

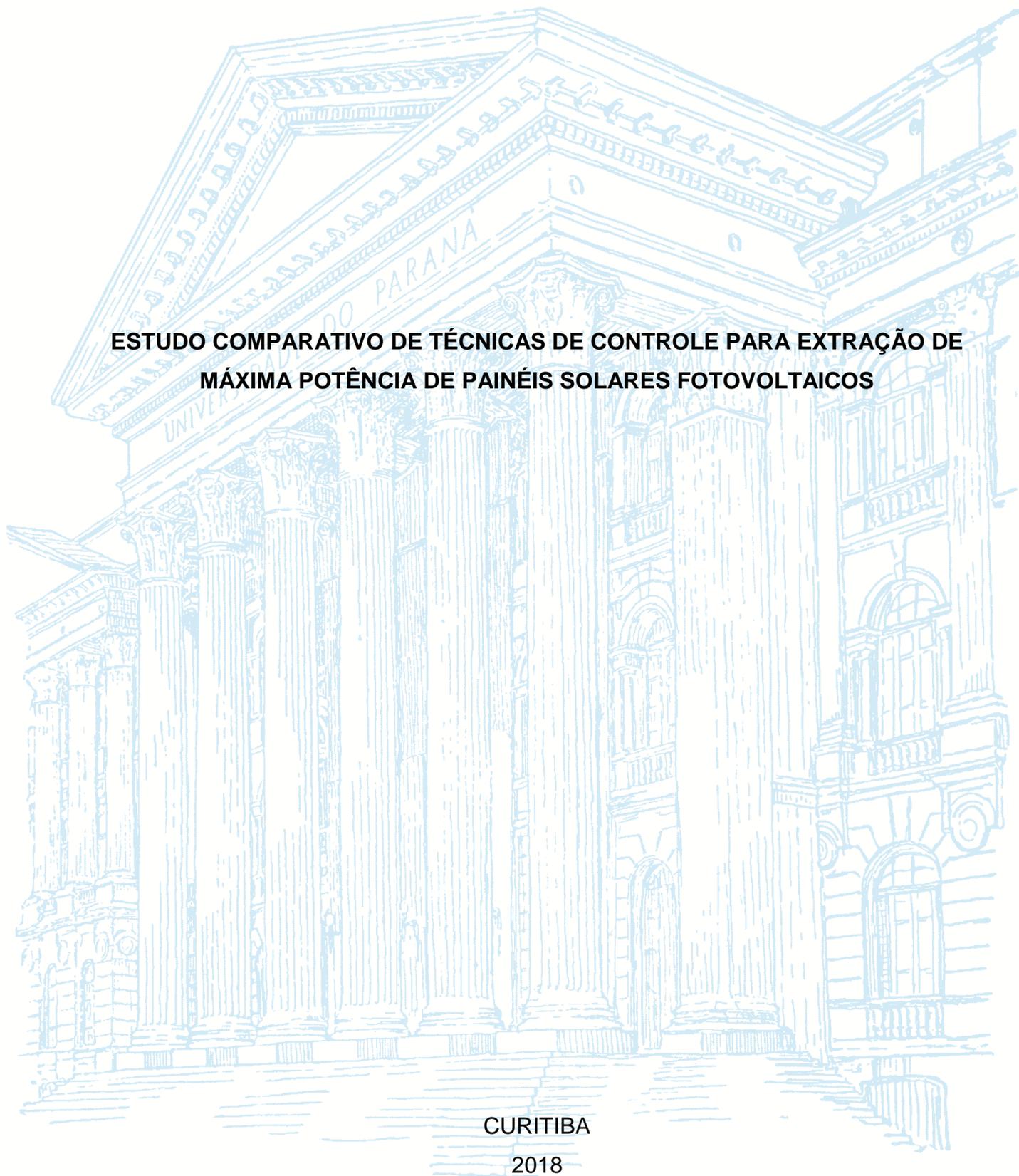
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO ARNOLDO HARTMANN

**ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE PARA EXTRAÇÃO DE
MÁXIMA POTÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

CURITIBA

2018



MARCELO ARNOLDO HARTMANN

**ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE PARA EXTRAÇÃO DE
MÁXIMA POTÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Américo Vilela Junior

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCELO ARNOLDO HARTMANN

ESTUDO COMPARATIVO DE TÉCNICAS DE CONTROLE PARA EXTRAÇÃO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. João Américo Vilela Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - UFPR

Prof. Dr. Ewaldo Luiz de Mattos Mehl

Departamento de Engenharia Elétrica - UFPR

Prof. Dr. Ivan Eidt Colling

Departamento de Engenharia Elétrica - UFPR

Curitiba, 26 de junho de 2018.

Dedico este trabalho a todos que estiveram comigo e me apoiaram nesta jornada, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. João Américo Vilela Júnior, que teve paciência para me ajudar e compartilhar seu conhecimento durante esta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo incentivo, apoio e todas as orações diárias que vocês me dedicaram. Obrigado por estarem sempre ao meu lado! Aos meus irmãos que me apoiaram e sempre me passaram uma palavra de ânimo.

Sou grato aos meus mestres que acompanharam meus estudos durante esses anos e me mostraram o quanto estudar é bom. Vocês me inspiraram a me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Obrigado aos amigos, colegas e demais familiares que me deram o suporte e a compreensão necessária nesses últimos anos para chegar até aqui.

*“Hoje os ventos do destino começaram a soprar,
nosso tempo de menino foi ficando para trás...”*

(Carlos Maltz, 1996)

RESUMO

Este projeto propõe a análise de técnicas de controle para extração da máxima potência de painéis solares fotovoltaicas através de um conversor CC-CC elevador (*boost*). A malha de controle do sistema é composta por dois sensores para aquisição dos sinais, um de corrente e outro de tensão. O sensor de tensão é construído a partir de um divisor resistivo e um circuito para condicionamento do sinal, enquanto o sensor de corrente utiliza-se de um resistor *shunt* e de um amplificador de instrumentação. O conversor é simulado utilizando as técnicas de controle de *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*), no software *PSIM* da *PowerSim Inc*®, para análise do comportamento e comparação com os dados experimentais obtidos. O sistema é operado por um microcontrolador da *Texas Instruments*® *TIVA-C* (*TM4C123GXL*) e o acionamento da chave é feito por um drive da *International Rectifier*® *IR2011*. A potência do conversor é dimensionada para 20 *Watts*, que é a especificação do painel solar fotovoltaico utilizado. A operação do conversor foi validada em etapas, primeiro em simulação e em sequência experimentalmente.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência, Energia Solar Fotovoltaica, Conversor Boost, *MPPT*.

ABSTRACT

This project proposes an analysis of control techniques for maximum power extraction of photovoltaic solar panels through a DC-DC converter (boost). The control system is composed by two sensors, one for current and another for voltage. The voltage sensor is constructed by a resistive divisor and a circuit for signal conditioning, while the current sensor uses a shunt resistor and an instrumentation amplifier. The converter is simulated using MPPT (Maximum Power Point Tracking) control techniques in PowerSin Inc® PSIM software behavior analysis and comparison with experimental data obtained. The system is operated by a Texas Instruments® TIVA-C microcontroller (TM4C123GXL) and the MOSFET is driven by an International Rectifier® IR2011 drive. The power of the converter is sized to 20 Watts, which is the specification of the photovoltaic solar panel used. The converter operation was validated in stages, first in simulation and in sequence experimentally.

Keywords: Power Electronics, Photovoltaic Solar Energy, Boost Converter, MPPT.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	19
FIGURA 2 - GRÁFICO DAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO PAINEL FOTOVOLTAICO	21
FIGURA 3 - EFEITOS DA IRRADIAÇÃO SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO, COM TEMPERATURA CONSTANTE (25°C).....	21
FIGURA 4 - EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO, COM IRRADIAÇÃO CONSTANTE (1KW/M ²)	22
FIGURA 5 - ESTRUTURA BÁSICA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	23
FIGURA 6 – ETAPAS DE OPERAÇÃO CONVERSOR <i>BOOST</i>	24
FIGURA 7 - PRINCIPAIS FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	25
FIGURA 8 - EXEMPLO DA MODULAÇÃO <i>PWM</i>	26
FIGURA 9 - GRÁFICO DE FUNCIONAMENTO DO PERTURBE & OBSERVE	27
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO PERTUBE & OBSERVE	28
FIGURA 11 - GRÁFICO DO FUNCIONAMENTO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL	29
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL.....	29
FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO <i>BETA</i>	30
FIGURA 14 - DIAGRAMA DO CONVERSOR CC-CC PARA MPPT	31
FIGURA 15 - DESIGN DO CIRCUITO	34
FIGURA 16 - RESPOSTA AO DEGRAU, PERTURBE & OBSERVE.....	35
FIGURA 17 - RESPOSTA AO DEGRAU, CONDUTÂNCIA INCREMENTAL.....	35
FIGURA 18 - RESPOSTA AO DEGRAU, <i>BETA</i>	36
FIGURA 19 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO PERTURBE E OBSERVE.....	36
FIGURA 20 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL	37
FIGURA 21 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO <i>BETA</i>	37
FIGURA 22 - GRÁFICO DE DESEMPENHO EM R.P DAS TÉCNICAS DE MPPT ..	38
FIGURA 23 – CIRCUITO DO SENSOR DE CORRENTE	40
FIGURA 24 – CIRCUITO DO SENSOR DE TENSÃO	40
FIGURA 25 - MICROCONTROLADOR TIVA-C	41
FIGURA 26 - LAYOUT DA PLACA DO CONVERSOR	44

FIGURA 27 - ARRANJO DE LÂMPADAS UTILIZADO NOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	45
FIGURA 28 - POSICIONAMENTO DO PAINEL FRENTE AS LÂMPADAS.....	46
FIGURA 29 - CIRCUITO COM FOTO-RESISTOR.....	46
FIGURA 30 - SINAL LIDO PELO FOTO-RESISTOR.....	47
FIGURA 31 - CONVERSOR COMPLETO.....	47
FIGURA 32 - VISÃO GERAL DA BANCADA DE TESTES.....	48
FIGURA 33 - RESPOSTA AO DEGRAU P&O.....	48
FIGURA 34 - RESPOSTA AO DEGRAU C.I.....	49
FIGURA 35 - RESPOSTA AO DEGRAU BETA.....	49
FIGURA 36 - REGIME PERMANENTE P&O.....	50
FIGURA 37 - REGIME PERMANENTE C.I.....	50
FIGURA 38 - REGIME PERMANENTE BETA.....	51
FIGURA 39 - REGIME PERMANENTE P&O - ESCALA 25ms.....	51
FIGURA 40 - REGIME PERMANENTE C.I. - ESCALA 25ms.....	52
FIGURA 41 - REGIME PERMANENTE BETA - ESCALA 25ms.....	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO PAINEL SOLAR FOTVOLTAICO.....	32
TABELA 2 – CARACTERÍSTICA DO CONVERSOR.....	32
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO MOSFET.....	39

LISTA DE SIGLAS

ANSI	- <i>American National Standards Institute</i> – Instituto nacional de padrões americanos
ARM	- <i>Advanced RISC Machine</i>
AWG	- American Wire Gauge - Escala Americana De Bitolas De Fios
CC	- Corrente contínua
CCS	- <i>Code Composer Studio</i>
C.I.	- Condutância Incremental
EAGLE	- <i>Easy Applicable Graphical Layout Editor</i>
EMC	- Electromagnetic compatibility – Compatibilidade Eletromagnética
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i> – Ambiente Integrado de Desenvolvimento
MATLAB	- <i>Matrix Laboratory</i>
MPP	- <i>Maximum Power Point</i> – Ponto de Máxima Potência
MPPT	- <i>Maximum Power Point Tracking</i> – Traçado do Ponto de Máxima Potência
MOSFET	- <i>Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor</i> – Transistor de efeito de campo Óxido-Metal-Semicondutor
P&O	- Perturbe e Observe
PSIM	- <i>Power Electronics Simulator</i>
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por largura de pulso
USB	- <i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$\&$	– Conjunção aditiva “e”
Ω	– Ohm
$\text{\textcircled{R}}$	– Marca Registrada
$\%$	– Por cento
\cong	– Aproximadamente
P	– Potência
dP	– Diferencial de Potência
dV	– Diferencial de Tensão elétrica
β	– Beta
\ln	– Logaritmo neperiano
I_{pv}	– Corrente elétrica do Painel solar fotovoltaico
V_{pv}	– Tensão elétrica do Painel solar fotovoltaico
I_o	– Corrente elétrica de Saída
V_o	– Tensão elétrica de Saída
E	– Tensão da fonte (entrada)
L	– Indutância
ΔI	– Variação de Corrente elétrica
P_{in}	– Potência da Entrada
V_{in}	– Tensão elétrica de Entrada
C_{in}	– Capacitor de Entrada
B_{max}	– Densidade de Fluxo Magnético Máximo
I_{pico}	– Corrente elétrica de Pico
J_{max}	– Densidade de Corrente elétrica Máxima
I_{eficaz}	– Corrente elétrica eficaz

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivos específicos	17
1.2 Estrutura do Trabalho	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Células Solares Fotovoltaicas.....	19
2.1.1 Efeito Fotovoltaico.....	19
2.1.2 Tecnologias.....	20
2.1.3 Características Fundamentais.....	20
2.1.4 Variação de Irradiação e Temperatura.....	20
2.2 Conversores CC-CC	23
2.2.1 Conversor Elevador.....	23
2.2.2 Etapas de Operação	24
2.3 Modulação PWM	25
2.4 Algoritmos de MPPT	26
2.4.1 Perturbe e Observe	27
2.4.2 Condutância incremental.....	28
2.4.3 Método Beta.....	30
3. METODOLOGIA	31
3.1 Modelagem do Conversor	31
3.1.1 Dimensionamento de Componentes	32
4. SIMULAÇÃO.....	34
4.1 Resposta ao Degrau.....	35
4.2 Regime Permanente.....	36
5. PROJETO	39
5.1 Escolha dos componentes	39
5.1.1 Projeto e construção do Indutor	41
5.2 Layout da placa de circuito impresso	43
6. RESULTADOS.....	45
6.1. Análises	48
7. CONCLUSÕES	53

7.1 TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS	54
APENDICE 1 – CÓDIGO: PERTURBE E OBSERVE	56
APENDICE 2 – CÓDIGO: CONDUÇÃO INCREMENTAL	57
APENDICE 3 – CÓDIGO: MÉTODO BETA	58

1. INTRODUÇÃO

Problemas ambientais e a crescente demanda energética estimularam o investimento para a geração de energia elétrica através de fontes renováveis que não agredam o ambiente. Dentre as alternativas, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma realidade capaz de trazer significativa contribuição a matriz energética mundial (MORALES, 2010).

No Brasil há um excelente potencial de geração de energia elétrica solar fotovoltaica, uma vez que possui bons índices de radiação solar. A Alemanha atualmente é o país que mais utiliza este tipo de energia no mundo, e seus níveis de radiação solar média são aproximadamente 1,6 vezes menores que a média no Brasil (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

Entretanto a eficiência das soluções para a utilização da energia solar fotovoltaica ainda é baixa e seu custo de implementação continua elevado. Desta forma os dispositivos utilizados para o condicionamento da energia devem garantir que o sistema forneça a máxima potência possível e para isso torna-se necessário o estudo e a utilização de técnicas de extração de máxima potência dos painéis (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

Como os painéis solares possuem características não lineares de tensão e corrente que são influenciadas pelas condições de temperatura e radiação solar é necessário o uso de técnicas baseadas em algoritmos que buscam o ponto onde a extração de potência será máxima, todavia há apenas um ponto correspondente à máxima potência e conforme mudanças no clima e horário esse ponto é deslocado (MORALES, 2010).

As técnicas de *MPPT* são implementadas no controlador de um conversor CC-CC que é inserido entre o Painel fotovoltaico e a carga, as técnicas consistem em ajustar a tensão de saída do painel solar fotovoltaico para extrair a máxima potência (MORALES, 2010).

Inúmeras técnicas para *MPPT* têm sido propostas para alcançar um melhor aproveitamento da energia elétrica gerada, entretanto ainda não há um consenso no Brasil sobre qual modelo apresenta o melhor desempenho (MOÇAMBIQUE, 2012).

Os algoritmos diferem em aspectos como complexidade, número de sensores necessários, custo e eficácia. Cada método tem sua especificação e limitação com as quais determina-se a melhor aplicação (MOÇAMBIQUE, 2012).

Contudo não é viável apontar um método quando apresentar custo e complexidade elevada e ganhos não significativos se comparado a um método barato e de simples implementação. Esta é a razão de vários métodos não serem utilizados.

Assim uma análise comparativa dos métodos pode originar boas informações para projetos de sistemas elétricos fotovoltaicos.

Em vista disso, este trabalho tem como premissa avaliar as principais técnicas de controle de *MPPT* disponíveis na literatura em relação à complexidade, ondulação em regime permanente e quantidade de potência fornecida. A análise será realizada através de um modelo em simulador e em resultados experimentais utilizando um conversor *Boost* na saída de um painel fotovoltaico.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do projeto consiste em realizar uma análise comparativa das técnicas mais utilizadas no controle de *MPPT*, visando definir o modelo com melhor desempenho, através da simulação e do desenvolvimento experimental de um conversor *CC-CC* para validação dos resultados.

1.1.1 Objetivos específicos

- I. Estudo das técnicas clássicas de controle para *MPPT*.
- II. Desenvolvimento da programação do algoritmo das técnicas escolhidas e realização da programação em microcontrolador.
- III. Análise das técnicas de controle para *MPPT* em simulação.
- IV. Construção do conversor.
 - a. Definição dos sensores e circuitos de condicionamento de sinal.
 - b. Elaboração do circuito de potência.
- V. Aplicação e análise das técnicas de controle no conversor construído

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A primeira etapa da realização do projeto consistiu em uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento e os diferentes modelos de painéis fotovoltaicos, conversores *CC-CC* e sobre as técnicas de controle que serão estudadas.

Logo após, no terceiro capítulo, é demonstrada a metodologia do conversor utilizado para desenvolvimento do projeto e o dimensionamento dos componentes críticos para simulação, desenvolvida no quarto capítulo deste documento.

Neste os algoritmos de controle de MPPT são simulados e as formas de onda resultantes no conversor são analisadas, onde percebe-se uma diferença consistente entre os métodos analisados.

Em seguida iniciou-se o processo de implementação do Conversor CC-CC, dando origem ao quinto capítulo deste documento. Os demais componentes foram dimensionados, os circuitos de potência, de aquisição de corrente e de aquisição da tensão da rede elétrica foram especificados e o indutor foi construído.

A próxima etapa do projeto está descrita no sexto capítulo deste documento e incluiu os testes em bancada do protótipo. Por fim, a conclusão sobre o tema é apresentada no sétimo capítulo, onde são recapitulados os resultados obtidos e são apresentadas as considerações finais e perspectivas para o futuro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

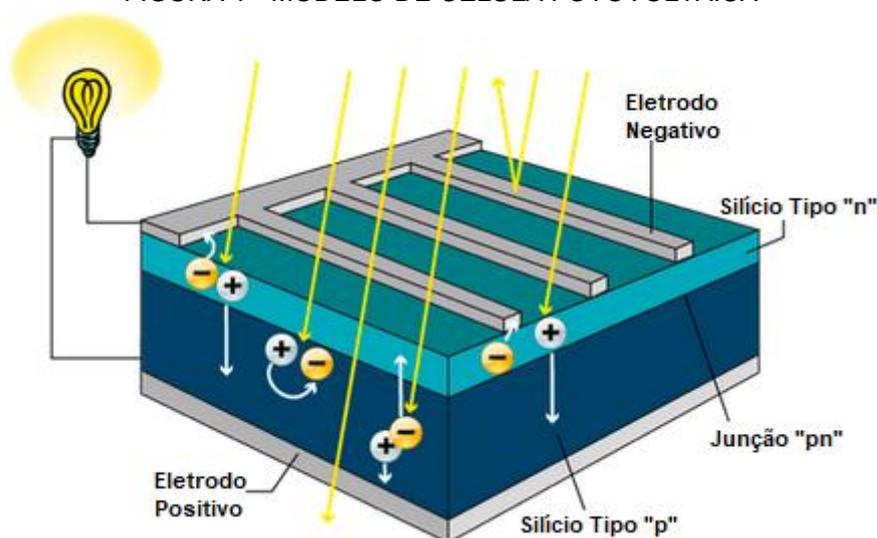
Em 1839 o físico Alexandre-Edmond Becquerel, ao analisar duas placas de latão imersas em um eletrólito produzindo uma diferença de potencial ao serem expostas a luz constatou, pela primeira vez, a conversão de energia solar em energia elétrica. Esse fenômeno foi chamado de “efeito fotovoltaico” (MACHADO & MIRANDA, 2015).

Em 1954 As primeiras células solares fotovoltaicas baseadas em silício foram desenvolvidas por cientistas no *Bell Labs* (MACHADO & MIRANDA, 2015) (NASCIMENTO, 2004).

2.1.1 Efeito Fotovoltaico

Na incidência de irradiação solar sobre célula fotovoltaica ocorre o efeito fotoelétrico, onde os fótons chocam-se com elétrons fornecendo-os energia. Com o campo elétrico gerado pela junção “*pn*” estes elétrons carregados fluem da camada “*p*” para a camada “*n*” e através de condutores externos que ligam ambas camadas (FIGURA 1), pode-se obter uma corrente elétrica, que será mantida enquanto a luz incidir na célula e terá sua magnitude proporcional a intensidade da luz incidente (MOÇAMBIQUE, 2012) (MACHADO & MIRANDA, 2015) (NASCIMENTO, 2004).

FIGURA 1 - MODELO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: ADAPTADO DE (ANKER, 2015).

2.1.2 Tecnologias

Os principais formatos de construção de células solares fotovoltaicas são: silício monocristalino, silício policristalino, e filme fino de silício amorfo. As células de silício monocristalinas são dentre todas as mais eficientes, no entanto, requerem um custo maior na produção. São feitas a partir de um único cristal de silício, e segundo dados do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), apresentam eficiência média de conversão fotovoltaica em torno de 12 a 15%. Nas células de silício policristalino, o silício líquido de alta pureza é inteiramente resfriado, formando vários cristais. Estas células têm eficiência média entre 11 e 14% (MACHADO & MIRANDA, 2015).

As células de filme fino de silício amorfo são obtidas pela deposição de finas camadas de silício sobre superfícies de vidro ou metal, com a eficiência média entre 5% e 7%. A melhor aplicação para esta tecnologia é em calculadoras, relógios e outros equipamentos onde o consumo de energia é baixo (NASCIMENTO, 2004).

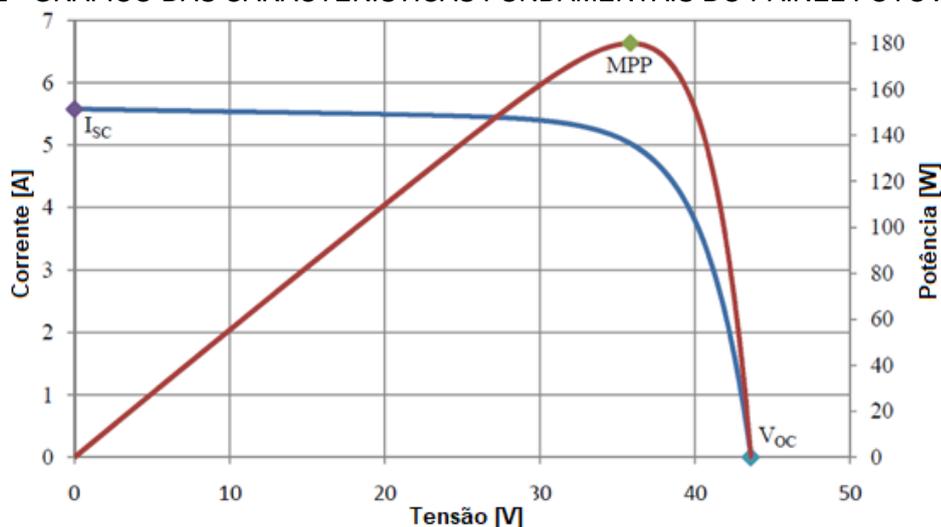
2.1.3 Características Fundamentais

Duas características construtivas fundamentais a serem consideradas são: a Tensão de circuito aberto (V_{oc}) e a corrente de curto-circuito (I_{sc}) do painel solar fotovoltaico, para ambos casos a energia gerada é zero. O ponto onde a energia gerada é máxima, ou ponto de máxima potência (MPP), é onde o produto da tensão e corrente instantânea é máxima, esse ponto é único, tal como ilustrado na FIGURA 2 (MORALES, 2010).

2.1.4 Variação de Irradiação e Temperatura

A irradiação solar e a temperatura de operação do painel são fatores que influenciam as características dos módulos fotovoltaicos, e com isso acabam alterando o MPP durante o dia, e essa é a principal razão pelo que o MPP deve ser constantemente traçado e medido para que obtenha-se sempre a máxima potência do painel fotovoltaico (MORALES, 2010).

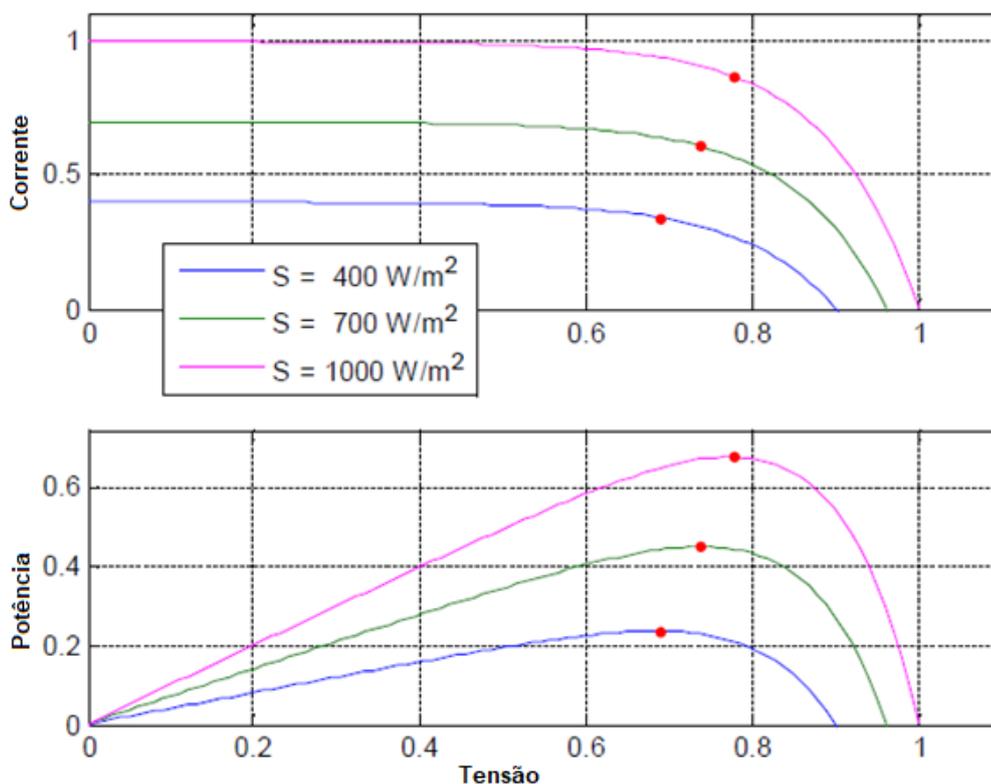
FIGURA 2 - GRÁFICO DAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO PAINEL FOTOVOLTAICO



FONTE: ADAPTADO DE (MORALES, 2010).

Pode-se avaliar os efeitos da irradiação sobre o painel fotovoltaico na FIGURA 3 onde é exibido as curvas de tensão por corrente e potência, os pontos vermelhos representam o *MPP*. A corrente gerada pelo painel é diretamente proporcional a irradiação, por esse motivo essa torna-se muito mais susceptível a mudanças de irradiação do que a tensão (MORALES, 2010).

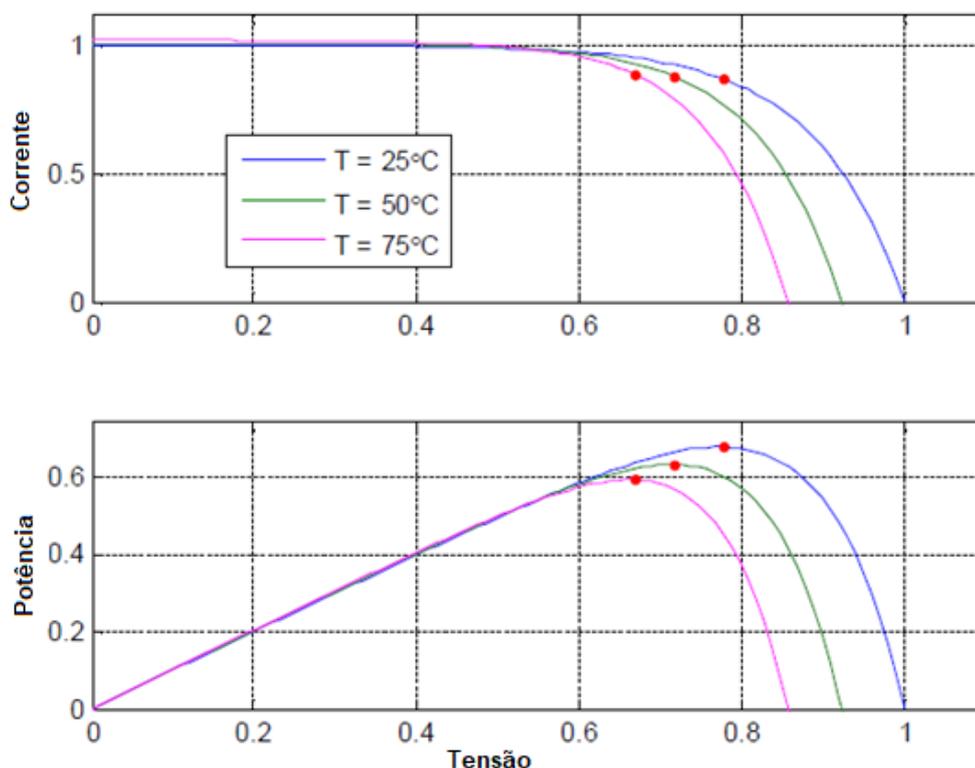
FIGURA 3 - EFEITOS DA IRRADIAÇÃO SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO, COM TEMPERATURA CONSTANTE (25°C)



FONTE: ADAPTADO DE (MORALES, 2010).

Por outro lado, a tensão é afetada principalmente pela temperatura de operação. Há um pequeno acréscimo na corrente com o aumento de temperatura, porém não compensa a queda de tensão dada pela mesma. e por isso a potência gerada diminui, como mostrado na FIGURA 4 (MORALES, 2010).

FIGURA 4 - EFEITOS DA TEMPERATURA SOBRE O PAINEL FOTOVOLTAICO, COM IRRADIAÇÃO CONSTANTE (1KW/M²)



FONTE: ADAPTADO DE (MORALES, 2010).

Usualmente os fabricantes de painéis fotovoltaicos informam qual a temperatura padrão de operação e os níveis de tensão e corrente em máxima potência para esta temperatura, assim como os valores de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto (MORALES, 2010).

Como já mencionado, a temperatura e a irradiação dependem das condições atmosféricas que não são constantes e podem variar rapidamente. Isso faz com que o *MPP* varie constantemente. Assim é essencial buscar constantemente o *MPP* para garantir que o painel fotovoltaico está fornecendo a máxima potência. (MORALES, 2010).

2.2 CONVERSORES CC-CC

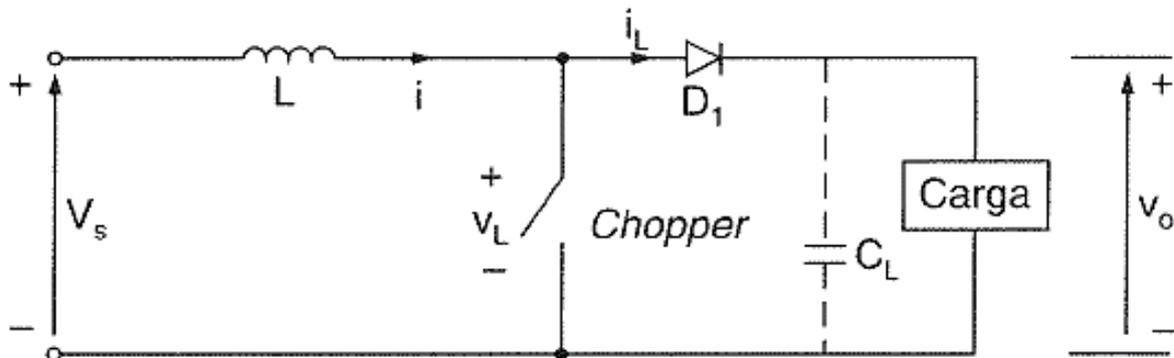
Os conversores CC-CC, também conhecidos como *choppers*, são sistemas que convertem tensão contínua de dada amplitude para uma tensão, também contínua, mas com diferente amplitude. A tensão média de saída é controlada pela variação da razão cíclica, quando operando em modo *PWM* (Modulação por Largura de Pulso). Onde a razão entre o tempo de condução do interruptor e o período de chaveamento representa a razão cíclica de operação do conversor (RASHID, 1999).

O rendimento real de um conversor CC-CC varia na faixa de 70% a 98%, dependendo das características de construção e operação (BARBI & MARTINS, 2006).

2.2.1 Conversor Elevador

O conversor *Boost*, é um conversor CC-CC que pode elevar a tensão sem a necessidade de um transformador, sua estrutura é apresentada na FIGURA 5.

FIGURA 5 - ESTRUTURA BÁSICA DO CONVERSOR *BOOST*



FONTE: (RASHID, 1999).

Para controle do conversor é utilizado uma malha de corrente que tem a função de impor uma corrente de referência mediante o controle da razão cíclica. Esta forma de controle é utilizada, principalmente, quando há uma fonte de tensão na saída. E mesmo que a entrada seja, também, uma fonte de tensão o controle produzirá uma diferença de potencial elétrico que acarretará em uma corrente tal qual a referência (BARBI & MARTINS, 2006).

A equação 1 define o comportamento da razão cíclica D , quando operando com modulação *PWM*, em função do tempo de condução t_c e o período T (BARBI & MARTINS, 2006).

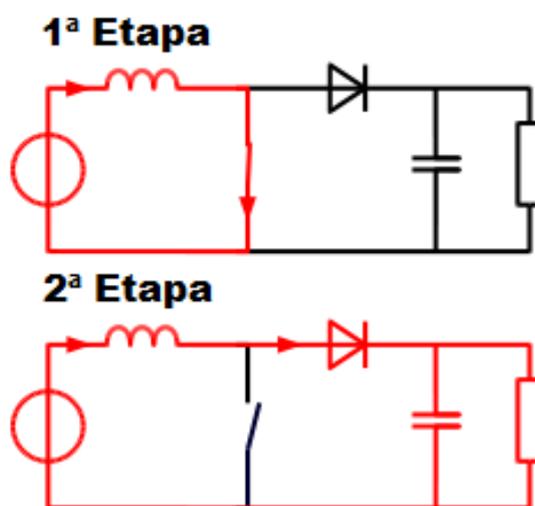
$$D = \frac{tc}{T} \quad (1)$$

A indutância em série com a fonte de alimentação torna o comportamento da fonte similar a uma fonte de corrente e o capacitor fornece uma regulação para a tensão de saída.

2.2.2 Etapas de Operação

O conversor *boost* possui duas etapas de operação, FIGURA 6 na primeira com o interruptor conduzindo e o diodo inversamente polarizado a corrente flui entre o indutor e a chave, fazendo com que a energia que percorre indutor seja armazenada em forma de campo magnético (AHMED, 2000).

FIGURA 6 – ETAPAS DE OPERAÇÃO CONVERSOR BOOST

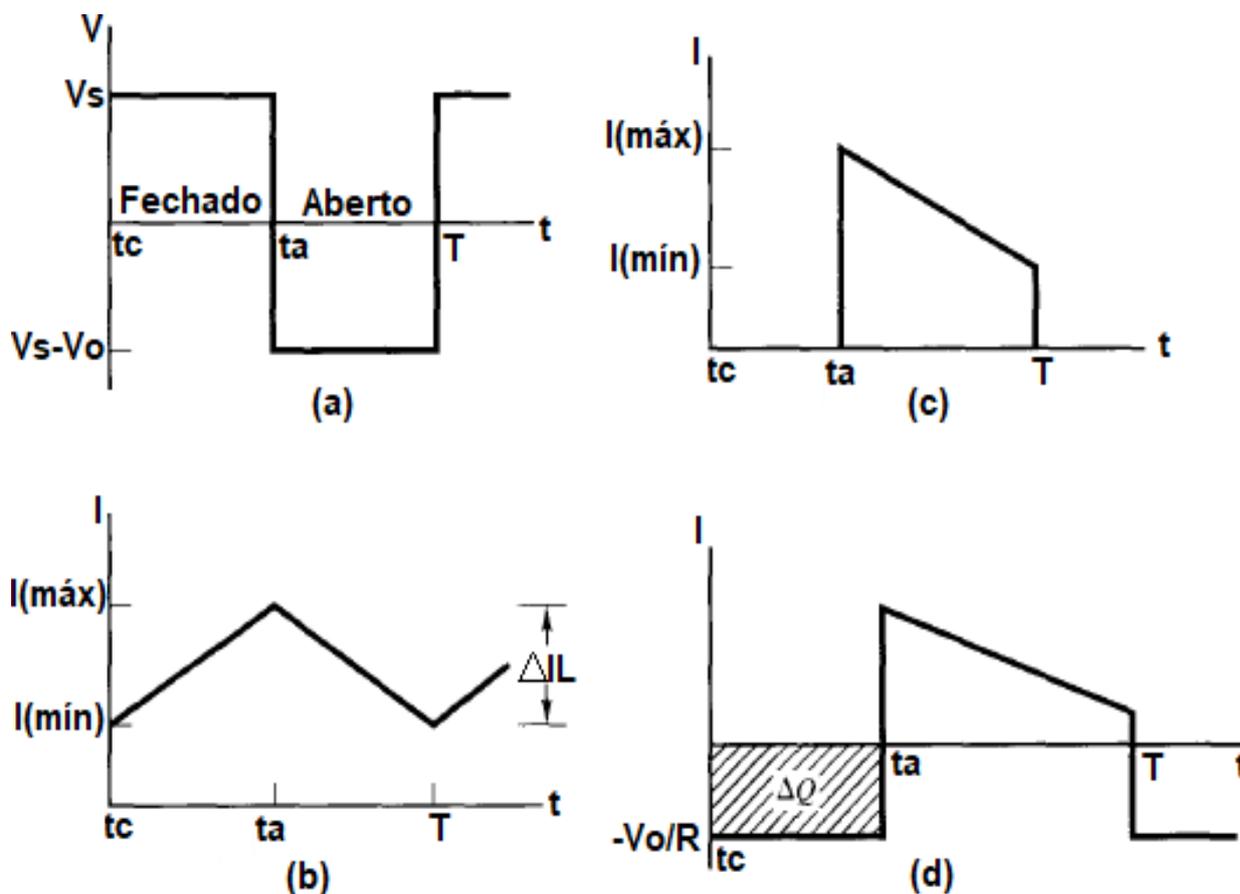


FONTE: ADAPTADO DE (RASHID, 1999).

A segunda etapa começa quando o interruptor é aberto fazendo com que o caminho da corrente percorra o indutor, diodo, capacitor e saída. A energia armazenada no indutor e a energia fornecida pelo painel fotovoltaico são entregues ao sistema de armazenamento (banco de baterias), a corrente no indutor cai até o momento em que o interruptor entre em condução novamente (AHMED, 2000).

As principais formas de onda do conversor são ilustradas na FIGURA 7, onde: (a) representa a tensão no indutor, (b) a corrente no indutor, (c) a corrente no diodo e (d) a corrente no capacitor.

FIGURA 7 - PRINCIPAIS FORMAS DE ONDA DO CONVERSOR BOOST



FONTE: ADAPTADO DE (HART, 2006).

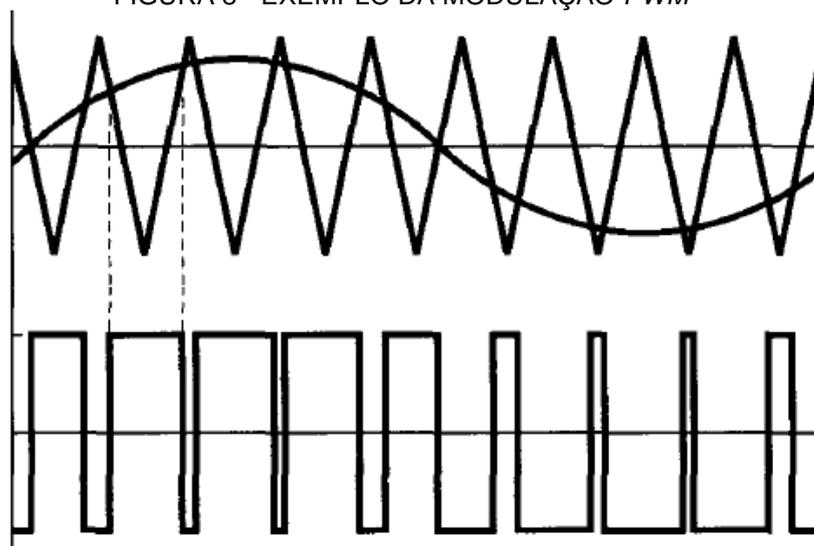
2.3 MODULAÇÃO PWM

Para controle do chaveamento do interruptor pode-se usar a modulação *PWM*, que conforme explica Hart (2006), apresenta dois pontos positivos, a utilização de menores ordens de filtro para reduzir as harmônicas e o controle da amplitude de saída.

Neste tipo de modulação compara-se a tensão de referência (moduladora), com um sinal simétrico de onda triangular (portadora), o qual determinará a frequência de chaveamento. O controle da amplitude é feito pela variação do tempo de condução do interruptor em relação ao período de chaveamento (HART, 2006).

Na FIGURA 8 pode-se visualizar a forma de onda da referência comparada a forma de onda da portadora e a respectiva resposta da largura de pulso da saída do modulador.

FIGURA 8 - EXEMPLO DA MODULAÇÃO PWM



FONTE: ADAPTADO DE (HART, 2006).

2.4 ALGORITMOS DE MPPT

Como citado no *item 2.1.4*, é necessário a aplicação de algoritmos, para controle, capazes de traçar o ponto de máxima potência em aplicações com painel solar fotovoltaico, uma vez que o ponto de extração de máxima potência varia rapidamente ao longo do dia.

Nas últimas décadas muitos métodos para encontrar o ponto de máxima potência foram desenvolvidos e publicados, essas técnicas se diferem em inúmeros aspectos, seja na quantidade de sensores necessários, na complexidade, nos custos para o desenvolvimento, na eficácia, na resposta e velocidade para estabilização, entre outras. (MORALES, 2010)

Dentre esses métodos, os mais utilizados são o: “Perturbe & Observe” e a “Condutância incremental”. Ambas técnicas são baseadas no princípio de escalada (“*hill-climbing*”), que consiste em mover o ponto de operação na direção onde a potência aumenta (MORALES, 2010).

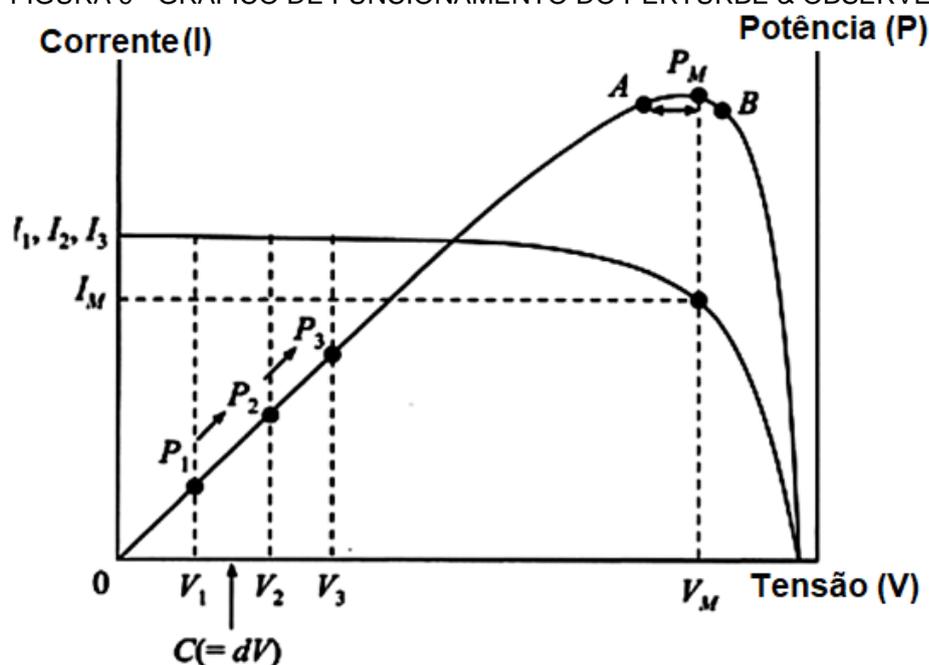
Métodos baseados nesse princípio têm uma boa performance quando a irradiação é constante e dependem de pouco poder computacional para sua implementação, em contrapartida podem tomar decisões erradas sobre o ponto de máxima potência devido a oscilações rápidas por mudanças de condições atmosféricas (MORALES, 2010).

2.4.1 Perturbe e Observe

Perturbe e Observe é um método de controle para traçar o *MPP*, baseado na perturbação da razão cíclica do conversor, fazendo com que a tensão e corrente nos terminais do painel varie e observando o reflexo da ação tomada na potência gerada, precisando para isso de dois sensores instalados, um para corrente e outro para tensão (MORALES, 2010).

Caso a perturbação gere um aumento da potência, é realizada outra perturbação no sentido, incrementando ou reduzindo a razão cíclica, do contrário a próxima perturbação toma o sentido oposto, como visto na FIGURA 9 no fluxograma da FIGURA 10 (MORALES, 2010).

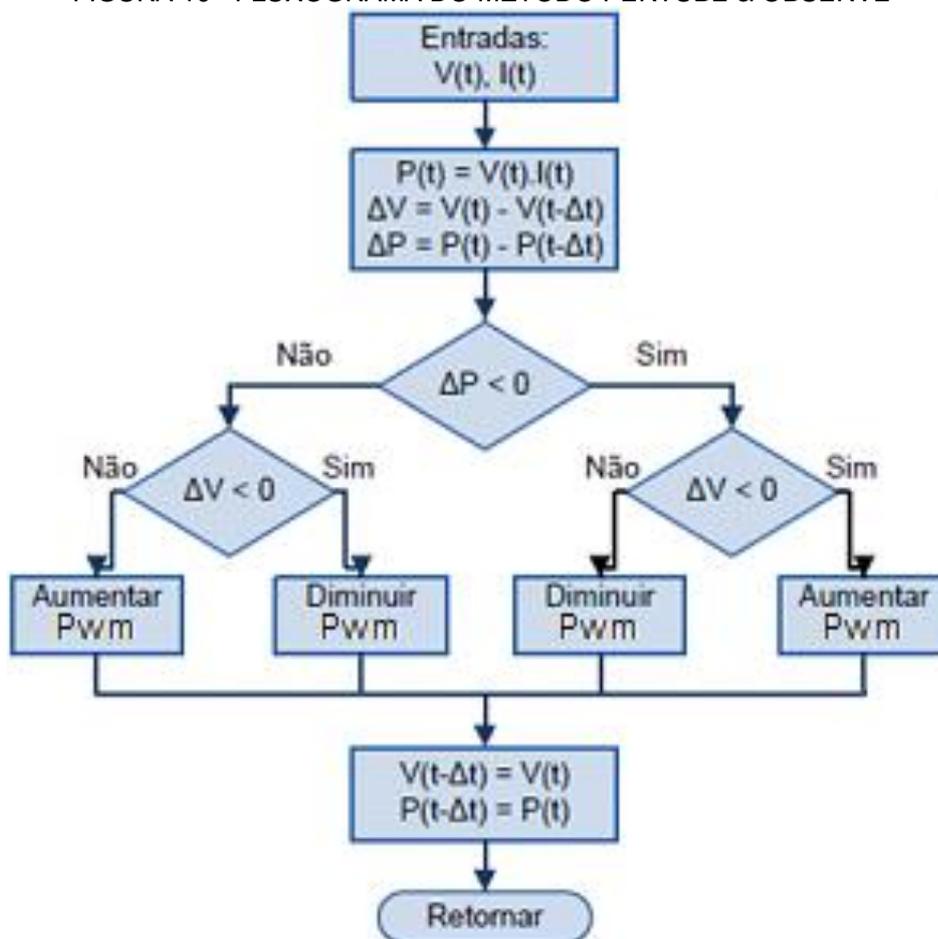
FIGURA 9 - GRÁFICO DE FUNCIONAMENTO DO PERTURBE & OBSERVE



FONTE: ADAPTADO DE (MORALES, 2010).

Este processo continua mesmo quando já atingido *MPP* fazendo com que a potência em regime permanente oscile em torno do *MPP*, assim, diminuindo a eficiência do método. Como a perturbação da razão cíclica, neste método, tem um passe (incremento ou redução) pré-definido, para diminuir a flutuação o passe de operação pode ser minimizado, entretanto desta forma o método se tornará mais lento e a resposta a mudanças bruscas do ambiente será comprometida (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO PERTUBE & OBSERVE



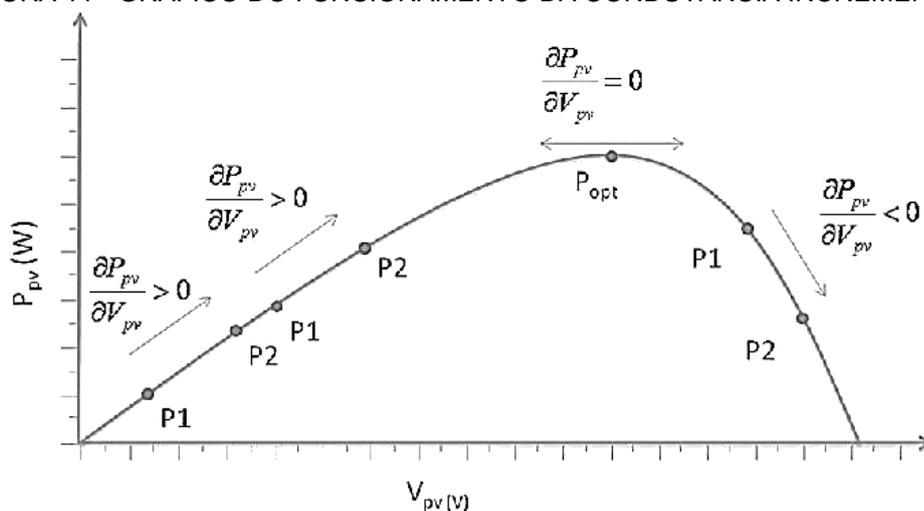
FONTE: ADAPTADO DE (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010)

2.4.2 Condutância incremental

O método da Condutância Incremental tem seu funcionamento similar ao Perturbe & Observe, porém, este método é baseado na inclinação da curva de potência $\left(\frac{dP}{dV}\right)$, a qual, é nula ao atingir o *MPP*, positiva à esquerda e negativa a direita, como demonstrado na FIGURA 11 (MORALES, 2010).

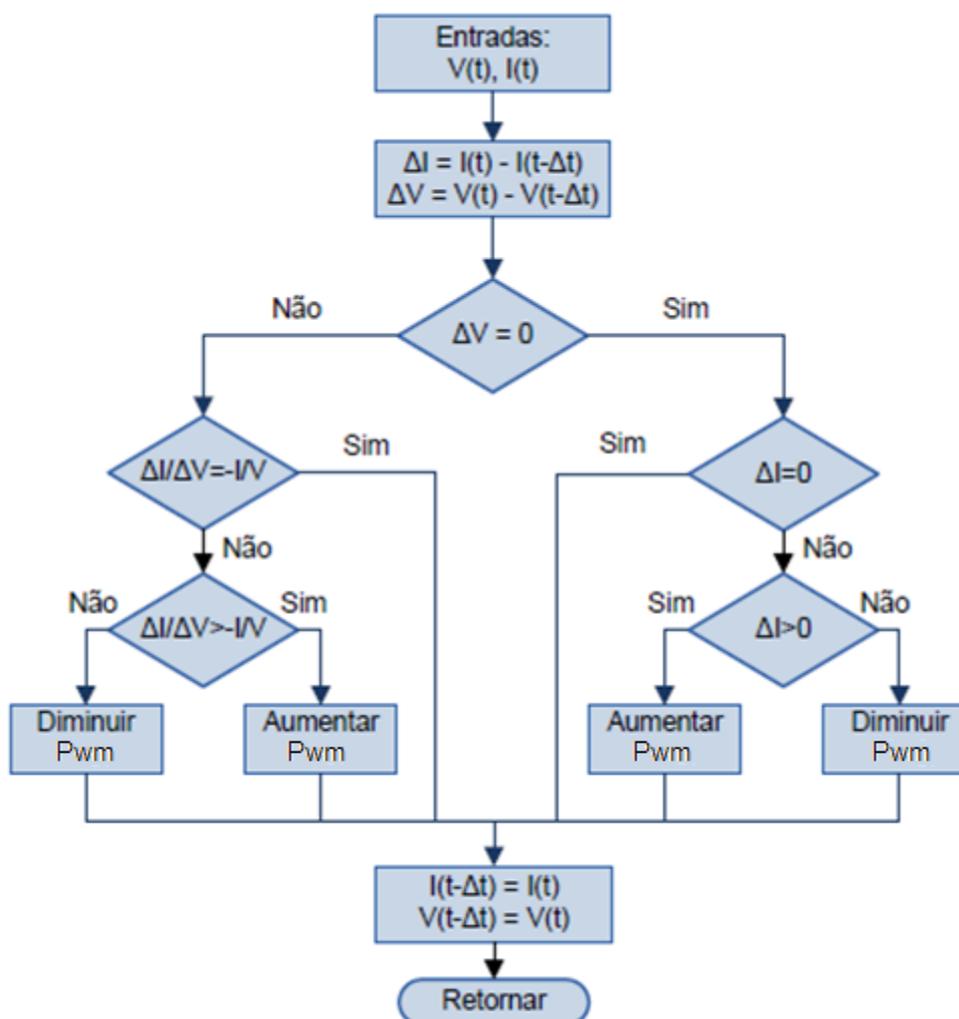
Tal como no “Perturbe & Observe”, a Condutância Incremental também necessita de dois sensores, um de corrente e outro de tensão. A vantagem deste método consiste na sua implementação que permite que ao alcançar o *MPP* as perturbações sejam encerradas até que se observem alterações na corrente do painel que indicam uma mudança nas condições atmosféricas, o fluxograma do método pode ser visto na FIGURA 12 (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

FIGURA 11 - GRÁFICO DO FUNCIONAMENTO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL



FONTE: ADAPTADO DE (MORALES, 2010).

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL



FONTE: ADAPTADO DE (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010)

2.4.3 Método Beta

A partir das características de corrente e tensão de um painel, pode-se chegar à relação “Beta” apresentada na equação 2, e respectivamente sua constante “c” na equação 3 (MORALES, 2010).

$$\beta = \ln\left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}}\right) - c * V_{pv} = \ln(I_o * c) \quad (2)$$

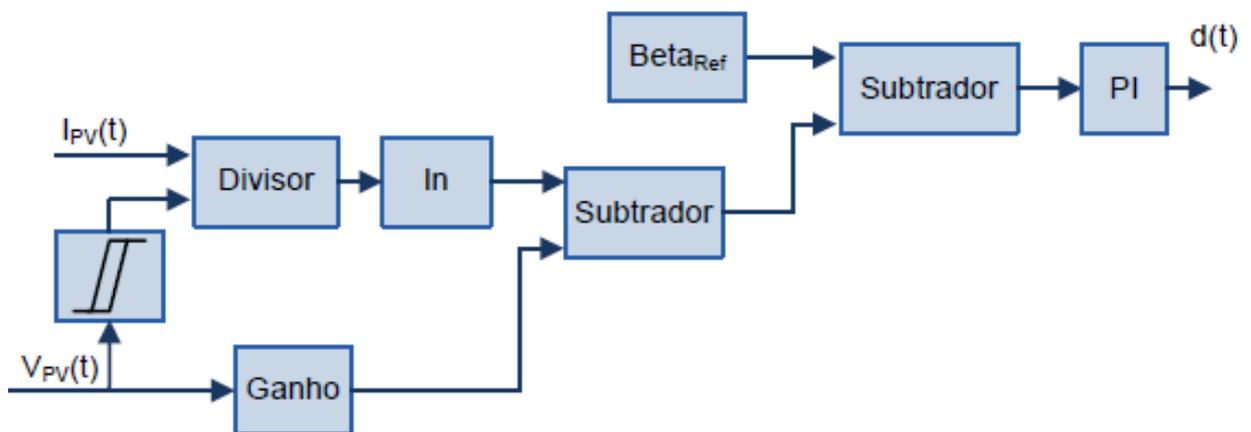
$$c = \frac{q}{n * k * T * N} \quad (3)$$

Onde:

- q , é a constante que representa a carga fundamental do elétron.
- n , é o fator de qualidade da junção do painel.
- k , é a constante de *boltzmann*.
- T , é a temperatura.
- N , é a quantidade de células fotovoltaicas em série.

Este método é capaz de colocar o painel num estado muito próximo do *MPP* de forma rápida, através de grandes etapas iterativas e conforme as condições de operação do painel se alteram o valor de β para o ponto ótimo permanece quase constante, desta forma, podendo ser continuamente calculado utilizando-se da tensão e corrente do painel em malha fechada, conforme ilustra o fluxograma da FIGURA 13 (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DO MÉTODO BETA

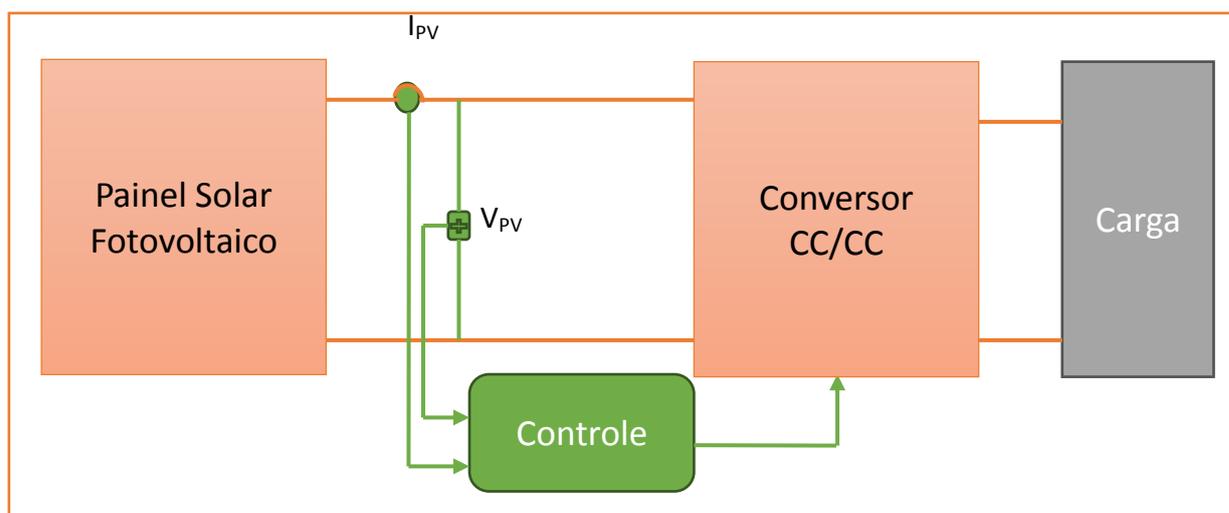


FONTE: (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010)

3. METODOLOGIA

Uma vez que a potência fornecida pelo painel fotovoltaico depende das condições ambientais, não há como pré-definir qual será o *MPP*, dessa forma recorre-se a um controle com os métodos para traçar o *MPP*. Estes são implementados por intermédio de conversores CC-CC, como demonstrado na FIGURA 14 (MOÇAMBIQUE, 2012).

FIGURA 14 - DIAGRAMA DO CONVERSOR CC-CC PARA MPPT



FONTE: O AUTOR.

Na literatura existem diferentes topologias para conversores CC-CC. As mais tradicionais são: *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*. Todas apresentam bons resultados e são de fácil implementação (MOÇAMBIQUE, 2012).

Neste trabalho será modelado e implementado um conversor do tipo *Boost*, conversor elevador de tensão, o conversor *Boost* possui uma boa margem de opções para desenvolvimento.

3.1 MODELAGEM DO CONVERSOR

Para modelagem do conversor e determinação de seus componentes, deve-se primeiramente avaliar os parâmetros do painel solar fotovoltaico que será utilizado.

Neste projeto é utilizado um painel solar fotovoltaico modelo: “**SL5M36-20W**” fabricado pela *Solar Leading*®, cujas principais características construtivas estão presentes na TABELA 1.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO.

Parâmetro	Valor
Tensão na máxima potência	17,28V
Corrente na máxima potência	1,16A
Tensão de Circuito Aberto	21,24V
Corrente de Curto-Circuito	1,31A
Máxima Potência Fornecida	20W

FONTE: O AUTOR.

Desta forma o Conversor *Boost* será desenvolvido com as características fundamentais segundo a TABELA 2:

TABELA 2 – CARACTERÍSTICA DO CONVERSOR.

Parâmetro	Valor
V_{in}	V_{pv}
V_{out}	43,5V
f_c	80kHz
f_s	30kHz
P	20W

FONTE: O AUTOR.

Onde a tensão de entrada “ V_{in} ” corresponde a tensão fornecida pelo painel solar fotovoltaico “ V_{pv} ”. A tensão de saída “ V_{out} ” está relacionada a tensão de carga das baterias conectadas a saída do conversor. As frequências “ f_c ” e “ f_s ” correspondem ao chaveamento e amostragem do conversor. A potência é definida por “ P ” e corresponde a potência máxima fornecida pelo painel fotovoltaico.

Os limites para os *ripple* da corrente e tensão de entrada são definidos ambos em 10%. Não é feita nenhuma consideração para a oscilação de tensão de saída, uma vez que a saída é ligada a um banco de baterias que atuará como uma fonte de tensão e evitará oscilações de tensão na saída.

3.1.1 Dimensionamento de Componentes

Com os parâmetros fundamentais do projeto, pode-se, através das equações demonstradas por BARBI (2006), calcular os valores dos componentes do

circuito. Desta forma, determina-se primeiramente a razão cíclica do conversor, onde partindo-se do ganho estático, equação 4, tem-se:

$$\frac{V_o}{E} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

Desta forma, pode-se chegar na relação da razão cíclica, como mostra a equação 5:

$$D = 1 - \frac{E}{V_o} \quad (5)$$

Logo, utilizando-se dos parâmetros definidos tem-se:

$$D = 1 - \frac{17,28}{43,5} \quad D \cong 0,603$$

Na definição do indutor, será levado em consideração o *ripple* máximo admitido da corrente de entrada, neste caso 10%. Para isso utiliza-se a equação 6:

$$\Delta I = \frac{D * E}{L * f_c} \quad (6)$$

Pode-se arranjar a equação de modo a isolar a indutância necessária, como na equação 7:

$$L = \frac{D * E}{\Delta I * f_c} \quad (7)$$

De onde chegamos à:

$$L = \frac{0,603 * 17,28}{(0,1 * 1,16) * 80000} \quad L \cong 1mH$$

A definição do capacitor de entrada leva em conta o *ripple desejado* da tensão de entrada, que para este projeto foi definido como 10%, a equação 8 representa o cálculo para definição deste.

$$C_{in} \geq \frac{\left(\frac{P_{in}}{V_{in}}\right) * D}{f_{chave} * V_{in} * Ripple_V} \quad (8)$$

Assim,

$$C_{in} \geq \frac{\left(\frac{20}{17,28}\right) * 0,603}{80000 * 17,28 * (0,1 * 17,28)} \quad C_{in} \geq 300nF$$

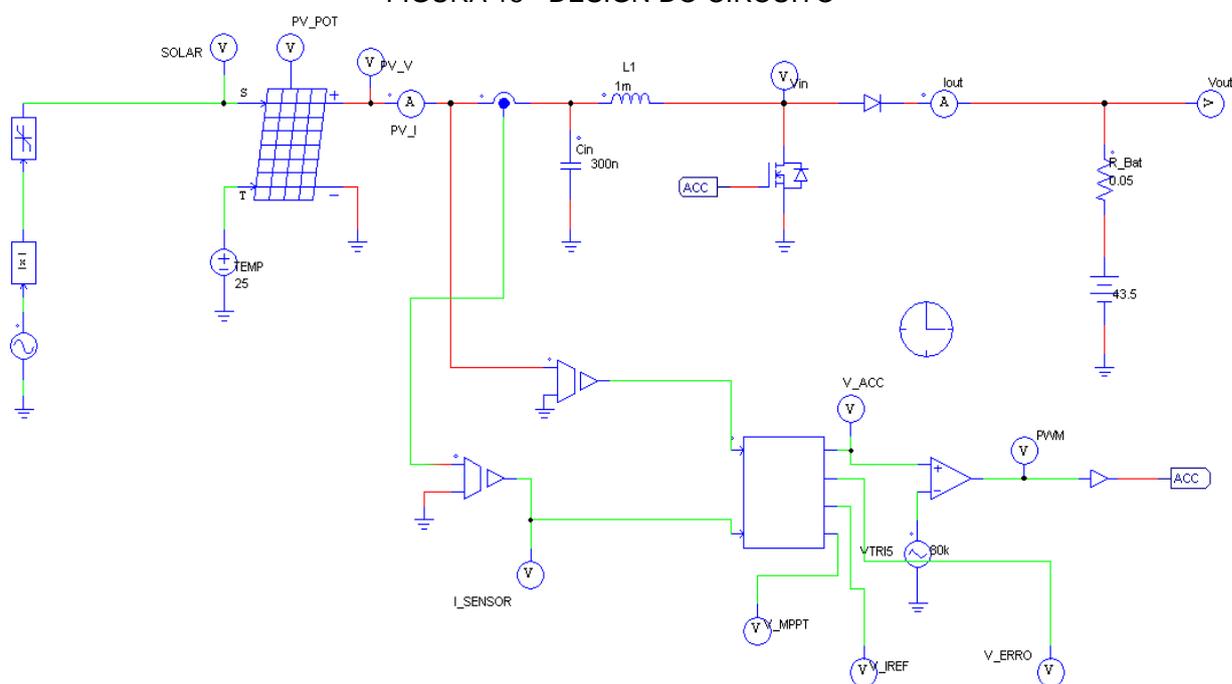
4. SIMULAÇÃO

O modelo do circuito, FIGURA 15, foi desenvolvido e simulado utilizando o software *PSIM* da *Powersim Inc*®.

Os valores dos componentes do circuito estão dentro do estipulado no capítulo 3, para a simulação de um banco de baterias foi adicionado uma fonte de tensão em série com uma resistência de baixo valor ôhmico.

Durante a simulação a temperatura de operação do painel fotovoltaico foi fixada em 25°C

FIGURA 15 - DESIGN DO CIRCUITO



FONTE: O AUTOR.

No acionamento do *MOSFET* foi utilizado um “*C-Block*”, que é um bloco onde, como sugerido, pode-se desenvolver lógicas utilizando-se de linguagem de programação *C ANSI*, similar a utilizada em microcontroladores, tornando a posterior migração para um modelo experimental mais transparente.

Para a aplicação dos métodos de controle utilizou-se de dois sensores, um para tensão e outro para corrente, assim permitindo a determinação da potência gerada pelo painel fotovoltaico.

Os códigos utilizados na simulação foram desenvolvidos, quando necessário, utilizando um passo que corresponde a 1% da razão cíclica média. Estes estão disponíveis nos apêndices 1, 2 e 3.

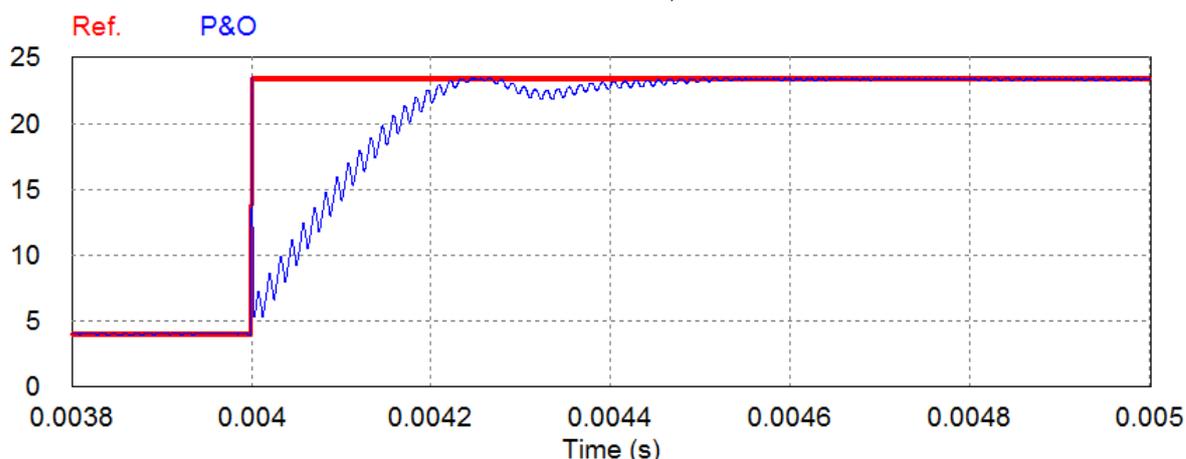
4.1 RESPOSTA AO DEGRAU

A resposta ao degrau é uma simulação que tem uma variação muito rápida e permite-se que possa avaliar o tempo de resposta das diferentes técnicas. As figuras 16, 17 e 18 representam o comportamento da resposta ao impulso utilizando as técnicas de *MPPT*: perturbe e observe, condutância incremental e beta respectivamente.

Todos os ensaios foram feitos considerando-se as mesmas variações de temperatura e incidência de irradiação. Nas figuras a referência de potência máxima é destacada na linha vermelha e o gráfico em azul é a potência extraída do painel.

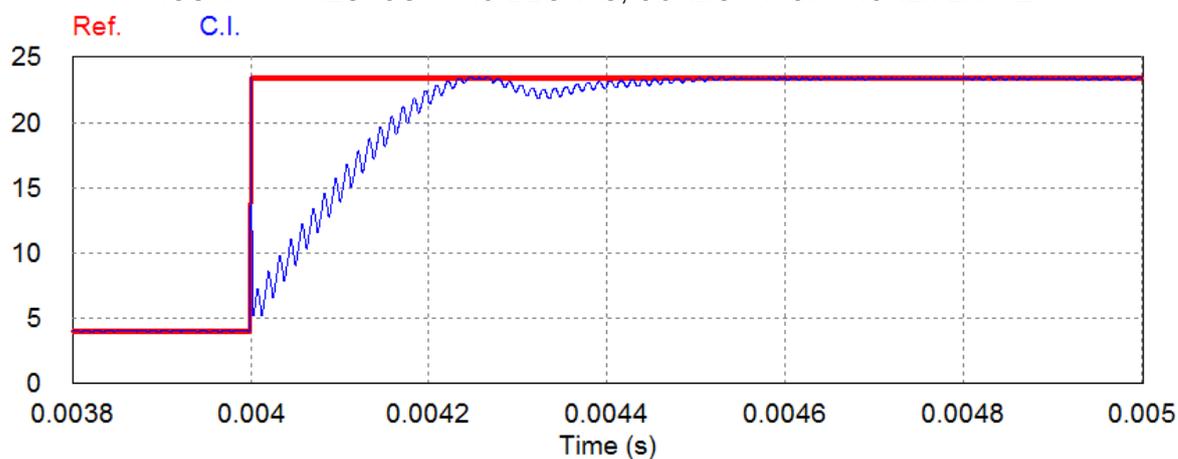
Pode-se observar nas simulações que as técnicas atingem a potência máxima praticamente ao mesmo tempo, entretanto a estabilização do método beta é visivelmente mais rápida e suave.

FIGURA 16 - RESPOSTA AO DEGRAU, PERTURBE & OBSERVE.

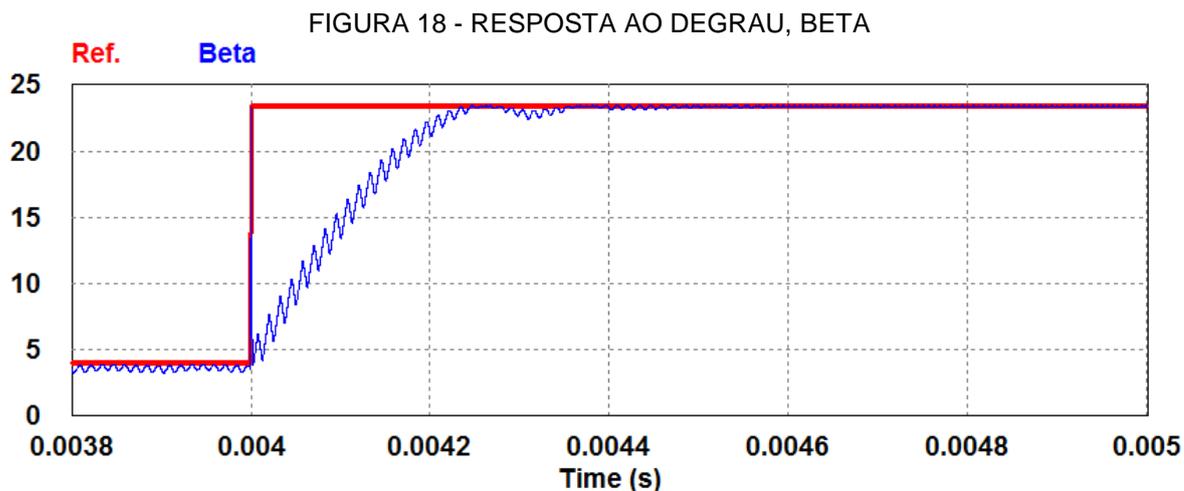


FONTE: O AUTOR.

FIGURA 17 - RESPOSTA AO DEGRAU, CONDUTÂNCIA INCREMENTAL



FONTE: O AUTOR.



FONTE: O AUTOR.

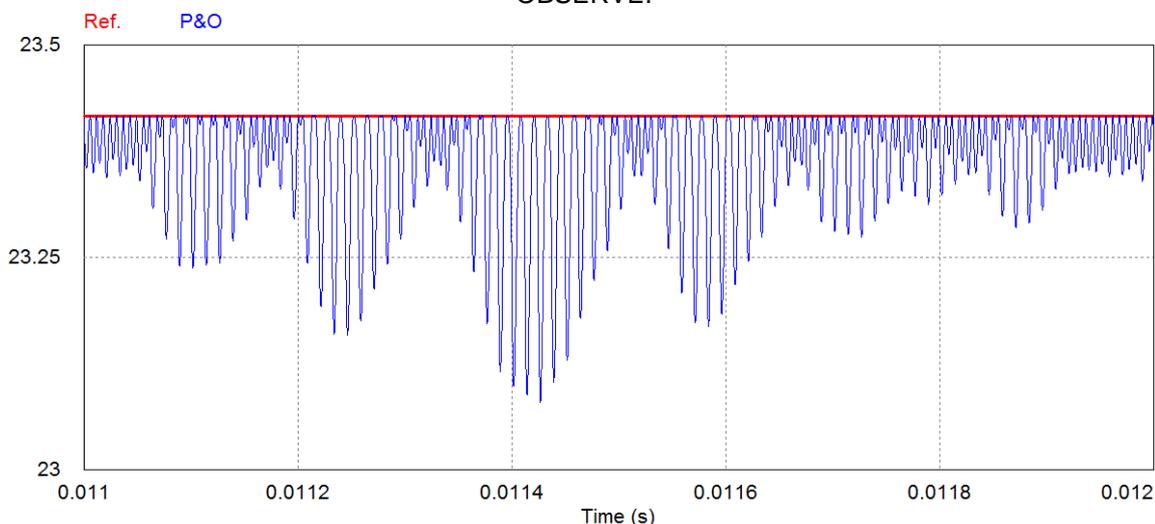
4.2 REGIME PERMANENTE

Para comparar adequadamente as técnicas, fez-se necessário estabelecer métricas de desempenho para critérios de comparação, uma vez que as medidas tradicionais a respostas dinâmicas não são suficientemente conclusivas.

Como a energia transmitida é fundamental para o desempenho do painel fotovoltaico, uma medida relevante é a ondulação em regime permanente em torno do ponto de máxima potência (CANESIN, BRITO, & SAMPAIO, 2010).

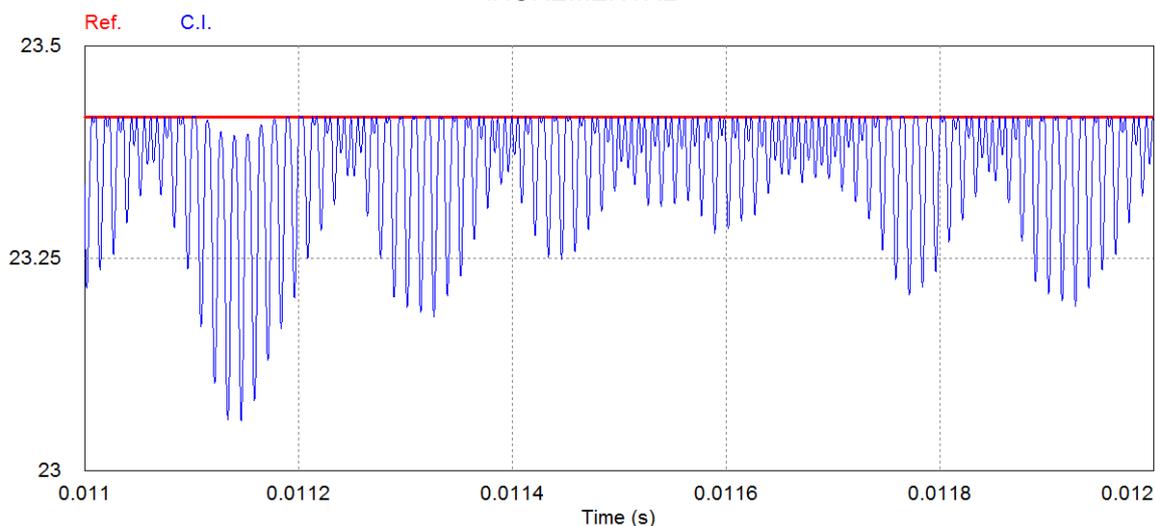
As figuras 19, 20 e 21 mostram respectivamente o comportamento em regime permanente dos métodos perturbe e observe, condutância incremental e beta.

FIGURA 19 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO PERTURBE E OBSERVE.



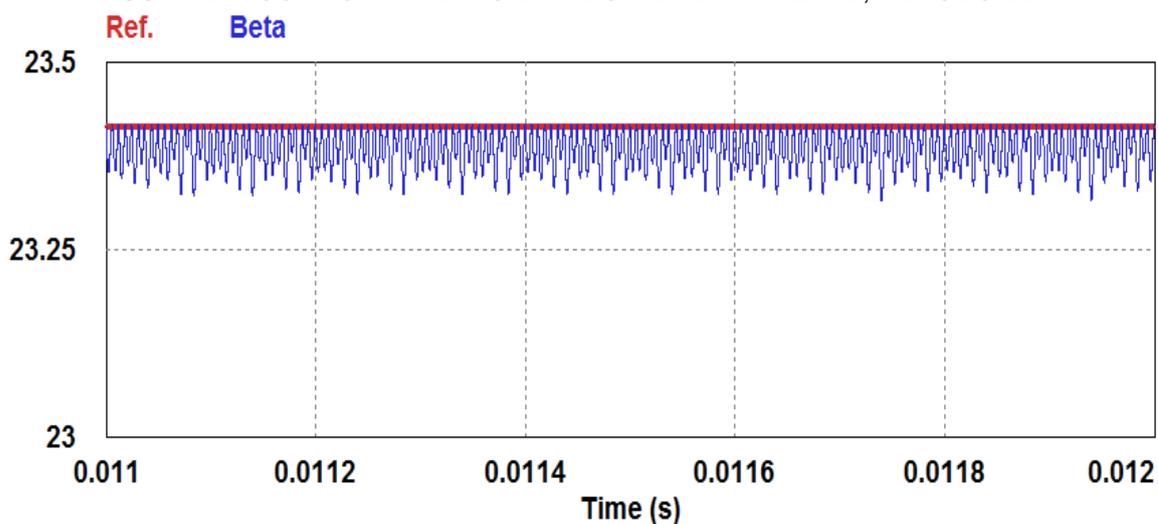
FONTE: O AUTOR.

FIGURA 20 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO CONDUTÂNCIA INCREMENTAL



FONTE: O AUTOR.

FIGURA 21 - COMPORTAMENTO EM REGIME PERMANENTE, MÉTODO BETA



FONTE: O AUTOR.

Pode-se avaliar a partir destes ensaios, que o método beta em regime permanente tem uma oscilação consideravelmente menor que os outros métodos, isso se deve em grande parte pela forma como seu algoritmo opera, não com um passe fixo, mas, com a variação do *beta* lido para o desejado.

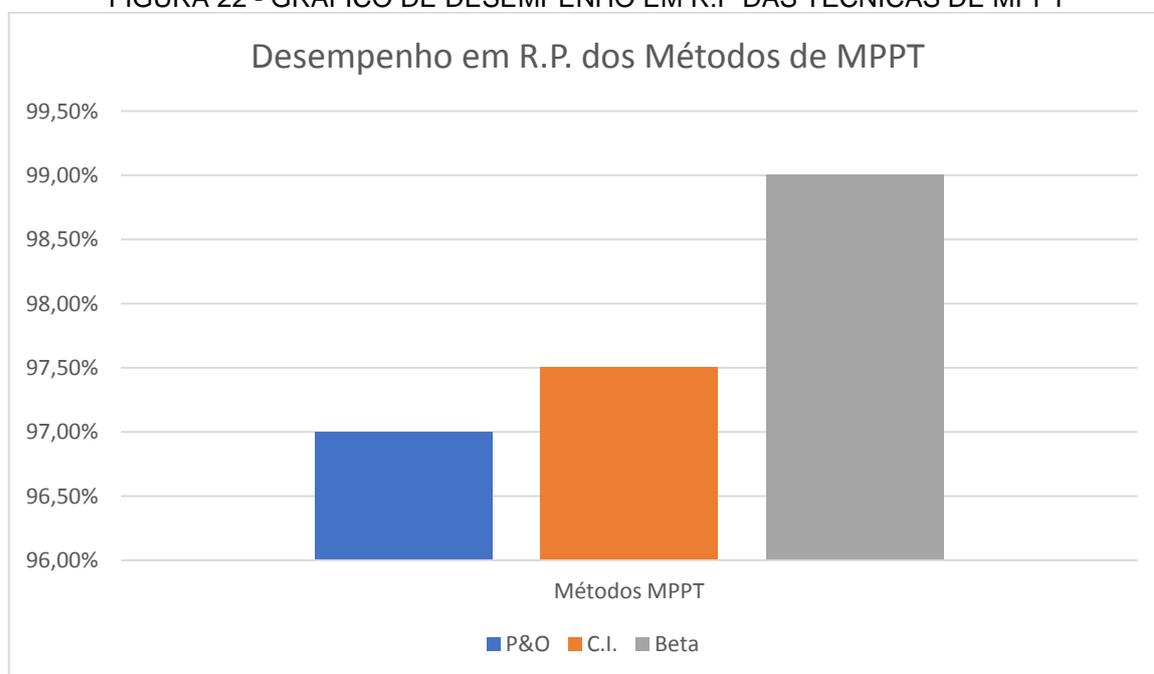
Fazendo uma análise dos ensaios pode-se determinar a eficiência em regime permanente das técnicas utilizadas, onde constata-se que o desempenho da técnica do perturbe e observe próximo aos 97%. O método da condutância incremental tem um leve aumento quando comparado ao perturbe e observe, com

um desempenho de aproximadamente 97,5%, esse incremento deve-se ao fato do fim das oscilações ao atingir o ponto de estabilidade, onde a derivada é 0, entretanto não há uma margem mais significativa, uma vez que, o método depende de um passe fixo, tornando raros os momentos onde ele atinge exatamente o *MPP*.

O método *beta* se sobressai aos demais devido, como já citado, ao método de operação de seu algoritmo, entretanto esse ganho não é gratuito e sua equação pode se tornar complexa para alguns microcontroladores mais simples, demandando um hardware superior para realização correta do método.

A FIGURA 22, apresenta um gráfico comparativo do desempenho das três técnicas.

FIGURA 22 - GRÁFICO DE DESEMPENHO EM R.P DAS TÉCNICAS DE MPPT



FONTE: O AUTOR.

Apesar de refletir uma margem, pequena, de aproximadamente 2%, se o cenário analisado for um sistema de Geração com Potência instalada de 1MW, o método do beta traria um ganho de 14.4 MWh por mês, sem adição de quaisquer custos ao projeto, sendo necessário apenas a reprogramação do mesmo.

5. PROJETO

Para validação experimental do projeto desenvolveu-se um protótipo do conversor *boost* operado por microcontrolador.

5.1 ESCOLHA DOS COMPONENTES

Devido as baixas tensão e corrente do circuito, e a alta frequência de chaveamento, escolheu-se um *MOSFET* como interruptor, sendo este o modelo **FQD16N25C** da *Fairchild®*, suas principais características, segundo a folha de dados (*Datasheet*), podem ser visualizadas na TABELA 3.

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO *MOSFET*

Parâmetro	Valor
Tensão Dreno-Fonte V_{DSS}	250V
Corrente de Dreno I_D	16A
Resistência Dreno-Fonte R_{DS}	0.22 Ω
Tempo para Ligar $T_{(on)}$	15ns

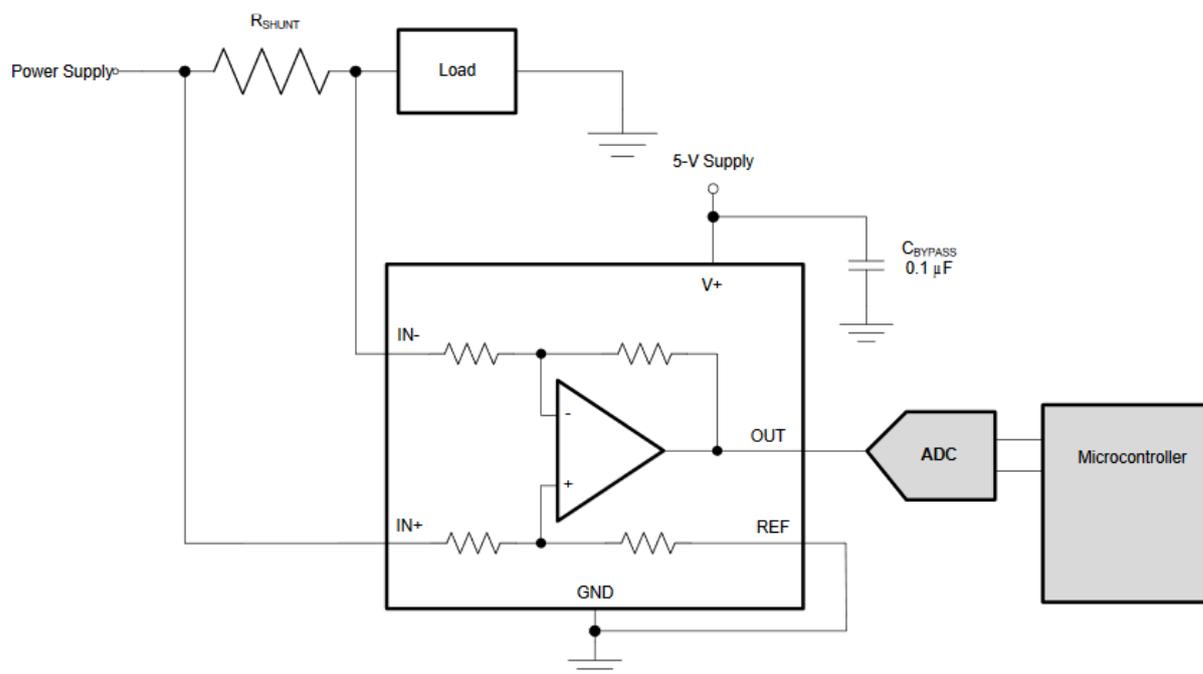
FONTE: O AUTOR.

Para o diodo foi escolhido o modelo **UF4007** da *Vishay®*, o componente é capaz de bloquear tensões reversas de 700V e suporta uma corrente média constante de 1A. Além disto ele tem as características de ser ultrarrápido, com tempos de recuperação reversa de 75ns. No projeto foram utilizados dois diodos deste modelo em paralelo.

Para sensoriamento da corrente foi utilizado um sensor *shunt*, em conjunto com um amplificador de instrumentação **INA199A2** da *Texas Instruments®*, o diagrama do circuito segue o modelo sugerido pela fabricante como demonstrado na FIGURA 23, a resolução do amplificador de instrumentação é de 100V/V.

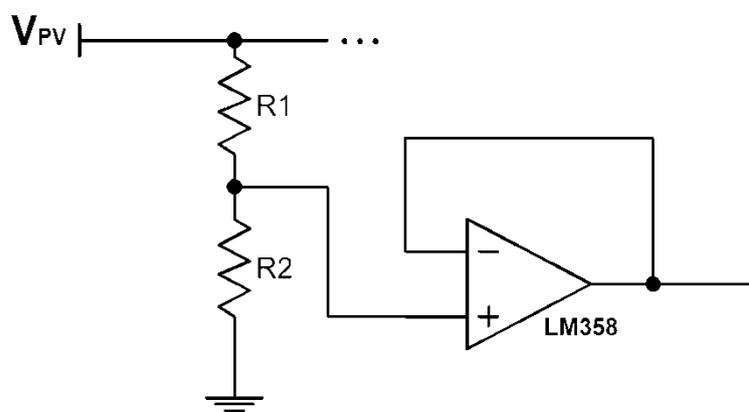
O sensoriamento de tensão foi desenvolvido através de um divisor de tensão e de um amplificador operacional o **LM358** da *Texas Instruments®*, o amplificador atua como buffer para garantir a estabilidade e isolar o circuito, que pode ser visto na FIGURA 24. Tendo em vista uma tensão de operação de 17,28V os resistores R1 e R2 foram definidos como 12k Ω e 2,2k Ω respectivamente, de modo não fornecer uma tensão superior a 3,3V para o microcontrolador, a qual poderia danificá-lo.

FIGURA 23 – CIRCUITO DO SENSOR DE CORRENTE



AUTOR: (TEXAS INSTRUMENTS, 2017)

FIGURA 24 – CIRCUITO DO SENSOR DE TENSÃO



FONTE: O AUTOR.

Para controle do conversor escolheu-se o o microcontrolador *Tiva™ C Series TM4C123G LaunchPad* da fabricante *Texas Instruments®*, ilustrado na FIGURA 25. O microcontrolador possui um processador *ARM* de 80MHz e dois módulos *PWM*, com um total de 16 pinos de Entrada/Saída.

Escolheu-se para desenvolvimento da programação o *software Code Composer Studio (CCS)*, este que é um ambiente integrado de desenvolvimento (*IDE*) para microcontroladores *TM4x ARM Cortex* e possui um conjunto de ferramentas usadas para desenvolver projetos de sistemas embarcados.

FIGURA 25 - MICROCONTROLADOR TIVA-C



FONTE: (TEXAS INSTRUMENTS, 2017)

Como os níveis de tensão e corrente fornecidos pelo microcontrolado podem não ser suficientes para controlar o *MOSFET*, há a necessidade de utilizar um drive, que é um componente responsável por garantir a comutação da chave.

Optou-se pelo drive **IR2011** fabricado pela *International Rectifier*®. A escolha pelo IR2011 dá-se pelo seu tempo de ativação de 80ns que é suficiente para a operação em 80kHz.

Como a alimentação do drive é diferente do microcontrolador e demais componentes foi inserido no projeto dois reguladores lineares, **LM7805** e **LM7815**, para fornecer as tensões de 5V e 15V respectivamente. Assim o circuito todo é alimentado por uma fonte de 19V e então regulado para as devidas necessidades.

A saída do conversor alimentará 3 baterias *Unipower* 12V ligadas em série, que em conjunto detêm uma tensão de carga de 43,5V.

5.1.1 Projeto e construção do Indutor

O projeto e dimensionamento do indutor seguirá as equações definidas por BARBI (2001). Como visto na secção 3.1 deste projeto o indutor deve ter aproximadamente 1mH, para isso será adotado um núcleo magnético do tipo “EE”, cuja seção transversal, A_e , é um retângulo de aproximadamente 120mm².

O material do núcleo é ferrite, e por convenção adota-se o limite da densidade de fluxo magnético, B_{limite} , como 300mT.

O número de espiras “ N ” utilizado para construir o indutor é dado pela equação 9, onde I_{gap} corresponde ao comprimento do entreferro e μ_0 a permeabilidade magnética do ar.

$$N = \sqrt{\frac{I_{gap} * L}{\mu_0 * A_e}} \quad (9)$$

Da equação 9 podemos chegar à:

$$N = \sqrt{\frac{(2 * (0,1 * 10^{-3})) * (1 * 10^{-3})}{(4 * \pi * 10^{-7}) * (120 * 10^{-6})}}$$

$$N \cong 36,4$$

Uma vez que um valor não inteiro para o número de espiras é impraticável, aproxima-se do inteiro maior mais próximo, logo:

$$N = 37$$

Para certificar-se que a densidade de fluxo magnético no núcleo do indutor não chegará a um ponto de saturação, deve-se garantir que durante a operação o indutor não ultrapasse o limite estipulado, para isso calcula-se a densidade de fluxo máxima segundo a expressão 10, onde I_{pico} representa a corrente de pico no indutor.

$$B_{max} = \frac{L * I_{pico}}{N * A_e} \quad (10)$$

A equação 10 nos leva a:

$$B_{max} = \frac{(1 * 10^{-3}) * 1,31}{37 * (70 * 10^{-6})}$$

$$B_{max} = 295\text{mT}$$

Como $B_{max} < B_{limite}$, o núcleo não saturará.

O fio disponível para enrolar o núcleo do indutor é um AWG 25, cuja área do condutor é de $162,35 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. E por convecção admite-se que o limite da densidade de corrente em um fio de cobre é de $J_{limite} = 4,5 \text{ MA/m}^2$, assim é necessário verificar também, se a corrente que o condutor será submetido não excederá esse valor, através da expressão 11, onde S_{total} , é a área do condutor.

$$J_{max} = \frac{I_{eficaz}}{S_{total}} \quad (11)$$

Dessa forma chegamos a:

$$J_{max} = \frac{1,12}{162,35 * 10^{-9}}$$

$$J_{max} = 6,9^{MA}/m^2$$

Como a densidade de corrente é maior que o limite máximo do fio de cobre, será utilizado dois fios em paralelo para confeccionar o enrolamento.

Em altas frequências, a corrente elétrica circula pela periferia do condutor, este efeito é chamado “*Efeito Pelicular*”, para calcular a profundidade de penetração “ Δ ” da corrente no condutor, utiliza-se a equação 12.

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_c}} [cm] \quad (12)$$

Assim:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{80000}} [cm]$$

$$\Delta \cong 0,265 \text{ mm}$$

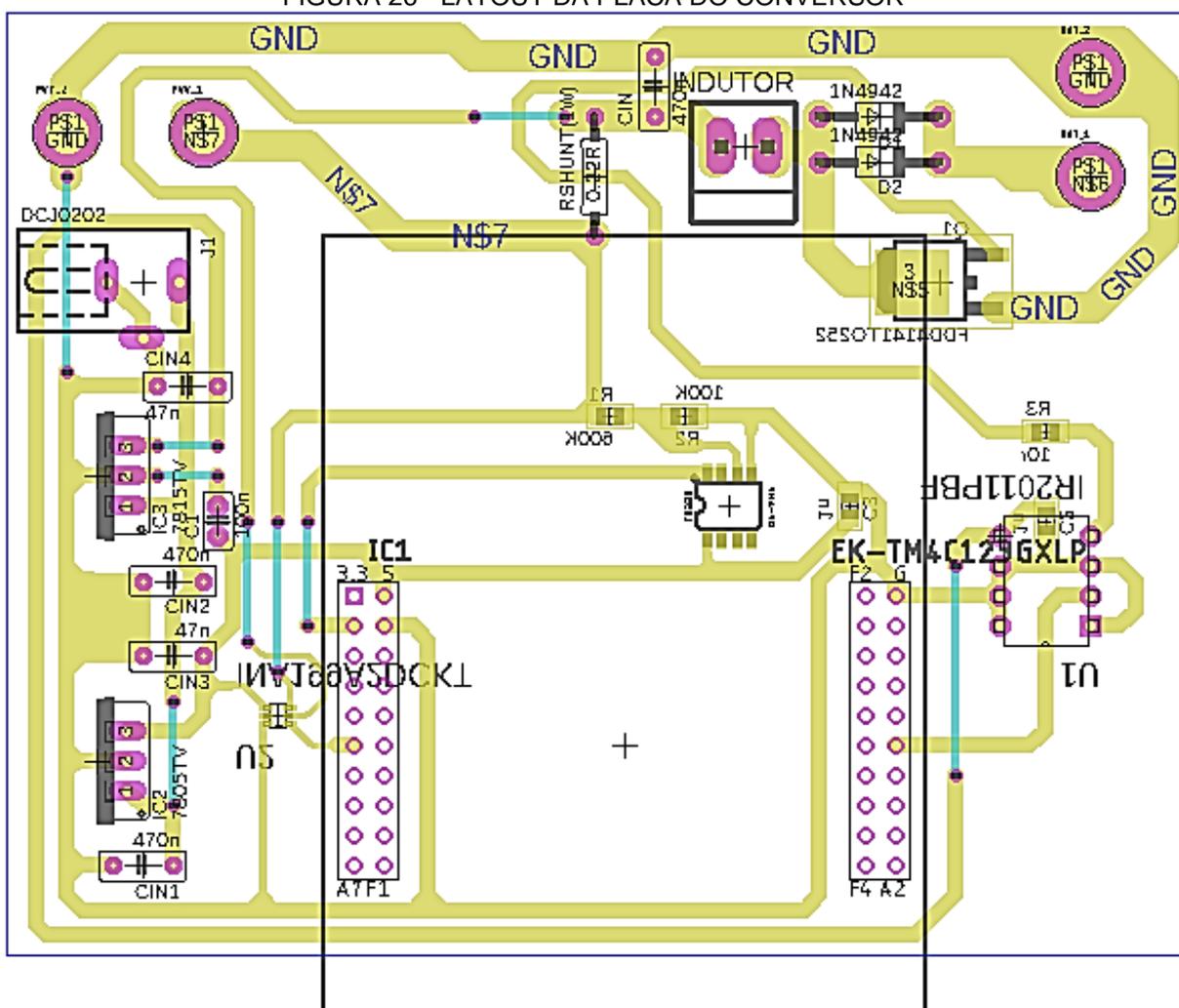
Para otimização em relação ao *Efeito Pelicular*, o condutor não deve possuir um diâmetro maior que “ 2Δ ”, ou seja, aproximadamente 0,530mm. De acordo com a tabela de bitolas *AWG* esse valor de diâmetro encontra-se entre as bitolas 23 e 24, como o condutor utilizado tem a bitola em 25 *AWG*, não é necessário do ponto de vista do “*Efeito Pelicular*” adicionar outro condutor em paralelo.

Entretanto como o número de condutores determinado pelo estudo da densidade de corrente foi dois, o indutor será constituído de 2 enrolamentos e 37 espiras, alcançando o valor desejado de 1mH.

5.2 LAYOUT DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O *layout* foi desenvolvido com auxílio do software *Eagle®*, respeitando as condições de compatibilidade eletromagnética (*EMC*), este pode ser visualizado na FIGURA 26.

FIGURA 26 - LAYOUT DA PLACA DO CONVERSOR



FONTE: O AUTOR.

6. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos de maneira experimental no laboratório de máquinas elétricas do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Em virtude de condições climáticas não favoráveis, e para que fosse adotado um método justo de avaliar igualmente todos os métodos, a irradiação utilizada para os resultados experimentais foi fornecida por um conjunto de 12 lâmpadas incandescentes de 60W cada. Este conjunto teve seu acionamento ramificado por duas chaves, uma controlando o estado das 4 lâmpadas centrais e a outra controlando as 8 lâmpadas laterais. O arranjo das lâmpadas pode ser visto na FIGURA 27, juntamente com o painel utilizado.

FIGURA 27 - ARRANJO DE LÂMPADAS UTILIZADO NOS TESTES EXPERIMENTAIS.



FONTE: O AUTOR.

Para aumentar a irradiação captada das lâmpadas foi utilizado um anteparo para erguer o painel e posicioná-lo de frente para estas, como demonstrado na FIGURA 28.

FIGURA 28 - POSICIONAMENTO DO PAINEL FRENTE AS LÂMPADAS.



FONTE: O AUTOR.

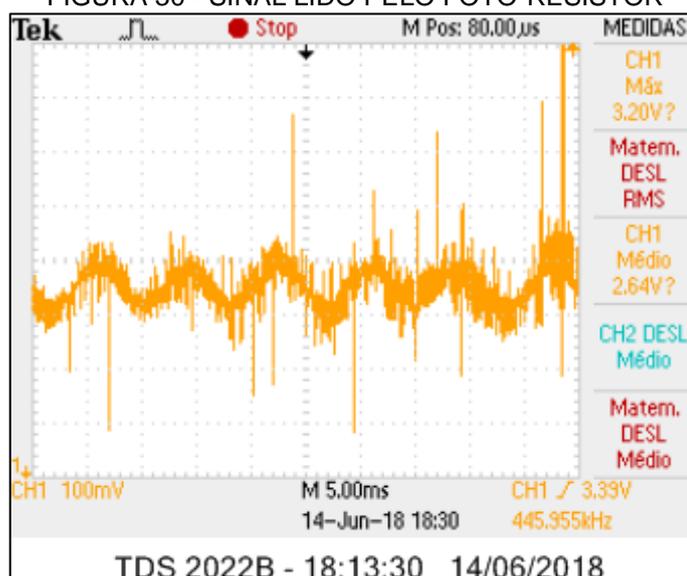
A utilização de lâmpadas incandescentes levou a uma anomalia no fluxo de irradiação do painel, uma vez que estão conectadas a rede elétrica de alimentação há uma oscilação na irradiação que varia em sintonia com a rede. Para comprovar este fenômeno, foi feito um circuito simples com um foto-resistor conectado a ponteira do osciloscópio, FIGURA 29, o resultado pode ser verificado na FIGURA 30.

FIGURA 29 - CIRCUITO COM FOTO-RESISTOR



FONTE: O AUTOR.

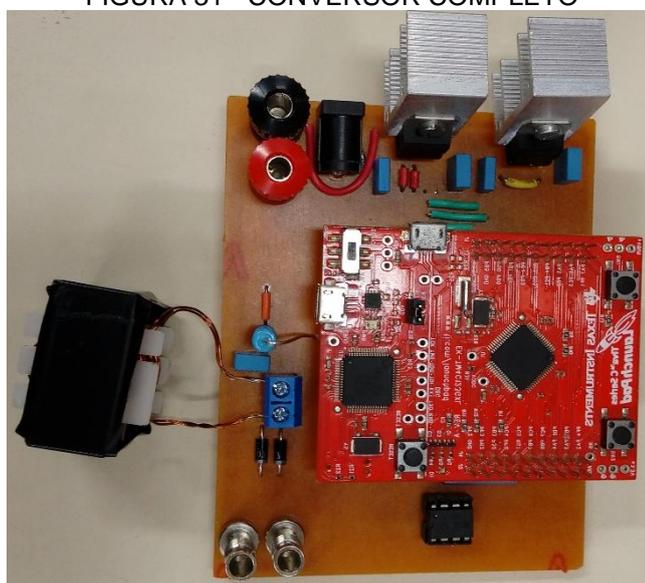
FIGURA 30 - SINAL LIDO PELO FOTO-RESISTOR



FONTE: O AUTOR.

Com a oscilação da entrada devidamente justificada pode-se seguir a preparação dos testes. O conversor foi ligado ao microcontrolador e ao indutor projetado, FIGURA 31.

FIGURA 31 - CONVERSOR COMPLETO



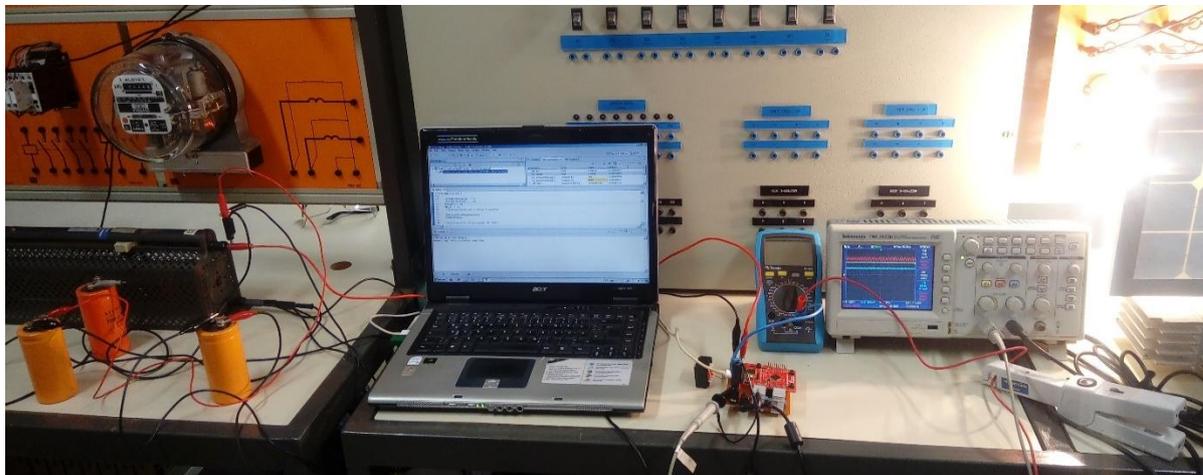
FONTE: O AUTOR.

A saída prevista para atuar em três baterias de 12V teve de ser modificada em virtude de falhas no funcionamento de duas das três baterias, resultando desta forma em um resistor de potência em paralelo com 3 capacitores de 2200uF/250V da *Siemens*® para garantir a estabilização da tensão de saída.

O monitoramento e validação dos resultados foi feita com auxílio do osciloscópio **TDS2022B** da *Tektronix*®, que conta com sensor de corrente não

invasivo e uma ponteira para medição de tensão. Uma visão geral da bancada de testes pode ser vista na FIGURA 32.

FIGURA 32 - VISÃO GERAL DA BANCADA DE TESTES



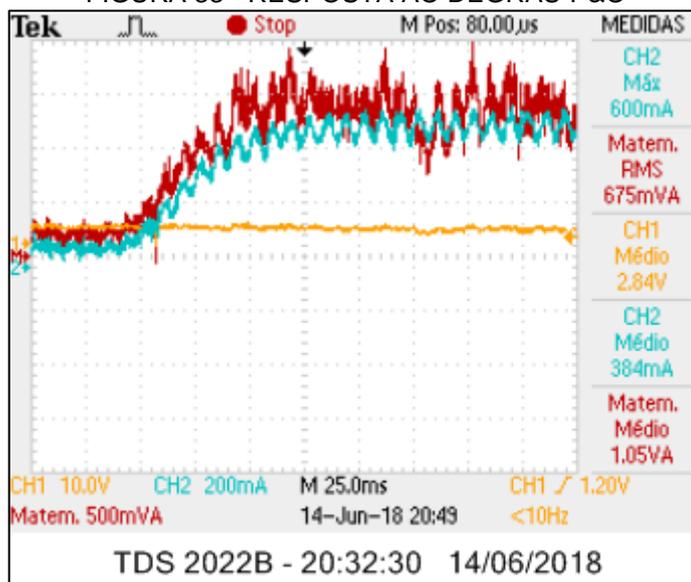
FONTE: O AUTOR.

6.1. ANÁLISES

A metodologia de análise dos resultados segue a mesma utilizada nas simulações, ou seja, primeiramente a avaliação da resposta ao degrau e em seguida a avaliação dos métodos em regime permanente.

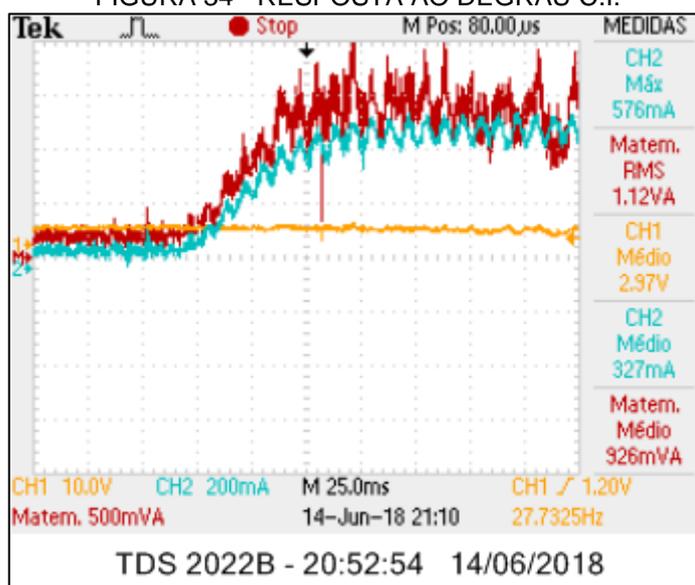
Os resultados de resposta ao degrau são vistos nas figuras 33, 34 e 35, sendo estes relacionados respectivamente aos métodos do P&O, C.I. e Beta. Onde a tensão é ilustrada em amarelo, a corrente em azul e a potência em vermelho.

FIGURA 33 - RESPOSTA AO DEGRAU P&O



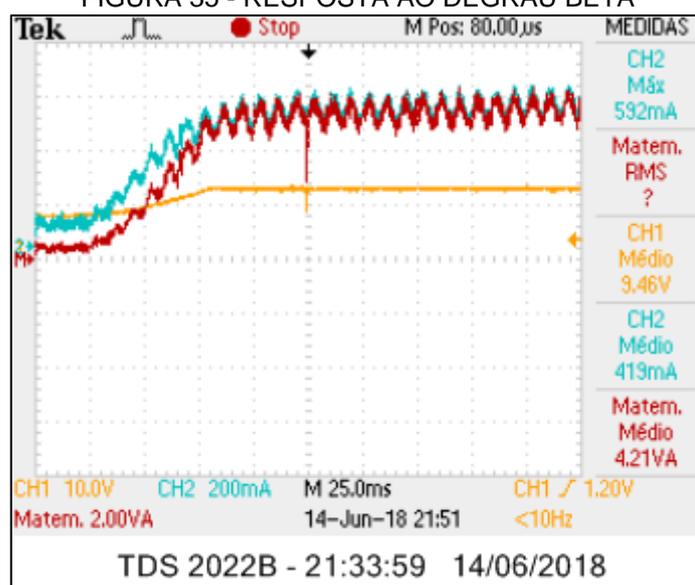
FONTE: O AUTOR.

FIGURA 34 - RESPOSTA AO DEGRAU C.I.



FONTE: O AUTOR.

FIGURA 35 - RESPOSTA AO DEGRAU BETA



FONTE: O AUTOR.

Nos resultados de resposta dinâmica pode-se observar um comportamento similar ao obtido nas simulações, com as três técnicas atingindo o ponto de equilíbrio com o mesmo tempo, aproximadamente 75ms, neste resultado pode-se observar também que o método Beta apresenta maior estabilidade ao encontrar o ponto de equilíbrio, enquanto que as demais parecem não chegar ao real *MPP*.

A estabilidade do método Beta, bem como seu maior aproveitamento e extração de potência do painel, se dá pela forma de operação de seu algoritmo, que atua sem a necessidade de um passe fixo, atuando dinamicamente, esse resultado torna-se mais evidente na análise em regime permanente.

Os resultados em regime permanente podem ser vistos nas figuras 36, 37 e 38, sendo estas respectivamente referentes aos métodos P&O, C.I. e Beta.

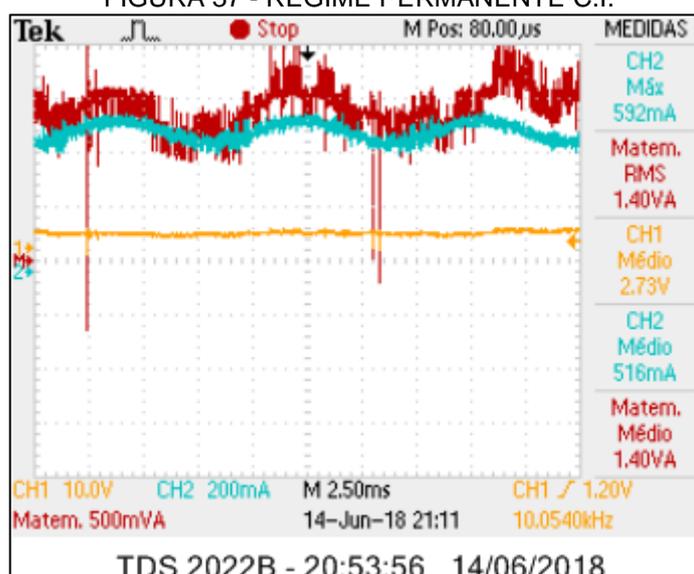
Em regime permanente fica evidente a diferença entre o método Beta para os demais, não apenas pela estabilidade apresentada, mas pela potência extraída quase 4 vezes maior. Esses valores são resultados de o algoritmo operar dinamicamente, sem um passe definido, fazendo com que seu método de controle atue como uma forma de compensador.

FIGURA 36 - REGIME PERMANENTE P&O



FONTE: O AUTOR.

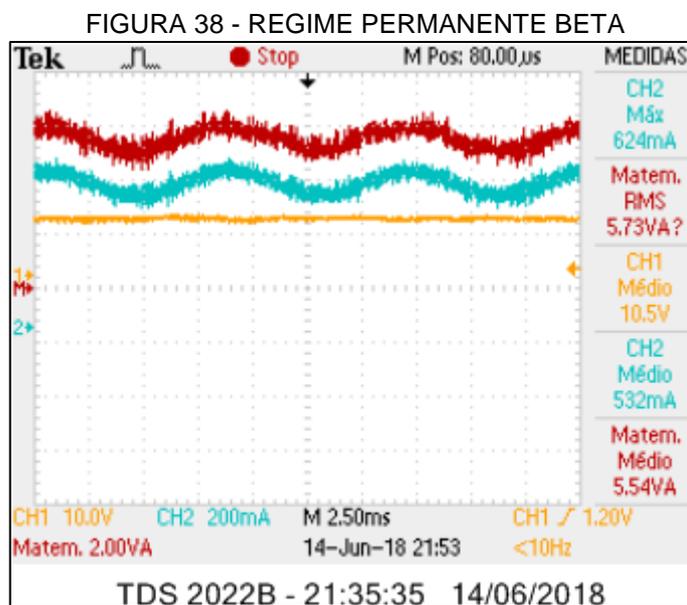
FIGURA 37 - REGIME PERMANENTE C.I.



FONTE: O AUTOR.

Dessa forma, como a irradiação não estava constante devido ao efeito das lâmpadas os algoritmos de P&O e C.I. acabavam se perdendo na tomada de

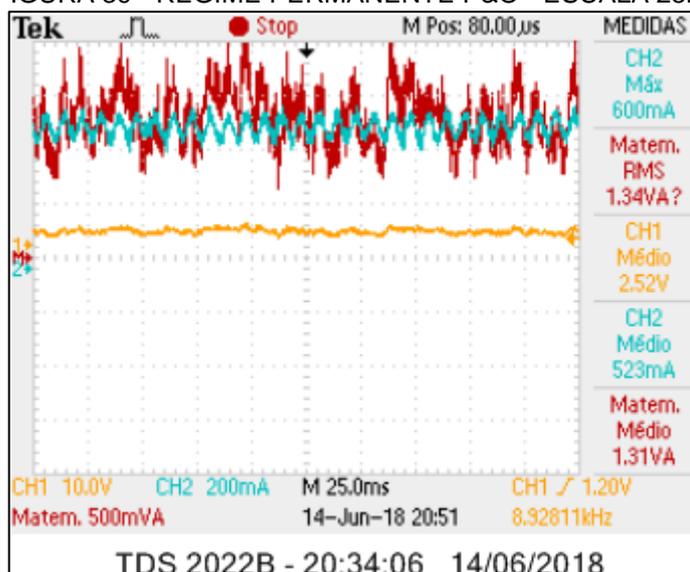
decisões o que acarretou em um desempenho relativamente inferior ao método Beta.



FONTE: O AUTOR.

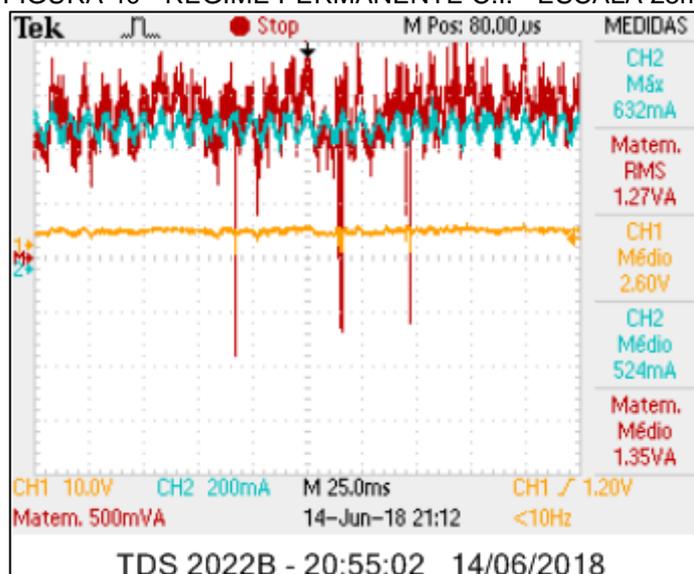
Ainda em regime permanente, mas utilizando uma escala de tempo dez vezes maior, figuras 39, 40 e 41 (métodos P&O, C.I. e Beta respectivamente), é possível visualizar a confirmação dos resultados, e a diferença de estabilização do gráfico de potência.

FIGURA 39 - REGIME PERMANENTE P&O - ESCALA 25ms



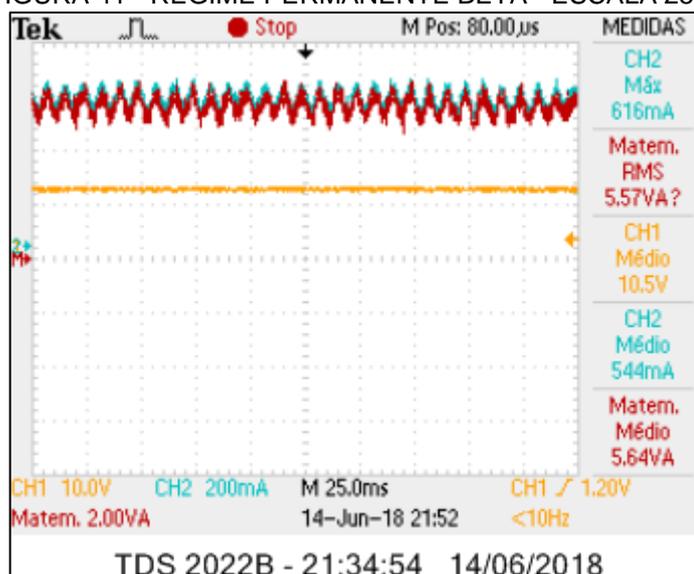
FONTE: O AUTOR.

FIGURA 40 - REGIME PERMANENTE C.I. - ESCALA 25ms



FONTE: O AUTOR.

FIGURA 41 - REGIME PERMANENTE BETA - ESCALA 25ms



FONTE: O AUTOR.

7. CONCLUSÕES

É evidente a necessidade de investimentos na área de geração de energia de forma alternativa. Uma das opções como destacado neste projeto é a geração de energia solar fotovoltaica.

A geração deste tipo de energia enfrenta barreiras de desempenho em várias linhas: na tecnologia dos painéis, na eficiência dos componentes e topologias dos conversores e no desempenho das técnicas de controle. Neste último, os ganhos podem ser obtidos praticamente sem investimentos, uma vez que na maioria dos casos basta-se atualizar o *firmware* do controle.

Este projeto propôs a análise experimental de alguns métodos muito utilizados em projetos de geração de energia fotovoltaica, para *MPPT* e um método muito estudado, porém ainda não comumente implementado, que é o método Beta.

Este método em especial consegue obter cerca de 2% de desempenho a mais que o Perturbe e Observe, em condições de simulação num ambiente ideal. Isso por si só representa um ganho de aproximadamente 14MWh no final de um mês para uma usina de 1MW de potência instalada.

Além disto em resultados experimentais, o método provou-se muito mais robusto a variações que os demais métodos estudados, e mesmo em condições de baixa irradiação, utilizando-se lâmpadas ao invés do sol, conseguiu resultados expressivos.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Entretanto o método Beta possui, algumas desvantagens, como a maior demanda de capacidade de processamento do hardware utilizado e o conhecimento prévio da potência média gerada para que se possa calcular um dos componentes "*Beta_{REF}*" de sua equação.

Dessa forma fica a sugestão para trabalhos futuros, a implementação dos métodos: Perturbe e Observe e Condutância incremental, através de um compensador, ou seja, sem a atuação direta na razão cíclica do conversor. Esta alteração pode fazer com que as mudanças bruscas das condições atmosféricas não afetem diretamente o desempenho do método, que estará mais resistente a transitórios.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- ANKER, M. **Photovoltaik - Funktionsprinzip**. Junho, 2015. Disponível em Strom vom Dach: <<https://goo.gl/13mTR6>>. Acesso em 28 de Abril de 2018.
- BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001
- BARBI, I., & MARTINS, D. C. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2006.
- CANESIN, C., BRITO, M. A., & SAMPAIO, L. P. Avaliação das principais técnicas para obtenção de MPPT de painéis fotovoltaicos. **9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**, 2010.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potencia**. Madrid: Prentice Hall, 2006.
- MACHADO, C. T., & MIRANDA, F. S. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química, Universidade Federal Fluminense**, 126-143, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/u33UnN>>. Acesso em 28 de Abril de 2018.
- MOÇAMBIQUE, N. E. **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** (Dissertação de Mestrado ed.). São Carlos, São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.
- MORALES, D. S. **Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications** (Dissertação de Mestrado ed.). Espoo, Finlândia: Aalto University - School of Science and Technology, 2010.
- NASCIMENTO, C. A. **Princípio De Funcionamento Da Célula Fotovoltaica** (Monografia de Especialização ed.). Lavras, Minas Gerais: Universidade Federal de Lavras, 2004.
- RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: MAKRON Books do Brasil 1999.

TEXAS INSTRUMENTS. **ARM® Cortex®-M4F Based MCU TM4C123G LaunchPad Evaluation Kit**, 2017. Disponível em <<http://goo.gl/nLxeGE>>. Acesso em 29 de Maio de 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **INA199 26-V, Bidirectional, Zero-Drift, Low- or High-Side, Voltage-Output, Current-Shunt Monitor**, Abril de 2017. Disponível em <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina199.pdf>>. Acesso em 29 de Maio de 2018.

APENDICE 1 – CÓDIGO: PERTURBE E OBSERVE

```

//-----
//Declaração das variáveis
//-----
static double Pt[3], Vc[3];
static double am, Tperiod, cont;
static int Pwm, x = 0;
if (x <=0)
{
    x = 1;
    Vc[1] = 0;
    Pt[1] = 0;
    Pwm = 0;
}
//-----
// Aquisição dos dados numa frequência definida
//-----

Tperiod = pow(30000,-1);           // frequência de amostragem
am = Tperiod*pow(delt,-1);        // amostras a cada número de passos de
calculo
cont += 1;
if (cont > am)                     //Rotina do programa
{
    cont=0;                         //Resetar a contagem

Vc[0] = in[0]; //Tensão atual
Pt[0] = (in[0]*in[1]); //Potência Atual
Vc[2] = Vc[0]-Vc[1]; // Diferença de Tensão
Pt[2] = Pt[0]-Pt[1]; // Diferença de Potência

if(Pt[2] < 0){
    if(Vc[2] < 0){
        Pwm -= 6;
    }
    if(Vc[2] > 0){
        Pwm += 6;
    }
}
if(Pt[2] > 0){
    if(Vc[2] < 0){
        Pwm += 6;
    }
    if(Vc[2] > 0){
        Pwm -= 6;
    }
}
Vc[1] = Vc[0]; //Tensão 1 ciclo atrás
Pt[1] = Pt[0]; // Potência 1 ciclo atrás
}
if(Pwm >= 600){
    Pwm = 603;
}
if(Pwm <= 60){
    Pwm=60;
}
// Sinais de comando
out[1]=Pt[2];
out[0]=Pwm;
out[2]=Vc[2];

```

APENDICE 2 – CÓDIGO: CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

```

//-----
//Declaração das variáveis
//-----
static double It[3],Vc[3],X[4];
static double am, Tperiod, cont;
static int Pwm, x = 0;
if (x <=0)
{
    x = 1;
    Vc[1] = 0;
    It[1] = 0;
    Pwm = 0;
}
//-----
// Aquisição dos dados numa frequência definida
//-----
Tperiod = pow(30000,-1);           // frequência de amostragem
am = Tperiod*pow(delt,-1);        // amostras a cada número de passos de
calculo
cont += 1;
if (cont > am)                    //Rotina do programa
{
    cont=0;                        //Resetar a contagem

Vc[0] = in[0]; //Tensão atual
It[0] = in[1]; //Corrente Atual
Vc[2] = Vc[0]-Vc[1]; // Diferença de Tensão
It[2] = It[0]-It[1]; // Diferença de Corrente
X[0] = It[2]/Vc[2];
X[1] = (-It[0])/Vc[0];
X[2] = X[0] + X[1];
if (Vc[2] == 0)
{
    if (It[2] > 0){
        Pwm -= 6;
    }
    if (It[2] < 0){
        Pwm += 6;
    }
}
else
{
    if(X[0] < X[1]){
        Pwm += 6;
    }
    if(X[0] > X[1]){
        Pwm -= 6;
    }
}
Vc[1] = Vc[0]; //Tensão 1 ciclo atrás
It[1] = It[0]; // Potência 1 ciclo atrás
}
if(Pwm >= 603){
    Pwm = 603;
}
if(Pwm <= 60){
    Pwm=60;}
// Sinal de comando
out[1]=X[2];
out[0]=Pwm;
out[2]=Vc[2];

```

APENDICE 3 – CÓDIGO: MÉTODO BETA

```

//-----
//Declaração das variáveis
//-----
static double Pt[3],Vc[3],X[4],It[3];
static double am, Tperiod, cont;
static int Pwm, x = 0;
if (x <=0)
{
    x = 1;
    Vc[1] = 0;
    Pt[1] = 0;
    Pwm = 0;
    X[2] = 0;
}
//-----
// Aquisição dos dados numa frequência definida
//-----
Tperiod = pow(30000,-1);           // frequência de amostragem
am = Tperiod*pow(delt,-1);        //amostras a cada número de passos de calculo
cont += 1;

if (cont > am)                     //Rotina do programa
{

cont=0;                            //Resetar a contagem

Vc[0] = in[0]; //Tensão atual
It[0] = in[1]; //Potência Atual

if(Vc[0]<=0){Vc[0]=0.0001;}
if(It[0]<=0){It[0]=0.0001;}

X[1] = 1.60217657e-19/(1.5*1.3806488e-23*(25+273)*1);
X[0] = log(It[0]/Vc[0])-(Vc[0]*X[1]);
X[2] = log(1.22/19.2)-(19.2*X[1]);
X[3] = X[2] - X[0];

Pwm += X[3];

Vc[1] = Vc[0]; //Tensão 1 ciclo atrás
It[1] = It[0]; // Potência 1 ciclo atrás
}
if(Pwm >= 603){
    Pwm = 603;
}
if(Pwm <= 60){
    Pwm=60;
}
// Sinal de comando
out[1]=X[0];
out[0]=Pwm;
out[2]=X[2];
out[3]=X[1];

```