

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUANA DAIANA DE LIMA

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

UBERLÂNDIA

2019

LUANA DAIANA DE LIMA

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

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia

Orientador: Luiz Carlos Gomes de Freitas

Assinatura do Orientador

UBERLÂNDIA

2019

LUANA DAIANA DE LIMA

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

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Controle e Automação da Universidade Federal de Uberlândia

Luana Daiana de Lima

Aprovado em: Uberlândia/MG, ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Luiz Carlos Gomes de Freitas, Dr.

(Orientador – Universidade Federal de Uberlândia – UFU)

Gustavo Brito de Lima, Dr.

(Membro 1 – Universidade Federal de Uberlândia – UFU)

Fernando Cardoso Melo, Dr.

(Membro 2 – Universidade Federal de Uberlândia – UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria do Socorro e Francisco Lima, pelo incentivo, amor, carinho e por não medirem esforços para que este sonho se realizasse.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida, por me proteger, iluminar os caminhos percorridos até aqui e pela benção de realizar este curso.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Gomes de Freitas por aceitar ser meu orientador, por estar sempre disponível em ouvir minhas dúvidas, pela paciência e compreensão. Sem seu apoio e incentivo este trabalho não teria sido realizado.

Aos membros da banca examinadora Fernando Cardoso Melo e Gustavo Brito de Lima, pelas suas contribuições e tempo despendido na leitura do trabalho.

Ao Rodrigo Rimoldi, Henrique, Cláudio, Danillo, Douglas, Antônio, Júlio, Bárbara, Diego, Joaquim, Leandro, Nei, Mateus, Marcelo, Vítor e Rodolfo, pelos conhecimentos transmitidos e por serem sempre solícitos.

À minha querida amiga Edetilde, pelo carinho e por estar sempre ao meu lado. Muito obrigada por ser um exemplo a ser seguido e por sua sincera amizade.

Aos meus amigos Gustavo, Julia, Alexsandra e Jéssica pelo incentivo, ensinamentos e companheirismo durante a graduação.

Ao meu irmão Fabiano e sua esposa, Érika, e meus sobrinhos Davi e Eloá, agradeço pelas inúmeras vezes que me ajudaram e pelos momentos de distração. Em especial, agradeço ao meu irmão que me ensinou a não desanimar diante das dificuldades.

Aos meus pais, Francisco G. de Lima e Maria do Socorro e S. Lima, que são os verdadeiros responsáveis por esta conquista. Não conseguiria nada se não estivessem ao meu lado. Obrigada pelo incentivo, por estarem presentes em todos os momentos e principalmente pelo amor de vocês.

A todos os familiares e amigos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho, incentivando e torcendo pela sua conclusão.

“O importante é não parar de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existência. Não se pode deixar de ficar admirado quando contempla os mistérios da eternidade, da vida, da maravilhosa estrutura da realidade. Basta que se busque compreender um pouco desse mistério a cada dia. Nunca perca a curiosidade... não pare de se maravilhar.”

(Albert Einstein. Afirmação para William Miller, como citada na revista LIFE (2 de Maio de 1955) Old Man’s Advice to Youth: “Never Lose a Holy Curiosity”, páginas 61-64.)

RESUMO

A busca por fontes de energia renovável tem aumentado nos últimos anos e a energia fotovoltaica tem se destacado. Sua utilização é uma forma de complementar a matriz energética brasileira para torná-la menos dependente da energia produzida por hidrelétricas, uma alternativa para lugares remotos onde não há energia e uma possível solução para suprir a grande quantidade de energia que será demandada nos próximos anos, de forma limpa, sem produzir gases do efeito estufa. Nesse sentido, para que se tornem ainda mais atraentes no mercado, é necessário construir sistemas eficientes para que seja aproveitada a máxima capacidade de energia que o sistema pode fornecer. Uma forma de melhorar a eficiência em sistemas fotovoltaicos é através da utilização de algum método de rastreamento de extração de máxima potência (do inglês, *Maximum Power Point Tracking* – MPPT). O objetivo deste trabalho é estudar e comparar duas técnicas clássicas de MPPT: Perturbe e Observe (P&O) e Condutância Incremental (Cond. Inc.) pois são duas técnicas já consagradas na literatura. A simulação será realizada por meio da ferramenta computacional PSIM[®] utilizando o conversor CC-CC *Boost* para a extração da máxima potência nas *Strings*.

Palavras chaves: Conversor CC-CC *Boost*, MPPT, Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

The search for renewable energy sources has increased in recent years and photovoltaic energy has stood out. Its use is a way to complement the Brazilian energy matrix to make it less dependent on the energy produced by hydroelectric plants, an alternative to remote places where there is no energy and a possible solution to supply the large amount of energy that will be demanded in the next years, with a clean energy, without producing greenhouse gases. In this way, in order to become even more attractive in the market, it is necessary to build efficient systems to take advantage of the maximum energy capacity that the system can provide. One way to improve efficiency in photovoltaic systems is through the use of some Maximum Power Point Tracking (MPPT) method. The objective of this work is to study and compare two classical techniques of MPPT: Perturbation and Observation (P&O) and Incremental Conductance (Cond. Inc.) because they are two techniques already consecrated in the literature. The simulation will be performed using the PSIM® computational tool through the DC-DC Boost converter for the extraction of the maximum power in the Strings.

Keywords: DC-DC Boost Converter, MPPT, Photovoltaic System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potência solar fotovoltaica instalada acumulada por país entre os anos de 2007 e 2017.	16
Figura 2 - Irradiação solar mundial em média anual.	17
Figura 3 - Custos dos painéis fotovoltaicos desde 1976 e projeção até 2035.	18
Figura 4 - Número de publicações anuais de novas estratégias de MPPT nas últimas décadas.	20
Figura 5 - Fluxograma de Perturbação e Observação.	21
Figura 6 - Casos possíveis para a potência em um sistema fotovoltaico com utilização de P&O.	22
Figura 7 - Comparação entre o rastreamento de máxima potência para diferentes valores do passo.	23
Figura 8 - Curva característica do painel com o MPP e a derivada da potência em relação à tensão.	25
Figura 9 - Fluxograma do método de MPPT Condutância Incremental.	26
Figura 10 - Comparação da eficiência dos tipos de células e dos módulos fotovoltaicos.	28
Figura 11 - Tela de parametrização do módulo solar no PSIM.	29
Figura 12 - Curva característica P - V nas condições padrão de teste.	30
Figura 13 - Curva característica I - V em diferentes níveis de irradiância.	31
Figura 14 - Variação da corrente com a temperatura.	31
Figura 15 - Características elétricas do painel fotovoltaico.	32
Figura 16 - Parametrização do modelo real no <i>Solar Module</i>	33
Figura 17 - Estrutura de um Conversor <i>Boost</i>	34
Figura 18 - Conversor <i>Boost</i> com interruptor em condução.	34
Figura 19 - Conversor <i>Boost</i> com interruptor aberto.	35
Figura 20 - Principais formas de onda teóricas do conversor <i>Boost</i> no Modo de Condução Contínuo.	36
Figura 21 - Circuito equivalente do conversor <i>Boost</i> com chave fechada.	39
Figura 22 - Circuito equivalente do conversor <i>Boost</i> com chave Aberta.	41
Figura 23 - Representação da malha de controle.	43
Figura 24 - Requisitos para o projeto do compensador.	44
Figura 25 - Tela do <i>Automated Tuning</i> para inserir os requisitos do controlador.	45

Figura 26 - Tela do <i>Automated Tuning</i> para inserir os parâmetros do controlador: velocidade de controle e largura de banda.....	45
Figura 27 - Resposta a um degrau unitário.....	46
Figura 28 - Diagrama de Bode do compensador e lugar geométrico das raízes.	46
Figura 29 - Circuito de realimentação negativa.....	47
Figura 30 - Resposta da malha de realimentação negativa com o controlador PID.....	47
Figura 31 - Circuito utilizado no trabalho para a extração de potência controle.....	48
Figura 32 - Potência disponível no painel e potência obtida pelo método Cond. Inc.	49
Figura 33 - Potência disponível no painel e potência obtida pelo método P&O.....	50
Figura 34 - Imagem ampliada da potência disponível no painel e potência média obtida pelo método Cond. Inc.	51
Figura 35 - Imagem ampliada da potência disponível no painel e potência média obtida pelo método P&O.....	51
Figura 36 - Controle de tensão pelo método Cond. Inc.....	52
Figura 37 - Controle de tensão pelo método P&O.	52
Figura 38 - Imagem ampliada do controle de tensão pelo método Cond. Inc.....	53
Figura 39 - Imagem ampliada do controle de tensão pelo método P&O.	53
Figura 40 - Fator de Rastreamento do método Cond. Inc.	54
Figura 41 - Fator de rastreamento do método P&O.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Matriz de Energia Elétrica no Brasil.....	15
Tabela II - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico nas condições padrões de teste..	28
Tabela III - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico na temperatura nominal de operação da célula (TNOC).....	29
Tabela IV - Especificações de projeto.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère: unidade de corrente elétrica
a-Si	Silício amorfo
C_{boost}	Capacitor do conversor <i>Boost</i>
$G_{boost}(s)$	Função de transferência do compensador de tensão do conversor <i>Boost</i>
CC	Corrente Contínua
CdTe	Tuturoto de cadmio
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio CIGS
CIS	Disseleneto de cobre e índio
Cond. InC.	Condutância Incremental
CPT	Condições Padrões de Teste
CPV	Célula fotovoltaica com concentrador
c-Si	Silício cristalino
D	Ganho estático do conversor <i>Boost</i>
D_{boost}	Diodo do conversor <i>Boost</i>
DSP	Processador de Sinal Digital
DSSC	Células sensibilizadas por corante
F	Faraday: unidade de capacitância
f_{ch}	Frequência de chaveamento
f_{pv}	Frequência de oscilação nos terminais da <i>String</i>
G_{vc_d}	Função de transferência da tensão no capacitor em relação à razão cíclica
Hz	Hertz: unidade de frequência
I	Corrente
i_c	Corrente no capacitor do conversor <i>Boost</i>
I_{cc}	Coefficiente de Temperatura da Corrente
i_i	Corrente na entrada do conversor <i>Boost</i>
i_l	Corrente no indutor do conversor <i>Boost</i>
I_{mp}	Corrente no Ponto de Máxima Potência
i_o	Corrente na saída do conversor <i>Boost</i>
i_r	Corrente na resistência variável do painel fotovoltaico
i_s	Corrente na chave do conversor <i>Boost</i>
I – V	Curva da corrente versus tensão do painel fotovoltaico

k	Instante atual
kHz	Kilohertz: unidade de frequência
L_{boost}	Indutor do conversor <i>Boost</i>
m^2	Metro quadrado: unidade de área
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
ms	Milissegundo: unidade de tempo
m-Si	Silício monocristalino
°C	Graus Celsius, unidade de temperatura
OPV	Células orgânicas e poliméricas
P	Potência
P_{pv}	Potência máxima do arranjo fotovoltaico
P – V	Curva de potência versus tensão do painel fotovoltaico
P&O	Perturbe e Observe
PID	Compensador Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de Máxima Potência
p-Si	Silício policristalino
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
Rad	Radiano
R_{pv}	Resistência variável do painel fotovoltaico
S	Chave estática
s	Segundo: unidade de tempo
TNOC	Temperatura Nominal de Operação da Célula
U_c	Tensão máxima sobre o capacitor do conversor <i>Boost</i>
\hat{u}_c	Amplitude da ondulação do capacitor do conversor <i>Boost</i>
V	Volt: unidade de tensão elétrica
v_c	Tensão no capacitor do conversor <i>Boost</i>
Vca	Coefficiente de Temperatura da Voltagem
v_{dc}	Tensão na saída do conversor <i>Boost</i> para a modelagem
V_i	Tensão na entrada do conversor <i>Boost</i>
Vmp	Tensão no ponto de Máxima Potência
V_o	Tensão na saída do conversor <i>Boost</i>
V_{ref}	Tensão de referência
v_s	Tensão na chave do conversor <i>Boost</i>

vs	Versus
W	Watt: unidade de potência
δ	razão cíclica ou ganho estático do conversor
ΔI_L	Ondulação da corrente no indutor do conversor <i>Boost</i>
ΔP	Variação da potência
μ	Micro
$x(t)$	Vetor de estados

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	TÉCNICA DE RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA	20
2.1	PERTURBA E OBSERVA	21
2.2	MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL	24
3	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	27
3.1	MODELAGEM DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	28
4	CONVERSOR CC-CC <i>BOOST</i>	34
4.1	DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	36
4.2	PROJETO DE CONTROLE DO <i>BOOST</i>	37
5	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	48
5.1	DESCRIÇÃO DO CIRCUITO UTILIZADO	48
5.2	RESULTADOS OBTIDOS	49
6	CONCLUSÕES GERAIS	55
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXOS	59
	Inserção da função de transferência G_{vc_d} no Matlab para encontrar o controlador....	59
	Código no Mathcad usado para encontrar a função de transferência G_{vc_d}.	60
	Código do CBLOCK para o método de MPPT Condutância Incremental.	61
	Código do CBLOCK para o método de MPPT Perturbe e Observe.	62

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é muito dependente da geração de energia hidrelétrica, que mesmo sendo uma energia renovável, possui algumas desvantagens como o custo de implementação elevado e impacto ambiental considerável, uma vez que é preciso alagar uma grande área.

Uma solução possível para gerar energia limpa com menor impacto ambiental é através da geração distribuída por meio de fontes renováveis, tais como: solar, eólica ou biomassa. A utilização de fontes alternativas tem conquistado relevância nos últimos anos, sendo importante para suprir a crescente demanda por eletricidade no Brasil que irá triplicar até 2050 e diminuir a dependência brasileira de hidrelétricas para a produção de energia (WITTMANN, 2014). A participação dessas fontes renováveis ainda é muito pequena se comparada às fontes tradicionais de geração. De acordo com dados da ANEEL, a participação da energia solar na matriz brasileira é de 1,2140 % e a eólica de 8,7082 %, conforme a Tabela I.

Tabela I - Matriz de Energia Elétrica no Brasil.

Fonte	Total	
	(KW)	%
Biomassa	14.826.804	8,5712%
Éolica	15.063.893	8,7082%
Fóssil	25.590.887	14,7937%
Hídrica	105.243.054	60,8395%
Nuclear	1.990.000	1,1504%
Solar	2.099.965	1,2140%
Undi-Elétrica	50	0,0000%
Importação	8.170.000	4,7230%
Total	172.984.653	100,0000%

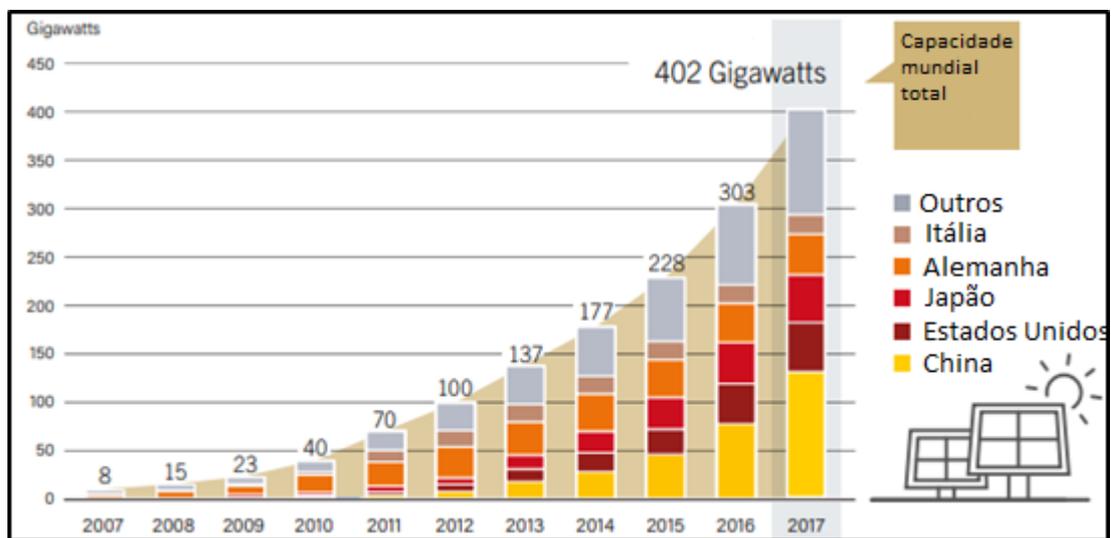
Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2019).

A utilização da energia fotovoltaica é uma alternativa para diminuir esta dependência da energia gerada a partir de hidrelétricas e produzir energia limpa e renovável a partir da radiação solar. Por ser inesgotável na escala de tempo terrestre, é atualmente umas das formas mais promissoras para suprir a energia necessária nos próximos anos devido ao aumento

da demanda (PINHO e GALDINO, 2014). A importância deste tema está crescendo e motivando a desenvolver sistemas mais eficientes e de menor custo.

A Figura 1 mostra a evolução ao longo dos anos da capacidade de energia fotovoltaica instalada nos principais países utilizadores e a capacidade acumulada de produção de energia solar mundial. Destaca-se que a Alemanha foi durante muito tempo líder neste segmento em termos de capacidade instalada, e em 2017 mostrou-se como a quarta colocada no *ranking*. É importante destacar também, que a China contribuiu para o aumento na capacidade acumulada em 2017 com relação ao ano de 2016 uma vez que a capacidade de geração deste país foi o dobro de um ano para o outro (REN21, 2018).

Figura 1 - Potência solar fotovoltaica instalada acumulada por país entre os anos de 2007 e 2017.

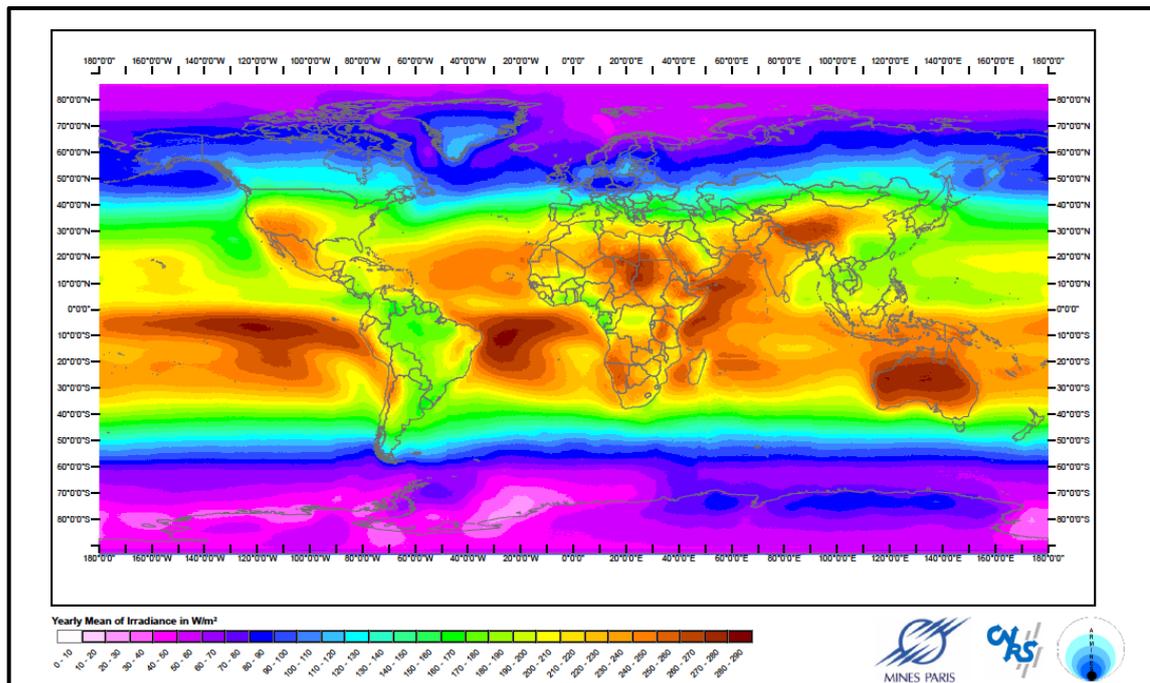


Fonte: Adaptado de (REN21, 2018).

A quantidade de energia que o sistema fotovoltaico pode fornecer depende da taxa de irradiação solar e da temperatura ambiente no local onde é instalado. No Brasil, as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar (com destaque para o nordeste). A região Sul, dentre todas as regiões, é a menos privilegiada em termos de radiação solar. Tal fato não a exclui de utilizar esta tecnologia, uma vez que a região mais favorecida da Alemanha, apresenta aproximadamente 1,4 vezes menos irradiação do que a região sul do Brasil (SALOMANI e RÜTHER, 2007).

A Figura 2 mostra a irradiação solar mundial em média anual. Através dela comprova-se que o Brasil tem maior potencial de geração de energia solar que os países europeus, onde a energia fotovoltaica é muito utilizada.

Figura 2 - Irradiação solar mundial em média anual.

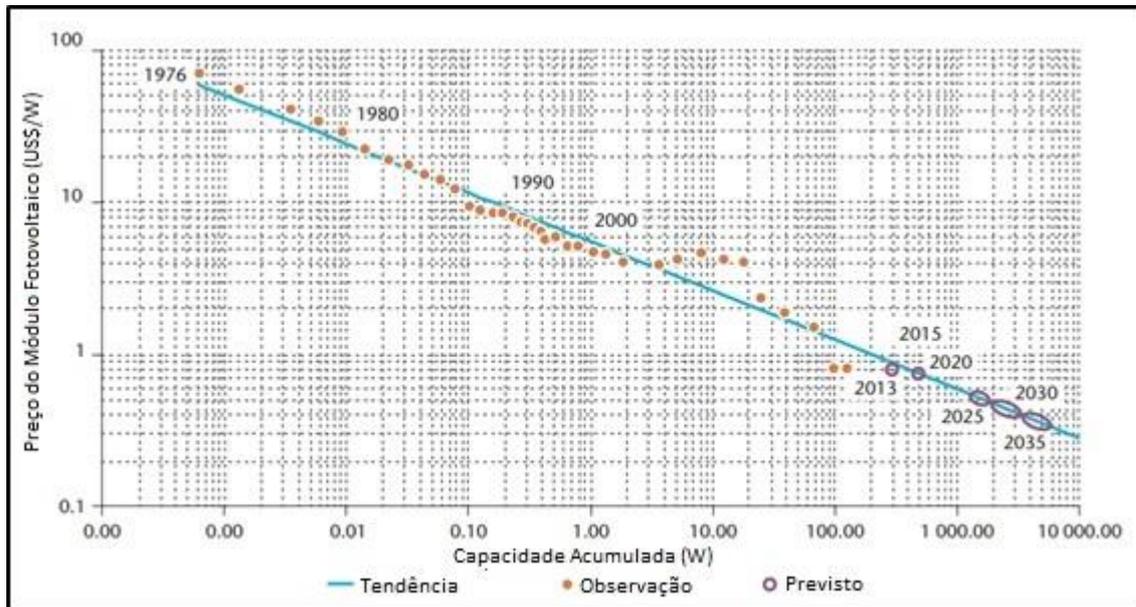


Fonte: (SODA, 2016).

Há várias formas de aplicação desta tecnologia por meio de sistemas conectados à rede (*on-grid*) ou sistemas desconectados da rede (*off-grid*) ou sistemas híbridos. Os sistemas fotovoltaicos isolados são caracterizados por não estarem conectados à rede elétrica. São utilizados principalmente em locais remotos já que muitas vezes é o modo mais econômico e prático de se obter energia. Alguns exemplos de aplicação são em: bombeamento de água, eletrificação de cercas, geladeiras para armazenar vacinas, postes de luz e estações replicadoras de sinal (NEOSOLAR ENERGIA, 2019). O sistema fotovoltaico *on-grid* está conectado à rede elétrica convencional. Com este sistema, é possível que a energia não consumida seja depois compensada nas contas de energia pelo sistema de compensação e possibilitando a redução dos gastos provenientes do consumo de energia elétrica. O sistema híbrido é a junção do sistema *on-grid* e *off-grid*.

Apesar das vantagens encontradas com o uso da energia fotovoltaica, esta apresenta empecilhos que dificultam a utilização como o alto custo do sistema e a baixa eficiência de conversão de energia. No entanto, conforme a Figura 3, é possível observar que os custos diminuíram ao longo dos anos analisados de 1976 a 2018 e a projeção para os anos futuros até 2035 é diminuir ainda mais. Com relação à baixa eficiência da conversão de energia solar em energia elétrica, as expectativas futuras também são positivas devido à evolução na tecnologia dos materiais semicondutores (IEA, 2014).

Figura 3 - Custos dos painéis fotovoltaicos desde 1976 e projeção até 2035.



FONTE: Adaptado de (IEA, 2014).

Neste sentido, para que os sistemas fotovoltaicos sejam mais atrativos é necessário que sejam cada vez mais eficientes. Uma maneira de melhorar a eficiência da extração de potência do arranjo fotovoltaico é através da utilização de alguma Técnica de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT). Essas técnicas têm o objetivo de encontrar o “Ponto de Máxima Potência” (PMP), para que a extração de potência se torne máxima (PIRES, 2019). Devido as variações de temperatura e irradiação ao longo do dia, a geração de eletricidade é comprometida diminuindo a eficiência da potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico. Com as técnicas de MPPT esse empecilho pode ser mitigado pois elas forçam o sistema fotovoltaico a operar no ponto de máxima potência (ou próximo dele) conseguindo extrair a máxima potência do painel.

Inúmeras técnicas têm sido propostas no meio acadêmico científico, para promover o melhor aproveitamento da energia elétrica gerada. Embora os métodos mais utilizados são os métodos Perturbe e Observe (P&O) e o método da Condutância Incremental (Cond. Inc.), devido à simplicidade e confiabilidade, existem também rebuscadas técnicas de MPPT na literatura baseadas em treinamentos que são algoritmos que fazem o uso da inteligência artificial, por exemplo: por lógica *fuzzy* ou redes neurais artificiais (MOÇAMBIQUE, 2012).

Em vista disso, neste trabalho é estudado, por meio da ferramenta de simulação computacional PSIM[®], os dois métodos tradicionais de rastreamento, que são o Perturba e

Observe (P&O) e Condutância Incremental (Cond. Inc.) devido à facilidade de implementação, robustez e além de serem amplamente empregados em arranjos comerciais (PEREIRA, SOUZA e SANTOS, 2016). Para isto foi utilizado o conversor CC - CC *Boost* devido à sua boa resposta quando empregado as técnicas clássicas de MPPT (SORIANO, PONCE e MOLINA, 2017) e por possuir características de fonte de corrente de entrada.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para apresentar de maneira organizada os aspectos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho, este foi dividido em 6 Capítulos, sendo este o primeiro para esclarecer sobre a importância do tema que foi estudado e relatar os componentes utilizados no projeto para a realização da extração de máxima potência nos painéis fotovoltaicos, além de fornecer dados atuais sobre a capacidade de produção de energia fotovoltaica mundial e no Brasil.

O Capítulo 2, trata-se das duas técnicas de rastreamento de máxima potência utilizadas neste trabalho (P&O e Cond. Inc.). Será mostrado o algoritmo e as vantagens e desvantagens de utilização de cada uma dessas técnicas.

No Capítulo 3, será abordado sobre a transformação da energia solar em energia elétrica nos painéis (efeito fotovoltaico) e as principais tecnologias das células fotovoltaicas, assim como a eficiência da célula. Será mostrado também, a modelagem do painel no *software* PSIM® a partir de um modelo físico disponível no mercado.

No Capítulo 4, será feito o projeto de controle do conversor *Boost*. Será apresentado os cálculos para encontrar os valores dos componentes deste conversor, e a modelagem em espaço de estados de forma detalhada para a encontrar a função de transferência da planta a ser controlada.

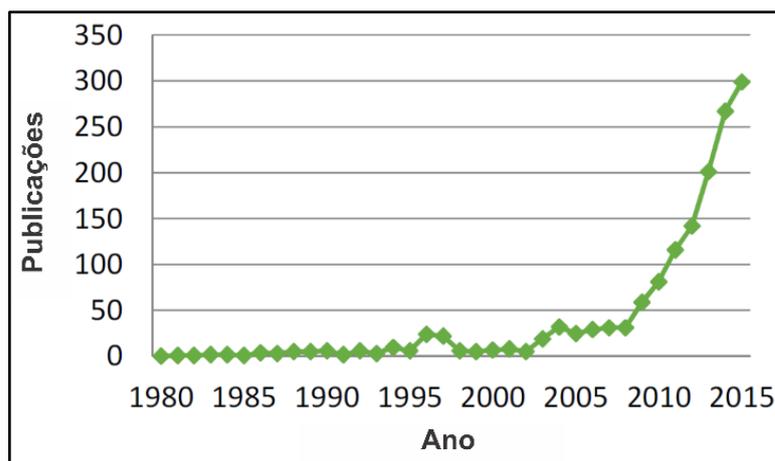
No Capítulo 5, serão expostos os resultados obtidos na simulação através do *software* PSIM para as duas técnicas de MPPT.

O capítulo 6, contém as conclusões gerais e referências bibliográficas necessárias para este trabalho e o apêndice contendo os códigos para a obtenção da função de transferência e de implementação do P&O e Cond. Inc.

2 TÉCNICA DE RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA

A crescente utilização da tecnologia solar fotovoltaica tem levado à busca por técnicas cada vez mais eficientes de extração de máxima potência. Na Figura 4 é possível ver o aumento do interesse sobre o assunto pela comunidade científica nos últimos anos.

Figura 4 - Número de publicações anuais de novas estratégias de MPPT nas últimas décadas.



Fonte: Adaptado de (KUNDU, GUPTA e KUMAR, 2016).

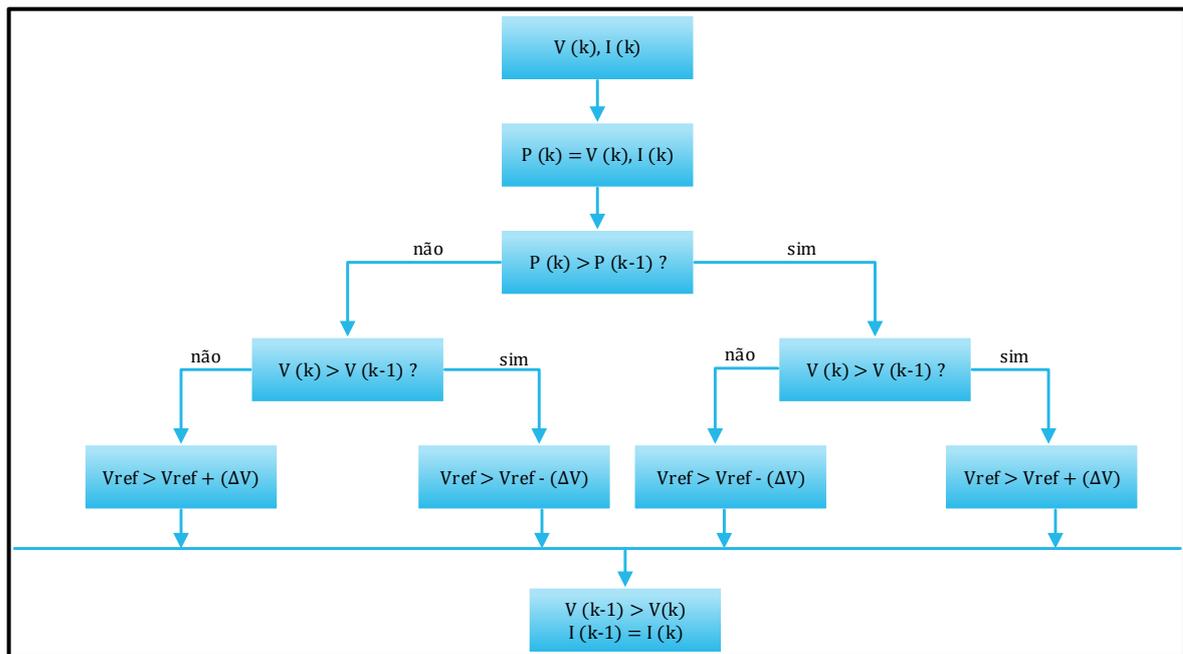
As técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência otimizam ao máximo o aproveitamento da capacidade de geração de um módulo solar ou arranjo fotovoltaico. Isso se faz por meio do rastreamento do ponto de máxima potência (MPP) que é o ponto de operação ideal do sistema que varia ao longo do dia devido às mudanças de temperatura e níveis de irradiação. Assim, a técnica do MPPT consiste em manter um módulo (ou arranjo) fotovoltaico operando em um ponto específico de sua curva I-V, de tal forma que a potência máxima disponível seja extraída para as condições de temperatura e irradiação incidente a cada instante (GOMES, 2014).

Dentre as principais propriedades requeridas em uma técnica de MPPT, destacam-se a precisão que é capacidade da técnica em operar com tensão e corrente de qualidade, sem grandes oscilações, mesmo em condições de sombreamento parcial das células fotovoltaicas. Eficácia, sendo esta relacionada com a adaptação da técnica à mudança dos fatores ambientais. E também, rapidez, ou seja, a velocidade de resposta da técnica diante de distúrbios repentinos de condições ambientais que alteram o ponto ótimo de operação, passando por um período transitório e voltando à operação para um ponto ideal logo em seguida (PIRES, 2019).

2.1 PERTURBA E OBSERVA

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) é um dos métodos mais simples na literatura. Ele é realizado através do monitoramento da potência por meio de sensores de tensão e corrente nos terminais do painel fotovoltaico (LEITE, 2017). A Figura 5 apresenta o fluxograma de funcionamento do método. Com os sensores é medido o valor da tensão $V(k)$ e o valor da corrente $I(k)$ e, então, o valor da potência $P(k)$ no instante atual (k) é calculado. A potência atual é comparada com a potência que foi calculada no instante anterior ($k-1$) e, assim, obtém-se a variação da potência ΔP . Se a variação de ΔP for positiva, então a técnica está atingindo o MPP e na próxima execução continua-se perturbando no mesmo sentido. Se ΔP for negativo, então no próximo passo a perturbação será no sentido oposto pois isto significa que está se distanciando do MPP. A Figura 5 mostra o fluxograma desta técnica.

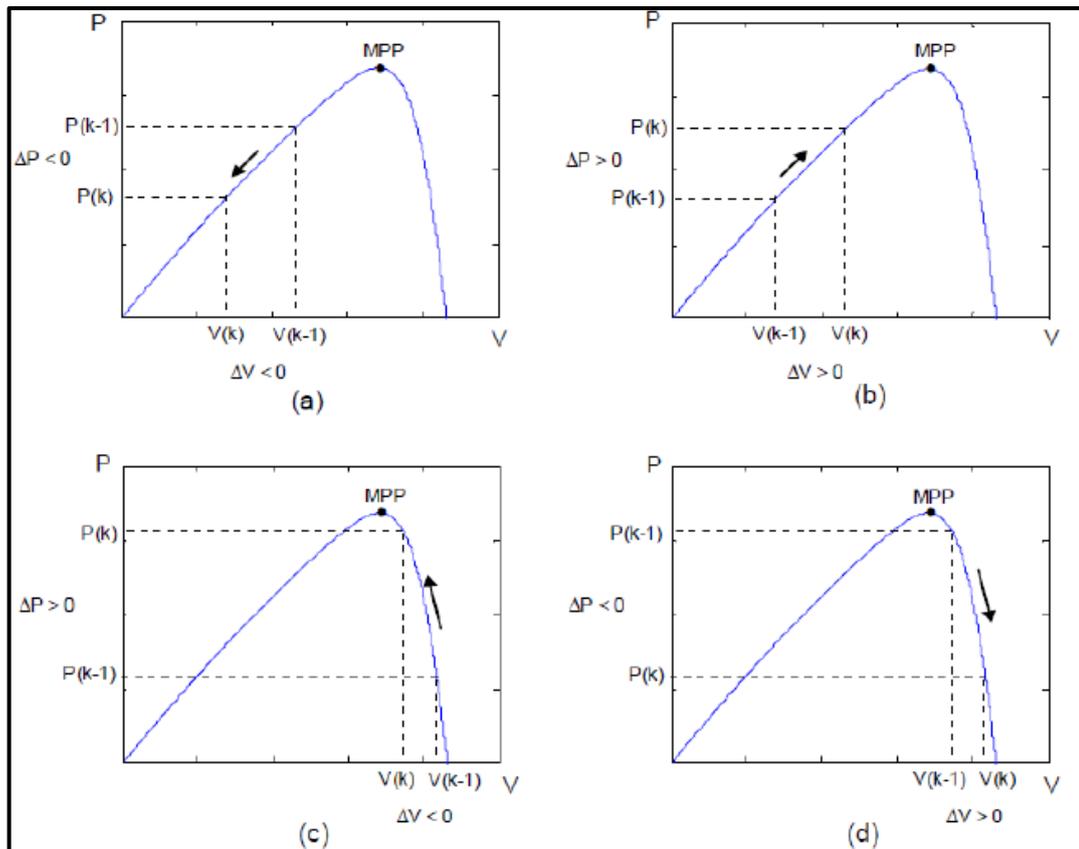
Figura 5 - Fluxograma de Perturbação e Observação.



Fonte: Adaptado de (VILLALVA, 2010).

Percebe-se na Figura 6 que o MPP nunca será atingido, pois as perturbações ficam oscilando em torno deste ponto. Abaixo, estão representadas as quatro possíveis situações de evolução da potência em um sistema fotovoltaico utilizando a técnica P&O.

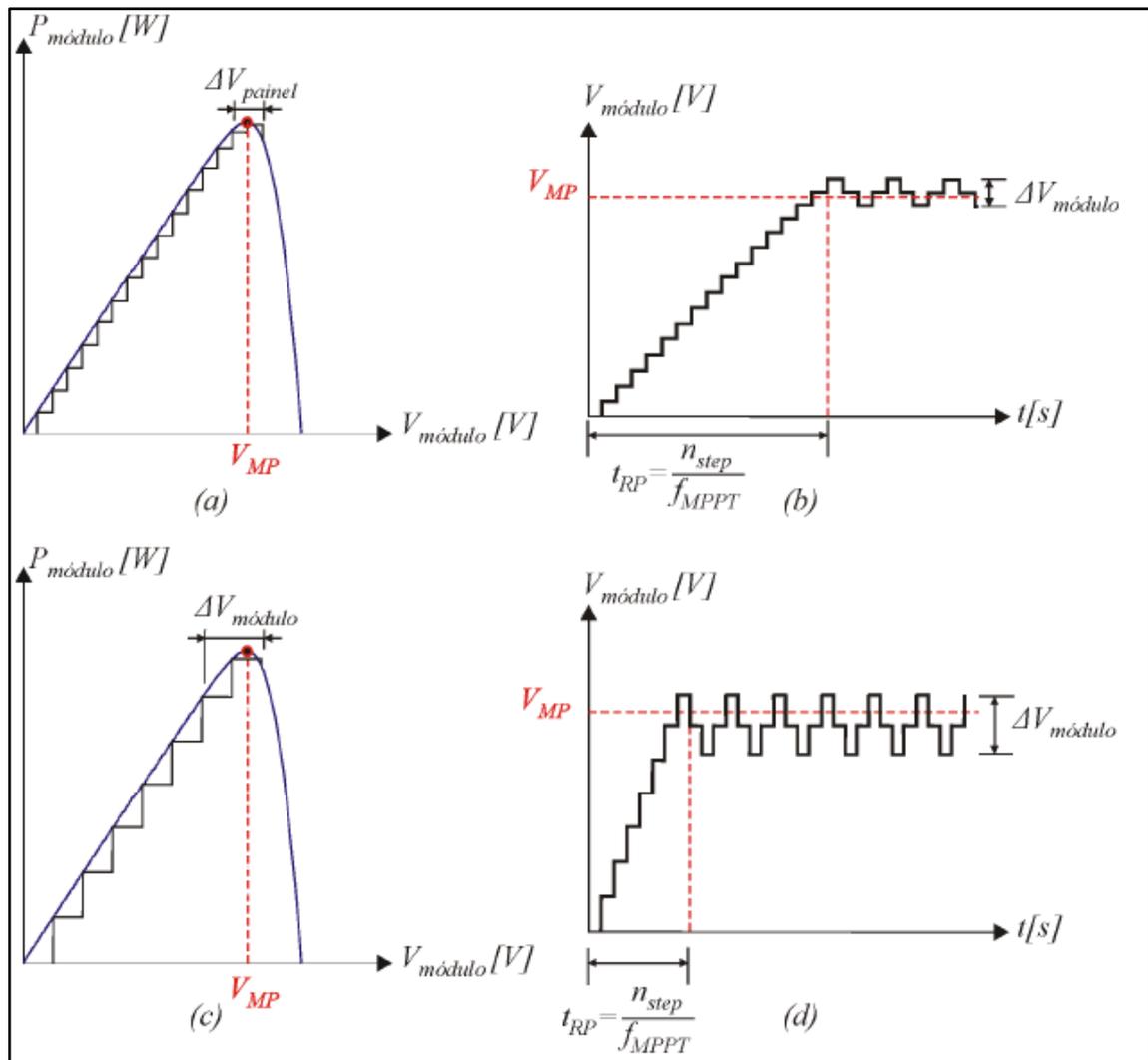
Figura 6 - Casos possíveis para a potência em um sistema fotovoltaico com utilização de P&O.



Fonte: (GOMES, 2014).

Se o passo escolhido for pequeno, as oscilações em torno do MPP serão pequenas e, conseqüentemente, desperdiçando pouca energia, porém demora-se para encontrar o ponto de máxima potência. Caso o passo seja grande, o MPP é atingido em um tempo menor, mas apresenta maiores oscilações em torno deste como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Comparação entre o rastreamento de máxima potência para diferentes valores do passo.



Fonte: (COELHO, 2018).

Outra desvantagem, encontrada com a utilização do P&O refere-se à demora em encontrar o Ponto de Máxima Potência (PMP) quando ocorre a mudança do nível de irradiação, podendo assim, ter baixa eficácia. Mesmo com estes impasses, o P&O é um excelente método de MPPT devido à sua fácil implementação e por não precisar das características dos módulos fotovoltaicos utilizados (BRITO, GALOTTO, *et al.*, 2012) e (PIRES, 2019).

Algumas modificações são encontradas na literatura para melhorar o P&O. Uma delas parte do uso de passos de tensão variável que diminuem à medida que se aproxima do ponto ótimo de operação, resultando na elevação da eficiência. Outra, chamada P&O Adaptativo e Preditivo, parte de perturbações constantes na razão cíclica de trabalho do conversor, que linearmente são reduzidas à medida que a potência extraída do módulo fotovoltaico aumenta (PIRES, 2019).

2.2 MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

O método da condutância incremental é muito similar ao método P&O, porém o erro do MPPT é reduzido pois o ponto de operação sofre menos perturbação quando comparado com o método Perturbe e Observa. Ele é frequentemente descrito na literatura como mais vantajoso em relação à técnica de P&O devido à facilidade de implementação, bom desempenho e rapidez de resposta diante das variações de irradiação solar (JÚNIOR, 2011). Este método possui resposta transitória melhor que a evidenciada no P&O (MASTROMAURO, LISERRE, *et al.*, 2009). O método Cond. Inc. baseia-se na derivada da potência da saída do painel, em relação à tensão ser zero no ponto de máxima potência e usa a Equação 1 da Potência (GOMES, 2014):

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

Em que:

P: Potência do Arranjo;

V: Tensão do arranjo;

I: Corrente drenada do arranjo fotovoltaico.

Derivando a Equação 1 em relação à V:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad (2)$$

Fazendo

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4)$$

Se o ponto de operação estiver à direita da curva de potência, tem-se:

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (6)$$

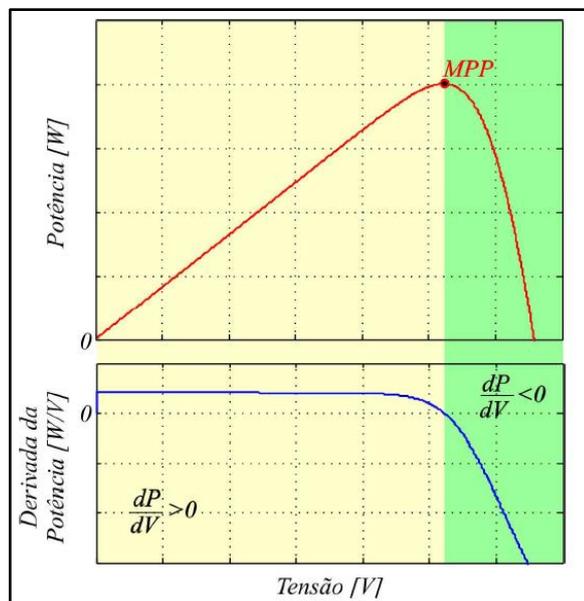
Se o ponto de operação está à esquerda da curva de potência:

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad (7)$$

$$\frac{dI}{dV} > \frac{I}{V} \quad (8)$$

Na Figura 8 é possível verificar que a região à direita do MPP é justamente a região em que a derivada da potência em relação à tensão é negativa e a região à esquerda do MPP é onde encontra-se que a derivada da potência em relação à tensão é positiva. Se dP/dV for maior que zero, o módulo fotovoltaico está atuando antes do ponto de MPP, desta forma, o MPPT deve atuar diminuindo a razão cíclica (D) do conversor de forma a elevar a tensão de saída do módulo fotovoltaico. Quando $dP/dV < 0$, o ponto de operação fica especificado depois do MPP, desta forma, o MPPT deve elevar a razão cíclica, deslocando o ponto de operação para a esquerda. A atuação do MPPT procura o ponto em que a $dP/dV = 0$, pois assim o ponto de operação do módulo é o próprio MPP (COELHO, 2008).

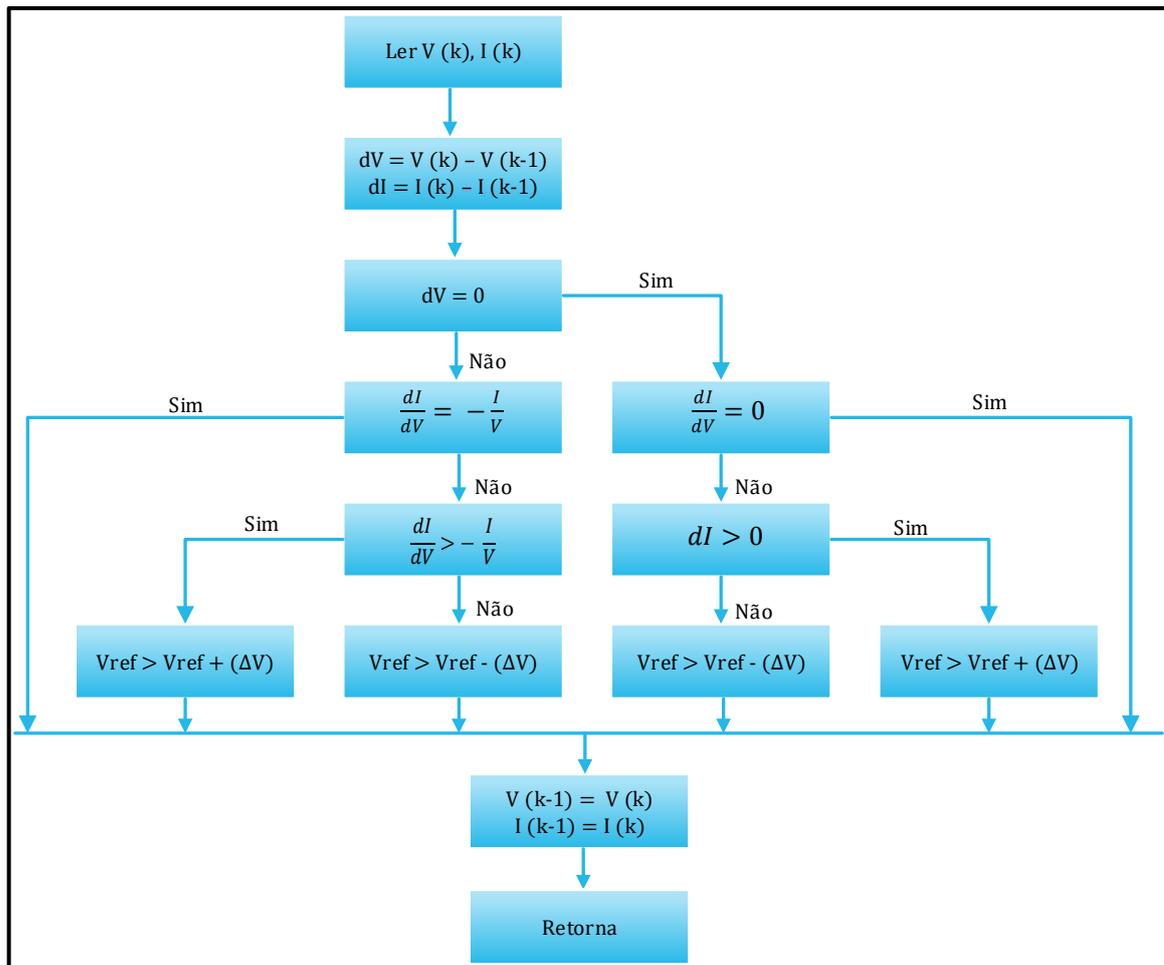
Figura 8 - Curva característica do painel com o MPP e a derivada da potência em relação à tensão.



Fonte: (COELHO, 2008).

O fluxograma para a implementação do algoritmo encontra-se na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma do método de MPPT Condutância Incremental.



Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009).

Dentre as desvantagens desta técnica encontram-se (PIRES, 2019):

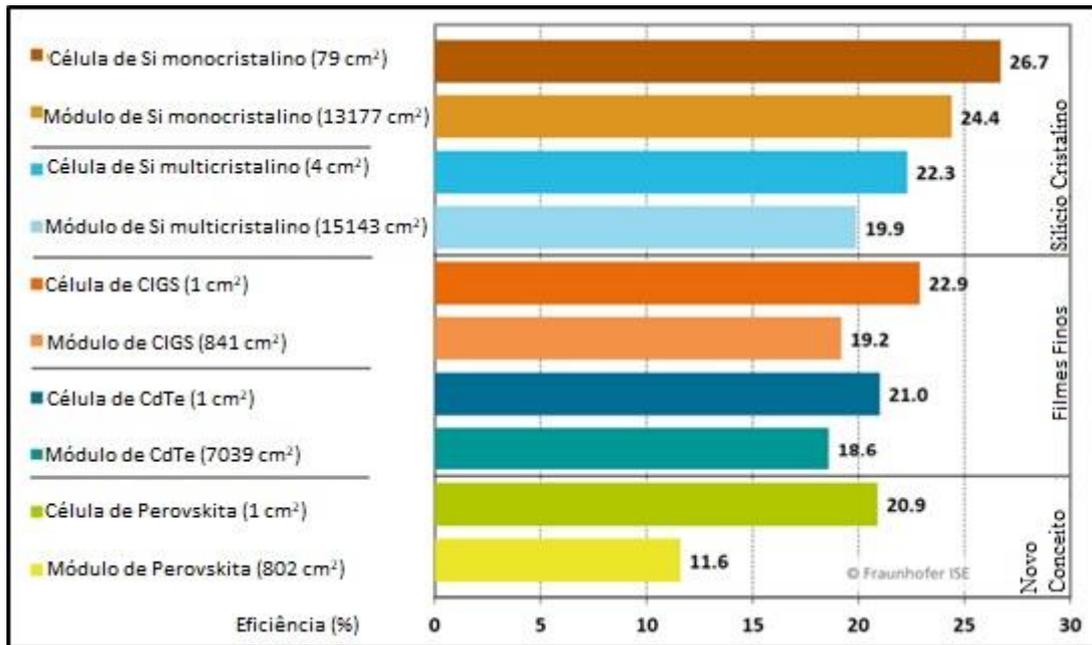
- Dificuldade de encontrar a inclinação nula: Devido à coleta imprecisa do sinal e ruídos existentes em uma implementação prática, esta técnica também ficará oscilando em torno do PMP;
- Complexidade: A implementação desta técnica é mais elevada quando comparado com P&O;
- Necessidade de sensores de tensão e corrente o que eleva os custos frente às outras técnicas que não necessitam sensores.

3 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são projetados para serem utilizados sob condições de intempéries e devem entregar resultados satisfatórios por no mínimo 30 anos (RÜTHER, 2004). São formados pelo encadeamento de várias células fotovoltaicas que através do efeito fotovoltaico realizam a conversão da radiação solar em eletricidade. O efeito fotovoltaico pode ser explicado como a diferença de potencial que surge nos extremos de um material semicondutor devido a liberação e movimentação de elétrons causado pela interação da radiação com o material semicondutor (PINHO e GALDINO, 2014).

As tecnologias das células fotovoltaicas podem ser classificadas em três gerações de acordo com o material e suas características. A primeira é composta por células produzidas a base de silício cristalino (c-Si) e pode ser de: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), este é o tipo de geração é a mais utilizada no mercado. A segunda geração é baseado na tecnologia fotovoltaica de filmes finos, formado por: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e tultureto de cádmio (CdTe), e devido ao baixo rendimento esta geração tem menor participação no mercado quando comparado com a primeira. A terceira geração estão em desenvolvimento e não são amplamente comercializados, sendo estas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV), células sensibilizadas por corante (DSSC) e células orgânicas e poliméricas (OPV) (COSTA, 2015). Alguns rendimentos, de acordo com o material da célula, podem ser vistos na Figura 10.

Figura 10 - Comparação da eficiência dos tipos de células e dos módulos fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de (FRAUNHOFER, 2019).

3.1 MODELAGEM DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

No projeto serão utilizados 6 módulos fotovoltaicos do Fabricante Kyocera KD135SX-UP do tipo policristalino, cujas características se encontram nas Tabela II e III.

Tabela II - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico nas condições padrões de teste.

Condições Padrões de Teste (*CPT)
Máxima Potência = 135 Watts
Tolerância = +5% / -5%
Tensão de Máxima Potência = 17,7 Volts
Corrente de Máxima Potência = 7,63 A
Tensão de Circuito Aberto = 22,1 Volts
Corrente de Curto Circuito = 8,37 A
Voltagem Máxima do Sistema = 600 Volts
Coeficiente de Temperatura da Corrente (I_{cc}) = $5,02 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
Coeficiente de Temperatura da Voltagem (V_{ca}) = $-8,02 \times 10^{-2} \text{ V/}^\circ\text{C}$
*CPT: Irradiância de 1000 W/m^2 , Espectro de Massa de ar 1.5 e Temperatura da Célula de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

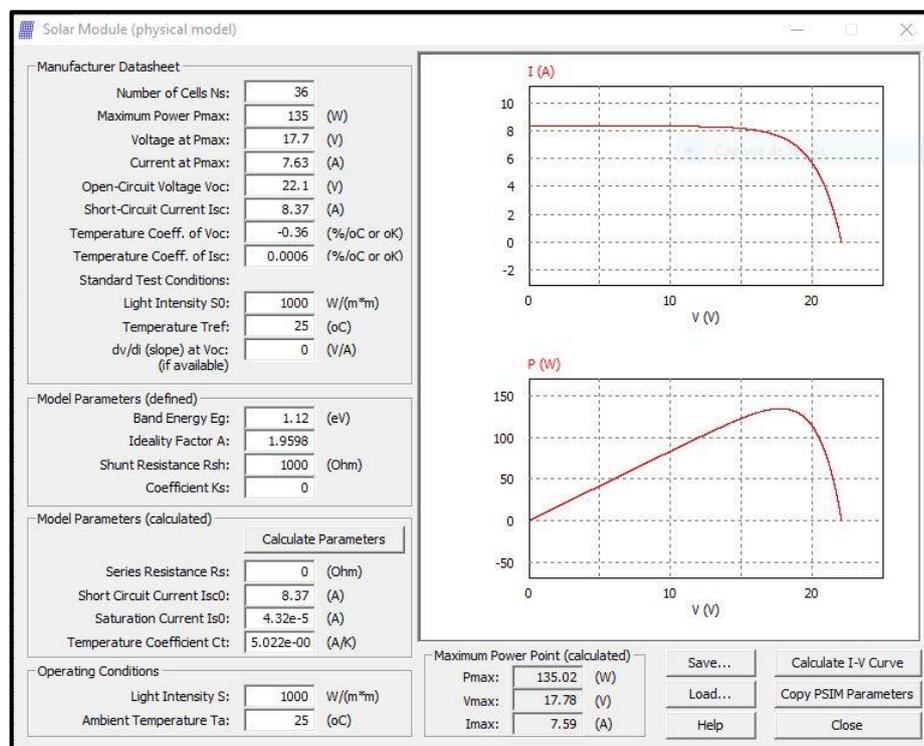
Fonte: Adaptado de (KYOCERA).

Tabela III - Especificações elétricas do módulo fotovoltaico na temperatura nominal de operação da célula (TNOC).

Teste com 800W/m ² , TNOC, Espectro de Massa de ar 1,5
Máxima Potência = 95 Watts
Tensão de Máxima Potência = 15,7 Volts
Corrente de Máxima Potência = 6,10 A
Tensão de Circuito Aberto 20,0 Volts
Corrente de Curto-Circuito = 6,79 A
*TNOC (Temperatura Nominal de Operação da Célula): 47,9 °C
Fonte: Adaptado de (KYOCERA).

Nesta primeira etapa, foi configurado o modelo físico de um módulo fotovoltaico utilizando a ferramenta “*Solar Module (physical model)*” do *software* PSIM. Com os dados que o catálogo informa, foi possível através da tela de parametrização inserir os dados referentes aos aspectos físicos e construtivos do módulo solar para verificar se os dados obtidos através do *software* seriam condizentes com os dados da especificação elétrica do módulo fotovoltaico. A Figura 11 mostra a inserção destes dados no *Solar Module* para um painel.

Figura 11 - Tela de parametrização do módulo solar no PSIM.



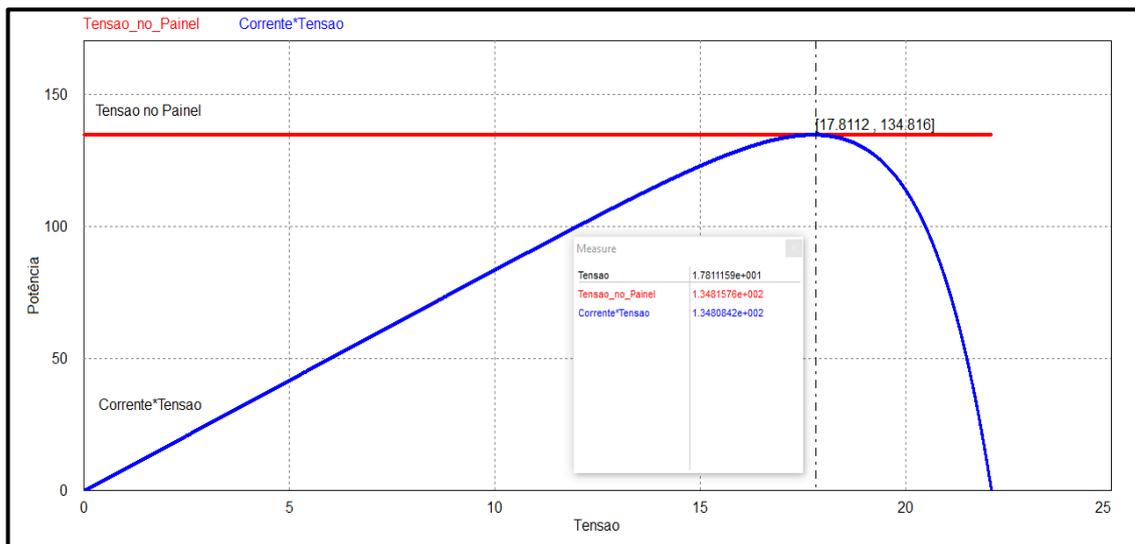
Fonte: Dados do próprio autor.

Os seguintes fatores: banda de energia E_g , fator de idealidade A , resistência paralela R_{sh} , e coeficiente K_s não foram encontrados no catálogo e foram estimados.

Observou-se que o ponto de máxima potência (PMP), a tensão na máxima potência (V_{mp}) e a corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}) não estavam idênticos ao do catálogo, então foi preciso variar o fator de idealidade A para o ajuste fino do modelo.

Assim, o módulo foi simulado e submetido a um índice de irradiância de 1000 W/m^2 a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ para obter a curva característica potência vs tensão (P - V) representada na Figura 12.

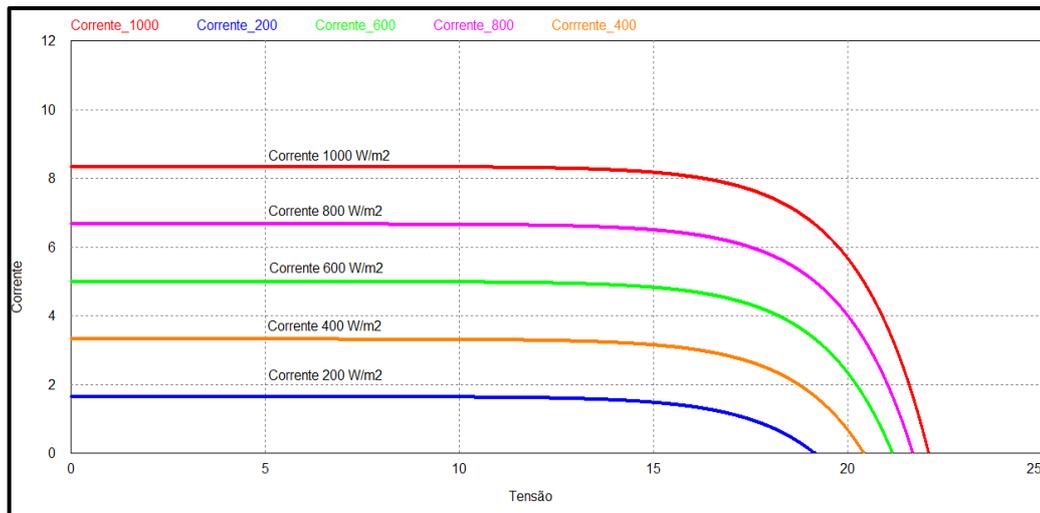
Figura 12 - Curva característica P - V nas condições padrão de teste.



Fonte: Dados do próprio autor.

De acordo com o catálogo, a máxima potência nessas condições é de 135 Watts. Na simulação obteve-se um erro de 0,14 % uma vez que a potência é de 134,8 Watts. Também foi necessário variar a irradiância para obter as características de tensão e corrente dos módulos em vários índices desta e operando na mesma temperatura a $25 \text{ }^\circ\text{C}$, resultando no gráfico da corrente vs tensão ($I - V$) na Figura 13.

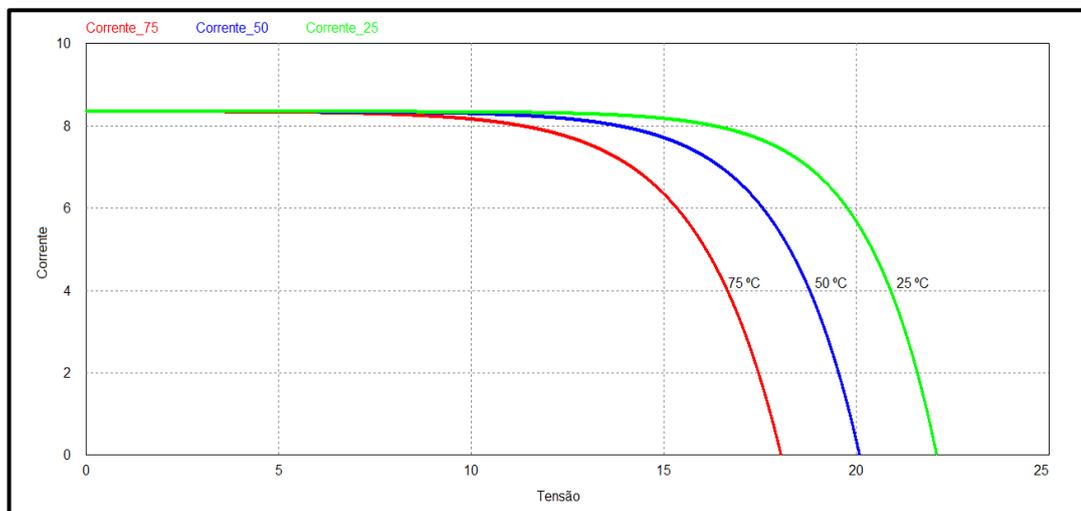
Figura 13 - Curva característica I - V em diferentes níveis de irradiância.



Fonte: Dados do próprio autor.

Após a validação da curva de acordo com os parâmetros de irradiação, foi necessário verificar a variação da corrente em diferentes valores de temperatura, obtendo a Figura 14.

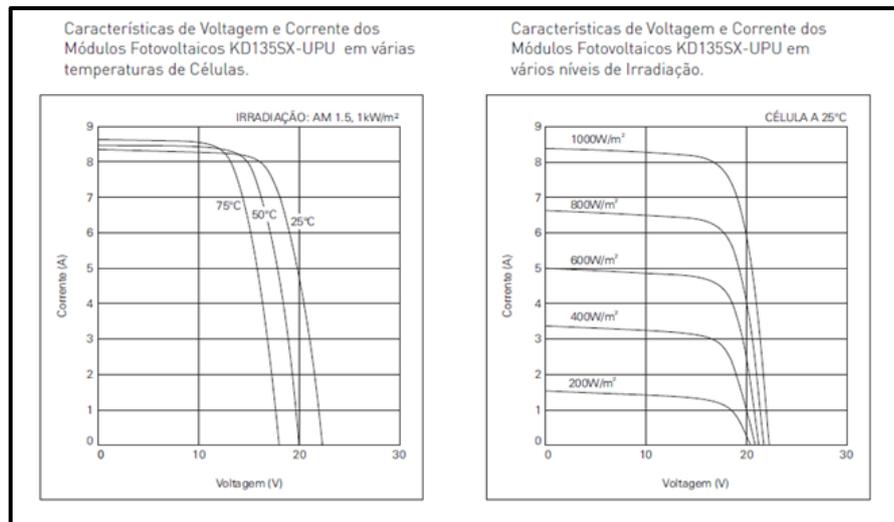
Figura 14 - Variação da corrente com a temperatura.



Fonte: Dados do próprio autor.

Sendo assim, as características elétricas obtidas nas simulações estão de acordo com as características elétricas especificadas no catálogo da Kyocera, apresentado a seguir.

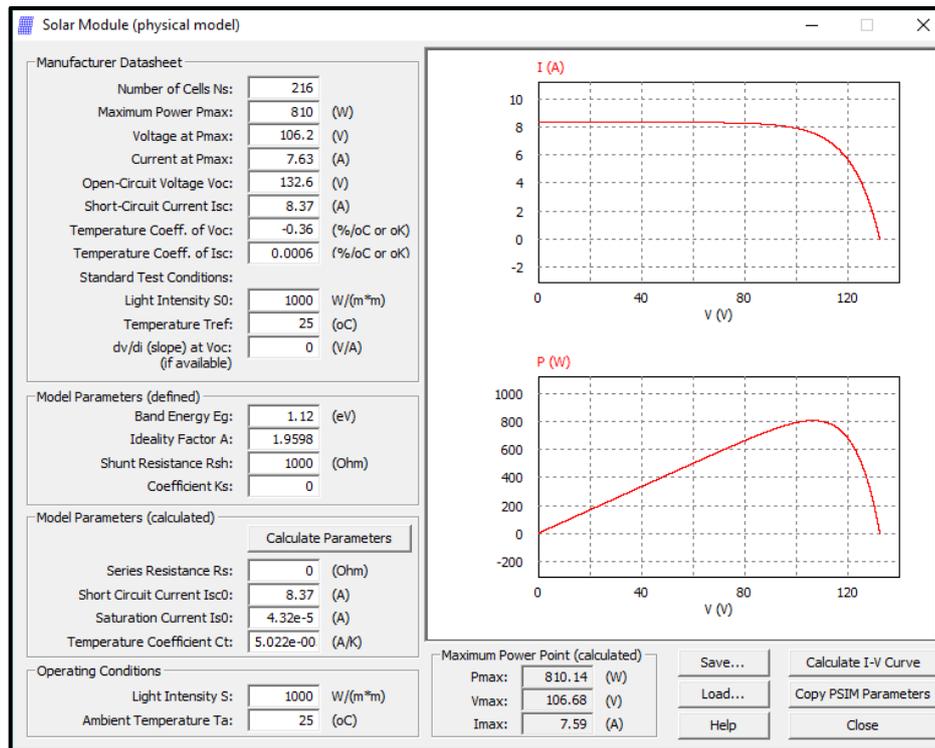
Figura 15 - Características elétricas do painel fotovoltaico.



Fonte: Dados do próprio autor.

Os painéis fotovoltaicos podem ser conectados em série e/ou paralelo, formando os arranjos fotovoltaicos. Quando conectados em série a tensão dos painéis conectados se somam e a corrente elétrica permanece a mesma. Na associação em paralelo a corrente de cada painel é somada e a tensão é mantida.

Nas condições padrões de teste em que a irradiação é de 1000 W/m^2 e a temperatura é de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ o catálogo informa que a potência máxima de um painel é de 135 Watts. Como estão sendo utilizados 6 painéis conectados em série, a potência máxima do conjunto é seis vezes maior que a potência máxima de um painel, portanto a potência máxima de 810 W observado na modelagem final dos módulos está coerente, como mostra a Figura 16. Os parâmetros: número de células N_s , potência máxima P_{max} , tensão máxima na potência máxima, tensão de circuito aberto V_{oc} e dv/di na V_{oc} foram multiplicados pelo número de painéis que foram conectados em série (PSIM TUTORIAL).

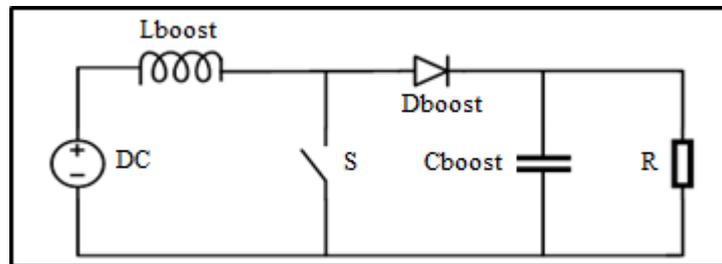
Figura 16 - Parametrização do modelo real no *Solar Module*.

Fonte: Dados do próprio autor.

4 CONVERSOR CC-CC *BOOST*

Conversores de corrente contínua (CC-CC) são usados em várias aplicações industriais e acadêmicas em que é necessário fazer a conversão de níveis de tensão em operação CC fornecendo na saída tensão regulada (AHMED, 2008). A Figura 17 mostra o Conversor *Boost*. Ele é formado pelo indutor (L_{boost}) que é responsável pelo armazenamento de energia, uma chave estática (S), um diodo (D_{boost}) e um capacitor, sendo este responsável por diminuir as oscilações de tensão sobre a carga (C_{boost}) (CARNEIRO, SANTOS e ANTUNES, 2018).

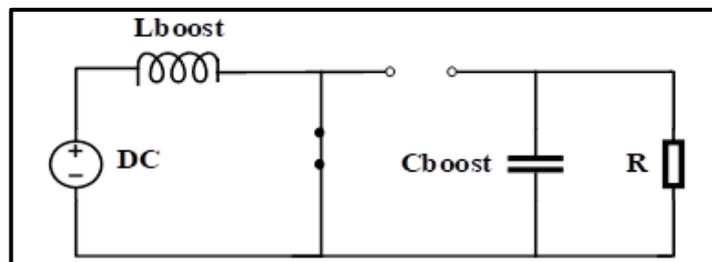
Figura 17 - Estrutura de um Conversor *Boost*.



Fonte: Dados do próprio autor

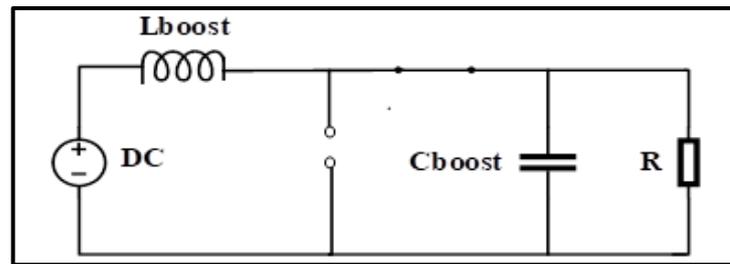
O funcionamento do Conversor *Boost* pode ser explicado da seguinte forma: Primeiramente, a chave ou interruptor está em condução. Durante esta etapa, o indutor armazena energia proveniente da fonte e a corrente na carga é fornecida pelo capacitor C_{boost} , o que provoca a diminuição da tensão. A Figura 18 mostra o circuito equivalente quando o interruptor está fechado.

Figura 18 - Conversor *Boost* com interruptor em condução.



Fonte: Dados do próprio autor

Quando o interruptor estiver aberto, o diodo entra em condução e a fonte e o indutor fornecem energia para a carga. Assim, a corrente no indutor decresce linearmente. O circuito equivalente é representado na Figura 19.

Figura 19 - Conversor *Boost* com interruptor aberto.

Fonte: Dados do próprio autor.

A razão cíclica do conversor *Boost* é dada pela seguinte relação:

$$\frac{1}{1-D} = \frac{V_O}{V_i} = D \quad (9)$$

Em que:

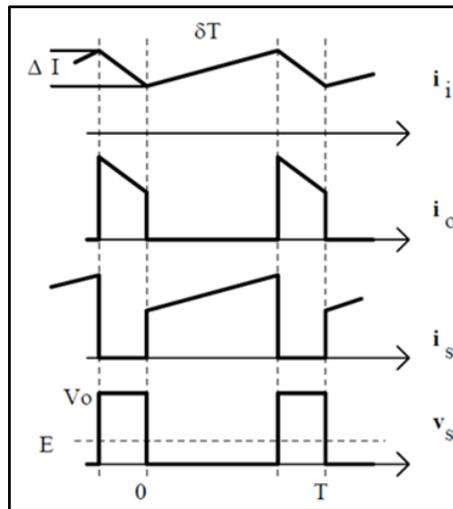
D : Ganho estático do conversor;

V_O : Tensão na saída do conversor;

V_i : Tensão na entrada do conversor.

Com base na Equação 9, é possível perceber que a tensão de saída aumenta exponencialmente em relação à tensão de entrada. Para aplicação em sistemas fotovoltaicos, a fonte de tensão de entrada é o gerador fotovoltaico, portanto terá amplitude variável, devendo essa, ser controlada para a extração da máxima potência. O conversor *Boost* é responsável por extrair a máxima potência do painel fotovoltaico através de alguma técnica de MPPT por meio da atuação sobre a razão cíclica.

As etapas de operação do conversor *Boost* operando no modo de condução contínua, encontram-se ilustradas na Figura 20. Na qual: i_s é a corrente na chave, v_s é a tensão na chave, i_i é a corrente na entrada, δ é a razão cíclica e i_o é a corrente na saída.

Figura 20 - Principais formas de onda teóricas do conversor *Boost* no Modo de Condução Contínuo.

Fonte: (MELO, 2011).

4.1 DIMENSIONAMENTO DO CONVERSOR *BOOST*

Para o cálculo dos componentes do conversor *Boost* foram utilizadas as especificações de projeto detalhadas na Tabela IV.

Tabela IV - Especificações de projeto.

Potência máxima do arranjo fotovoltaico (P_{pv}):	Amplitude da ondulação do capacitor (\hat{u}_c):
$P_{pv} = 810,14 \text{ w}$	$\hat{u}_c = 0,05 * 106,68 = 5,334 \text{ V}$
Frequência de oscilação nos terminais da <i>String</i> (f_{pv}):	Frequência de chaveamento (f_{ch}):
$f_{pv} = 120 \text{ Hz}$	$f_{ch} = 25 \text{ kHz}$
Tensão máxima sobre o capacitor (U_c):	Ondulação da corrente no indutor (ΔI_L):
$U_c = 106,68 \text{ V}$	$\Delta I_L = 0,5 * 7,5 = 3,75 \text{ A}$
Tensão de saída do conversor <i>Boost</i> (V_o):	
$V_o = 400 \text{ V}$	

Fonte: Dados do próprio autor.

O capacitor do conversor *Boost* (C_{boost}) foi calculado usando a Equação 10 (KJAER, EDERSEN e BLAABJERG, 2005):

$$C_{boost} = \frac{P_{pv}}{4 \cdot \pi \cdot f_{pv} \cdot U_c \cdot \hat{u}_c} = \frac{810,14}{4 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 106,68 \cdot (0,05 \cdot 106,8)} = 944,13 \mu F \quad (10)$$

A Potência máxima extraída do arranjo fotovoltaico é de 810,14 W, para essa condição, a tensão máxima sobre o capacitor é de 106,68 V. A amplitude da ondulação foi estabelecida em 5% da tensão máxima sobre o capacitor com base em (PIRES, 2019), para que a oscilação sobre este seja de pequena magnitude. O valor da f_{pv} é igual o dobro da frequência fundamental da rede elétrica (60 Hz) (JAIN e AGARWAL, 2007). Assim, o valor encontrado do capacitor de saída do arranjo é de 944,13 μF .

Para o cálculo do indutor do conversor *Boost*, foi usado a Equação 9 para obter o ganho estático do conversor *Boost* expresso na Equação 11, a partir da relação de tensão de entrada e tensão de saída do conversor.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{400 - 106,68}{400} = 0,73330 \quad (11)$$

Como critério de projeto, na saída do *Boost* a tensão é de 400 V e a tensão na entrada do conversor Boost (V_i) quando for máxima será igual à tensão máxima sobre o capacitor (U_c). Conhecendo a razão cíclica, é possível encontrar a indutância do *Boost* (L_{boost}) através da Equação 12 (VILELA, 2011).

$$L_{boost} = \frac{U_c \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_{ch}} = \frac{106,68 \cdot 0,7333}{25 \cdot 10^3 \cdot (0,5 \cdot 7,59)} = 818,28 \mu H \quad (12)$$

A frequência de chaveamento é de 25 kHz pois é um valor que possibilita a redução no tamanho de indutores e capacitores com valores comerciais facilmente encontrados de chaves. A ondulação de corrente é metade da corrente no indutor (OLIVEIRA JUNIOR, 2017) e a indutância do *Boost* resultante é de 818,28 μH .

4.2 PROJETO DE CONTROLE DO *BOOST*

A modelagem matemática de um sistema visa representá-lo por uma função de transferência, a qual determina o comportamento estático e/ou dinâmico do mesmo (OLIVEIRA JÚNIOR, 2017). Para modelagem do conversor, será utilizado o método de espaço de estados. As equações diferenciais ou equações de estado que descrevem o sistema, podem ser escritas em forma de matriz, como mostra a Equação 13.

$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (13)$$

Em que:

$x(t)$: vetor de estados;

$\frac{\partial x(t)}{\partial t}$: derivada do vetor de estados;

$u(t)$: vetor de entrada;

A: matriz de sistema;

B: matriz de entrada.

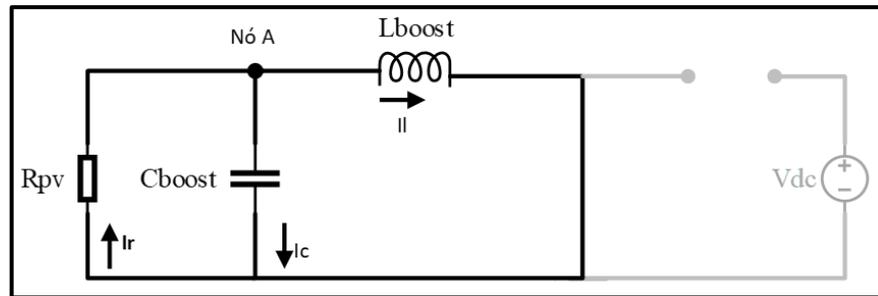
O vetor de estados $x(t)$ contém todas as variáveis de estado, ou seja, correntes nos indutores e tensões nos capacitores. A derivada do vetor de estados é a matriz em que os elementos são iguais às derivadas dos elementos correspondentes do vetor de estados. O vetor de entrada $u(t)$ contém as entradas independentes do sistema. As matrizes A, B contêm constantes de proporcionalidade (PIRES, 2019).

Para que o controlador do conversor *Boost* seja encontrado é necessário obter a função de transferência da planta a ser controlada a partir da modelagem em espaço de estado do conversor. Para que o conversor CC - CC *Boost* realize a extração de máxima potência por meio de uma das técnicas clássicas (P&O ou Cond. Inc.) deve-se controlar a tensão terminal da fileira fotovoltaica (que varia devido às condições climáticas de radiação e temperatura) por meio da razão cíclica de chaveamento do seu interruptor. Portanto, a função de transferência a ser encontrada é $G_{vc,d}$ (s) (PIRES, 2019).

As Figuras 21 e 22 ilustram os circuitos do *Boost* que foram utilizados para a modelagem matemática. Esta não é a configuração de um *Boost* comum devido às condições que se encontram o conversor no circuito. Para a modelagem, a resistência R_{pv} representa uma situação de operação (tensão e corrente) do módulo e a tensão na saída do conversor pode ser imposta por um inversor como foi apresentado por (OLIVEIRA JUNIOR, 2017), sendo esta substituída no circuito por uma fonte de tensão. É possível identificar na região em amarelo da Figura 8 que o arranjo fotovoltaico comporta-se como uma fonte de corrente e após o MPPT comporta-se como uma fonte de tensão, porém, é preferível utilizar a resistência equivalente, por retornar melhores resultados na simulação.

No momento em que a chave estiver fechada, o diodo não estará conduzindo e o circuito equivalente momentâneo será o dado pela Figura 21.

Figura 21 - Circuito equivalente do conversor *Boost* com chave fechada.



Fonte: Dados do próprio autor.

Sabe-se que a corrente no capacitor pode ser encontrada pela Equação 14 (HART,2016):

$$i_c = C_{boost} \cdot \frac{dv_c}{dt} \quad (14)$$

Em que:

i_c : Corrente no capacitor C_{boost} [A];

$\frac{dv_c}{dt}$: Derivada da tensão no capacitor em relação ao tempo.

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes (LKC) no nó A, indicado na Figura 21, obtém-se a Equação a seguir:

$$i_c + i_l = i_r \quad (15)$$

Em que:

i_l : Corrente no indutor L_{boost} [A];

i_r : Corrente na resistência R_{pv} [A];

Substituindo a Equação 14 na Equação 15, e escrevendo i_r em função da tensão no capacitor e resistência R_{pv} , tem-se a Equação 16.

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{v_c}{R_{pv} \cdot C_{boost}} - \frac{i_l}{C_{boost}} \quad (16)$$

Em que:

v_c : Tensão no capacitor C_{boost} [V].

A queda de tensão no indutor pode ser encontrada com a Equação 17 (HART, 2016):

$$v_l = L_{boost} \cdot \frac{di_l}{dt} \quad (17)$$

Em que:

v_l : Tensão no indutor L_{boost} [V];

$\frac{di_l}{dt}$: Derivada da corrente no indutor em relação ao tempo.

Para esta configuração, a tensão no indutor é igual à tensão no capacitor.

$$v_l = v_c \quad (18)$$

Substituindo a Equação 17 em 18, tem-se a Equação 19.

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_c}{L_{boost}} \quad (19)$$

A representação na forma matricial é representada na Equação 20.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_l}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ -\frac{1}{C_{boost}} & -\frac{1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_l \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [v_{dc}] \quad (20)$$

Em que:

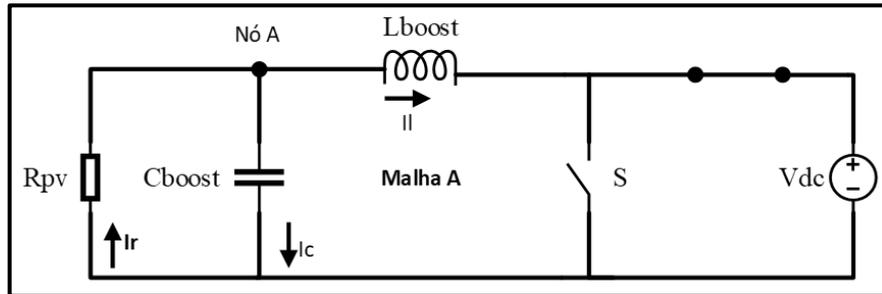
v_{dc} : Tensão na saída do conversor *Boost* [V].

A partir da Equação 20, têm-se as matrizes de sistema e de entrada para a primeira etapa de operação do conversor, dadas por:

$$A1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ -\frac{1}{C_{boost}} & -\frac{1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{bmatrix} \quad B1 = [0] \quad (21)$$

Para a modelagem em espaço de estados do conversor *Boost*, quando este estiver com a chave aberta e diodo conduzindo, o circuito equivalente é representado na Figura 22.

Figura 22 - Circuito equivalente do conversor *Boost* com chave Aberta.



Fonte: Dados do próprio autor.

A partir da análise nodal no nó A, é possível estabelecer a relação na Equação 22.

$$i_c + i_l = i_r \quad (22)$$

A Equação 23 é obtida de maneira análoga à Equação 16.

$$\frac{dv_c}{dv_t} = -\frac{v_c}{R_{pv} \cdot C_{boost}} - \frac{i_l}{C_{boost}} \quad (23)$$

Da lei de Kirchhoff das tensões na malha A, obtém-se a Equação 24.

$$v_{dc} + v_l - v_c = 0 \quad (24)$$

Substituindo a tensão no indutor da Equação 24 pela Equação 17, e isolando o termo $\frac{di_l}{dt}$ encontra-se a Equação 25.

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{v_c}{L_{boost}} - \frac{v_{dc}}{L_{boost}} \quad (25)$$

A representação na forma matricial é representada na Equação 26.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_l}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ -\frac{1}{C_{boost}} & -\frac{1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_l \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [v_{dc}] \quad (26)$$

A partir da Equação 26, têm-se as matrizes de sistema e de entrada para a segunda etapa de operação do conversor, dadas por:

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ -\frac{1}{C_{boost}} & -\frac{1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{bmatrix} \quad B2 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

As Equações 20 e 26 foram inseridas em um programa desenvolvido por (LIMA) no software Mathcad capaz de calcular a tensão no capacitor do conversor *Boost* em função da razão cíclica (G_{vc_d}) e por meio deste a Equação 28 foi obtida.

$$G_{vc_d} = \frac{R_{pv} \cdot v_{dc}}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \quad (28)$$

Para o cálculo de G_{vc_d} foi utilizado $v_{dc} = 400 V$, que é a tensão na saída do conversor e o cálculo da resistência R_{pv} foi feito através da tensão no MPP (V_{MP}) e da potência no MPP (P_{MP}), através da Equação 29.

$$R_{pv} = \frac{V_{MP}^2}{P_{MP}} = \frac{106,68^2}{810,14} = 14,047 \ \Omega \quad (29)$$

Substituindo as variáveis da equação com os valores numéricos encontrados de C_{boost} , L_{boost} , R_{pv} e v_{dc} na Equação 28, encontra-se a função de transferência na Equação 30.

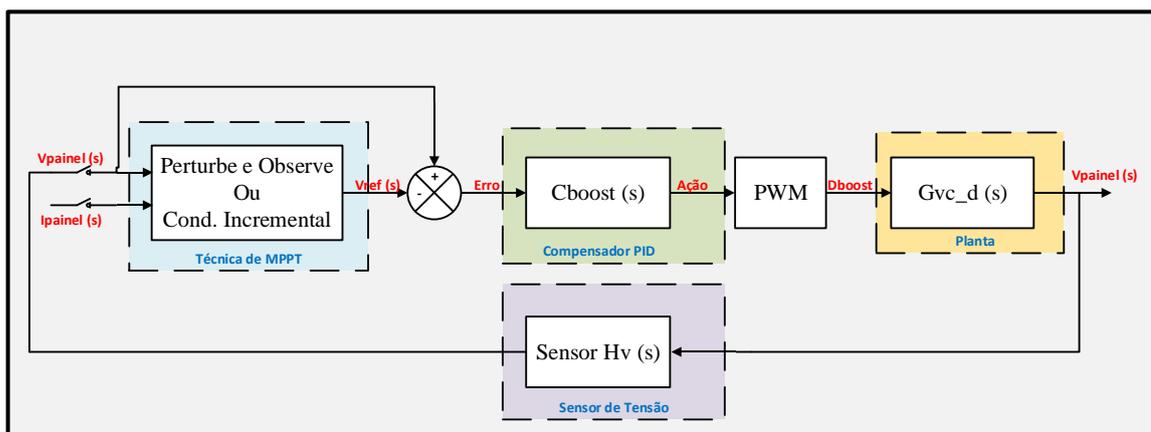
$$G_{vc_d} = \frac{5619}{1,085 \cdot 10^{-5} s^2 + 0,0008183 \cdot s + 14,05} \quad (30)$$

Com a função de transferência, é possível encontrar o controlador do conversor *Boost*. A estratégia de controle consiste em controlar a tensão de entrada do conversor *Boost* de modo a extrair a máxima potência disponibilizada pelas *strings* fotovoltaicas, mesmo diante das mudanças de irradiação e temperatura. Para uma aplicação prática pode-se usar um DSP capaz de gerar sinais PWM para o controle do conversor como foi apresentado em (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

A técnica de MPPT possui como variáveis de entrada a tensão e a corrente nos terminais do painel, e como saída uma tensão de referência, sendo esta a tensão que garante que o arranjo fotovoltaico opere na máxima potência. Ou seja, esta é a tensão final com incremento ou decremento, que depende da variação da tensão e potência analisada pela técnica do Perturbe e Observe ou pela variação da derivada da potência em relação à tensão analisada pela técnica da Condutância Incremental. A estratégia de controle utilizada impõe essa tensão nos terminais das *strings* fotovoltaicas por meio de um compensador $C_{boost}(s)$ em cascata com a planta G_{vc_d} (função de transferência a ser controlada).

O controlador trabalha no sentido de compensar o erro entre a tensão de referência (obtida pela técnica de MPPT) e a tensão de saída da *string* fotovoltaica, atuando na razão cíclica de chaveamento do conversor de modo a impor essa tensão de referência nos terminais da *string* (OLIVEIRA JUNIOR, 2017). A representação da malha de controle encontra-se na Figura 23.

Figura 23 - Representação da malha de controle.



Fonte: Adaptado de (PIRES, 2019).

Como requisito de projeto para o controlador do conversor *Boost*, deve-se ter estabilização do sistema em 1/10 do tempo de atualização do método de MPPT utilizado. A

atualização é de 100 Hz (ou 10 ms), então o tempo de estabilização do controlador C_{boost} é fixado em 1 ms, com um tempo de subida de 0,5 ms (PIRES, 2014) conforme mostra a Figura 24.

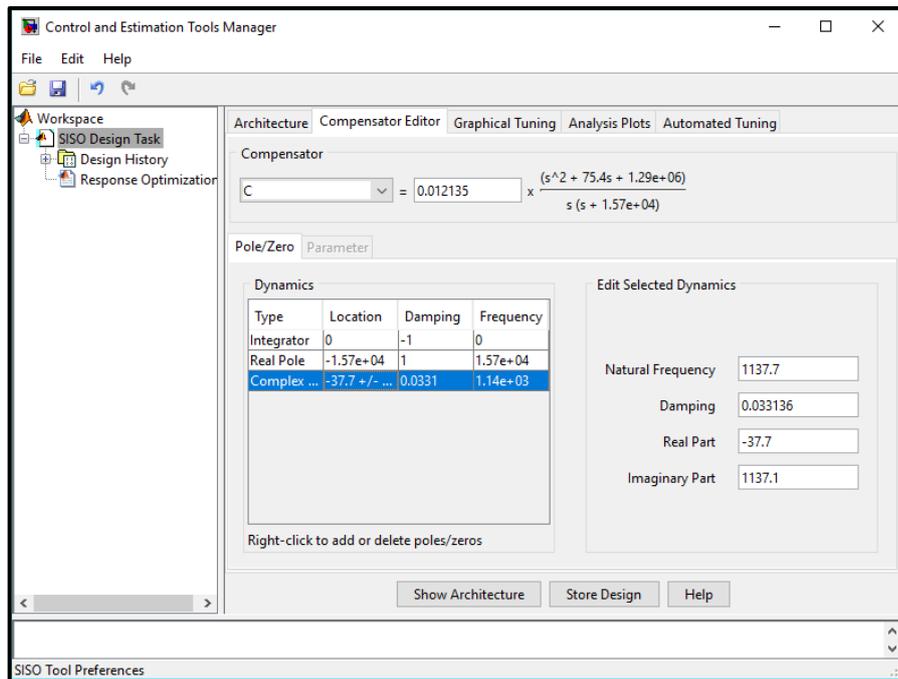
Figura 24 - Requisitos para o projeto do compensador.

Fonte: Dados do próprio autor.

Foi projetado um compensador PID seguindo os seguintes critérios: um polo na origem para eliminar o erro de regime permanente, um polo em $\frac{1}{10}$ da frequência de chaveamento para filtrar frequências acima do chaveamento e os zeros do compensador foram posicionados nos polos da planta tornando o sistema originalmente de 2ª ordem em um sistema de 1ª ordem (PIRES, 2014), conforme mostra a Figura 25. Foi elaborado um PID, pois a ação proporcional irá prover uma resposta mais rápida do sistema sob uma variação no sinal de entrada. A ação integral tem por objetivo anular o erro de regime permanente. A ação derivativa possui efeito de antecipação da correção do valor de saída do sistema de forma que ela melhora a rapidez de resposta do sistema (NEVES, 2014).

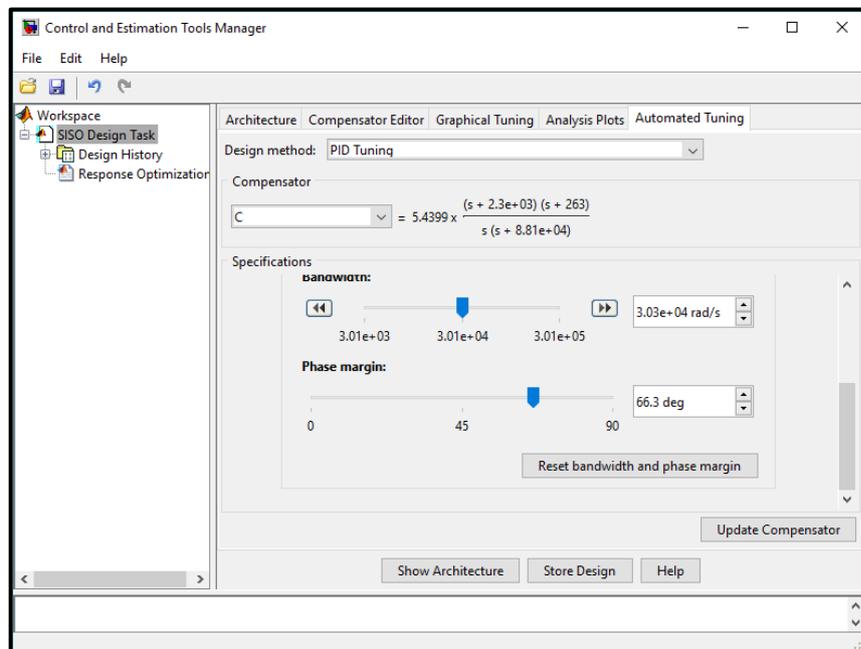
Com o *Automated Tuning* do Matlab, outros critérios também foram inseridos: margem de fase entre 45° e 76° para que o sistema apresente baixo tempo de acomodação e ultrapassagem percentual (%UP) reduzida (OLIVEIRA JUNIOR, 2017). Em relação à velocidade de controle, esta foi estipulada como 5 vezes menor que a velocidade de chaveamento (25 kHz) resultando em $31415 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ (PIRES, 2014). A Figura 26 mostra a inserção destes parâmetros na janela no *Automated Tuning*

Figura 25 - Tela do *Automated Tuning* para inserir os requisitos do controlador.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 26 - Tela do *Automated Tuning* para inserir os parâmetros do controlador: velocidade de controle e largura de banda.



Fonte: Dados do próprio autor.

A resposta deste compensador a um degrau unitário é evidenciada na Figura 27 onde é possível notar a boa estabilidade do compensador. Observa-se ainda que o sistema atende o regime permanente com tempo de assentamento de, aproximadamente, 0,7 ms.

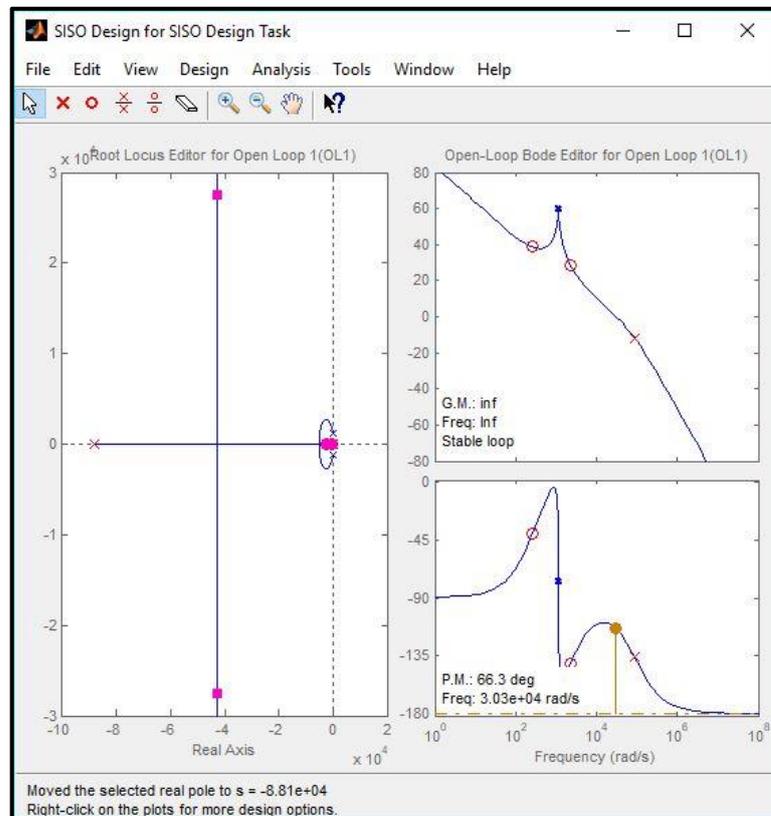
Figura 27 - Resposta a um degrau unitário.



Fonte: Dados do próprio autor.

Com a Figura 28, observa-se que o controlador atendeu aos requisitos de projeto com margem de fase de 66.3° e frequência de $30300 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Figura 28 - Diagrama de Bode do compensador e lugar geométrico das raízes.



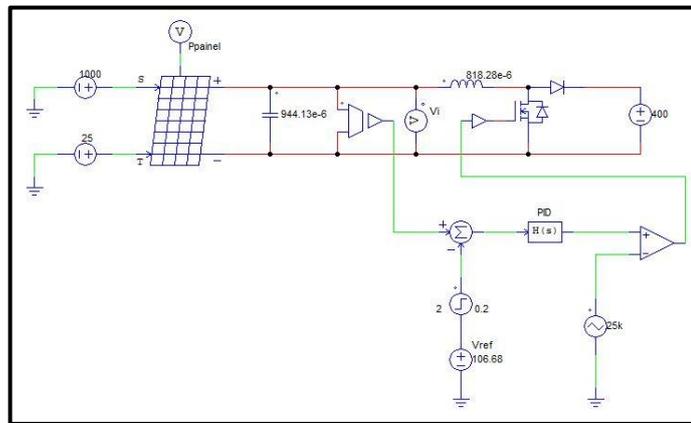
Fonte: Dados do próprio autor.

O compensador encontrado para o *Boost* resulta em:

$$C_{boost}(s) = 5.4399 \frac{s^2 + 2563.s + 604900}{s^2 + 88100.s} \quad (31)$$

O conversor *Boost* e a malha de realimentação negativa foi implementada no PSIM conforme a Figura 29 e posteriormente foi inserida a função de transferência do controlador no bloco H(s).

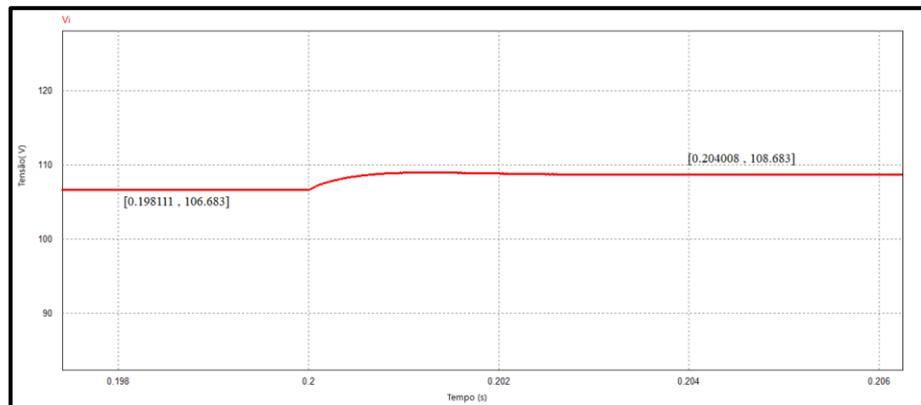
Figura 29 - Conversor *Boost* e circuito de realimentação negativa



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 30 é possível observar a resposta para a malha fechada de tensão com um degrau de 2V no tempo 0,2 s. Observa-se que o controlador PID projetado impõe a tensão de referência (V_{ref}) na tensão de saída do painel (V_i).

Figura 30 - Resposta da malha de realimentação negativa com o controlador PID.



Fonte: Dados do próprio autor.

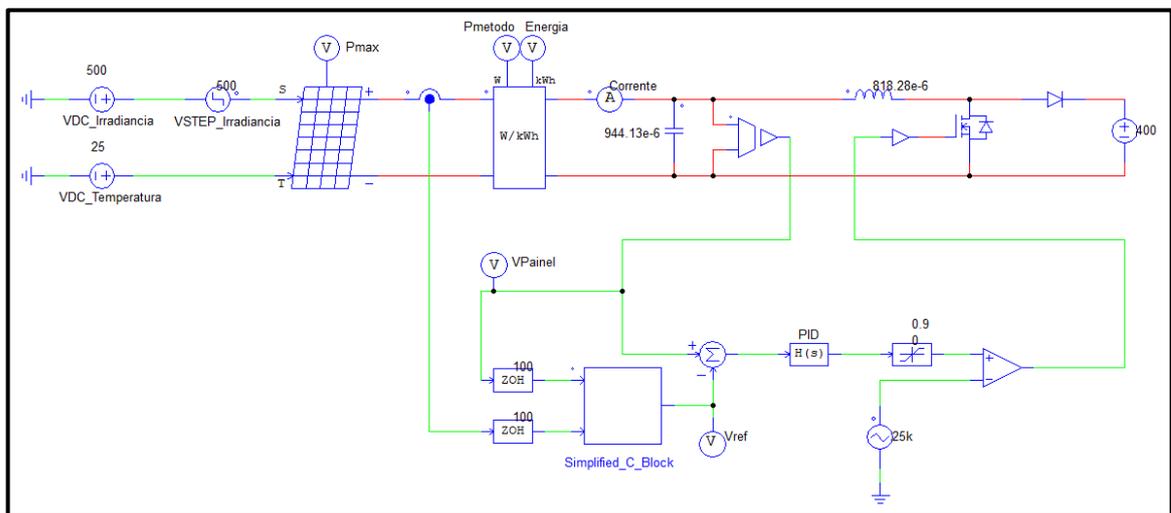
5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

5.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO UTILIZADO

Após o projeto do controlador e do conversor *Boost* operando como um rastreador de máxima potência e os estudos acerca das técnicas de P&O e Cond. Inc. foi realizada a simulação na plataforma computacional PSIM® para avaliar a teoria estudada. Com este programa é possível configurar o módulo que está disponível no *software* com as características de um modelo físico disponível pelo fabricante, obtendo assim, resultados próximos da realidade, sendo este passo descrito na seção 3.1.

A Figura 31 mostra o circuito que foi montado no *software* PSIM para simulação do sistema. O módulo solar é alimentado por fontes de tensão que representam as condições de irradiação e temperatura que atuam sobre o painel. Conectado com o painel está o wattímetro para a verificação da potência instantânea e seus terminais estão conectados também com o conversor *Boost*. Os resultados obtidos por meio dos gráficos foram gerados a partir da leitura dos voltímetros e amperímetros instalados no circuito.

Figura 31 - Circuito utilizado no trabalho para a extração de potência e controle.



Fonte: Dados do próprio autor.

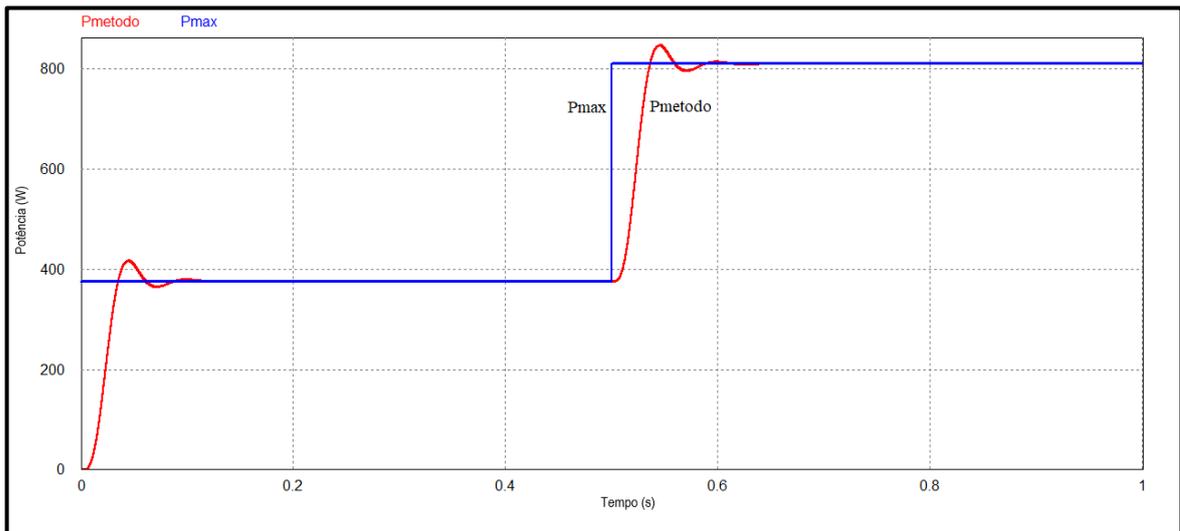
Abaixo do circuito do conversor *Boost* está o circuito de controle, com o seguinte princípio de funcionamento: com a aquisição da tensão e da corrente do painel fotovoltaico é calculada, por meio de perturbações, a tensão de referência através de algum método de MPPT para a malha de controle. O erro é calculado a partir da subtração desta tensão de referência

com a tensão observada no circuito por um sensor de tensão. O controlador PID obtido pelo Matlab gera uma saída com o objetivo de eliminar o erro. A saída do PID é comparada com uma onda triangular de forma a gerar pulsos de ataque de gatilho do conversor *Boost*. Assim, a tensão no painel fotovoltaico é forçada a igualar-se à referência gerada pelo método de MPPT.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

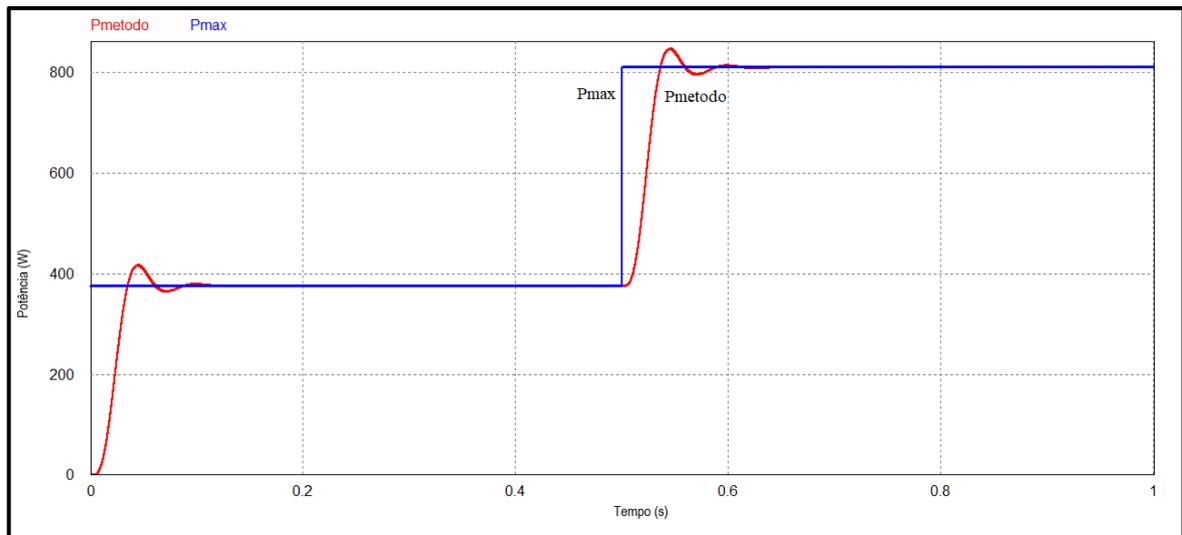
Foi verificada na simulação a resposta do módulo com dois degraus de irradiância. O primeiro de 500 W/m^2 e, após o tempo de $0,5 \text{ s}$, com 1000 W/m^2 . Na Figura 32, a técnica de extração da máxima potência utilizada foi a Condutância Incremental e na Figura 33 o método usado foi o Perturbe e Observa.

Figura 32 - Potência disponível no painel e potência obtida pelo método Cond. Inc.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 33 - Potência disponível no painel e potência obtida pelo método P&O.

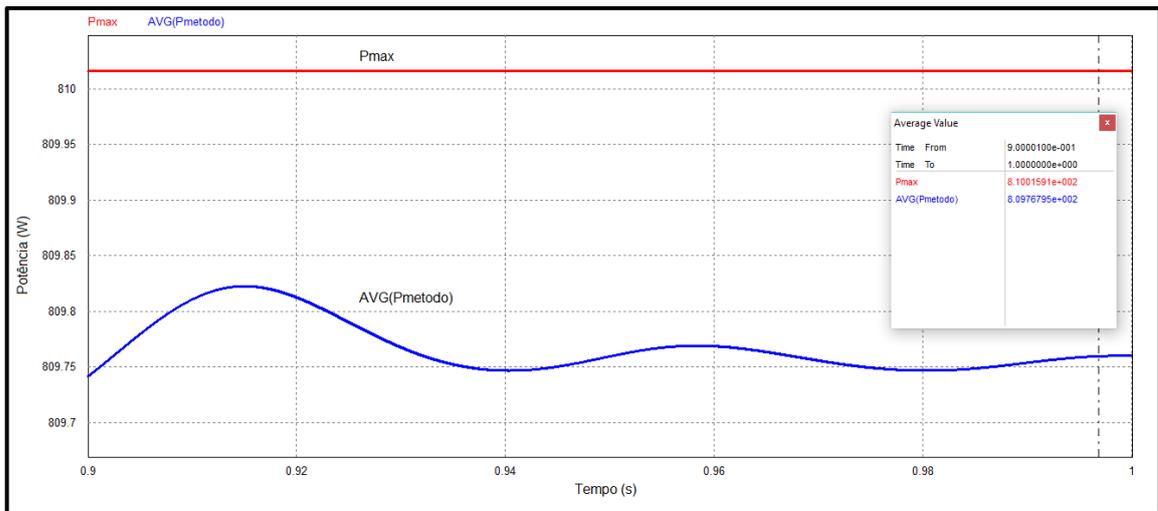


Fonte: Dados do próprio autor.

Através das Figuras 32 e 33 é possível perceber que a potência obtida através desses dois métodos é semelhante e que os dois métodos são eficientes para a extração de máxima potência.

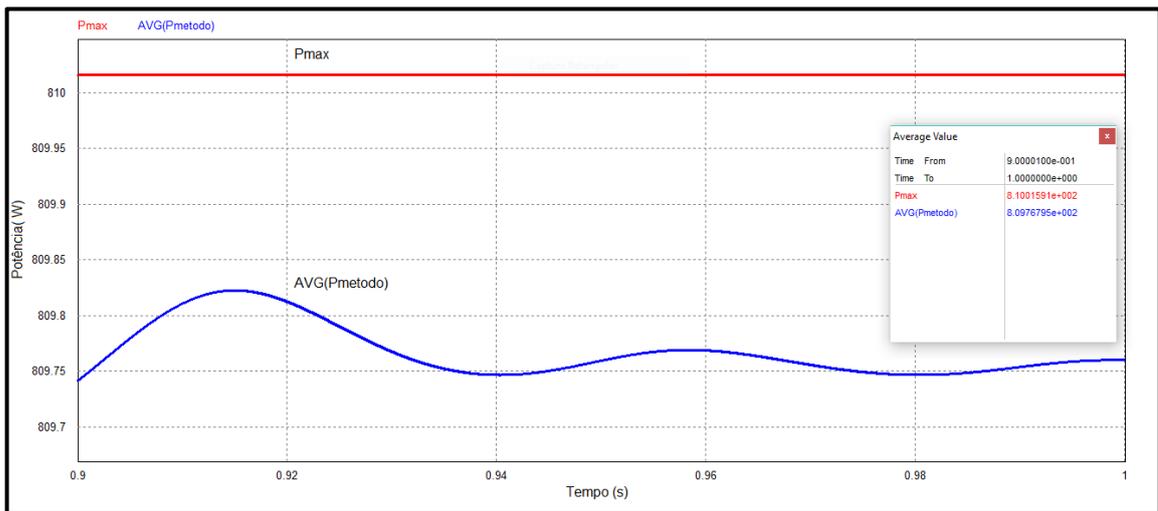
Nas Figuras 34 e 35 é possível perceber com maiores detalhes a potência média extraída durante o período de regime permanente com irradiância de 1000 W/m^2 . A potência média fornecida pelo método Cond. Inc. e pelo método P&O é de $809,76 \text{ W}$.

Figura 34 - Imagem ampliada da potência disponível no painel e potência média obtida pelo método Cond. Inc.



Fonte: Dados do próprio autor.

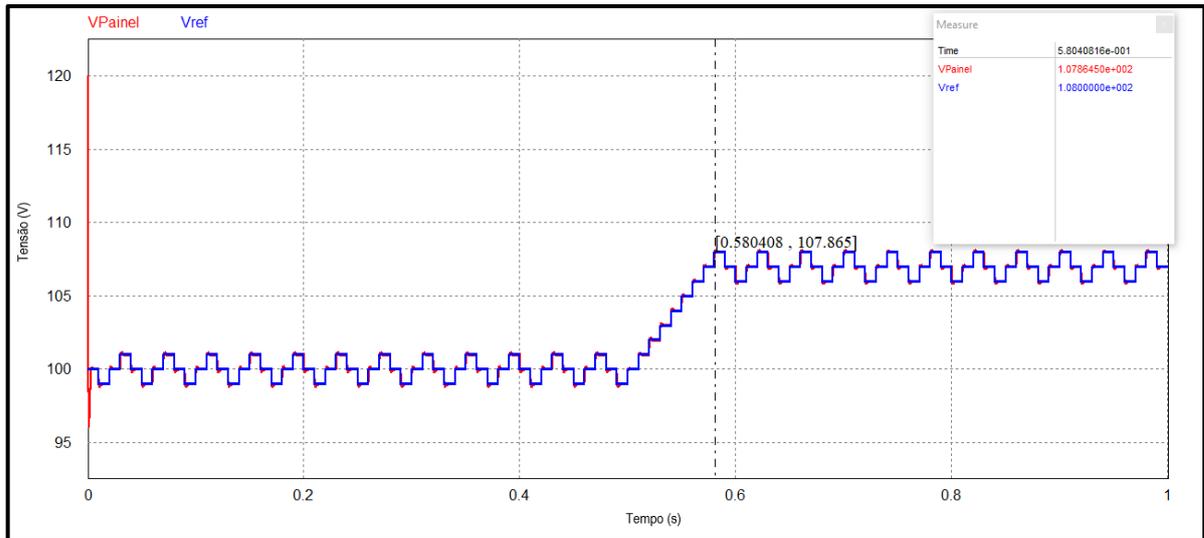
Figura 35 - Imagem ampliada da potência disponível no painel e potência média obtida pelo método P&O.



Fonte: Dados do próprio autor.

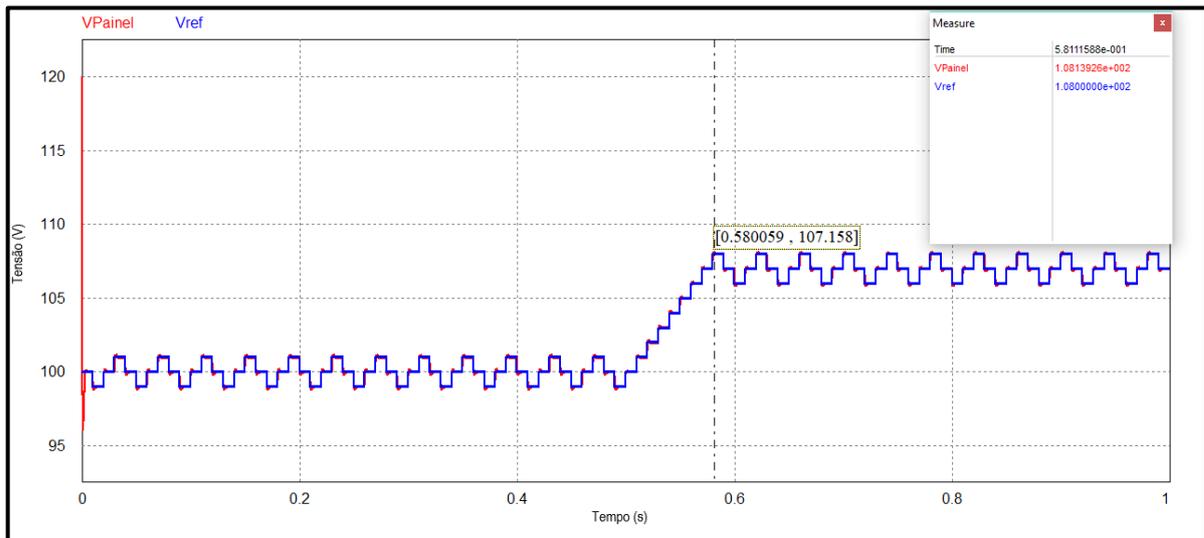
Com o objetivo de verificar a atuação do controlador PID projetado, obteve-se a simulação da tensão do módulo com a tensão de referência (tensão de MPP) que está mostrada nas Figuras 36 e 37. Os dois métodos atingiram a tensão no MPP no tempo igual à 0,58 s, depois que a irradiância foi aumentada no instante igual a 0,5 s.

Figura 36 - Controle de tensão pelo método Cond. Inc.



Fonte: Dados do próprio autor.

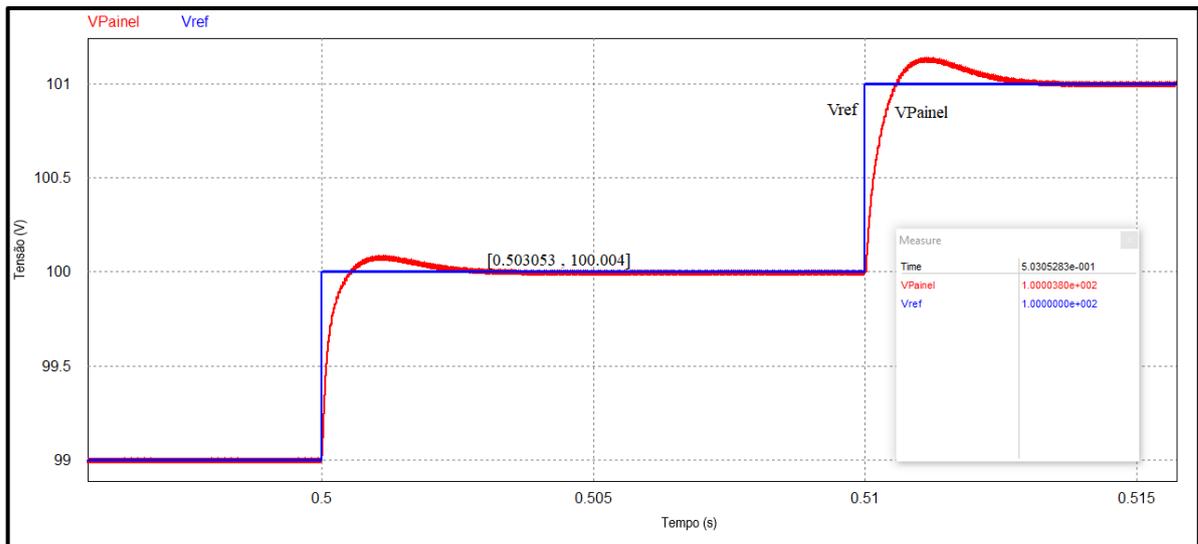
Figura 37 - Controle de tensão pelo método P&O.



Fonte: Dados do próprio autor.

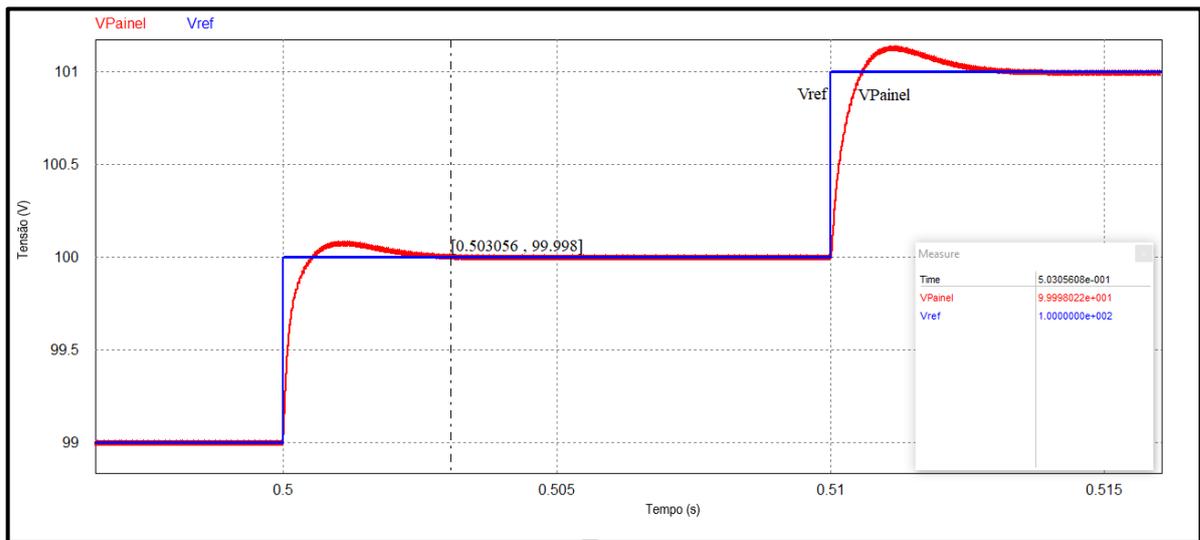
Para melhor visualizar o controle de tensão, as Figuras 36 e 37 também foram ampliadas nas Figuras 38 e 39, respectivamente. A ampliação foi feita no tempo igual a 0,5 s, pois nesse instante a irradiância passou de 500 W/m^2 para 1000 W/m^2 . Para os dois métodos o sistema consegue estabilizar por volta do instante de 0,503 s

Figura 38 - Imagem ampliada do controle de tensão pelo método Cond. Inc.



Fonte: Dados do próprio autor.

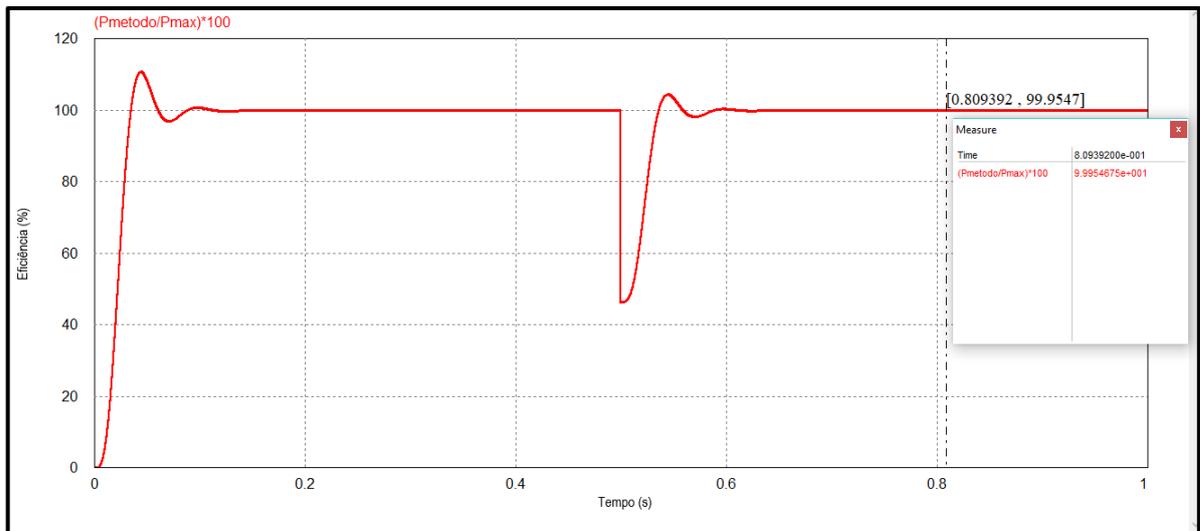
Figura 39 - Imagem ampliada do controle de tensão pelo método P&O.



Fonte: Dados do próprio autor.

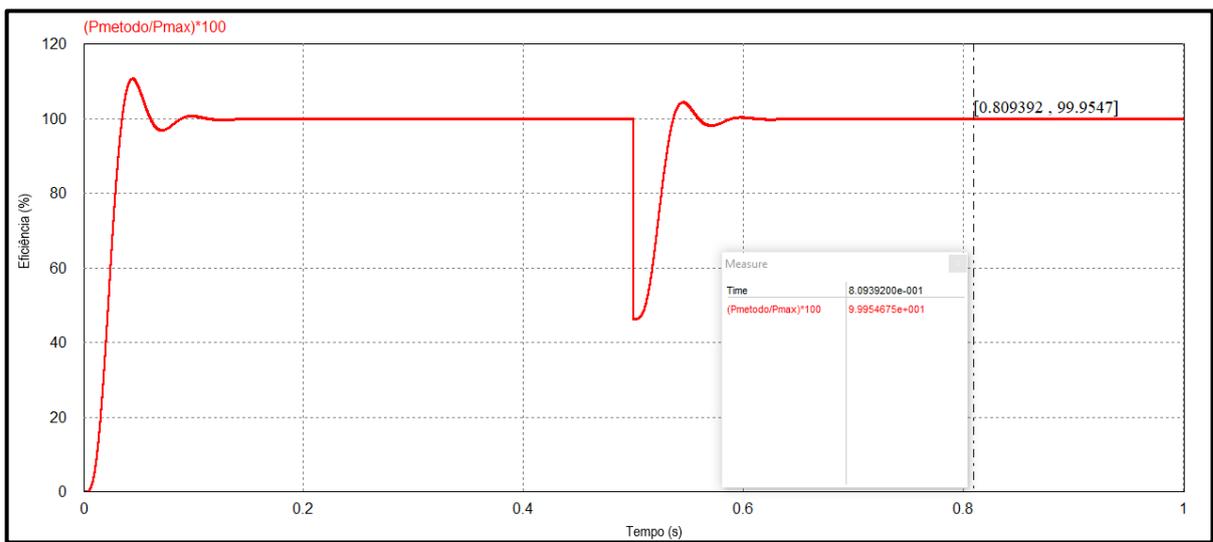
Para medir o fator de rastreamento de cada técnica foi feita a divisão da potência extraída através do método pela potência do painel fotovoltaico fornecendo, assim, dados para qualificar os dois métodos. Através das Figuras 40 e 41 é possível observar que a menor eficiência do método Cond. Inc. e do método P&O é de 99,9547 %.

Figura 40 - Fator de Rastreamento do método Cond. Inc.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 41 - Fator de rastreamento do método P&O.



Fonte: Dados do próprio autor.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho apresentou o estudo e a simulação, por meio do *software* PSIM®, de duas técnicas clássicas, já consagradas na literatura sobre MPPT, sendo estas o Perturbe e Observe e Condutância Incremental. Com essas técnicas foi possível extrair a maior potência possível disponível nos painéis e diminuir as perdas na geração de energia fotovoltaica causada pela variação de irradiância. Foi verificado a partir dos gráficos das Figuras 32 a 41, que os dois métodos são satisfatórios pois possuem a mesma qualidade com relação ao fator de rastreamento. Os dois métodos também se mostraram eficazes quando ocorre o acréscimo de irradiância com um tempo de estabilização pequeno.

Portanto, após analisar os resultados é possível concluir que o método Perturbe e Observe e Condutância Incremental podem ser facilmente implementados e retornam resultados confiáveis, justificando o fato de serem os dois métodos mais utilizados.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de potência**. Pearson Education do Brasil, 2008.
- ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2019. Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 12 maio 2019.
- BRITO, M. A. G. D. et al. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 3, p. 1156 - 1167, May 2012.
- CARNEIRO, T. C.; SANTOS H. A. D.; ANTUNES F. L.M. Conversor para Interligação de Sistema de Geração Fotovoltaico à Rede Elétrica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Gramado, 2018. Disponível em:
<<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/293>> Acesso em: 16 2019
- COELHO, R. F. **Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaico**. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- COSTA G. S. **Geração Distribuída de Energia Elétrica e Panorama Fotovoltaico Brasileiro e Português**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, p. 84, 2015.
- FRAUNHOFER. **Photovoltaics Report**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2019. Disponível em:
<<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2019.
- GOMES, A. C. **Análise, Projeto e Simulação de um Conversor Boost com Técnica de Rastreamento de Máxima Potência para Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- IEA. **Technology Roadmap - Solar Photovoltaic Energy**. International Energy Agency. Paris, p. 60. 2014. Disponível em:
<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf> Acesso em: 2 de janeiro de 2019.
- JAIN, S.; AGARWAL, V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems. **IET Electrical Power Applications**, v. 1, n. 5, p. 753-762, September 2007.
- JÚNIOR, P. D. A. S. **Conversor Cc-Cc Boost Entrelaçado Aplicado no Processamento da Energia de Arranjo Solar Fotovoltaico**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, p. 114, 2011.

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 41, n. 5, p. 1292-1306, Outubro 2005.

KYOCERA. Módulo Policristalino de Alta Eficiência. Disponível em: < <https://bit.ly/30INlfb> > Acesso em: 13 fevereiro 2019

LEITE, A. C. Q. B. **Rastreamento da máxima potência utilizando o método baseado na medição de temperatura com modulação OCC digital**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

LIMA, G. B. D. Software que Calcula a Função Transferência.

MASTROMAURO, R. A. et al. A Single-Phase Voltage-Controlled Grid-Connected Photovoltaic System With Power Quality Conditioner Functionality. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 56, n. 11, p. 4436 - 4444, November 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2004383>

MELO, F. C. **Projeto e Análise do Conversor Boost com Correção do Fator de Potência Utilizando o Circuito Integrado Uc 3854**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MOÇAMBIQUE, N. E. M. **Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e Controladores Lineares e/ou Fuzzy para a Regulação da Tensão Terminal de Painéis Fotovoltaicos**. Tese de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 134, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-26072012-091641/en.php>>. Acesso em: 4 fevereiro 2019

NEOSOLAR ENERGIA. **Sistemas isolados - off-grid**. Disponível em: <<http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais>>. Acesso em: 12 de junho 2014.

NEVES, F. Controlador PID digital: Uma modelagem prática para microcontroladores - Parte 1. **Embarcados**, 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/controlador-pid-digital-uma-modelagem-pratica-para-microcontroladores-parte-1/>>. Acesso em: 2019.

OLIVEIRA JUNIOR, C. J. D. **Uma Contribuição ao Estudo e Desenvolvimento de Inversores Solares com Duas Entradas de MPPT Independentes e Capacidade de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em Condições de Sombreamento Parcial**. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p.114, 2017.

OLIVEIRA JUNIOR, S. P. D. **Análise do impacto na conta de energia elétrica de um consumidor residencial provocado pela migração tarifária e pelo sistema de compensação de energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 68, 2017.

PEREIRA, P. F., SOUZA, A. C., SANTOS, I. N. Modelagem e Avaliação de Desempenho das Principais Técnicas de Controle de MPPT Empregadas na Geração Fotovoltaica. **XIV CEEL**. Uberlândia, 2016.

PINHO T. J.; GALDINO A. M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPAL-CRESESB, 2014.

PIRES, L. P. **Projeto e Simulação Computacional de um Sistema Fotovoltaico Híbrido Utilizado Para Injeção De Potência Ativa na Rede Elétrica e Sistema UPS (*Uninterruptible Power Supply*) Aplicado em Semáforos Urbanos**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, p. 120, 2014.

PIRES, L. P. **Proposta de Uma nova Técnica para Extração Global de Máxima Potência de Módulos Fotovoltaicos sem Sensoriamento da Corrente e da Tensão Provenientes da Fileira Fotovoltaica**. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 232, 2019.

PSIM TUTORIAL. **How to Use Solar Module Physical Model**. Disponível em: <<https://powersimtech.com/drive/uploads/2016/04/Tutorial-Solar-Module-physical-model.pdf>>. Acesso em: 4 fevereiro 2019.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report. REN21- Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**, 2018. Disponível em: < http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf >. Acesso em: 13 maio 2019.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. LABSOLAR Florianópolis: Editora da UFSC, 2004. ISBN 85-87583-04-2. Disponível em: <<https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/livros/livro-edificios-solares-fotovoltaicos.pdf>>. Acesso em: 8 março 2019

SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. **O potencial brasileiro da geração solar fotovoltaica conectada à rede elétrica: análise de paridade da rede**. Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC). 2007

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica de MPPT e controle digital**, Belo Horizonte, 2009.

SODA. **SODA - Solar Radiation Data**, 2016. Disponível em: <<http://www.soda-pro.com/maps/maps-for-free>>. Acesso em: 4 janeiro 2019.

SORIANO, L. A.; PONCE, P.; MOLINA, A. **Analysis of DC-DC converters for photovoltaic applications based on conventional MPPT algorithms**. 14th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). Mexico City: [s.n.]. 2017.

VILELA, A. O. R. **Projeto e Construção de um Conversor Boost controlado em modo de tensão**. Monografia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 69, 2011.

VILLALVA, M. G. **Conversor eletrônico de potência trifásico para sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p. 292, 2010.

WITTMANN, D. **A indústria de energia elétrica no Brasil e o desenvolvimento sustentável: uma proposta para o horizonte 2050 à luz da teoria de sistemas**. Tese de Doutorado – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 200, 2014.

ANEXOS

Inserção da função de transferência Gvc_d no Matlab para encontrar o controlador.

```
>> Cboost = 944.13e-6;
>> Rpv = (106.68)^2/(810.14);
>> Vdc = 400;
>> Lboost = 818.28e-6;
>> s = tf('s');
>> Gvc_d = (Rpv*Vdc)/(Cboost*Lboost*Rpv*s^2 + Lboost*s + Rpv)
Gvc_d =
      5619
-----
1.085e-05 s^2 + 0.0008183 s + 14.05
Continuous-time transfer function.
>> pole(Gvc_d)
ans =
  1.0e+03 *
-0.0377 + 1.1371i
-0.0377 - 1.1371i
>> sisotool(Gvc_d)
```

Código no Mathcad usado para encontrar a função de transferência Gvc_d.

$$u := (Vdc) \quad x := \begin{pmatrix} iL \\ vC \end{pmatrix}$$

$$A2 := \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ \frac{-1}{C_{boost}} & \frac{-1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{pmatrix} \quad B2 := \begin{pmatrix} -1 \\ L_{boost} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$A1 := \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L_{boost}} \\ \frac{-1}{C_{boost}} & \frac{-1}{R_{pv} \cdot C_{boost}} \end{pmatrix} \quad B1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C1 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E1 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C2 := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E2 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Matrizes de Estado Médio

$$A_{med} := A1 \cdot D + A2 \cdot (1 - D) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & \frac{D}{L_{boost}} - \frac{D-1}{L_{boost}} \\ \frac{D-1}{C_{boost}} - \frac{D}{C_{boost}} & \frac{D-1}{C_{boost} \cdot R_{pv}} - \frac{D}{C_{boost} \cdot R_{pv}} \end{pmatrix}$$

$$B_{med} := B1 \cdot D + B2 \cdot (1 - D) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{D-1}{L_{boost}} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C_{med} := C1 \cdot D + C2 \cdot (1 - D) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$E_{med} := E1 \cdot D + E2 \cdot (1 - D) \rightarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

EXTRAÇÃO DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIAS DE PEQUENOS SINAIS

U := Vdc

$$X := \begin{bmatrix} (-A_{med})^{-1} \cdot B_{med} \cdot U \\ \text{simplify} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{Vdc \cdot (D-1)}{R_{pv}} \\ -Vdc \cdot (D-1) \end{bmatrix}$$

Modelo em Pequenos Sinais

$$G_{xu} = x'(s)/u'(s) = (sI - A)B$$

$$G_{xd} = x'(s)/d'(s) = (sI - A)[(A1 - A2) \cdot X + (B1 - B2) \cdot U]$$

$$G_{xu} := \begin{bmatrix} (sI - A_{med})^{-1} \cdot B_{med} \text{ simplify} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{(L_{boost} + C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s) \cdot (D-1)}{L_{boost} \cdot (C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv})} \\ \frac{R_{pv} - D \cdot R_{pv}}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \end{bmatrix}$$

$$G_{yu} := \begin{bmatrix} C_{med} \cdot (sI - A_{med})^{-1} \cdot B_{med} + E_{med} \text{ simplify} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{(L_{boost} + C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s) \cdot (D-1)}{L_{boost} \cdot (C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv})} \\ \frac{R_{pv} - D \cdot R_{pv}}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \end{bmatrix}$$

$$G_{xd} := (sI - A_{med})^{-1} \cdot [(A1 - A2) \cdot X + (B1 - B2) \cdot U] \text{ simplify} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{Vdc \cdot (C_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s + 1)}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \\ \frac{R_{pv} \cdot Vdc}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \end{bmatrix}$$

$$G_{yd} := C_{med} \cdot (sI - A_{med})^{-1} \cdot [(A1 - A2) \cdot X + (B1 - B2) \cdot U] + (C1 - C2) \cdot X + (E1 - E2) \cdot U \text{ simplify} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{Vdc \cdot (C_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s + 1)}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \\ \frac{R_{pv} \cdot Vdc}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}} \end{bmatrix}$$

Considerando $X(s) := \begin{pmatrix} iL(s) \\ vC(s) \end{pmatrix}$

$$G_{vc_d} := G_{xd} \text{ simplify} \rightarrow \frac{R_{pv} \cdot Vdc}{C_{boost} \cdot L_{boost} \cdot R_{pv} \cdot s^2 + L_{boost} \cdot s + R_{pv}}$$

Código do CBLOCK para o método de MPPT Condutância Incremental.

```

static float Vatual = 0;           // Tensão atual na string
static float Vanterior = 0;       // Tensão anterior na string
static float Iatual = 0;          // Corrente atual na string
static float Ianterior = 0;       // Corrente anterior na string
static int incV = 1;              // Incremento de tensão do método Cond. Inc. da string
static float Vref = 100;         // Tensão de referência inicial
static float deltaV = 0;         // Diferença da tensão atual pela tensão no instante anterior da string
static float deltaI = 0;         // Diferença da corrente atual pela corrente no instante anterior na string

Vatual = x1;                       // Tensão atual é igual a tensão do sensor de tensão
Iatual = x2;                       // Corrente atual é igual a corrente do sensor de corrente

deltaV = Vatual - Vanterior;       // Cálculo da diferença de tensão atual pela tensão anterior na string
deltaI = Iatual - Ianterior;       // Cálculo da diferença de corrente atual pela corrente anterior na string

if (deltaV != 0)                   // Se a diferença da tensão atual pela tensão no instante anterior da string
    {                             // não for igual a 0
    if ((deltaI/deltaV) != (-Iatual/Vatual)) // Se a divisão das diferenças de corrente e tensão não for igual a divisão
        {                             // da corrente e tensão atual vezes menos 1.
        if ((deltaI/deltaV) > (-Iatual/Vatual)) // Se a divisão das diferenças de corrente e tensão for maior que a
            {                             // divisão da corrente e tensão atual vezes menos 1.
            Vref = Vref + incV;           // Tensão de referência é atualizada somando-se com o incremento
            else                          // se não
            Vref = Vref - incV           // Tensão de referência é atualizada subtraindo-se com o incremento
            }
        }
    }
else
    {
    if(deltaI != 0)                 // se a diferença da corrente atual pela corrente no instante anterior na
        {                             // string não for igual a 0.
        if(deltaI > 0)               // Se a diferença da corrente atual pela corrente no instante anterior na
            {                             // string for 0
            Vref = Vref + incV;       // Tensão de referência é atualizada somando-se com o incremento
            else                      // Tensão de referência é atualizada subtraindo-se com o incremento
            Vref = Vref - incV;
            }
        }
    }

Ianterior = Iatual;               //Atualiza a corrente
Vanterior = Vatual;               //Atualiza a tensão

y1 = Vref;                       // Saída é igual a tensão de referência atualizada

```

Código do CBLOCK para o método de MPPT Perturbe e Observe.

```

static float Patual = 0;           // Potência atual na string
static float Panterior = 0;       // Potência anterior na string
static float Vatual = 0;         // Tensão atual na string
static float Vanterior = 0;      // Tensão anterior na string
static float Iatual = 0;         // Corrente atual na string
static float Ianterior = 0;      // Corrente anterior na string
static int incV = 1;             // Incremento de tensão do método P&O da string
static float Vref = 100;        // Tensão de referência inicial
static float deltaP = 0;        // Diferença da potência atual pela potência no instante anterior da string
static float deltaV = 0;        // Diferença da tensão atual pela tensão no instante anterior da string

Vatual = x1;                     // Tensão atual é igual a tensão do sensor de tensão
Iatual = x2;                     // Corrente atual é igual a corrente do sensor de corrente

Patual = Vatual*Iatual;          // Cálculo da potência atual
deltaV = Vatual - Vanterior;    // Cálculo da diferença de tensão atual pela tensão anterior na string
deltaP = Patual - Panterior;    // Cálculo da diferença de potência atual pela potência anterior na string

if (deltaP != 0)                 // Se o cálculo da diferença de potência atual pela potência anterior na string
{                                 // não for 0
    if (deltaP <= 0 && deltaV<=0) // Nesta condição o MPPT não foi atingido
        Vref = Vref + incV;     // O incremento é somado a tensão referência para atingir o MPPT
    if (deltaP < 0 && deltaV>0)  // Esta condição está além do ponto de MPPT
        Vref = Vref - incV;     // O incremento é subtraído da tensão referência para atingir o MPPT
    if (deltaP >= 0 && deltaV<=0) // Esta condição está além do ponto de MPPT
        Vref = Vref - incV;     // O incremento é subtraído da tensão referência para atingir o MPPT
    if (deltaP > 0 && deltaV>0) // Nesta condição o MPPT não foi atingido
        Vref = Vref + incV;     // O incremento é somado a tensão referência para atingir o MPPT
}

Vanterior = Vatual;             //Atualiza a corrente
Panterior = Patual;            //Atualiza a tensão

y1 = Vref;                     // Saída é igual a tensão de referência atualizada

```
