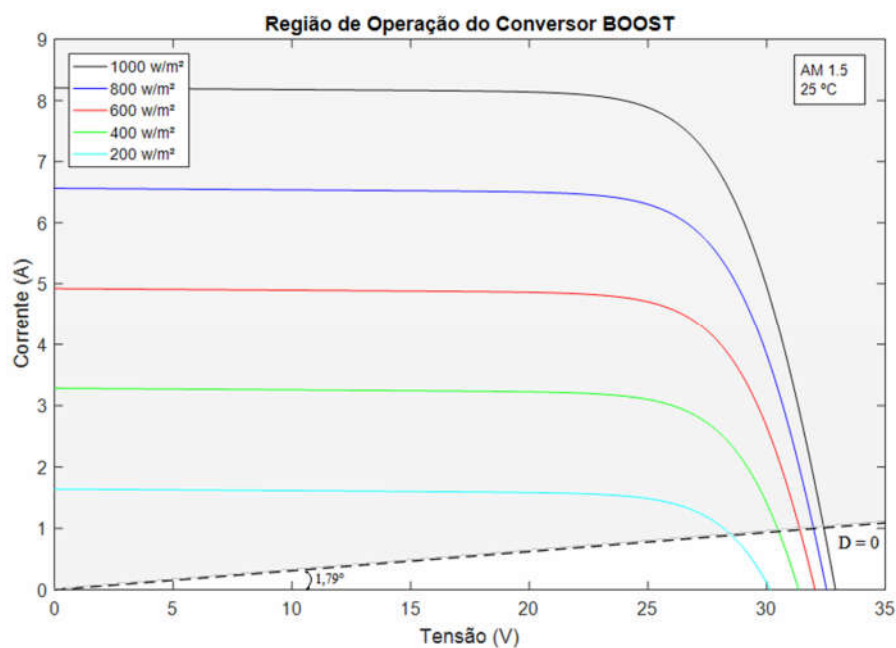
(a) Variação de irradiância.

(b) Variação de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Para o modelo do conversor, os dados do Quadro 2 somados as equações (14) à (18) constituem informações suficientes para sua elaboração. Sua região de operação é delimitada de acordo com a equação (20), ficando definida entre  $1,79^\circ$  e  $90^\circ$ . Tomando como base a Figura 12 e sobrepondo-a a um gráfico do espectro de geração chega-se a Figura 20.

Figura 20 - Curva de geração e região de operação para o conversor *BOOST*.

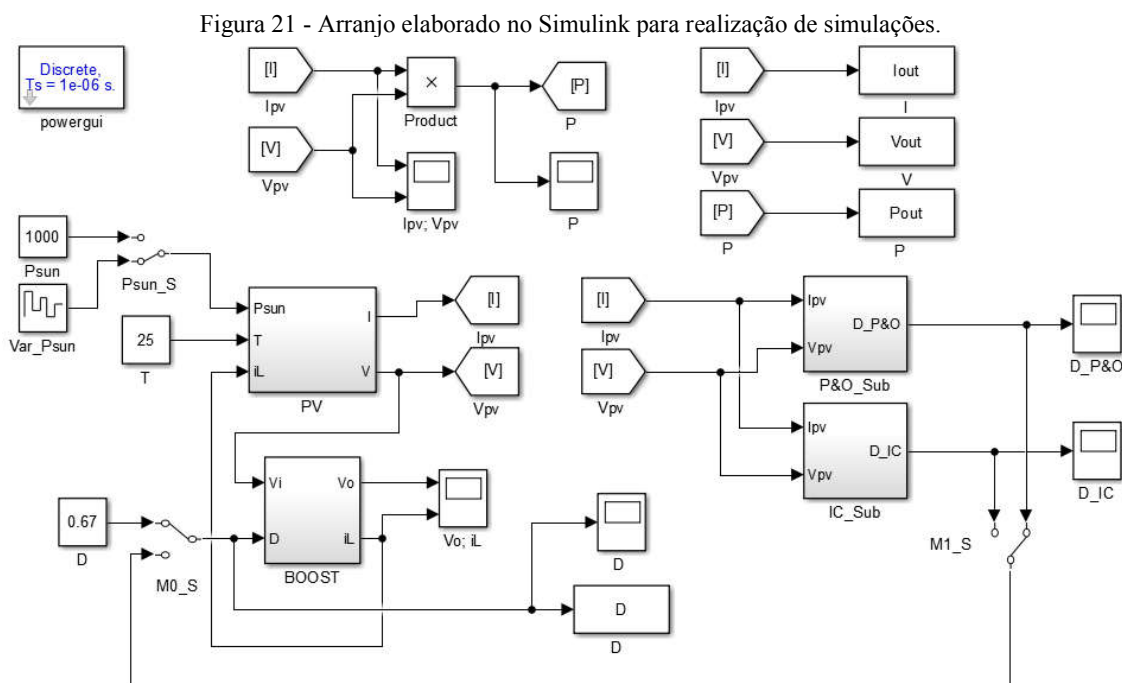
Fonte: Autoria própria.



A região em cinza mostra toda área de operação do conversor. A menor condição de potência em que seria possível operar é delimitada pela reta seccionada com angulação  $1,79^\circ$ , obtida com o *Duty-Cycle* nulo. A imagem revela também que para realização dos testes com os métodos de controle é preferível a utilização de valores de  $P_{sun}$  superiores a  $200 \text{ W/m}^2$ , condição adotada durante os ensaios.

## 4.2. MÉTODOS MPPT E TESTES

Com a união de todos os elementos componentes do sistema fotovoltaico é finalmente possível extrair dados da operação, atuação e ganho de eficiência que podem provir do uso de um controlador MPPT. A Figura 21 contém o arranjo final em ambiente MatLab/Simulink® utilizado para extração dos resultados que seguem.



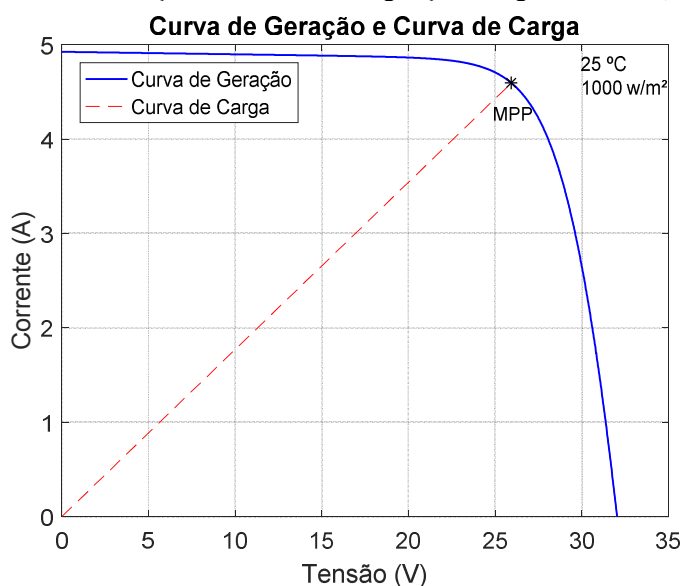
Fonte: Autoria própria.

Nesta janela de simulação existem os blocos *PV*, *BOOST*, *P&O\_Sub* e *IC\_Sub* que foram descritos na metodologia, apresentados aqui encapsulados em *Subsystems*. O bloco *D* é uma constante que consiste no valor da razão cíclica de projeto do conversor. O bloco *Var\_Psun* é uma *Repeatig Sequence Stair*, que permite execução de degraus de valores determinados com

tempo de amostragem predefinido. Os demais blocos apresentados são para coleta de dados e auxílio na execução da simulação.

Para cada condição de irradiação e temperatura há um máximo instantâneo de potência possível, com o ajuste correto da razão cíclica é possível a extração total de seu valor. Considerando uma irradiação de  $600 \text{ W/m}^2$  a uma temperatura de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  o valor  $D$  para que o MPP seja atingido é de aproximadamente  $0,58$ . Este valor aplicado a equação (20), associado a curva de geração, permite obtenção da Figura 22.

Figura 22 - Intersecção entre as curvas de geração e carga a  $600 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

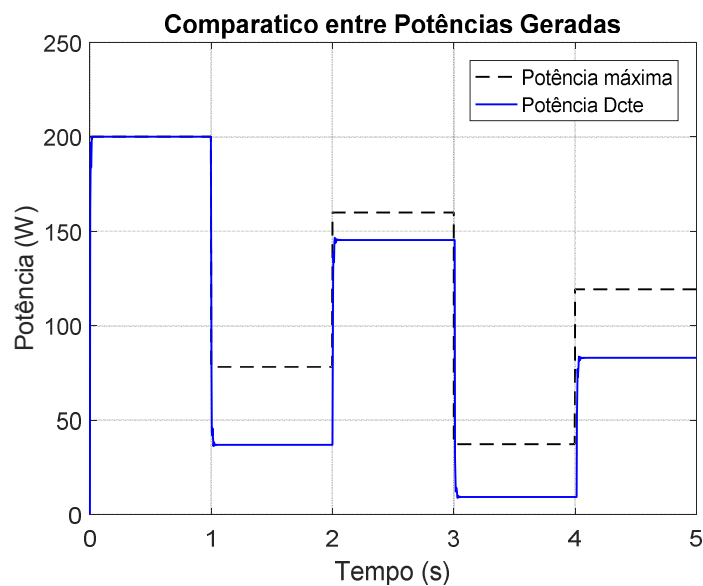


Fonte: Autoria própria.

Neste caso com a razão cíclica inserida manualmente a tensão no ponto de máximo é de  $25,93 \text{ V}$ , a corrente é de  $4,59 \text{ A}$ , com isso a potência obtida foi de aproximadamente  $119 \text{ W}$ . O ajuste automático da razão do controlador é a característica desejada na operação, uma vez que a condição de irradiação diária não se comporta de maneira linear. O método  $D_{cte}$ , ajustado ao  $D$  estático de projeto do conversor, demonstra na Figura 23 como métodos não adaptativos reagem às variações de irradiação.

Os métodos P&O e IC já dispõem de algum processamento computacional e possuem capacidade de se adequar a condições adversas. De maneira a comprovar isso, os mesmos degraus de irradiância foram inseridos no PV. Os resultados para ambos foram comparados com a referência máxima para a irradiação instantânea, sendo a Figura 24 para o método P&O e Figura 25 para o método da IC.

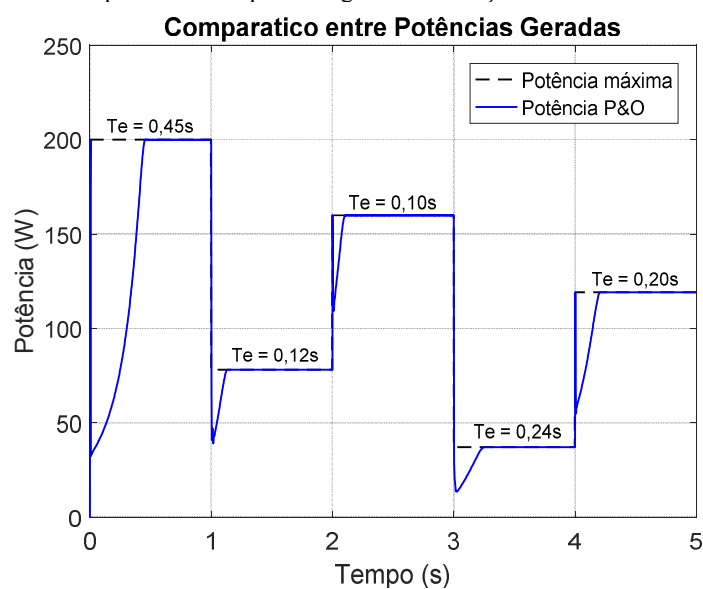
Figura 23 - Comparativo entre potência gerada na atuação da Razão Cíclica Fixa e máxima.



Fonte: Autoria própria.

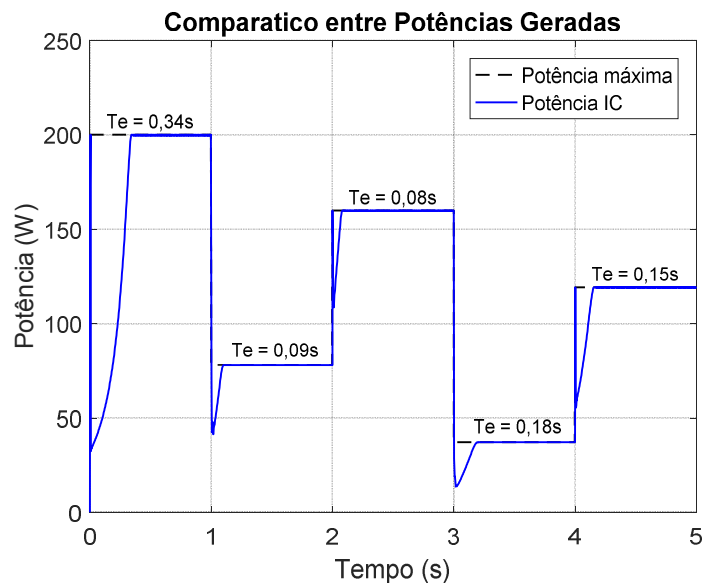
Para a Razão Cíclica Fixa o ajuste é quase que instantâneo à variação, no entanto, comparado ao máximo percebe-se grande perda de eficiência, com o fator de rastreamento de 79,73 %.

Figura 24 - Comparativo entre potência gerada na atuação do método P&O e a máxima.



Fonte: Autoria própria.

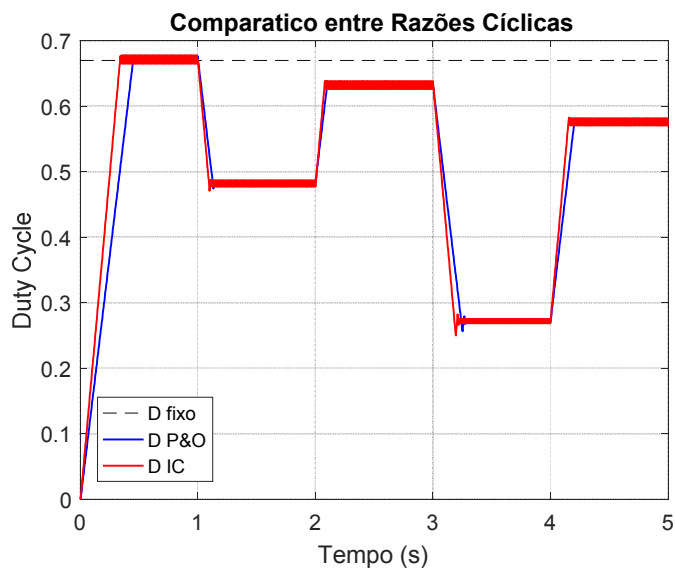
Figura 25 - Comparativo entre potência gerada na atuação do método IC e a máxima.



Fonte: Autoria própria.

Nas respostas geradas há uma sutil, mas perceptível diferença. A Condutância Incremental é um pouco mais rápida que a Perturbação e Observação, como fica evidente nos tempos de estabelecimento ( $T_e$ ) de cada degrau. Isso se torna mais claro num comparativo das razões cíclicas, visível na Figura 26.

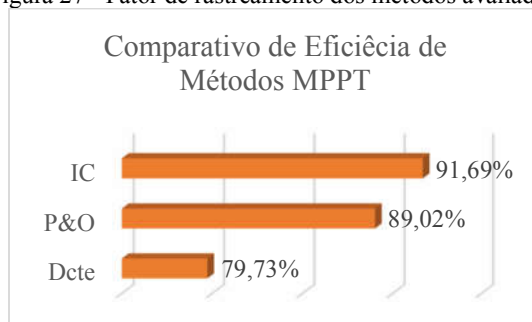
Figura 26 - Comparativo de atuação das razões cíclicas.



Fonte: Autoria própria.

Como a estabilidade é atingida antes a eficiência do método da IC é superior ao P&O, sendo que o FR respectivo obtido é de 91,69 % contra 89,02 %. Como comparação final, na Figura 27 são posicionados os três métodos avaliados para visualização do ganho obtido no uso de sistemas de controle adaptativos para aplicações básicas fotovoltaicas.

Figura 27 - Fator de rastreamento dos métodos avaliados.



Fonte: Autoria própria.

## 5. CONCLUSÕES

O foco do trabalho em questão foi o desenvolvimento de metodologias de controle MPPT aplicadas a sistemas fotovoltaicos para avaliação de sua eficiência. As diversas topologias de sistemas disponíveis na literatura se destacaram mediante cada específica aplicação, sendo que para simples elemento de simulação a estrutura idealizada por um PV, um conversor CC-CC, uma carga e o método que se deseja analisar se mostraram suficientes.

A minimização da estrutura do painel em análise a partir da célula e a posterior definição de um único módulo para objeto de estudo garantiram a fidelidade ao modelo físico. Já o projeto do conversor exigiu análise de parâmetros estruturais um pouco mais complexos, portanto, a escolha de uma topologia básica que poderia fornecer um ganho de tensão como o *BOOST* minimizou tempo gasto com projeto. A análise da região de operação por meio de sua resistência equivalente conseguiu fornecer dados de limites operacionais do conversor, que foram de extrema importância na definição dos degraus de irradiação submetidos ao sistema.

Para os métodos de rastreamento de máximo, o passo de incremento se mostrou grande responsável por manter estabilidade na potência resultante, sendo que após alguns ensaios os valores mais eficientes foram aqueles apresentados por Brito (2013). Enquanto a razão cíclica do método  $D_{cte}$  permaneceu fixa em 0,67, os métodos IC e P&O variaram idoneamente entre 0,25 e 0,68, o que era esperado já que possuem funcionamento bastante similar.

No que diz respeito a eficiência, a condição estática de operação da razão cíclica de projeto tende a manter operação ótima apenas na potência nominal do sistema, sua resposta será imediata e sua eficiência excelente. Contudo para condições onde a potência é reduzida o FR é muito inferior aos demais métodos analisados, com performance cerca de 10 % menor.

De modo geral foi de grande importância a utilização de modelos em espaço de estados. Isso tornou fácil a associação com cada elemento do sistema e reduziu o tempo de simulação significativamente.

## 6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Mediante a resultados tão expressivos do ganho em operação pela implementação de sistemas de controle, fica evidente o tamanho do campo e quão grande a quantidade de expansões estes trabalhos relacionados apenas a métodos para sistemas fotovoltaicos poderiam possuir. Se analisadas as referências utilizadas é possível encontrar estudos específicos para cada um dos elementos componentes do sistema fotovoltaico avaliado, portanto, o aprofundamento em um componente determinado seria por si só uma oportunidade.

O efeito da associação de painéis fica apenas enunciado neste trabalho, considerando que sobre este tipo de arranjo o fator de sombreamento e variações de condições climáticas geram uma abrupta perda de eficiência. Avaliar métodos MPPT inteligentes e soluções alternativas que poderiam contornar este problema, constituem uma proposta interessante para futuros estudos.

Existem ainda pontos não abordados aqui que poderiam resultar uma nova e mais completa pesquisa. Um exemplo disso seria a análise das topologias de sistemas fotovoltaicos em aplicações *grid-connected*, que envolveriam componentes inversores, filtros para componentes CA, sistemas paralelos de identificação de ilhamento, entre outros componentes estruturais requeridos a esta aplicação.

## REFERÊNCIAS

- 17 Objetivos para Transformar Nosso Mundo. **ONUBR: Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- Acordo de Paris Sobre o Clima. **ONUBR: Nações Unidas no Brasil**, Paris, 11 dez. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acordodeparis/>>. Acesso em: 5 fev. 2018.
- AHMAD, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2000.
- Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos. Recife, Ed. Universitária da Universidade Federal do Pernambuco – UFPE, 2000.
- AZEVEDO, G. M. S.; CAVALCANTI, M. C.; OLIVEIRA, K. C.; NEVES, F. A. S.; LINS, Z. D. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Methods for Grid Connected Photovoltaic Systems. In: **Power Electronics Specialists Conference - PESC 2008, Rhodes**. IEEE, p. 1456-1462.
- BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos não Isolados**. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2006.
- BENDIB, B.; BELMILI, H.; KRIM, F. A Survey of the Most Used MPPT Methods: Conventional and Advanced Algorithms Applied for Photovoltaic Systems. *ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.45, p. 637-648, 2015.
- BRITO, Moacyr A. G. **Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos para Aplicações Fotovoltaicas: Técnicas para Obtenção de MPPT, Detecção e Proteção de Ilhamento, Sincronização e Paralelismo com a Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. 2013. 220f. Tese – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira, 2013.
- BRITO, M. A. G.; SAMPAIO, L. P.; JUNIOR, L. G; CANESIN, C. A. Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS - INDUSCON, 9., 2010, São Paulo**. IEEE. 2010. p. 1-6.
- BRITO, M. A. G.; SAMPAIO, L. P.; MELO, G. A.; CANESIN, C. A. Contribuição ao Estudo dos Principais Algoritmos de Extração de Máxima Potência dos Painéis Fotovoltaicos. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v.17, n.3, p. 592-600, 2012.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 13, n.3, p.141-146, 2008.
- COELHO, R. F.; CONGER, F.; MARTINS, D. C. A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking. In: **Power Electronics Conference, 2009. COBEP'09. Brazilian**. IEEE, 2009. p. 673-678.



DRIR, N.; BARAZANE, L.; LOUDINI, M. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Methods of Photovoltaic Systems. In: **ELECTRICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES IN MAGHREB - CISTEM, 2014, Tunis**. IEEE, p. 1-5.

FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. MPPT techniques for PV systems: Energetic and cost comparison. In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - PESGM, 9., 2008, Pittsburgh. **Proceedings...** Pittsburgh: IEEE, 2008. p. 1-6.

FURTADO, D. R. B. Países Emergentes. **Países Emergentes**. Disponível em: <<http://paises-emergentes.info/>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e Meio Ambiente**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

KOLLING, G. S.; PEREIRA, L. R. S.; SILVA, S. C. A.; VINHAS, L. A. Protocolo de Kyoto. **Protocolo de Kyoto**. Disponível em: <<http://protocolo-de-kyoto.info/>>. Acesso em: 5 fev. 2018.

KYOCERA Corporation. **KC200GT High Efficiency Multicrystal Photovoltaic Module**.

Pirapora, a Maior Usina de Energia Solar da América Latina. **Agence France Presse**. ABSOLAR: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, São Paulo, 10 nov. 2017. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/pirapora-a-maior-usina-de-energia-solar-da-america-latina.html>>. Acesso em: 6 fev. 2018.

SHI, S.; WANG, Y.; JIM, P. Study of Maximum Power Point Tracking Methods for Photovoltaic Power Generation System. In: CHINESE AUTOMATION CONGRESS - CAC, 2013, Changsha, Hunan, China. IEEE, p. 835-840.

SUMATHI, S.; KUMAR L. A.; SUREKHA, P. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems: An Introduction to Theory, Modeling with MATLAB/SIMULINK, and the Role of Soft Computing Techniques**. Suíça: Springer International Publishing AG, 2015.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2012.

YU, G. J.; JUNG, Y. S.; CHOI, I.; SONG, J. H. A novel two-mode MPPT control algorithm based on comparative study of existing algorithms. In: PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE - PVCS, 29., 2002, Louisiana. **Proceedings...** Louisiana: IEEE, 2002. p. 1531-1534.

## ANEXO I

Código MatLab implementado em *Subsystem* para execução de *script*. Em ambiente de simulação reproduz comportamento de um painel fotovoltaico compatível com o modelo KC200GT da fabricante Kyocera.

```
function Ipa = PV_Array(Psun, T, Vpa)
% Declarando informações do painel, considerando que
% que o desejado é uma potência de 200 W, neste caso
% obtido com um Voc = 32.9V, Ioc = 8.21A.
Rs = 0.005;
Rp = 7;
Ns = 54;
Isc = 8.21;
a = 3.18e-3;

% Constantes matemáticas necessárias para a simulação
% do funcionamento do painel.
n = 1.2;
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
EG = 1.1;
Tr = 298;

Voc = 32.9/Ns;
T = 273 + T;
Vt = n*k*T/q;
V = Vpa/Ns;

Iph = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000;
Irr = (Isc-Voc/Rp) / (exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir = Irr*(T/Tr)^3*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T));
I = zeros(size(V));

for j = 1:5;
    I = I - (Iph-I-Ir*(exp((V+I*Rs)/Vt)-1) - (V+I*Rs) ...
        /Rp) / (-1-Ir*exp((V+I*Rs)/Vt)*Rs/Vt-Rs/Rp);
end

for j = 1:length(I)
    if I<0
        I=0;
    end
end

Ipa = I;
End
```