

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**FELIPE RAYZEL DA CRUZ
LEANDRO DOS REIS PEREIRA
PEDRO ENRICO MANTOVAN**

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM BUSCA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO EM BANCO DE
DADOS**

CURITIBA

2020

**FELIPE RAYZEL DA CRUZ
LEANDRO DOS REIS PEREIRA
PEDRO ENRICO MANTOVAN**

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM BUSCA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO EM
BANCO DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação, ofertada pelo Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Adriano Ruseler, Dr. Eng.

CURITIBA

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

**FELIPE RAYZEL DA CRUZ
LEANDRO DOS REIS PEREIRA
PEDRO ENRICO MANTOVAN**

RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM BUSCA DA TENSÃO DE OPERAÇÃO EM BANCO DE DADOS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação, ofertada pelo Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Data de aprovação: 27 de novembro de 2020.

Prof. Adriano Ruseler, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Glauber Gomes de Oliveira Brante, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Roger Gules, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se no Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT).

RESUMO

Todo sistema de geração de energia fotovoltaica necessita de um algoritmo de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT). Os métodos existentes na atualidade possuem alta eficiência em condições de mesma temperatura e radiação solar incidentes em todo o arranjo fotovoltaico. Porém, quando estes são submetidos a situações de sombreamento parcial, podem não operar no ponto de máximo do sistema, uma vez que estas condições fazem com que a curva $V \times I$ dos painéis crie máximos de potência locais. Assim, os métodos de MPPT convencionais podem reconhecer esses pontos como se fossem os pontos de máxima potência do sistema. Um agravante a este problema é o fato de que métodos como P&O, por exemplo, geram muitas perturbações ao sistema gerador, podendo ocorrer em instabilidade no conjunto. O presente trabalho possui como objetivo propor uma técnica de rastreamento de ponto de máxima potência global que utiliza uma variação do método de Tensão Constante, onde a tensão grampeada provém de dados armazenados em um banco de dados, aplicado tanto em sistemas sob condição de sombreamento parcial quanto em casos de uniformidade climática. O sistema fotovoltaico foi modelado no software PSIM e seu banco de dados gerado pelo MATLAB e armazenado em formato SQL. O método proposto é comparado às técnicas Tensão Constante, P&O e Condutância Incremental. Os resultados de simulação mostraram que o método de MPPT de tensão variável com busca em tabela de banco de dados consegue rastrear pontos de máximos globais sob condições de sombreamento parcial, além de mostrar maior eficiência nas demais condições testadas.

Palavras-chave: Rastreamento do Ponto de Máxima Potência. Sistema Fotovoltaico. Sombreamento Parcial.

ABSTRACT

Every photovoltaic power generation system requires a maximum power point tracking algorithm (MPPT). Currently existing methods have high efficiency under conditions of the same temperature and solar radiation incident on the photovoltaic arrangement. However, when they are subjected to situations of partial shading, they may not obtain the global maximum, since these conditions cause the $V \times I$ curve of the panels to create local maximum power points. The most common MPPT methods might end up recognizing these points as if they were the maximum power points in the system. An aggravating factor to this problem is the fact that methods such as P&O, for example, generate many disturbances to the generator system, which may occur in instability in the set. The present work aims to propose a global maximum power point tracking technique that uses a variation of the Constant Voltage method, in which the voltage comes from data stored in a database, applied both in systems under partial shading conditions and in cases of climatic uniformity. The photovoltaic system was modeled on the PSIM software and its database generated by MATLAB and stored in SQL format. The proposed method is compared to the Constant Voltage, P&O and Incremental Conductance techniques. The simulation results showed that the variable voltage MPPT method using a database table search can track global maximum points under partial shading conditions, in addition to showing greater efficiency in the other tested conditions.

Key words: Maximum Power Point Tracking. Photovoltaic system. Partial shading.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento na produção de energia fotovoltaica no mundo, entre os anos 2006 e 2016	24
Figura 2 - Evolução da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica	25
Figura 3 - Curva característica de um painel fotovoltaico.....	27
Figura 4 - Curvas de Desempenho do Painel.....	30
Figura 5 - Curvas Corrente x Tensão e Potência x Tensão GBR 320p.....	30
Figura 6 - Ilustração do Funcionamento de um Painel	36
Figura 7 - Ponto de Operação	37
Figura 8 - Estrutura do Rastreador do Ponto de Máxima Potência	37
Figura 9 - Representação de chaveando PWM.....	38
Figura 10 - Modulação PWM.....	39
Figura 11 - Formas de Onda referentes a modulação.....	40
Figura 12 - Circuito Conversor <i>BOOST</i>	41
Figura 13 - Forma de Onda Indutor	42
Figura 14 - Ganho com a variação da razão cíclica no conversor <i>BOOST</i>	42
Figura 15 - Curva da Carga.....	45
Figura 16 - Curva Característica de Operação do <i>BOOST</i>	46
Figura 17 - Algoritmo Perturba e Observa.....	49
Figura 18 - Regiões de derivada e suas correspondentes potências	50
Figura 19 - Algoritmo Condutância Incremental	52
Figura 20 - Grampeamento de Tensão, em diferentes níveis de irradiância, sob temperatura constante	53
Figura 21 - Gráfico de P X V com pontos MPPT e potência sob tensão constante, analisados sob irradiância constante	54
Figura 22 - Algoritmo Tensão Constante.....	55
Figura 23 - Modelagem Simplificada do Painel Fotovoltaico Estudado.....	56
Figura 24 - Resistência Emulada	58
Figura 25 - Estrutura MPPT no PSIM.....	59
Figura 26 - Representação de circuito no PSIM para execução do método de MPPT P&O.....	63
Figura 27 – Resposta do painel com método P&O	63

Figura 28 - Representação de circuito no PSIM para execução do método de MPPT Condutância Incremental	64
Figura 29 – Resposta do painel com método CondInc.....	65
Figura 30 - Representação de circuito no PSIM para execução do método de MPPT Tensão Constante	66
Figura 31 – Resposta do painel com método TenConst	66
Figura 32 - Circuito emulador de carga para rastreamento de máxima potência com dois painéis	68
Figura 33 - Ponto de Máxima potência em $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$ e $k_1=0,8$	69
Figura 34 - Circuito emulador de carga para rastreamento de máxima potência com três painéis	70
Figura 35 - Curva de potência no tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$, $k_1=0,6$ e $k_2=0,8$	70
Figura 36 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método P&O.....	71
Figura 37 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método CondInc.....	72
Figura 38 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método TenConst.....	72
Figura 39 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método P&O	73
Figura 40 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método CondInc.....	73
Figura 41 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500W/m^2$, $T_i=25^\circ C$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método TenConst.....	73
Figura 42 - Parcela do registro do banco de dados com as máximas do sistema com 1 painel.....	77
Figura 43 - Fluxograma do Método de Rastreio por Internet das Coisas	79
Figura 44 - Circuito de geração de energia fotovoltaico com rastreamento via IoT...	80
Figura 45 – Resposta do painel com método de banco de dados.....	81
Figura 46 - Modelo ESP32	87
Figura 47 - Circuitos e etapas de obtenção de MPP	89
Figura 48 – Circuito Série LDR e Resistor 10k Ω	91
Figura 49 - Circuito Série LDR e Resistor 10k Ω	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações técnicas do módulo ESP32.....	88
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: componentes do conversor <i>Boost</i> para sistema com 1 painel	61
Tabela 2: componentes do conversor <i>Boost</i> para sistema com 2 painéis.....	61
Tabela 3: componentes do conversor <i>Boost</i> para sistema com 3 painéis.....	62
Tabela 4 - Potência gerada em sombreamento parcial com dois painéis	82
Tabela 5 - Produtividade efetiva com 2 painéis	83
Tabela 6 - Potência gerada em sombreamento parcial com 3 painéis.....	84
Tabela 7 - Produtividade efetiva com 3 painéis.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

CdTe	Telureto de Cádmiio
AM	Massa de ar
c	Velocidade da luz no vácuo
D	Razão cíclica
Ddp	Diferença de potência
Dmáx	Razão cíclica máxima
Dmin	Razão cíclica mínima
D(n)	Razão cíclica da iteração atual
D(n-1)	Razão cíclica da iteração anterior
dP	Diferencial de potência
dV	Diferencial de tensão
E	Campo elétrico
f	Frequência
Gi	Ganho de corrente
Gv	Ganho de tensão
h	Constante de Planck
li	Corrente entrada do conversor
I(n)	Corrente lida na iteração atual
I(n-1)	Corrente lida na iteração anterior
I _p	Corrente do painel
I _{ref}	Corrente elétrica de referência
MWp	Mega Watts de Pico
P(n)	Potência obtida na iteração atual

$P(n-1)$	Potência obtida na iteração anterior
R	Carga
R_p	Carga vista pela saída do painel
R_o	Carga de Saída
R_{carga}	Impedância da Carga
S	Irradiância solar
T	Temperatura
T_{off}	Tempo de desligamento ou abertura
T_{on}	Tempo de fechamento
T_s	Tempo total de um ciclo
V_i	Tensão de entrada do conversor
$V(n)$	Tensão obtida na iteração atual
$V(n-1)$	Tensão obtida na iteração anterior
V_i	Tensão de entrada
V_o	Tensão de saída
V_{oc}	Tensão de circuito aberto
V_p	Tensão do painel
ΔD	Passo de incremento da razão cíclica
ΔP	Passo de Incremento de Potência
ΔV	Passo de Incremento de Tensão
η	Rendimento

LISTA DE SIGLAS

API	Interface de Programação de Aplicativos
a-Si	Liga de Silício Amorfo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CIS/CIGS	Disseleneto de Cobre/Cobre-Índio-Gálio-Selênio
CondInc	Condutância Incremental
CSS	Folha de Estilo em Cascatas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPIA	Associação das Indústrias Fotovoltaicas Europeias
GTZ	Agência Alemã de Cooperação Técnica
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto
IBM	International Business Machines
IEA	Administração de Informação da Energia
IOT	Internet of Things
I2C	Barramento de comunicação serial
Mac	Media Access Control
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Máxima Potência
MPP	Ponto de Máxima Potência
MPPT	Rastreador do Ponto de Máxima potência
M2M	Machine-to-Machine

NREL/DOE	National Renewable Energy Laboratory/Dos Estados Unidos
P&O	Perturba e Observa
PDEE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PWM	Modulação de Largura de Pulso
RFID	Identificação por Radiofrequência
SDIO	Secure Digital Input Output
SPI	Serial Peripheral Interface
TenConst	Tensão Constante
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 TEMA	16
1.1.1 Delimitação do Tema	18
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 JUSTIFICATIVA	20
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	21
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 INTRODUÇÃO	23
2.2 REVISÃO HISTÓRICA	23
2.3 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO	26
2.4 VARIÁVEIS DO MEIO	27
2.4.1 Radiação Solar	28
2.4.2 Temperatura	28
2.4.3 Massas de Ar	28
2.4.4 Sombreamento Parcial	29
2.5 CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA	29
2.6 INTRODUÇÃO ao MPPT	31
2.6.1 Métodos de MPPT Estudados	32
2.7 INTERNET DAS COISAS (IOT)	33
3 MPPT - MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA	36
3.1 INTRODUÇÃO	36

3.2 MODULAÇÃO PWM e Razão Cíclica	38
3.3 CONVERSORES CC-CC	40
3.4 CIRCUITO RASTREADOR DE MÁXIMA POTÊNCIA COM CONVERSOR BOOST	43
3.5 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE MPPT	46
3.5.1 Perturba e Observa - P&O	47
3.5.2 Condutância Incremental - CondInc	49
3.5.3 Tensão Constante - TenConst	53
3.6 MODELAGEM COMPUTACIONAL	55
3.6.1 Painel Fotovoltaico	56
3.6.2 Painel Fotovoltaico com o Uso de Conversor <i>Boost</i>	58
3.7 SIMULAÇÕES	62
3.7.1 P&O	62
3.7.2 Condutância Incremental	64
3.7.3 Tensão Constante	65
3.8 SIMULAÇÕES COM SOMBREAMENTO PARCIAL	67
3.9 CONCLUSÕES	74
4 MPPT COM BANCO DE DADOS	75
4.1 INTRODUÇÃO	75
4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MÉTODO MPPT COM BANCO DE DADOS	76
4.2.1 Software MATLAB	76
4.2.2 Banco de Dados	76
4.2.3 Simulação	80
4.2.4 Simulações do Sistema em Condições de Sombreamento Parcial	81
4.2.4.1 Sombreamento parcial utilizando dois painéis	81
4.2.4.2 Sombreamento parcial utilizando três painéis	83
4.3 CONCLUSÕES	85

5 MODELO DO MÉTODO DE MPPT COM BANCO DE DADOS PROVENIENTES DA INTERNET DAS COISAS	86
5.1 INTRODUÇÃO	86
5.2 COMPENENTES ELETRÔNICOS	86
5.2.1 Microcontroladores	86
5.2.2 Sensores	88
5.2.2.1 Sensor de corrente	89
5.2.2.2 Sensor de tensão	90
5.2.2.3 Sensor de irradiância (LDR)	90
5.3 SOFTWARES	92
5.3.1 PlatformIO	92
5.3.2 Node-Red	92
5.3.3 Protocolo MQTT	93
5.3.4 Visual Studio Code	94
5.4 CONCLUSÕES	94
6 CONCLUSÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A – Código DLL do P&O	102
APÊNDICE B - Código DLL do Condutância Incremental	104
APÊNDICE C - Criação DLL do Tensão Constante	106
APÊNDICE D – Criação do DLL para banco de dados	108

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Há várias formas de se produzir energia atualmente. Entre as fontes de energia mais populares estão: as fósseis (petróleo, carvão e gás natural), nucleares, solares, eólicas, das marés, hidráulicas, biomassa. Algumas dessas fontes para geração de energia são reconhecidamente danosas ao meio ambiente, provocando elevadas emissões de gases nocivos à atmosfera. Com isso, cada vez mais se tem falado e estudado métodos de se produzir energia de fontes limpas e renováveis, a fim de se garantir um melhor desenvolvimento sustentável e uma consequente diminuição da atual degradação ambiental.

Nesse contexto, a energia solar fotovoltaica vem tendo cada vez mais destaque. A implementação da tecnologia fotovoltaica como uma fonte de geração de energia elétrica vem ocorrendo nos últimos dois séculos, sendo considerada viável pelo surgimento e aprimoramento de materiais mais eficientes que estipularam a queda dos custos e maior eficiência na produção desta (COELHO, 2008). Além de que não necessita ser extraída, refinada e nem transportada para o local da geração, o qual é próximo à carga.

Esta fonte de energia utiliza células fotovoltaicas que consistem em um material semicondutor disposto em duas camadas carregadas positivamente e negativamente. Devido aos seus aspectos construtivos, ao receber radiação solar, os elétrons se movimentam na presença de uma diferença de potencial nas células, criando assim uma corrente elétrica que alimentará uma carga (ZAGO, 2018). Essa tecnologia consiste também de outros componentes, como o inversor, necessário para transformar a tensão elétrica e frequência para os valores nominais dos aparelhos a serem alimentados pela energia gerada. A geração de energia proveniente da radiação solar é dependente de fatores como intensidade de radiação solar e temperatura, sendo estes limitantes no processo de geração. Este processo é mais simples, sem emissão de gases poluentes ou ruídos e com necessidade mínima de manutenção (SHAYANI, 2006).

Na busca por eficiência energética, para a geração fotovoltaica, constata-se que os painéis fotovoltaicos, por si só, apresentam uma eficiência de conversão de energia muito baixa. Os painéis apresentam uma curva característica de corrente por tensão elétrica, a qual apresenta aspectos fundamentais dos módulos solares. Além disso, também possibilita levantar uma curva de potência elétrica, onde se observa o ponto ótimo de funcionamento do módulo, no qual será maximizada a potência e a geração de energia.

Em virtude de o ponto de operação de um módulo fotovoltaico ser atrelado às condições climáticas e à carga em que está conectado, é necessário empregar circuitos capazes de maximizar a potência gerada, os chamados Rastreadores de Máxima Potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracker*), de modo que o rendimento de conversão não seja ainda mais reduzido. (COELHO, 2008, p. 51).

Baseando-se em métodos realmente eficazes de rastreamento do ponto máximo de geração de energia mediante uso de painéis fotovoltaicos, destacam-se alguns dentre os mais utilizados na literatura (COELHO, 2008):

Baseados na Lógica Fuzzy;

Baseados em Redes Neurais;

Baseados em Frações da Tensão de Circuito Aberto;

Tensão Constante;

Perturba e Observa;

Condutância Incremental.

Estes métodos são necessários, uma vez que possibilitam potencializar a geração de energia, independentemente dos fatores externos e temporais, devido às características climáticas do ambiente. Tais métodos como o de Tensão Constante, Perturba e Observa e Condutância Incremental são mais utilizados e de fácil implementação (COELHO, 2008). Todos estes métodos podem ser implementados pelo uso de microcontroladores e algoritmos que analisam a saída do sistema. A função de cada um refere-se à obtenção das medidas de tensão e corrente na saída do painel, com as quais o controlador é capaz de alterar fatores nos circuitos

eletrônicos (conversores CC-CC), permitindo o ajuste do conjunto a fim de se gerar a máxima potência.

1.1.1 Delimitação do Tema

Os métodos utilizados atualmente são eficientes, no entanto, alguns causam certas perturbações ao sistema. Por isso, declara-se:

Percebe-se que, mediante as perturbações impostas pela natureza, o sistema de controle deve responder rapidamente a estas intempéries. No entanto, dependendo do algoritmo utilizado, a perturbação do sistema acaba sendo ampliada. A eficiência no rastreamento está relacionada com a potência de saída (entregue à carga) com a potência máxima (corrente e tensão na máxima potência) do painel fotovoltaico especificado pelo fabricante. Quanto menores as perdas de energia observadas, melhor a eficiência do sistema. Alguns algoritmos de MPPT têm melhores respostas do que outros sob as mesmas condições de funcionamento, por isso faz-se necessário estudar alguns métodos. (JÚNIOR, 2013, p. 26).

Fica evidente que alguns dos métodos de MPPT são geradores de distúrbios, sendo que tais perturbações podem gerar instabilidade ao sistema. Portanto, necessitando-se de maior confiabilidade e eficiência, e buscando por sistemas com menos perturbações, considera-se o uso de outros métodos de rastreamento de máxima potência. Em vista disso, optou-se pelo uso de um sistema que busca em um banco de dados o ponto de operação, que leva à tensão de máxima potência, podendo esse método ser implementado via Internet das Coisas, buscando o controle sem gerar grandes distúrbios ao sistema.

Adicionado a isso, os métodos mais comumente utilizados também possuem limitação. Um exemplo disso são situações de sombreamento, quando parte do painel ou alguns painéis dentro de um conjunto são cobertos com sombras. Esse cenário coloca o funcionamento do painel em um patamar totalmente diferente, fazendo com que os métodos de MPPT tradicionais não consigam rastrear a máxima potência do funcionamento do circuito (OLIVEIRA, 2015) e o sistema fotovoltaico não forneça o total de energia esperado (LOPES, 2013).

O conceito de Internet das Coisas foi desenvolvido com a finalidade de interligar dispositivos através de redes, permitindo a automatização de processos. A IoT possui funções de reconhecimento inteligente, localização, rastreamento e gerenciamento dos diversos dispositivos trocando informações a todo momento (LIMA, 2017). Por sua facilidade e eficiência, as inovações tecnológicas em geração de energia têm sido acompanhadas da implementação de Internet das Coisas, permitindo uma maior interação usuário/máquina e eficiência na gestão de informações.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Analisando o cenário tecnológico atual, percebe-se a necessidade e oportunidade de encontrar novas alternativas para os métodos de rastreamento de ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos, tendo em vista a tendência da automatização de processos através do um conceito de integração de dispositivos e tecnologias via internet. Busca-se, portanto, a implementação de sistemas de geração de energia solar em painéis fotovoltaicos com alto rendimento, de maneira prática e com um baixo custo.

Constata-se que, com o rápido desenvolvimento de tecnologias embasadas no conceito da internet das coisas, o uso de sistemas integrados na nuvem se tornará cada vez mais comum, implicando no barateamento dos custos de implementação e manutenção.

Portanto, para que novas alternativas sejam desenvolvidas, seguindo a tendência atual, é necessário o estudo e análise da eficiência dos métodos atuais, bem como da possível integração e aperfeiçoamento com as inovações tecnológicas que vem tomando espaço significativo na área em questão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo o aperfeiçoamento de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis solares, principalmente em condições de sombreamento parcial do sistema fotovoltaico, integrando o uso de conversores CC-CC com dados provenientes de dispositivos conectados pela internet, utilizando, dessa forma, o conceito de IoT.

1.3.2 Objetivos Específicos

Identificar os principais problemas da utilização dos métodos de MPPT convencionais;

Simular os principais métodos de MPPT no PSIM;

Estudar os conceitos e a comunicação de dispositivos eletrônicos via IoT e como podem ser aplicados nos métodos de MPPT;

Simular um novo método de MPPT no PSIM, conectando-o com banco de dados MySQL, incrementados pelo MATLAB;

Comparar os resultados e analisar a viabilidade de implementação do método desenvolvido;

Investigar e estudar o método proposto.

1.4 JUSTIFICATIVA

Intensificar e aprimorar métodos já existentes que potencializam a geração de energia solar fotovoltaica, além de investigar soluções para a tecnologia fotovoltaica com a forma de armazenar e coletar dados via Internet das Coisas, uma vez que o termo se tornou tendência no meio científico e tecnológico. Buscar maior eficiência e acessibilidade à exploração de energias renováveis e identificar estratégias de rastrear e controlar equipamentos que promovem a identificação dos pontos de máxima potência gerada em sistemas de energia solar. Implementar conceitos

científicos na realização das ações e empregar o papel do Engenheiro na aplicação da ciência.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, seguiu-se a contextualização teórica e literária de pesquisadores e especialistas, da qual, deve-se relevar métodos, conceitos e propostas científicas em geração de energia fotovoltaica, sua maior potencialização e a integração de tecnologia em rede de Internet das Coisas.

Posteriormente, foi necessário realizar a simulação de cada um dos métodos de MPPT e identificar qual possui maior viabilidade na comunicação com banco de dados, podendo ser implementado com a IoT.

Além disso, foi desenvolvido um método de busca do ponto de máxima potência por meio da tensão que garanta essa condição, a fim de gerenciar um conversor. Todo o sistema de rastreamento foi controlado por meio da leitura de um banco de dados que permitirá a interconexão do sistema com IoT.

Finalmente, simulou-se o sistema completo para se analisar os dados e o devido funcionamento do método proposto. Além disso, analisou-se a eficiência do projeto proposto em relação aos projetos já existentes de MPPT.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 Introdução. Abordagem inicial do assunto, contendo a delimitação do tema, problemas e premissas, objetivos (geral e específico), justificativa e os procedimentos a serem adotados como pesquisa.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica. Geração de energia elétrica relacionada a fontes alternativas e sustentáveis. Quadro nacional e internacional de geração de energia solar fotovoltaica. Desafios de implementação de painéis fotovoltaicos e seu dimensionamento tecnológico.

Capítulo 3: Abordagem dos conceitos de pesquisas de métodos já testados e implementados por outros. Explicação do funcionamento dos métodos mais utilizados na literatura de rastreamento de MPPT utilizando-se conversores CC-CC. Apresentação de simulações e análises de funcionamento de cada um dos métodos a serem abordados.

Capítulo 4: Desenvolvimento sobre a tecnologia proposta de rastreamento de MPPT via banco de dados e IoT na geração de energia fotovoltaica, mostrando seu funcionamento. Resultados obtidos com o projeto em comparação com métodos convencionais.

Capítulo 5: Sugestões para os passos seguintes, com o objetivo de implementação do método na prática.

Capítulo 6: Conclusão. Argumentações e considerações finais. Idealização do contexto estudado e base de suporte para eventuais estudos e aprimoramento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

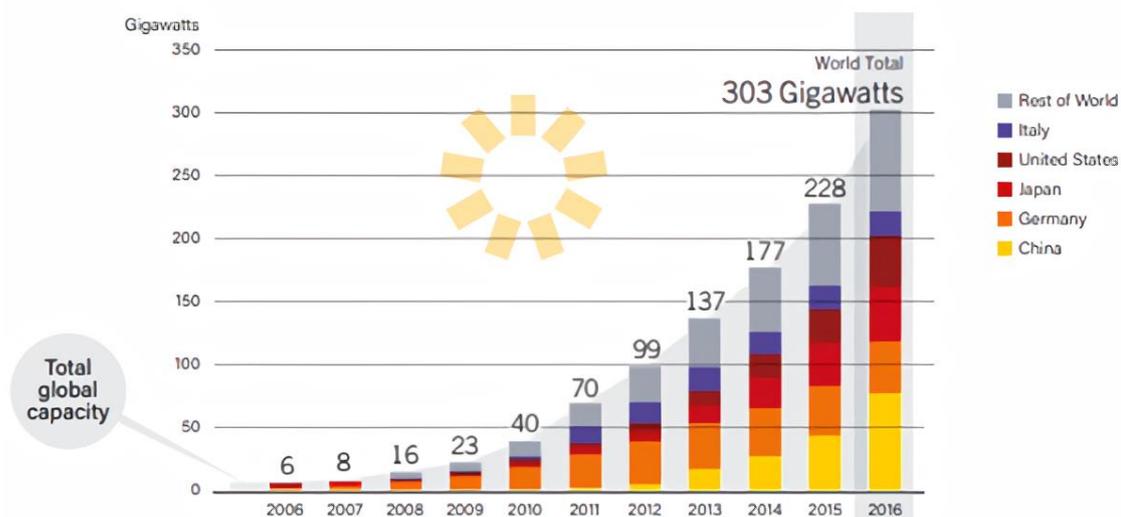
As tecnologias referentes à geração de energia fotovoltaica já vêm sendo desenvolvidas há mais de dois séculos. Porém, apesar dos avanços conquistados nesse período, somente foi-se possível alcançar resultados satisfatórios de eficiência de conversão de energia com o desenvolvimento da eletrônica de potência. Na maior parte das aplicações, a eletrônica de potência é utilizada com o objetivo de processar os níveis de tensão e corrente de entrada no painel fotovoltaico, tornando-os adequados para alimentar uma carga específica (COELHO, 2008). Conversores e microcontroladores são utilizados entre o painel e a carga a ser alimentada, não só para manter a carga adequadamente alimentada, mas também para que o módulo opere em seu ponto de máxima transferência de potência. Tais arranjos são chamados de rastreadores de ponto de máxima potência (MPPT), os quais receberão um foco mais aprofundado ao longo deste trabalho.

2.2 REVISÃO HISTÓRICA

Na década de 1970 e meados de 1980, as aplicações tradicionais da energia proveniente das células fotovoltaicas eram para locais remotos onde a energia elétrica não era disponibilizada, para emergências em desastres e repetidores de estações de comunicação remota. Seguindo para as últimas décadas do século XX, as células solares passaram a ser usadas no ambiente urbano e rural, em casas, edifícios, hospitais, plantações e outras aplicações conectadas à rede elétrica (COELHO, 2008).

Em termos estatísticos, alguns resultados, quando trazidos sob a forma gráfica, evidenciam o crescimento acentuado da produção mundial de energia fotovoltaica nos últimos anos, tal como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Crescimento na produção de energia fotovoltaica no mundo, entre os anos 2006 e 2016



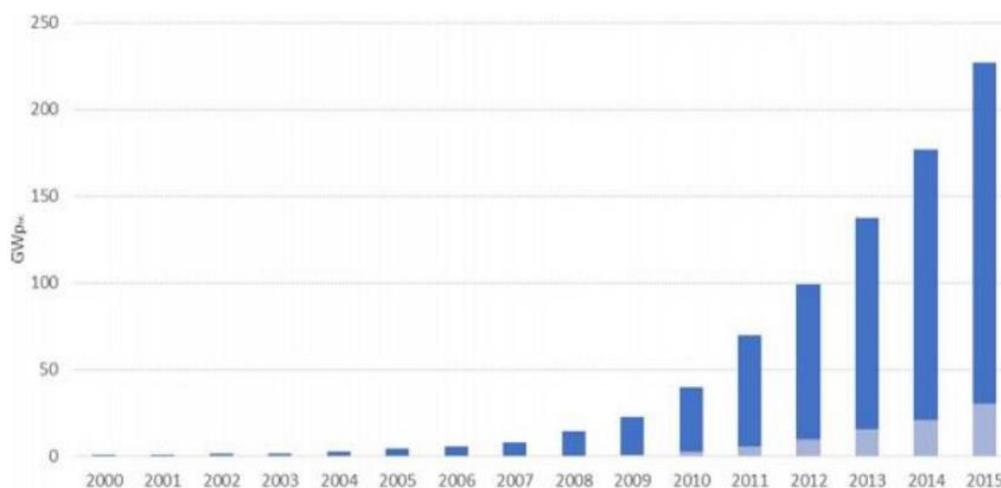
Fonte: MAIA (2018, pg. 3).

O gráfico da Figura 1 mostra o rápido crescimento da produção de energia elétrica por fontes fotovoltaicas. Destaca-se a liderança da China, seguido pelo Japão, em terceiro lugar os Estados Unidos, e posteriormente a Europa, com a Alemanha se apresentando como líder em geração de energia fotovoltaica no continente. Em termos de potência instalada, as informações apontam para um total de cerca de 330 GWp, no ano de 2016.

Na Figura 2, com informações da International Energy Agency (IEA), confirma-se o grande aumento no consumo de energia elétrica de fonte fotovoltaica em anos mais recentes.

Observa-se que, apenas em 2015, foram implementados no mundo cerca de 50 GW de capacidade instalada de geração, um aumento de 25% em relação a 2014. A taxa de crescimento anual composta da capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica entre 2000 e 2015 foi de aproximadamente 41% (NASCIMENTO, 2017).

Figura 2 - Evolução da Capacidade Instalada de Energia Solar Fotovoltaica



Fonte: NASCIMENTO (2017, p.7).

Como resultado do desenvolvimento tecnológico e de incentivos governamentais, a produção primária de energia solar por painéis fotovoltaicos aumentou 395% entre 2003 e 2013, segundo IEA - Administração de Informação da Energia dos Estado Unidos (2014). Citando EPIA - Associação das Indústrias Fotovoltaicas Europeias (2014), EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2014) menciona que a capacidade mundial instalada atingiu 139 GWp. A título de ilustração, a produção primária total de energia cresceu 17% no mesmo período, frente a 56% das fontes renováveis. Somente o crescimento da geração de energia eólica superou a energia solar (NASCIMENTO, 2017; SILVA, 2015).

No Brasil, em particular, iniciaram-se vários projetos para o aproveitamento da energia solar por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional. Além do apoio técnico, científico e financeiro recebido de diversos órgãos e instituições brasileiras (MME, Eletrobrás/CEPEL e universidades, entre outros), esses projetos têm tido o suporte de organismos internacionais, particularmente da Agência Alemã de Cooperação Técnica – GTZ e do Laboratório de Energia Renovável dos Estados Unidos (National Renewable Energy Laboratory) – NREL/DOE (ANEEL, 2018). Segundo EPE (2014), em 2023, 140 mil consumidores residenciais e 21 mil consumidores comerciais utilizarão a geração fotovoltaica. Isso fará com que 0,33% do consumo residencial e 0,33% do consumo comercial sejam atendidos por tal fonte.

A mudança na matriz energética brasileira nos próximos anos também pode impulsionar a energia solar. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE) 2023 prevê a queda, em termos proporcionais, da geração de fonte hidráulica, e um aumento correspondente na participação de outras fontes renováveis, em especial, a eólica. Antecipa-se um leve crescimento na participação das fontes renováveis na matriz elétrica: de 82,9%, em 2013, para 83,8%, em 2023. Para a energia solar, o PDEE 2023 estima que a capacidade instalada dessa fonte atingirá 3.500 MWp (548 MW médios) em 2023, frente aos 19 MWp outorgados atualmente. A perspectiva de expansão da energia eólica é, também, oportunidade para crescimento da energia solar. Por exemplo, em complexos híbridos de energia eólica e solar, como é o caso do projeto da Renova Energia, uma das líderes em energia eólica no país (NASCIMENTO, 2015).

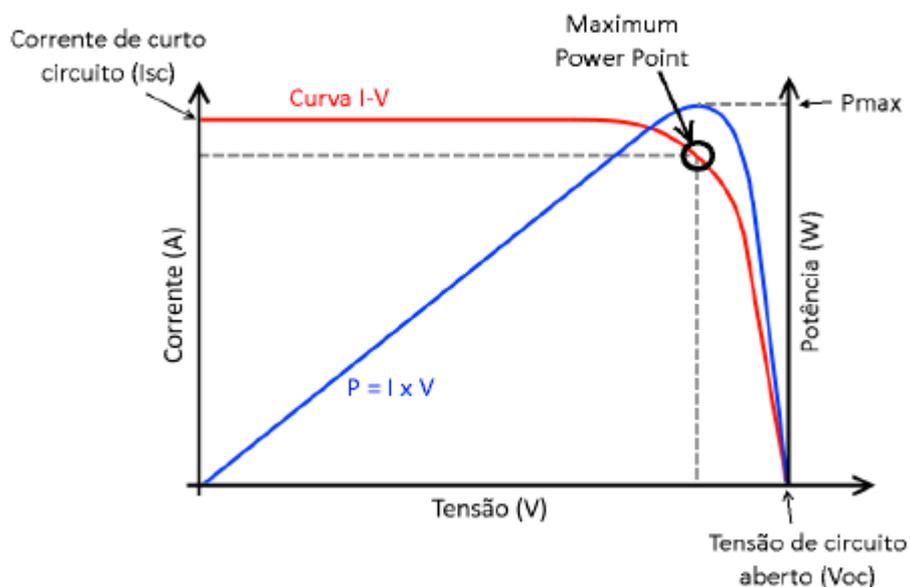
Embora existam os obstáculos na área das políticas públicas, os custos de equipamentos e instalações em função da previsão do tempo de retorno de investimento se mostra como uma das principais barreiras à implementação dos painéis fotovoltaicos para geração de energia. Dessa forma, a área de pesquisa e desenvolvimento se mostra vital, buscando maior eficiência e viabilidade, novas tecnologias que mostrem a vantagem da energia fotovoltaica e tornem os investimentos mais claros.

2.3 PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO

Módulos fotovoltaicos podem ser compreendidos como dispositivos semicondutores, ou seja, materiais com características de condutor e de isolante, que conseguem converter energia solar em fotovoltaica (COELHO, 2008).

Para se entender o funcionamento de um painel fotovoltaico, basta compreender a curva de corrente e tensão deste. A curva referida é conhecida como a característica I-V e apresenta a forma geral para qualquer painel fotovoltaico, geralmente encontradas nos catálogos dos fabricantes. A Figura 3 ilustra uma curva I-V de um painel fotovoltaico.

Figura 3 - Curva característica de um painel fotovoltaico



Fonte: ZAGO (2018, p.31).

A interpretação da curva traz as características de funcionalidade do painel fotovoltaico, podendo mostrar informações importantes como corrente de curto-circuito (I_{sc}), onde os terminais de saída do painel são ligados em curto-circuito e, conseqüentemente, a tensão nesse ponto é zero. Outro ponto relevante é a tensão de circuito aberto (V_{oc}), onde os terminais são deixados em aberto, não existindo corrente. Entre estes dois pontos, o produto de tensão pela corrente fornece a curva característica de potência do painel, na qual, claramente, observa-se o ponto máximo de potência de saída (ZAGO, 2018).

2.4 VARIÁVEIS DO MEIO

Para todo tipo de geração de energia elétrica proveniente de meios naturais, existem as variáveis referentes ao meio ambiente. A eficiência de geração de energia fotovoltaica depende necessariamente de três fatores naturais que serão discutidos a seguir.

2.4.1 Radiação, Irradiação e Irradiância Solar

Segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (PLANAFATTORI; CEBALLOS, 2009), seguem as definições dos termos, importante para a compreensão deste trabalho.

Radiação é a forma de transferência de energia através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons.

Irradiação é a quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta.

Irradiância é o fluxo que atravessa uma superfície, por unidade de área desta, com unidade, no SI: W/m^2 .

Devido aos fenômenos de reflexão e absorção da atmosfera, nem toda a radiação solar à qual a Terra está exposta chega diretamente à superfície. A radiação solar não é constante em todos os lugares, variando com a latitude, nebulosidade e outros fenômenos meteorológicos (COELHO, 2008).

2.4.2 Temperatura

A temperatura é uma medida do grau de agitação das moléculas e é uma variável importante para o funcionamento das células fotovoltaicas (COELHO, 2008).

2.4.3 Massas de Ar

Massas de ar são porções volumosas de ar com características homogêneas de temperatura e vapor de água. O índice AM (Air Mass) corresponde a componente normalizada, em relação ao menor caminho possível percorrido pela radiação eletromagnética solar, da espessura da camada de ar no caminho da radiação. Quanto maior o ângulo entre a radiação e a camada de ar, menor será a parcela direta

de radiação solar que incidirá sobre a superfície terrestre. Percebe-se, assim, a relevância desse fator para a geração de energia fotovoltaica (COELHO, 2008).

2.4.4 Sombreamento Parcial

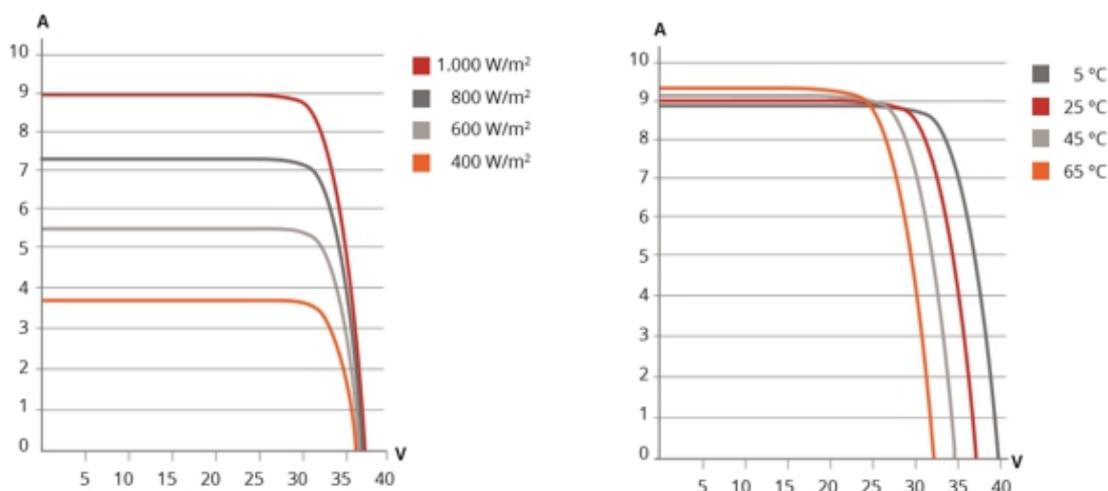
Como visto anteriormente, variações ambientais de temperatura e radiação fazem com que um painel fotovoltaico apresente diferentes curvas de corrente-tensão (COELHO, 2008). Como esta curva possui um comportamento não-linear, se houver um sombreamento parcial incidindo sobre um arranjo fotovoltaico, ou seja, se parte deste apresentar diferentes níveis de irradiância, a sua curva característica apresentará pontos de máximos locais e um máximo global. Geralmente este fenômeno ocorre em locais urbanos, devido a sombras de prédios, torres, estruturas que impeçam a incidência direta de sol no sistema gerador de energia (OLIVEIRA, 2015).

Em certos casos, em que há a ocorrência deste evento de sombreamento parcial, as técnicas tradicionais de MPPT (P&O, Tensão Constante, Condutância incremental) não são capazes de rastrear o ponto de máximo global, fazendo com que seja entregue uma menor potência na saída do sistema (OLIVEIRA, 2015). Este fenômeno será abordado com mais atenção ao longo deste trabalho.

2.5 CARACTERÍSTICAS DE SAÍDA

Mudanças nos níveis de irradiância solar ou nos valores de temperatura, como visto na Figura 4, auxiliam na obtenção de diferentes tipos de curvas características de $I \times V$. Para demonstrar as curvas, coletou-se as informações de catálogo do Painel Energia Solar Fotovoltaica 320W, da empresa Globo Brasil.

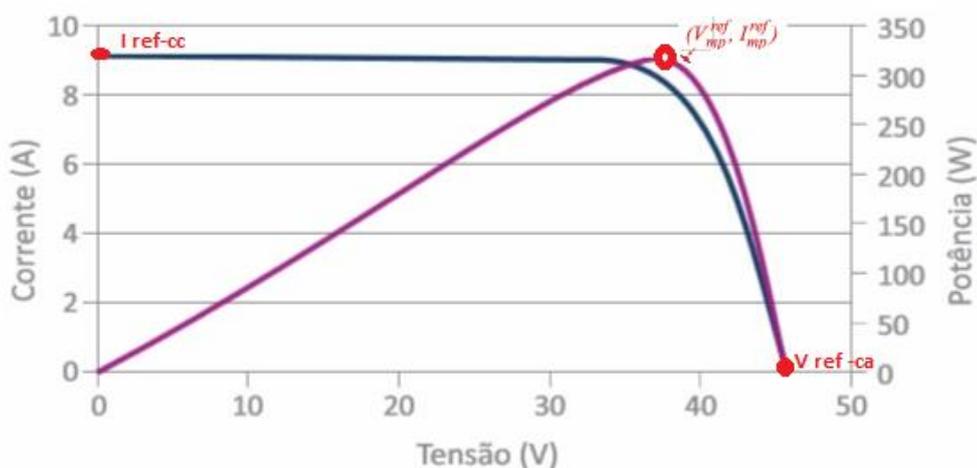
Figura 4 - Curvas de Desempenho do Painel



Fonte: Painéis Globo Brasil¹.

Existem alguns pontos específicos nas curvas apresentadas que devem ser analisados cuidadosamente, levando-se em conta a energia gerada. A Figura 5 apresenta a curva característica de saída de um módulo fotovoltaico nas condições padrão de teste, ou seja, irradiância solar $S = 1000 \text{ W/m}^2$ e temperatura sobre o painel $T = 25^\circ\text{C}$.

Figura 5 - Curvas Corrente x Tensão e Potência x Tensão GBR 320p



Fonte: Painéis Globo Brasil¹.

Na Figura 5, o termo representado por ($I_{\text{ref-cc}}$) representa a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico. O índice ($V_{\text{ref-ca}}$) indica a tensão de circuito aberto. Por fim, o par ordenado ($V_{\text{ref-mp}}$, $I_{\text{ref-mp}}$) indica, respectivamente, a tensão e a

¹ Disponível em: < <https://www.paineisglobo brasil.com.br/produtos/paineis-solares/>>. Acessado em 14 nov. 2018.

corrente de máxima potência, isto é, o ponto onde o produto dos valores de tensão e corrente maximiza a potência de saída do painel fotovoltaico, denominado por P_{max} (COELHO, 2008).

Analisando o gráfico de potência com relação a temperatura, observa-se que nos momentos do dia em que a temperatura do painel se eleva, ocorrem dois processos que afetam seu desempenho. O primeiro seria devido ao fato de que quando uma célula fotovoltaica é aquecida, os átomos de seu cristal de silício aumentam suas vibrações. E, por conta disso, os choques com os fótons produzem um valor maior de corrente, numa dada radiação. Além disso, o aumento de temperatura também gera excesso de energia térmica nos elétrons livres e lacunas, tornando assim mais fácil para que estes se movimentem no sentido contrário ao imposto pelo campo elétrico, diminuindo o valor da tensão encontrada na saída da célula (COELHO, 2008).

O segundo efeito decai à radiação solar, que quando diminui faz com que a quantidade de fótons por segundo penetrando na célula também baixe, afetando a movimentação dos elétrons livres. Esse fator impacta diretamente no valor de corrente do módulo (COELHO, 2008). Em contrapartida, a tensão de saída pouco se altera. Esse efeito pode ser observado a esquerda da Figura 4.

Outro efeito importante, que merece destaque na geração, é a ocorrência de sombreamentos, que podem ser suaves ou abruptos. Os sombreamentos suaves são causados por ventos ou nuvens pouco densas que bloqueiam ou distorcem os raios solares tornando-os difusos, implicando numa redução, proporcional à área sombreada, da potência de saída. Já o sombreamento abrupto ocorre quando os raios solares são totalmente interrompidos, não alcançando a superfície da célula. Neste caso, existe a possibilidade de sombreamento parcial ou total, impactando, no segundo caso, na geração nula de potência (COELHO, 2008).

2.6 INTRODUÇÃO AO MPPT

Os painéis solares, conforme já mencionado, possuem apenas um ponto único de operação para a máxima geração de potência, que varia de acordo com a

radiação solar, temperatura, sombreamento, envelhecimento do painel, entre outros fatores. De acordo com a teoria de circuitos elétricos, a resistência de fonte e carga devem ser iguais para maximizar a transferência de potência (ZAGO, 2018). Além disso, o rendimento dos módulos fotovoltaicos é baixo, na ordem de 15%. Por esse motivo, é essencial que se obtenha o ponto máximo de transferência de potência proveniente dos painéis.

Como a energia gerada varia durante o dia, visto que depende das condições climáticas e da carga conectada ao sistema, é necessário empregar circuitos capazes de maximizar a potência fornecida pelos painéis, realizando o Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, ou MPPT (do inglês *Maximum Power Point Tracking*). Métodos de MPPT garantem que o rendimento e a transferência de energia sejam máximos, independente das variáveis climáticas ou das limitações construtivas do painel (COELHO, 2008).

Para se implementar um MPPT, necessita-se de algoritmos que frequentemente utilizam dados amostrais de tensões e correntes provindas do painel. Com esses dados, um dispositivo controlador ajustará a razão cíclica do conversor do painel, conforme necessário, para se obter a máxima potência. Os microcontroladores são empregados para implementar esses algoritmos, os quais são responsáveis por alterar o ponto de operação dos conversores, que podem ser do tipo *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost* (ZAIONS, 2017).

2.6.1 Métodos de MPPT Estudados

Existem diversos métodos de rastreamento presentes em várias literaturas e estudos. No entanto, serão aqui estudados apenas três desses métodos como base de conhecimento e comparação para um método alternativo de rastreamento utilizando-se Internet das Coisas.

Um dos métodos de MPPT mais utilizado, é o Perturba e Observa (P&O), no qual razão cíclica do conversor tem uma pequena variação, aumentando ou diminuindo a tensão de operação do sistema. Após a alteração, a potência é novamente calculada. Se a potência aumentou, então o método continua realizando

a mesma operação (incremento ou decremento) sobre a razão cíclica e segue o caminho correto para máxima potência transferida. Caso contrário, a operação sobre a razão cíclica é alterada (ZAGO, 2018).

Um segundo método, conhecido como Condutância Incremental (CondInc), exige um grande esforço computacional do controlador, devido a presença de operações matemáticas mais complexas. Em contrapartida, é o que apresenta melhor resposta, velocidade e baixas perturbações do sistema. Este método consiste também em analisar as variações do sistema não mais sobre a potência, mas sim sobre a razão entre potência e tensão, que representa a derivada de potência sobre tensão (COELHO, 2008).

Por fim, o último método de MPPT a ser estudado é o de Tensão Constante (Tconst), cuja técnica consiste em se fixar uma tensão de saída do painel buscando se assegurar a máxima potência gerada. No entanto esse “grampeamento” de tensão faz com que o método seja muito impreciso e qualquer variação climática fará com que o sistema opere fora da máxima potência (COELHO, 2008).

Todos os métodos citados serão descritos cuidadosamente no decorrer deste trabalho e apresentadas as lógicas de implementação de cada um.

2.7 INTERNET DAS COISAS (IOT)

Kevin Ashton, em 1999, utilizou pela primeira vez o conceito de Internet das Coisas para descrever um sistema em que a Internet estaria conectada ao mundo físico através de sensores onipresentes (PINTO, 2014). Ele afirmou sobre isso enquanto falava sobre as potencialidades da identificação por radiofrequência, ou RFID (do inglês *Radio-Frequency Identification*), na cadeia de abastecimento da multinacional Procter & Gamble (ASHTON, 2009). Esta visão, dez anos depois, fez com que este termo se tornasse um título amplamente utilizado.

Hoje, com o avanço da tecnologia e com o baixo custo de produção de componentes eletrônicos, tem sido possível implementar dispositivos, como microprocessadores, em diversos lugares antes dificilmente considerados, como eletrodomésticos, vestimentas e automóveis. Assim, criam-se objetos e sistemas

inteligentes, capazes de captar as informações do ambiente onde estão inseridos e tomar decisões automaticamente a partir destas informações (Informação verbal)¹.

Dessa forma, surge então o conceito de Internet das Coisas, ou IoT (do inglês *Internet of Things*). Bartleson (2014) afirma que a Internet das Coisas promete ser uma das maiores revoluções tecnológicas que a humanidade já viu. Esta tecnologia está em constante evolução e se encontra cada vez mais presente na vida das pessoas (PINTO, 2014).

A Internet das Coisas já está inserida em diversas áreas da economia. Na agropecuária, por exemplo, utiliza-se a previsão do tempo obtida pela internet juntamente com dados de temperatura local, umidade do solo, velocidade do vento etc. para controle de irrigação e melhorias no rendimento do plantio. Além disso, sensores podem também ser acoplados a animais para ajudar no controle de vacinas, rastreamento e muitas outras funcionalidades (ALIGER, 2019).

No setor automotivo há também vários avanços na área. Em 2016, a Ford lançou um veículo (Ford Edge) com 21 computadores espalhados interiormente que monitoram o estado do carro, avisando o proprietário via celular (app ou email), a fim de aumentar a segurança e eficiência do uso e para prevenir reparos. A empresa Continental também lançou um pneu com sistema de rastreamento de desgaste e de níveis de calibragem, os quais são enviados em tempo real ao proprietário. Juntamente com isso, a empresa Google desenvolveu um veículo auto conduzido, que apesar de ainda estar em fase de testes, já consegue identificar pedestres, sinais e ciclistas (Informação verbal)¹.

No Brasil, as empresas Weg e IBM estão se unindo com o objetivo de associar a Internet das Coisas à produção de energia solar. O dispositivo utiliza a IoT para fazer o controle de consumo, temperatura e produção de energia do painel, enviando estes dados para um computador ou dispositivo móvel (IPESI, 2018).

Em geral, para geração de energia fotovoltaica, a utilização de IoT se restringe ao monitoramento de dados da produção. Há também alguns estudos voltados ao controle da posição dos painéis através de microcontroladores, direcionando a placa fotovoltaica para o foco de maior incidência de radiação solar. Entretanto, não existem

¹ Informação fornecida no curso online “Introdução a Internet das Coisas” do Code IoT em 2016.

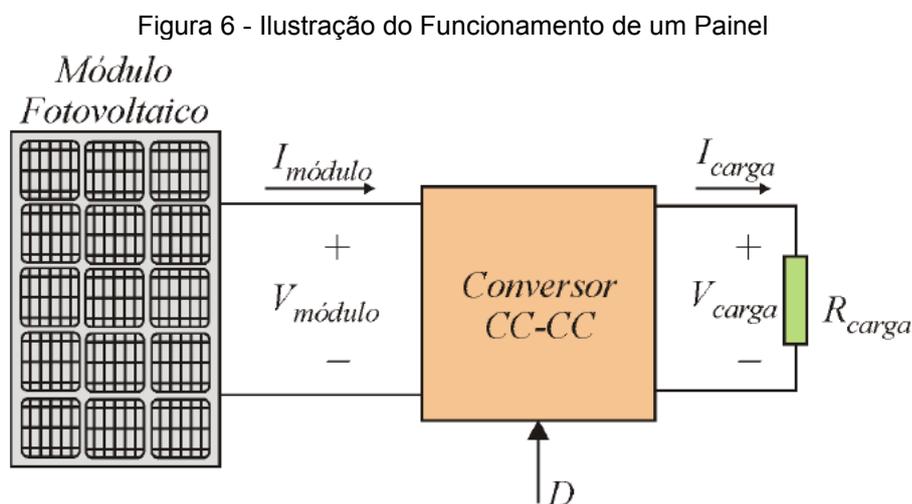
muitas tecnologias desenvolvidas com Internet das Coisas para controle de máxima potência de energia.

3 MPPT - MÉTODOS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

3.1 INTRODUÇÃO

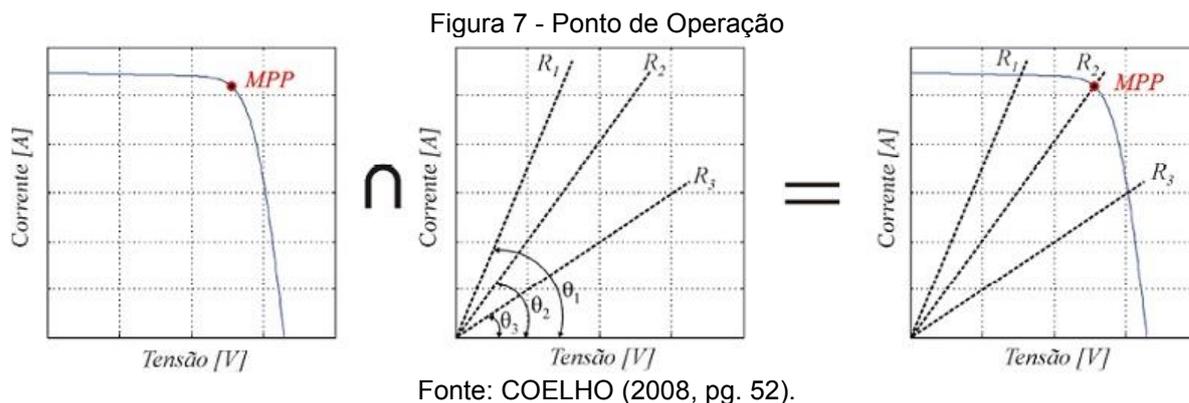
Na maioria das aplicações, os painéis fotovoltaicos apresentam baixa eficiência energética, devido às características materiais das células e pelas razões climáticas, como já anteriormente apresentadas. Por esses motivos, vê-se necessário o uso de controladores que se utilizam de algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência gerada pelo sistema, já mencionados neste trabalho. Outro fator impactante que altera consideravelmente o MPP é a carga inserida ao conjunto, na utilização dessa energia (JÚNIOR, 2013).

Os controladores, ou os chamados rastreadores, começaram a ser utilizados por volta de 1970, quando se viu necessário a eficiência de sistemas que possuem uma fonte não linear e variável, como um painel fotovoltaico (CARVALHO, 2012). Para melhor entendimento do funcionamento do painel fotovoltaico e do ponto de operação, a Figura 6 é apresentada abaixo.



Fonte: COELHO (2008, pg. 53).

A corrente de saída dependerá diretamente da carga e a tensão é a mesma tensão no painel e na carga. O ponto de operação é determinado pela intersecção da curva característica de saída e a curva de carga, como mostra a Figura 7.

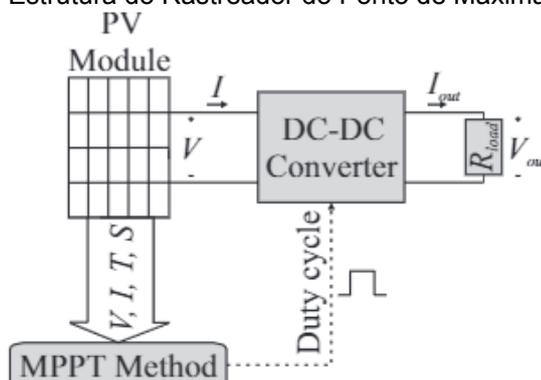


Percebe-se, na Figura 7, que, alterando a carga e, conseqüentemente, alterando a curva de carga, o ponto de operação estará mais próximo ou mais distante do MPP. O painel funcionará então, com eficiência diferente da máxima.

Como foi anteriormente apresentado, as diferentes condições climáticas alteram a curva característica de geração do painel. Portanto, conclui-se que o ponto de operação dificilmente coincidirá com o ponto de máxima potência, sendo necessária uma nova configuração do arranjo para o controle do ponto de operação, inserindo circuitos que formarão o rastreador de máxima potência.

Basicamente, um rastreador de máxima potência é capaz, autonomamente, de ajustar os parâmetros de um conversor situado entre a saída de um painel fotovoltaico e a carga alimentado pelo mesmo, com o objetivo de garantir a máxima potência transferida para a carga. Na Figura 8, pode-se observar o acoplamento entre o painel, o conversor CC-CC, o rastreador MPPT e a carga.

Figura 8 - Estrutura do Rastreador do Ponto de Máxima Potência



Fonte: ZAIONS (2017, pg. 3).

Para a análise mais aprofundada dessa configuração, será demonstrado o uso de um conversor CC-CC *Boost* e, posteriormente, serão estudados alguns dos diferentes métodos de rastreamento de máxima potência que, juntamente com o conversor, garantem o controle esperado do ponto de operação.

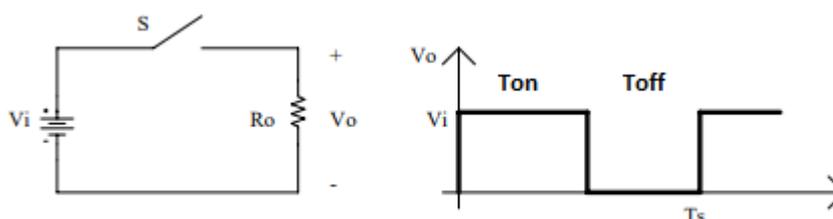
Para se aprofundar no tema, é importante que antes se conheçam as variáveis a serem controladas, que garantem a maior eficiência na geração de energia. O próximo tópico apresentará a relação entre razão cíclica (D) e a Modulação de Largura de Pulso, ou PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*). Em seguida, os conversores CC-CC e, particularmente, o conversor *Boost*, serão introduzidos, bem como os métodos mais conhecidos para o MPPT. Por fim, a modelagem das simulações com as configurações e métodos estudados serão apresentados.

3.2 MODULAÇÃO PWM E RAZÃO CÍCLICA

Para diversas aplicações eletrônicas que necessitam de controle, seja ele de velocidade de motores CC, intensidade de iluminação em CC, fontes chaveadas e de conversores, utiliza-se a prática da Modulação, que permite a limitação da potência de saída.

A modulação PWM, ou a chamada modulação de largura de pulso, pode ser compreendida como o tempo referente ao chaveamento de um circuito, isto é, o tempo que representa a alimentação de um circuito por uma fonte comutada por uma chave. A Figura 9 demonstra uma modulação PWM.

Figura 9 - Representação de chaveando PWM



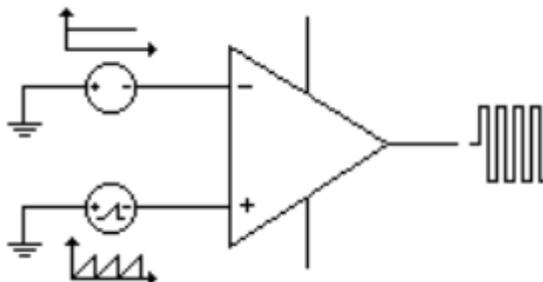
Fonte: PETRY (2001, p.3).

Ao se fechar a chave (S), a carga (R_o) será alimentada pela energia provinda da fonte (V_i). O tempo correspondente a esse fechamento é apresentado por T_{on} . Logo, o complemento deste tempo, demarcado por T_{off} , representa o tempo de abertura da chave. A soma desses dois tempos é representada por T_s , sendo esse tempo responsável pela frequência de chaveamento.

A técnica de modulação por largura de pulso, consiste na comparação de dois sinais de tensão, um de baixa frequência ou constante (referência) e outro de alta frequência (portadora), resultando em um sinal alternado, com forma de onda quadrada, possuindo frequência fixa e largura de pulso variável. Os parâmetros referentes a essa técnica são: sinal de referência, sinal de portadora e modulador (MEZARROBA, 2018).

A Figura 10 representa um circuito PWM, cuja tensão de referência é representada por uma tensão constante e a portadora por uma tensão tipo dente-de-serra (MEZARROBA, 2018).

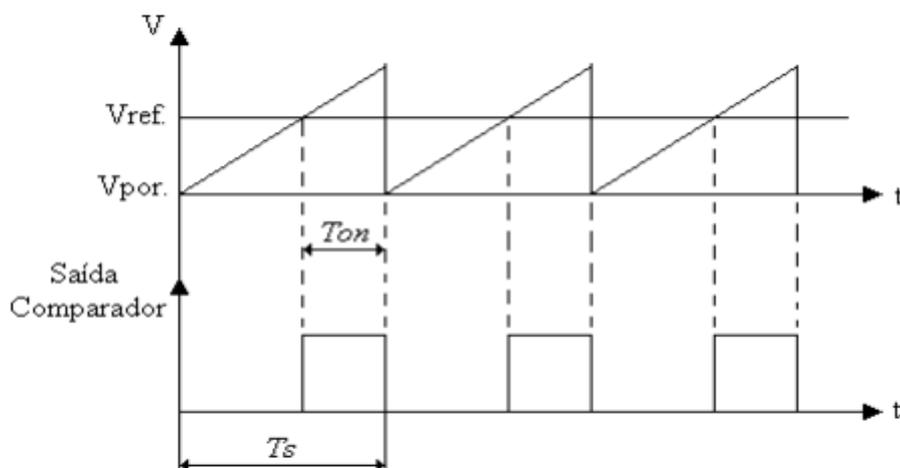
Figura 10 - Modulação PWM



Fonte: MEZARROBA (2018, p.5).

As representações das formas de onda nas entradas do comparador e saída modulada, para um Conversor CC-CC, podem ser vistas na Figura 11.

Figura 11 - Formas de Onda referentes a modulação



Fonte: MEZARROBA (2018, p.6).

Como descrito no início desta seção, a razão cíclica é a proporção do tempo cuja chave se encontra fechada (T_{on}) em termo do tempo total de um ciclo (T_s). Com isso, conclui-se que a razão cíclica depende da amplitude da onda de referência e da frequência da onda portadora, podendo ser representada pela razão:

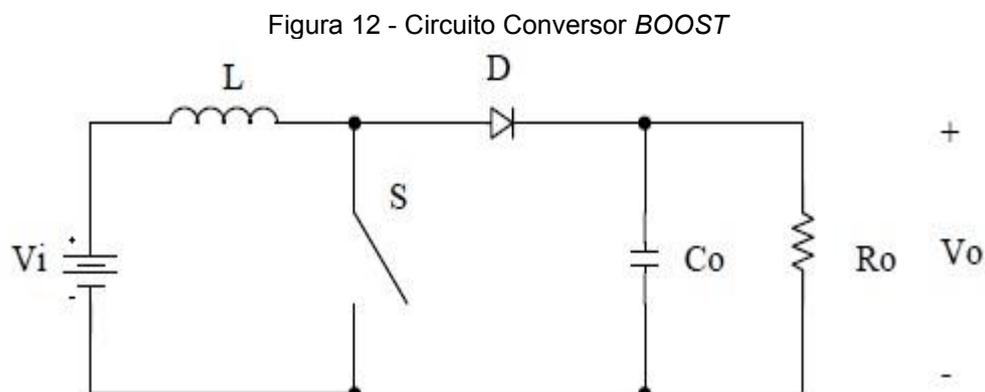
$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (1)$$

Antes mesmo de se introduzir os conceitos dos conversores CC-CC, é de grande importância o conhecimento da modulação PWM, uma vez que o funcionamento dos circuitos conversores depende diretamente da razão cíclica D , gerada pela modulação.

3.3 CONVERSORES CC-CC

Conversores CC-CC são sistemas formados por semicondutores de potência, operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída (PETRY, 2001).

O conversor *Boost* é um elevador de tensão, caracterizado por ter entrada em corrente e saída em tensão. A Figura 12 mostra um circuito de um conversor *Boost*.



Fonte: PETRY (2001, p.7).

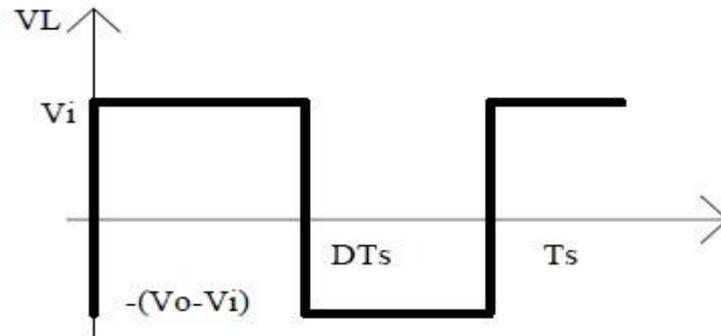
Este conversor funcionará em etapas, sendo a primeira delas quando a chave *S* estiver fechada e conduzindo. O indutor *L* é magnetizado e a fonte *Vi* fornece energia ao indutor, fazendo com que a energia sobre o indutor aumente gradativamente (PETRY, 2001).

Na segunda etapa, a chave *S* estará aberta e o diodo *D* conduzirá, fazendo com que a fonte *Vi* e o indutor forneçam energia para a carga, pois há uma queda da corrente no indutor e este induz uma tensão. A tensão sobre a carga será a soma das tensões na fonte e no indutor. Essa energia será armazenada no capacitor, que não permitirá grandes oscilações de tensão na carga (PETRY, 2001).

No modo de condução contínuo, a chave é fechada antes da corrente no indutor se extinguir, e o chaveamento continua. No modo de condução descontínuo, a corrente no indutor se extingue e a corrente sobre a carga vem do capacitor.

No modo contínuo, a forma de onda sobre o indutor é mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Forma de Onda Indutor



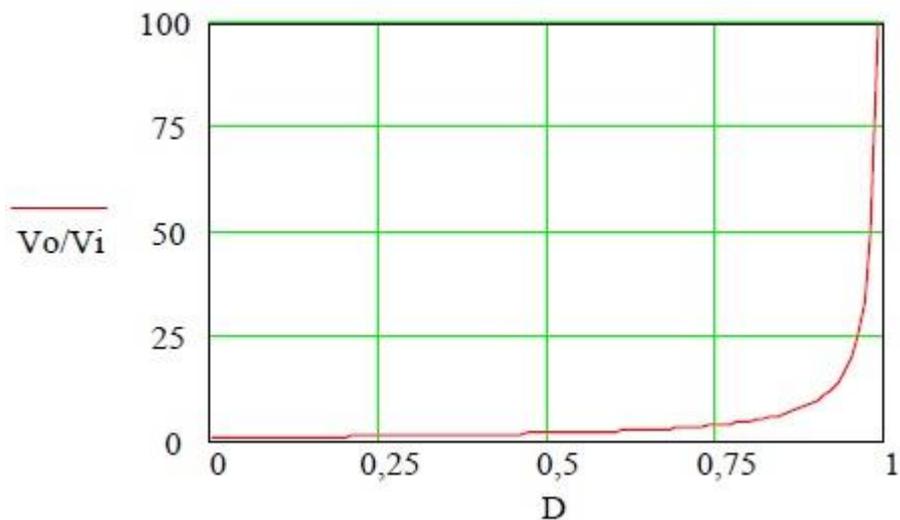
Fonte: PETRY (2001, p.7).

Como a tensão média no indutor deve ser nula, então:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (V_o - V_i) dt \quad (2)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

Na Figura 14 mostra-se a variação da tensão de saída em função da razão cíclica para o conversor *Boost*.

Figura 14 - Ganho com a variação da razão cíclica no conversor *BOOST*

Fonte: PETRY (2001, p.7).

3.4 CIRCUITO RASTREADOR DE MÁXIMA POTÊNCIA COM CONVERSOR BOOST

O controle de rastreamento da máxima potência, utilizando um conversor *Boost*, dá-se pela leitura da Corrente (I_p) e Tensão (V_p) do painel, com o uso de sensores. A partir dessa leitura, o controlador altera a razão cíclica (D) do conversor.

Inicialmente, para a Figura 16, mais adiante, possuímos a seguinte equação:

$$V_o = I_o \times R_o \quad (4)$$

Para o conversor *Boost*, operando em modo de condução contínua (MCC) (COELHO, 2008):

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

$$G_I = \frac{I_o}{I_p} = 1 - D \quad (6)$$

Isolando V_o e I_o nas Equações 5 e 6, temos:

$$V_o = \frac{V_p}{(1-D)} \quad (7)$$

$$I_o = I_p \times (1 - D) \quad (8)$$

Substituindo os resultados, vem:

$$\frac{V_p}{(1-D)} = I_p \times (1 - D) \times R_o \quad (9)$$

Sabendo que R_p é a carga vista pela saída do painel, isola se R_p e conclui se que esta varia de acordo com a razão cíclica D do conversor, também dependendo do valor da carga real R_o , como segue:

$$R_p(D, R_o) = (1 - D)^2 \times R_o \quad (10)$$

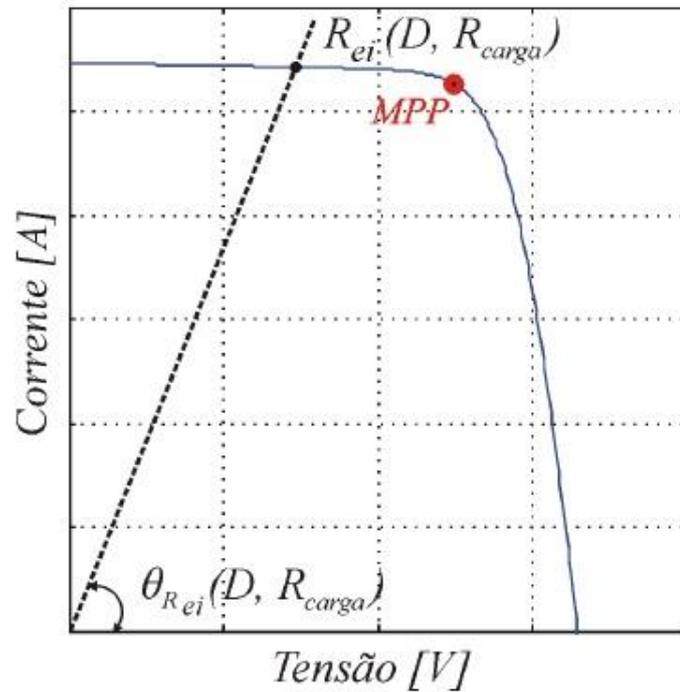
A Figura 15 mostra como a curva da carga se apresenta, sobrepondo a curva característica de saída do painel.

O ângulo variável que representa a inclinação da curva de carga pode ser calculado através da equação que segue:

$$\theta_{R_{ei}}(D, R_{carga}) = \text{atan}\left(\frac{1}{(1-D)^2} \times R_o\right) \quad (11)$$

Observa-se que, com a alteração da razão cíclica do conversor em questão, a inclinação da curva de carga se altera e pode interceptar a curva característica em um ponto desejado, mais especificamente, o ponto de máxima potência (MPP).

Figura 15 - Curva da Carga



Fonte: COELHO (2008, pg. 55).

É importante destacar que nem todos os pontos de operação são possíveis de serem alcançados, pois a razão cíclica possui valores limitados. Com o uso do conversor *Boost*, se $D = 0$, o ângulo de inclinação da reta de carga será:

$$\theta_{R_{ei}}(D, R_{carga}) = \text{atan}\left(\frac{1}{R_o}\right) \quad (12)$$

E para $D = 1$, valor máximo da razão cíclica, se obtém:

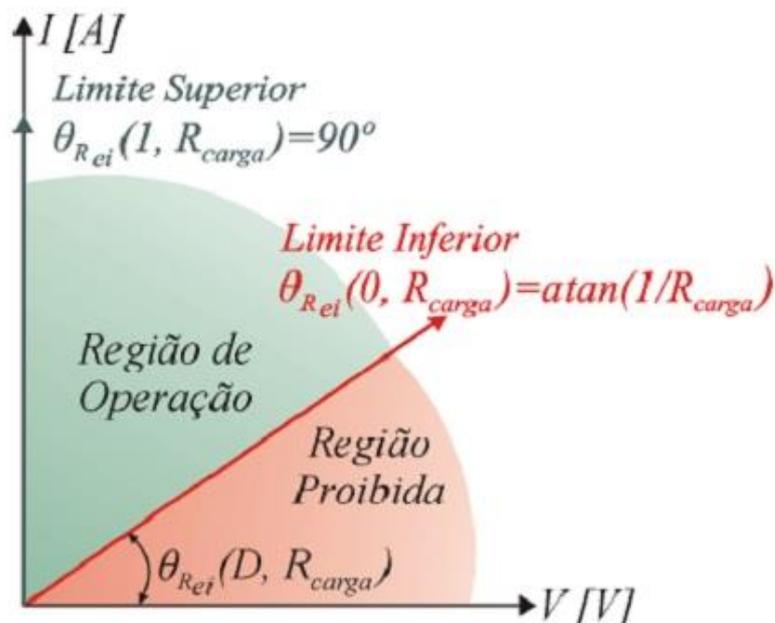
$$\theta_{R_{ei}}(D, R_{carga}) = \text{atan}(0) = 90^\circ \quad (13)$$

Portanto:

$$\text{atan}\left(\frac{1}{R_o}\right) < \theta_{R_{ei}}(D, R_{carga}) < 90^\circ \quad (14)$$

A Figura 16 apresenta a área da curva característica que pode ser operada pelo conversor *Boost*:

Figura 16 - Curva característica de operação do *BOOST*



Fonte: Coelho (2008, pg. 56).

Conclui-se que o conversor pode buscar o ponto de máxima potência, alterando a razão cíclica e, conseqüentemente, a inclinação da curva de carga, para que o ponto de operação coincida com o MPP. Porém, devido aos limites da razão cíclica (0 a 1), a alteração da inclinação da curva da carga é limitada e, assim, apenas uma parte da região compreendida na curva característica de geração do painel fotovoltaico (região de operação) pode ser verificada pelo rastreador.

3.5 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE MPPT

Apresentada a maneira como os conversores CC-CC, em especial o *Boost*, podem atuar, fazendo com que o painel fotovoltaico opere no ponto de máxima potência, é necessário estudar as técnicas que controlam a variação da razão cíclica e detectam o MPP.

Para esta tarefa, se mostra necessário saber o ponto de operação atual do módulo e verificar se este ponto corresponde ao MPP e, se não corresponde, verificar

se o ponto de operação está à esquerda ou à direita do MPP. Em seguida, altera-se a razão cíclica, por incremento ou decremento. O processo se repete até encontrar o ponto de máxima potência e, então, é necessário mantê-lo (COELHO, 2008).

As técnicas de MPPT utilizam-se de circuitos eletrônicos e algoritmos, responsáveis em garantir um acréscimo em torno de 15% a 30% na eficiência da geração de energia de painéis fotovoltaicos (CARVALHO, 2012).

Existem diversos métodos de MPPT registrados e analisados na literatura, por inúmeros autores e pesquisadores. Os métodos se diferem em quesitos de velocidade e precisão de rastreamento, bem como de esforço computacional e complexidade de implementação. Comparando-se as técnicas analógicas e digitais, as últimas se mostram mais vantajosas, por não necessitarem de troca de hardware para alteração do método, sendo esta alteração apenas de algoritmos. Neste trabalho serão discutidos três dos métodos mais abordados na literatura, o Perturba e Observa (P&O), Condutância Incremental (CondInc) e Tensão Constante (TenConst).

3.5.1 Perturba e Observa - P&O

O método Perturba e Observa (P&O), consiste em trabalhar diretamente com os sinais de tensão e corrente, coletados por sensores na saída do painel (na entrada do conversor CC-CC), e realizar o rastreamento do ponto de máxima potência a partir destes. Para isso, compara-se periodicamente a potência atual do sistema com a potência anteriormente obtida e armazenada pelo algoritmo (CARVALHO, 2012).

O passo da programação é feito em iterações que se iniciam quando o sistema é iniciado. Quando o painel e o conversor CC-CC iniciam a operação, o algoritmo inicia com razão cíclica $D(n - 1)$, onde n é o número da iteração. A partir disso, são obtidos os valores de tensão $V(n - 1)$ e corrente $I(n - 1)$, e calculada a potência de saída do painel $P(n - 1)$. Então, é aplicada uma variação ΔD sobre a razão cíclica, causando uma pequena perturbação no sistema, podendo esta ser um incremento ou um decremento da razão inicial, como segue:

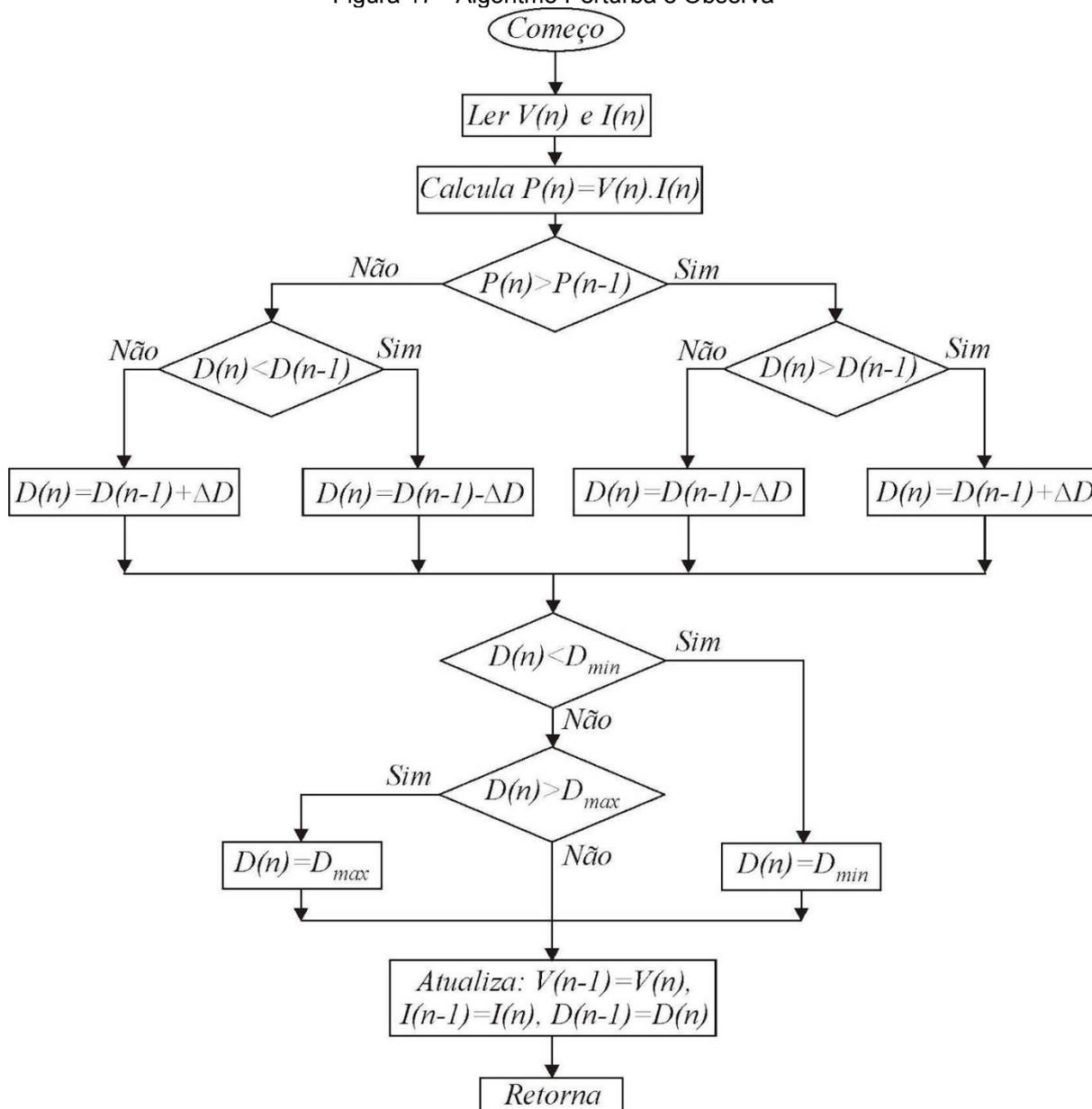
$$D(n) = D(n - 1) \pm \Delta D \quad (15)$$

Para determinar se a perturbação a cada iteração está no caminho correto, ou seja, se o ΔD deve ser um acréscimo ou decréscimo de D para que o sistema alcance o MPP, calcula-se a variação da potência (ΔP). Após a obtenção dessa variação, ocorre uma análise do valor obtido. Se $\Delta P > 0$, conclui-se que a perturbação do sistema caminha para a direção de máxima potência. Caso contrário, isto é, $\Delta P < 0$, o sistema caminha para a direção oposta de maximização de potência, então, o sentido de perturbação deve ser alterado (COELHO, 2008).

A Figura 17 mostra o fluxograma da programação do Algoritmo Perturba e Observa.

Nota-se que a razão cíclica D deverá ter limites bilaterais programados, ou seja, valores de mínimo e máximo. Caso o valor de D extrapole o valor de máximo, D receberá o valor de máximo, o mesmo acontece para o outro extremo, se D decair chegando em valor abaixo do mínimo estipulado, D receberá o valor de mínimo. Tais valores devem ser estipulados pelo projetista do sistema. Outro fator importante é que após cada iteração o algoritmo se reinicia com a atualização dos valores, isso ocorrerá indefinidamente, até que se desligue todo o sistema.

Figura 17 - Algoritmo Perturba e Observa



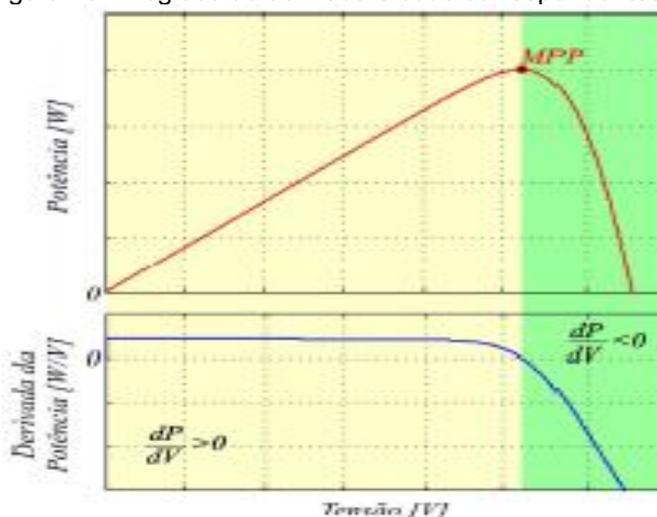
Fonte: COELHO (2008, pg. 69).

3.5.2 Condutância Incremental - CondInc

O método Condutância Incremental fundamenta-se no cálculo da variação da potência e da tensão fornecida. Essa variação é analisada pelo algoritmo como uma derivada, referente a curva de potência em função da tensão do painel. No momento em que a derivada é positiva, assegura-se que o ponto de operação atual está situado na subida da curva. O contrário, indicado pela derivada negativa, representa que o ponto de operação está situado na descida da curva (CARVALHO, 2012).

Em termos matemáticos a derivada representa a razão entre a variação de potência (ΔP) e a variação de tensão (ΔV). A figura 18, a seguir mostra a curva P x V e a curva que representa a derivada pela tensão $dP/dV \times V$, onde pode-se observar as regiões representadas pelas derivadas em cada ponto da curva P x V (COELHO, 2008).

Figura 18 - Regiões de derivada e suas correspondentes potências



Fonte: COELHO (2008, p.70).

Observa-se que a derivada representa duas áreas exclusivas do gráfico. Quando o ponto de operação está na parte de subida da curva de potência, é evidente que o ponto de máxima potência está à sua direita. Já quando o ponto de operação se encontra numa descida no gráfico de potência, evidencia-se que o ponto de MPP está à esquerda do ponto atual. É importante ressaltar que, quando a derivada é igual a zero, o ponto de operação é o próprio ponto de MPP (JÚNIOR, 2013).

O CondInc exige computacionalmente um grande esforço. Para facilitar a interpretação e a aplicabilidade, deve-se deduzir uma forma mais simplificada de determinar os cálculos diferenciais. Com isso os termos necessários podem ser resumidos em:

$$P = V \times I \quad (16)$$

Derivando, utilizando propriedades da Regra da Cadeia:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d[V \times I]}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} = I + V \times \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (17)$$

Onde se tem I e V , representam-se a corrente e a tensão de saída do painel, consecutivamente, convencionados como $I(n)$ e $V(n)$, nos termos atuais do sistema. Já os termos ΔI e ΔV representam a variações dos estados atuais e anteriores, de corrente e tensão, respectivamente. Dessa maneira calcula-se:

$$\Delta I = I(n) - I(n - 1) \quad (18)$$

$$\Delta V = V(n) - V(n - 1) \quad (19)$$

Aplicando a Equação 18 e 19 em 17, o cálculo diferencial pode ser representado por:

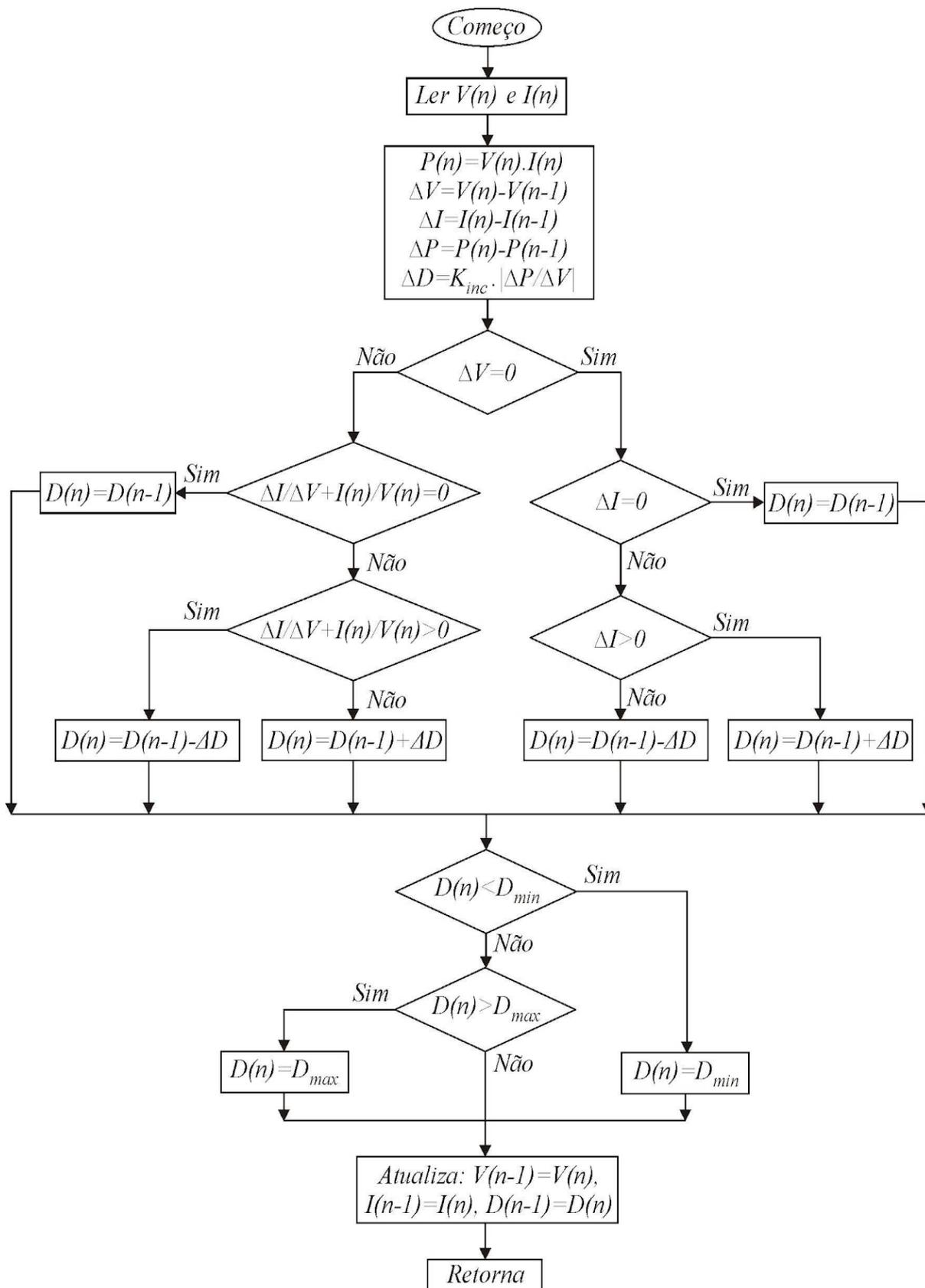
$$\frac{dP}{dV} = I(n) + V(n) \cdot [I(n) - I(n - 1) / V(n) - V(n - 1)] \quad (20)$$

No ponto de MPP, o termo dP/dV é nulo, com isso:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} + \frac{I(n)}{V(n)} = 0 \quad (21)$$

Baseando-se neste breve estudo, pode-se constatar que o método Condutância Incremental é uma forma de algoritmo baseado em P&O, porém aperfeiçoado. Para demonstrar isso é apresentado a Figura 19, que representa o fluxograma do algoritmo do CondInc.

Figura 19 - Algoritmo Condutância Incremental

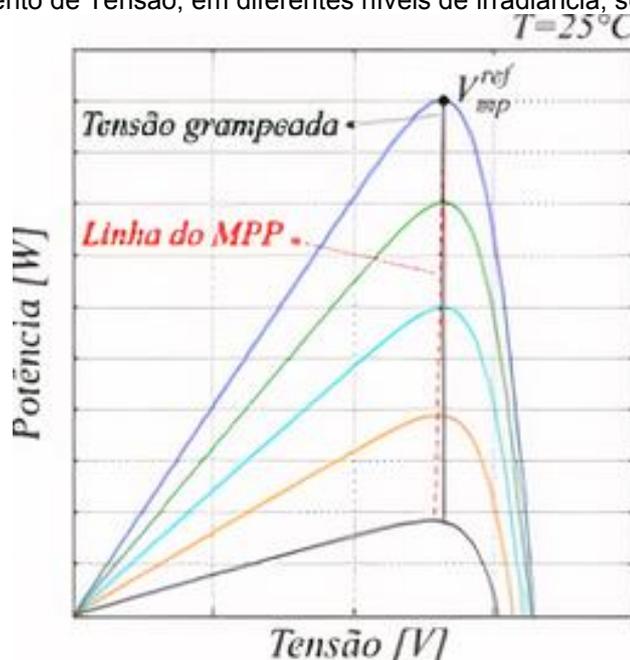


Fonte: COELHO (2008, pg. 72).

3.5.3 Tensão Constante - TenConst

O método de Tensão Constante, como o próprio nome sugere, consiste no grampeamento de uma tensão de saída, buscando sempre o ponto de máxima potência, mesmo em diferentes condições de referência. O método é um tanto quanto impreciso, no entanto, o sistema irá operar nas proximidades do ponto de MPP para diferentes valores de irradiância, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Grampeamento de Tensão, em diferentes níveis de irradiância, sob temperatura constante



Fonte: Coelho (2008, p.63).

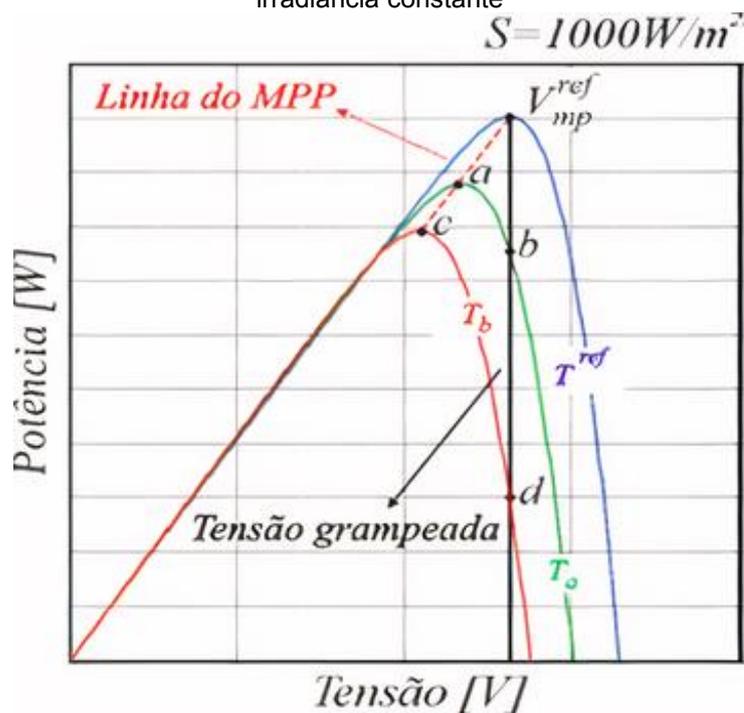
Evidentemente, o valor de tensão grampeada (V_{ref}) não remete ao valor de máxima potência em diferentes condições climáticas. Na Figura 20, a linha contínua representa o valor grampeado, enquanto a linha tracejada conecta os pontos de máxima potência reais para diferentes condições de radiação solar. Ao se analisar graficamente essas retas, verifica-se a diferença entre o valor exato de MPP e o de operação, mantendo o valor de tensão constante (COELHO, 2008).

Um fator importante a ser ressaltado sobre o método é que a sua precisão é bastante dependente da temperatura de operação dos módulos, ou seja, o TenConst é preciso desde que a temperatura do sistema não se altere daquela a qual a tensão

foi grampeada. Em poucas palavras, se a temperatura se difere da temperatura de referência, o sistema dificilmente conseguirá operar em máxima potência.

A Figura 21 mostra a característica operacional do painel, expondo as curvas de potência em termos de tensão, com variação apenas de temperatura.

Figura 21 - Gráfico de P X V com pontos MPPT e potência sob tensão constante, analisados sob irradiância constante

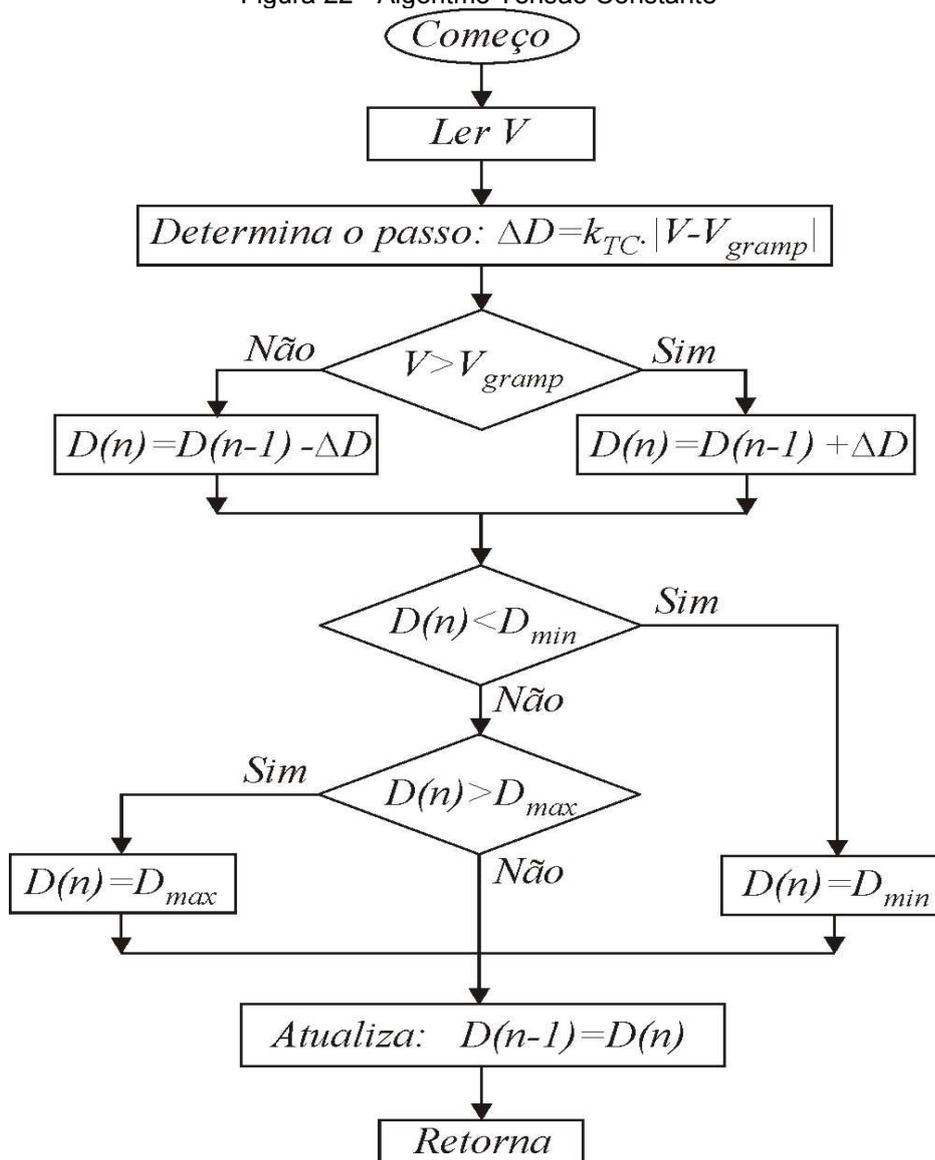


Fonte: Coelho (2008, pg.64).

Em um primeiro momento, como visto na Figura 21, quando a temperatura do painel é a mesma da temperatura de referência, a tensão de máxima potência e a grampeada são as mesmas. No entanto, quando a temperatura se eleva (T_a), há um novo ponto de MPP, referenciado por a . Contudo, a potência gerada será menor que a máxima devido ao grampeamento estipulado. Caso a temperatura se elevar ainda mais, chegando a T_b , onde $T_b > T_a > T_{ref}$, o ponto de máxima potência será imposto ao ponto c , no entanto, devido ao grampeamento, o ponto de operação está no ponto d , se afastando ainda mais do ponto de MPP (COELHO, 2008).

Segue, ainda, o fluxograma do método apresentado, na Figura 22.

Figura 22 - Algoritmo Tensão Constante



Fonte: COELHO (2008, pg. 65).

3.6 MODELAGEM COMPUTACIONAL

É imprescindível, para o desenvolvimento de qualquer projeto, o uso de softwares simuladores que possam demonstrar, de forma clara, o funcionamento dos equipamentos a serem empregados, de acordo com alterações nas variáveis de um sistema. Não obstante disso, para interpretação mais profunda e detalhada do comportamento dos equipamentos utilizados neste trabalho, utilizou-se o software PSIM. Escolheu-se este software por sua fácil aplicabilidade e por possuir um potente ambiente de simulação.

O circuito representado é responsável por identificar a carga necessária e suficiente para a transmissão de máxima potência do painel. Apenas como instrumento de conhecimento e modelagem, foram simuladas diferentes condições climáticas, verificando o comportamento do painel. Na prática, a potência máxima gerada pelo módulo não é transmitida à carga sem o uso de MPPT. No entanto, para análises de comportamento, em primeiro instante fez-se como conhecida a potência máxima.

Conhecendo-se a potência máxima gerada pelo painel e obtendo o valor de tensão de saída do equipamento, pode-se calcular a carga que permite máxima potência em diferentes condições naturais. Pela Lei de Ohm:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (25)$$

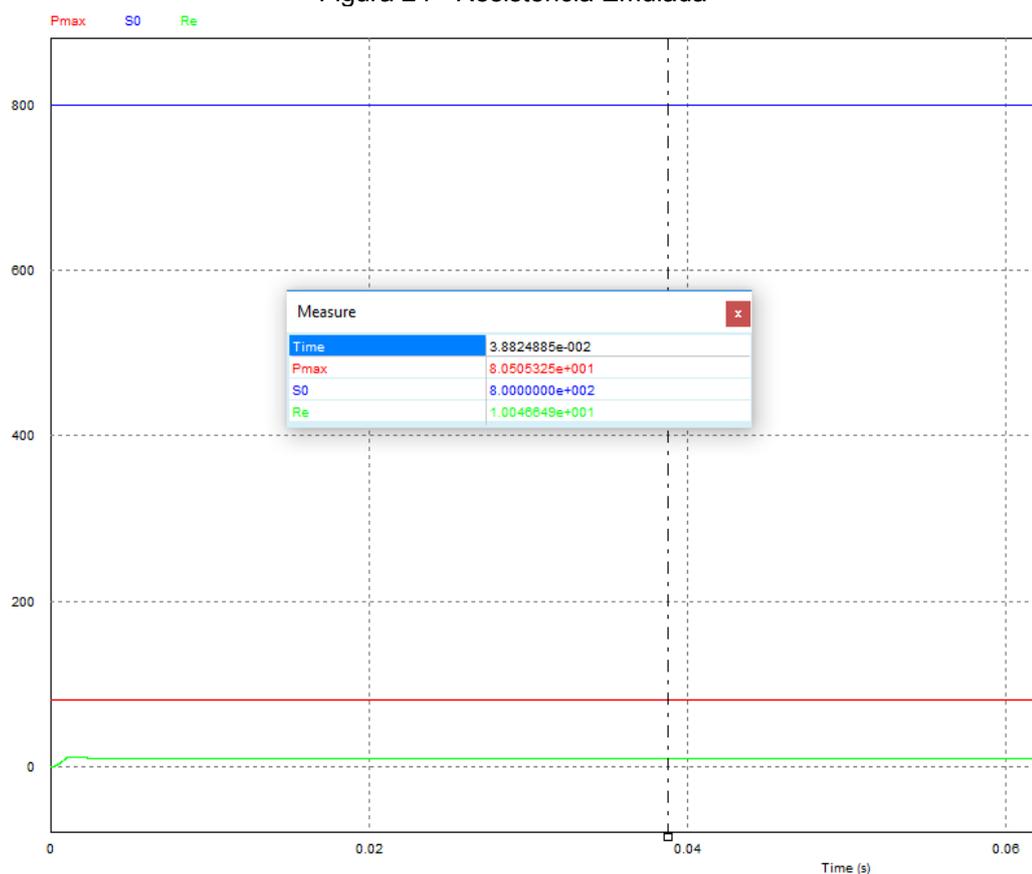
Logo a carga de máxima potência é obtida em:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (26)$$

V é a tensão de saída do painel e P é a potência máxima fornecida.

No caso da simulação, não há uma carga real e sim uma carga emulada, que, grosso modo, representa uma resistência simulada, cujo valor representa a carga que dissipará a maior potência, ou seja, a máxima potência do painel. Utilizando-se irradiância $S = 800\text{W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$, verifica-se a carga máxima que transmitirá a máxima potência, como mostra a Figura 24.

Figura 24 - Resistência Emulada



Fonte: Autoria própria (2020).

Sob as condições descritas, obtêm-se cerca de 80,50 Watts de potência máxima no painel. Para o aproveitamento total dessa energia, a carga, como pode ser visto na figura acima, representada por R_e , deverá ser de 10Ω . A mesma simulação pode ser utilizada para representar diferentes condições climáticas e assim simbolizar a carga máxima que irá impor ao sistema a máxima potência.

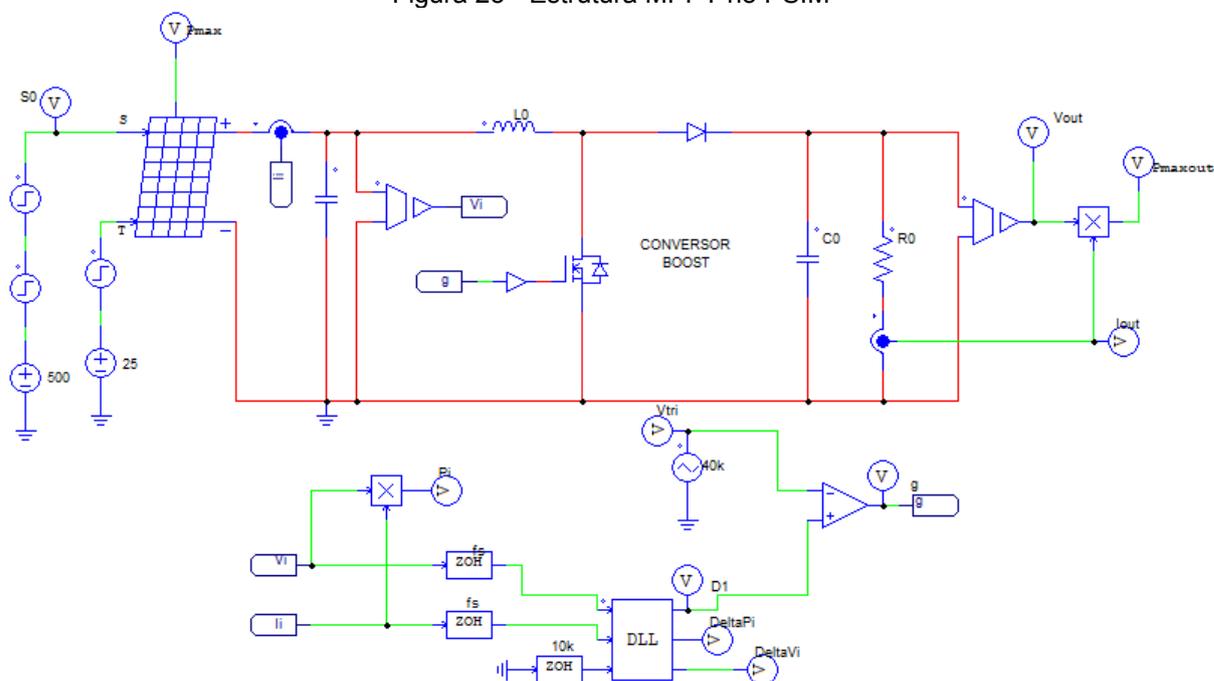
3.6.2 Painel Fotovoltaico com o Uso de Conversor *Boost*

Como citado, será utilizado o conversor CC-CC *Boost*, mantendo o nível de tensão maior ou igual na saída (V_o), em termos da tensão de entrada (V_i). As variações da tensão de entrada, ou de carga conectada ao sistema, acarretam a variação da tensão de saída, que dificultam a obtenção do MPP. No entanto, utiliza-se de técnicas de controle em malha fechada, já citadas anteriormente, que trazem resultados razoáveis na obtenção do MPP (TENÓRIO, 2017).

Toda a análise de funcionamento e das características das variações climáticas podem ser simuladas com a utilização do software PSIM. A Figura 25, a seguir, mostra a estrutura de modelagem do sistema de MPPT.

Como visto na Figura 25, há obtenção de parâmetros do sistema, destacando-se a tensão de saída do painel (V_i) e a corrente (I_i). Diante da obtenção dessas variáveis, pode-se aplicar os métodos de MPPT, já vistos até então. É importante ressaltar que a obtenção do ponto de máxima potência, nas simulações, se dá graças ao driver de comunicação de extensão “.dll”, executando o algoritmo, programado em linguagem C, que processa os dados e opera o sistema.

Figura 25 - Estrutura MPPT no PSIM



Fonte: Autoria própria (2020).

Para a escolha dos valores dos componentes do conversor (indutor, capacitor e resistência) foram modelados os parâmetros do circuito com o auxílio do software Mathcad. As equações adotadas são específicas para o modo de condução contínuo do conversor *Boost*. Como dados de entrada, foram inseridos a tensão de entrada no conversor, a tensão de saída (na carga), a potência dissipada (esperada na saída), frequência de comutação e porcentagem de ondulação de corrente média e de tensão na carga.

Para a tensão de entrada foram escolhidos valores múltiplos de 17,1 V, de acordo com a quantidade de painéis no sistema e sua ligação (série ou paralelo), sabendo que o fabricante do painel cujo modelo foi simulado informa a tensão para máxima potência em condições padrão de teste. Os valores da tensão de saída foram múltiplos de 48 V, para condizer com a carga, tendo em vista que esta poderia ser um banco de baterias, tendo valores padronizados. Os valores de potência dissipada foram múltiplos de 58 W, já que esta é a potência máxima para um painel nas condições padrão de teste, segundo o fabricante (SOLAREX, 1998). A frequência de comutação foi escolhida com 40 kHz e a ondulação escolhida foi de 20% para a corrente e de 2,5% para a tensão.

Com estes dados foram obtidos os seguintes parâmetros: resistência da carga escolhida, ganho de tensão, razão cíclica de operação, corrente da carga, corrente de pico em condição crítica, corrente média na indutância, ondulação da corrente média da carga, indutância, indutância crítica, variação de carga no capacitor, capacitância.

As equações a seguir mostram os cálculos ainda não apresentados:

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0} \quad (27)$$

$$I_{pk} = \frac{2 \cdot I_0}{1 - D_{Boost}} \quad (28)$$

$$I_{L0} = \frac{I_0}{1 - D_{Boost}} \quad (29)$$

$$\Delta i_{L0} = 0,2 * I_{L0} \quad (30)$$

$$L_{Boost} = \frac{(V_0 - V_i) * V_i}{\Delta i_{L0} * V_0 * f_s} \quad (31)$$

$$L_{cr} = R_0 * \frac{D_{Boost} * (1 - D_{Boost})^2}{2 * f_s} \quad (32)$$

$$\Delta V_0 = 0,025 * V_0 \quad (33)$$

$$\Delta Q = I_0 * D_{Boost} * T_s \quad (34)$$

$$C_0 = \frac{\Delta Q}{\Delta V_0} \quad (35)$$

Onde:

I_0 = Corrente na carga;

I_{pk} = Corrente de pico em condição crítica;

$I_{L0} = \frac{I_0}{1-D_{Boost}}$ = Corrente média na indutância;

Δi_{L0} = Ondulação da corrente média da carga;

L_{Boost} = Indutância do Conversor *Boost*;

L_{cr} = Indutância crítica do Conversor *Boost*;

ΔV_0 = Ondulação da tensão na carga;

ΔQ = Variação de carga no capacitor;

C_0 = Capacitância.

O conversor *Boost* utilizado neste projeto foi modelado com os componentes das tabelas 1, 2 e 3, de acordo com o número de painéis do arranjo.

Tabela 1: componentes do conversor *Boost* para sistema com 1 painel

Componentes:	Valores:
Resistência (Ro)	39,724 Ω
Indutor (Lo)	405,687 μH
Capacitor (Co)	16,206 μF

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 2: componentes do conversor *Boost* para sistema com 2 painéis

Componentes:	Valores:
Resistência (Ro)	79,448 Ω
Indutor (Lo)	811,375 μH
Capacitor (Co)	8,103 μF

Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3: componentes do conversor *Boost* para sistema com 3 painéis

Componentes:	Valores:
Resistência (R _o)	119,172 Ω
Indutor (L _o)	1217 μH
Capacitor (C _o)	5,402 μF

Fonte: Autoria própria (2020).

3.7 SIMULAÇÕES

Para se verificar a melhor maneira de realizar o projeto de um novo método de MPPT, foi necessário primeiramente simular os métodos tradicionais já utilizados a literatura, obtendo-se uma base de performance a ser alcançada ou até mesmo aperfeiçoada. Foram realizados cálculos de simulação para o projeto do conversor *Boost* e simulações dos métodos de MPPT: P&O, Condutância Incremental e Tensão Constante.

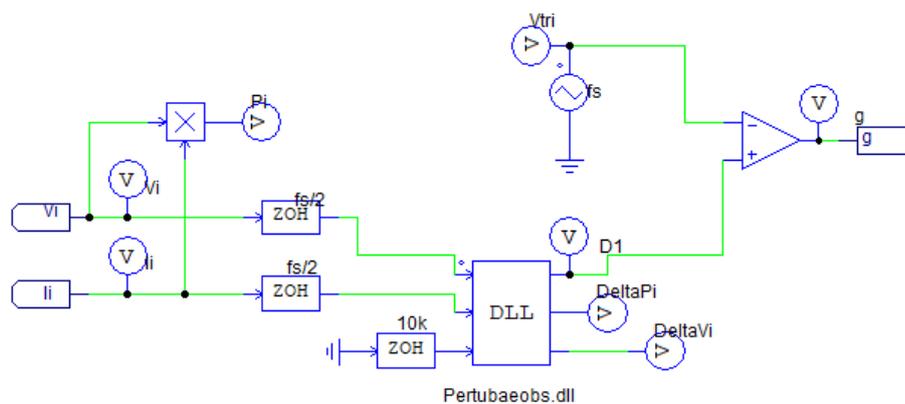
3.7.1 P&O

Como já visto na seção 3.5.1, o método de MPPT Perturba e Observa consiste em analisar, com diversas iterações, se a potência gerada pelo sistema converge para o ponto de máxima potência. A cada iteração lê-se a tensão de saída do sistema e a corrente que o percorre. O produto dessas resulta na potência de saída (COELHO, 2008). Na Figura 26 podemos ver o modelo DLL da representação do método utilizado no software PSIM.

Para todos os métodos, inicialmente simulou-se em condições de irradiância igual a 500W/m² e temperatura de 25°C, alterando a irradiância para 800W/m² em t = 0,1s e, posteriormente, a temperatura para 55°C em t = 0,2s.

A implementação de método MPPT P&O foi feita utilizando-se código de programação em C++, inserido no DLL. O código utilizado está descrito no Apêndice A deste trabalho.

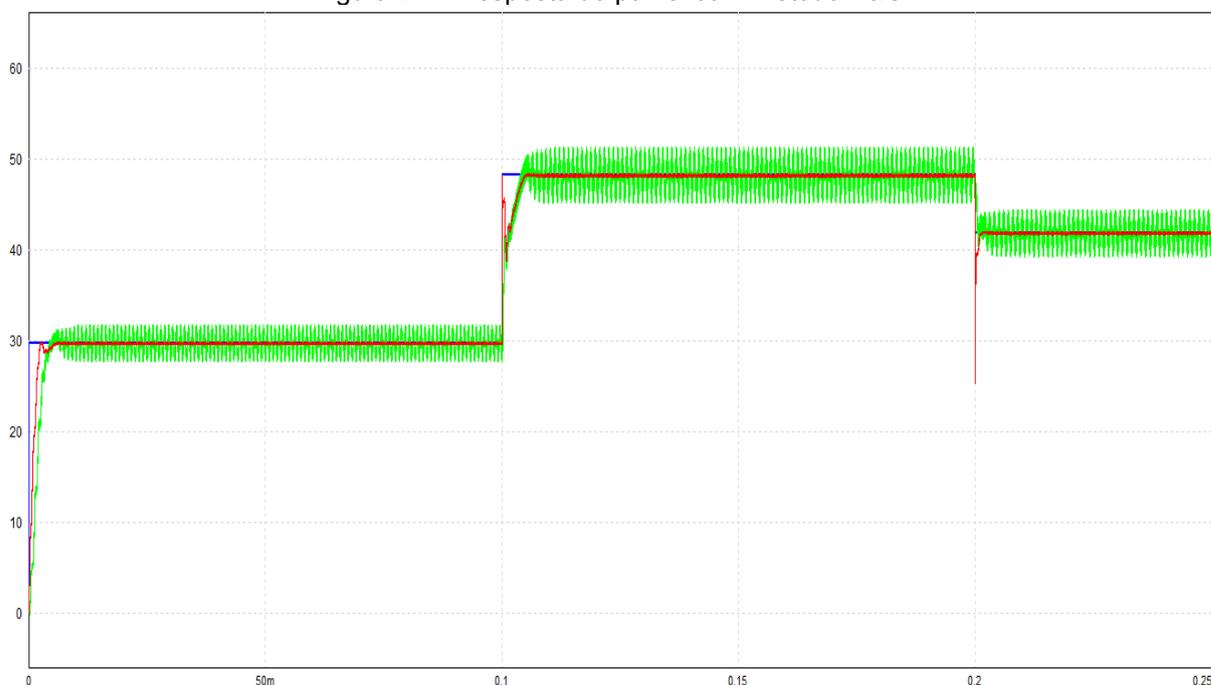
Figura 26 - Representação de circuito no PSIM para execução do método de MPPT P&O



Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 27 mostra a potência máxima (P_{max}), em azul, que o painel pode fornecer nas diferentes condições de radiação solar e temperatura no painel. Também pode-se ver o resultado do MPPT, em vermelho, levando a potência de saída do painel (entrada do conversor *Boost*) a seguir a máxima potência do sistema, e a potência sobre a carga, em verde.

Figura 27 – Resposta do painel com método P&O



Fonte: Autoria própria (2020).

Legenda: Potência máxima de operação (azul), potência fornecida pelo painel (vermelho) e potência sobre a carga (verde).

Figura 29 – Resposta do painel com método CondInc



Fonte: Autoria própria (2020).

Legenda: Potência máxima de operação (azul), potência fornecida pelo painel (vermelho) e potência sobre a carga (verde).

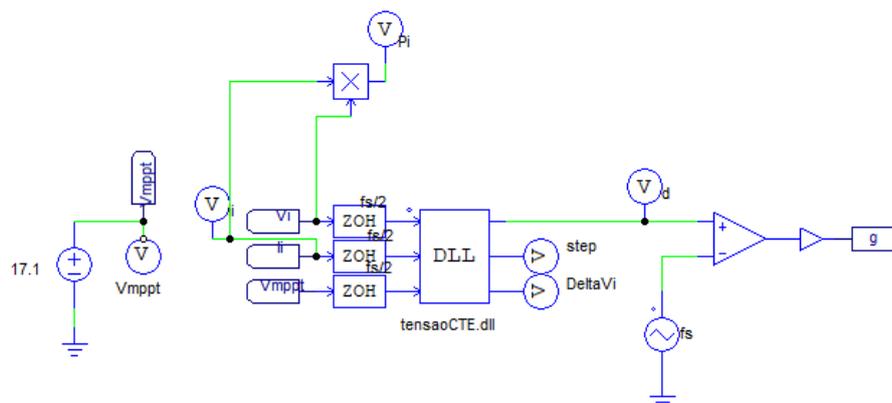
A Figura 29 mostra que a potência máxima (P_{max}) capaz de ser fornecida pelo painel é rastreada com eficiência pelo algoritmo MPPT. Adicionalmente, comparando-se com a Figura 27, observa-se a resposta mais rápida para a mudança dos parâmetros de irradiância e temperatura.

3.7.3 Tensão Constante

O método de MPPT Tensão Constante, como visto anteriormente na seção 3.5.3, consiste no grampeamento de uma tensão de saída, com o intuito de buscar sempre o ponto de máxima potência (COELHO, 2008). Implementou-se o método com o circuito da Figura 30, representado pelo DLL.

A implementação de método MPPT Tensão Constante foi realizada através da utilização de código de programação em C++, inserido no DLL. O código utilizado está descrito no Apêndice C deste trabalho.

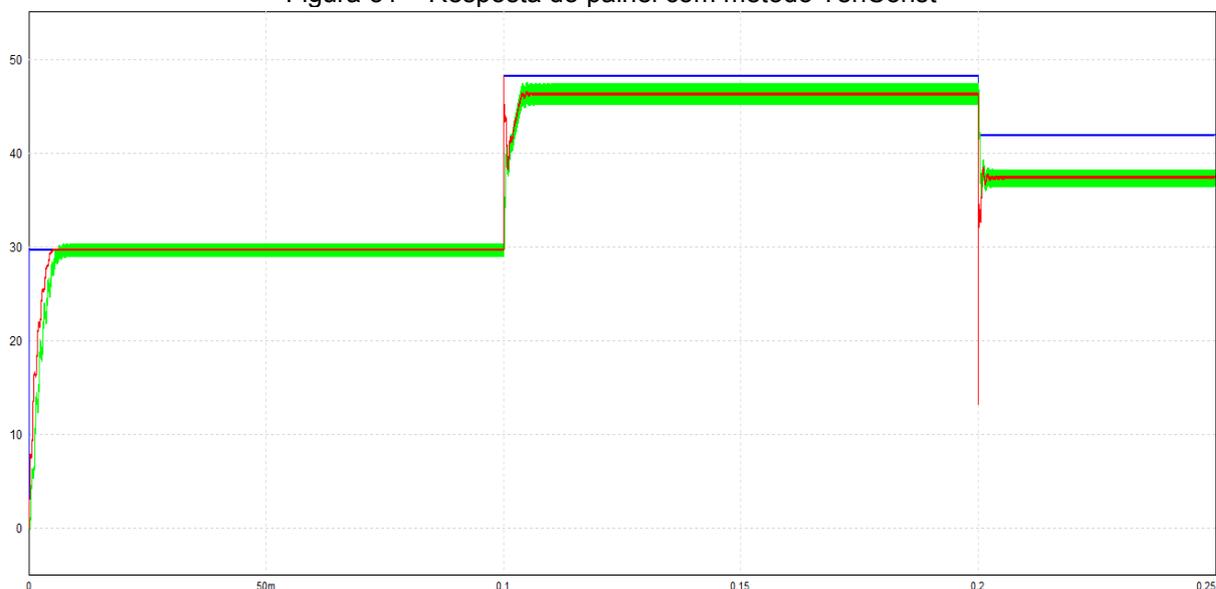
Figura 30 - Representação de circuito no PSIM para execução do método de MPPT Tensão Constante



Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 31 nos mostra a resposta do método para as mesmas variações de irradiância e temperatura aos quais os métodos anteriores foram submetidos, utilizando uma faixa de tensão apenas grampeada em 17,1 V.

Figura 31 – Resposta do painel com método TenConst



Fonte: Autoria própria (2020).

Legenda: Potência máxima de operação (azul), potência fornecida pelo painel (vermelho) e potência sobre a carga (verde).

Pode-se observar que a potência máxima (P_{max}) capaz de ser fornecida pelo painel é rastreada com menor eficiência pelo algoritmo MPPT para as variações de irradiância, e menor ainda para as variações de temperatura. Isso pode ser visto pela curva vermelha na figura, a qual representa a potência de saída do painel. Esta

diferença de performance ocorre devido as características do método. Quando se grampeia a tensão em um único valor, a saída não consegue rastrear o MPP, uma vez que para cada valor de temperatura há uma tensão de ponto de máxima potência diferente (COELHO, 2008).

3.8 SIMULAÇÕES COM SOMBREAMENTO PARCIAL

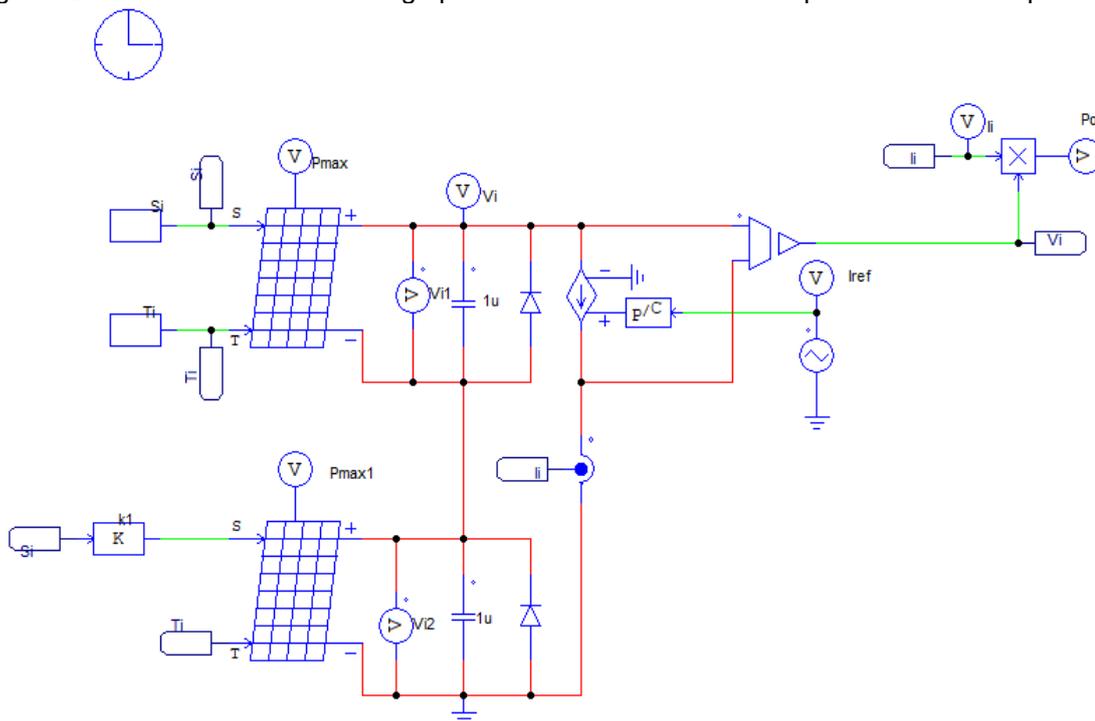
Para verificar a eficiência dos métodos apresentados, foram realizadas simulações em que os sistemas são submetidos a condições de sombreamento parcial. Para isso, os sistemas contam com dois ou mais painéis em série, de forma que cada painel possa receber um valor diferente de irradiância e/ou temperatura.

3.8.1 Curvas de Potência

Para se observar o comportamento do sistema em diversas condições, implementou-se o circuito da Figura 32, capaz de varrer todo o espectro de potência gerada pelo arranjo fotovoltaico em questão.

Na Figura 32, observa-se um sistema de dois painéis em série, que recebem uma taxa de irradiância (S_i) e temperatura (T_i), as quais determinam a condição de operação da geração de energia do sistema. Para fins de simplificação inseriu-se o bloco k_1 , que corresponde a uma constante multiplicadora que permite indicar a porcentagem do valor de S_i que chega ao segundo painel.

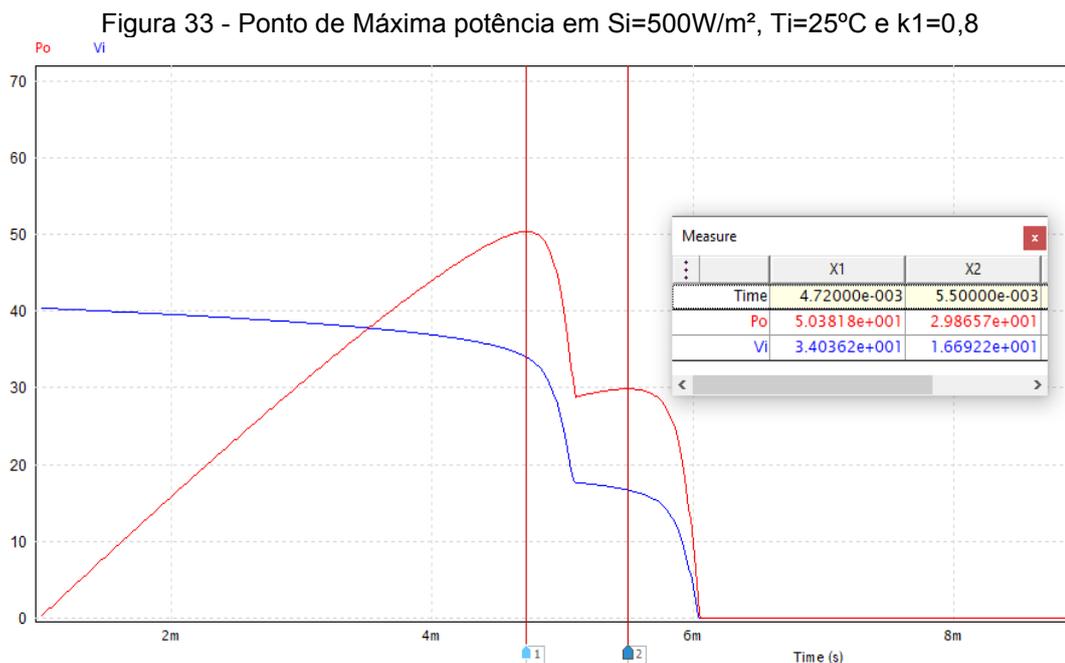
Figura 32 - Circuito emulador de carga para rastreamento de máxima potência com dois painéis



Fonte: Autoria própria (2020).

O circuito auxiliar, observado após a frente do sistema, emula uma carga que varrerá todo o espectro de potência que o sistema é capaz de fornecer. Para exemplificar o funcionamento, considera-se $S_i = 500 \text{ W/m}^2$, $T_i = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $k_1 = 0,8$ e verifica-se a curva de potência resposta do circuito descrito acima na Figura 33.

Na Figura 33 observa-se o efeito de sombreamento parcial, uma vez que a irradiância do segundo painel é o produto de S_i e k_1 , ou seja, 400 W/m^2 . Pode-se verificar que, nesta condição, o sistema apresenta dois máximos ao longo do período de simulação. No entanto, o máximo global nesta configuração é $P_o = 50,382 \text{ W}$ e $V_i = 34,036 \text{ V}$, que determinam o ponto de potência máxima deste sistema.



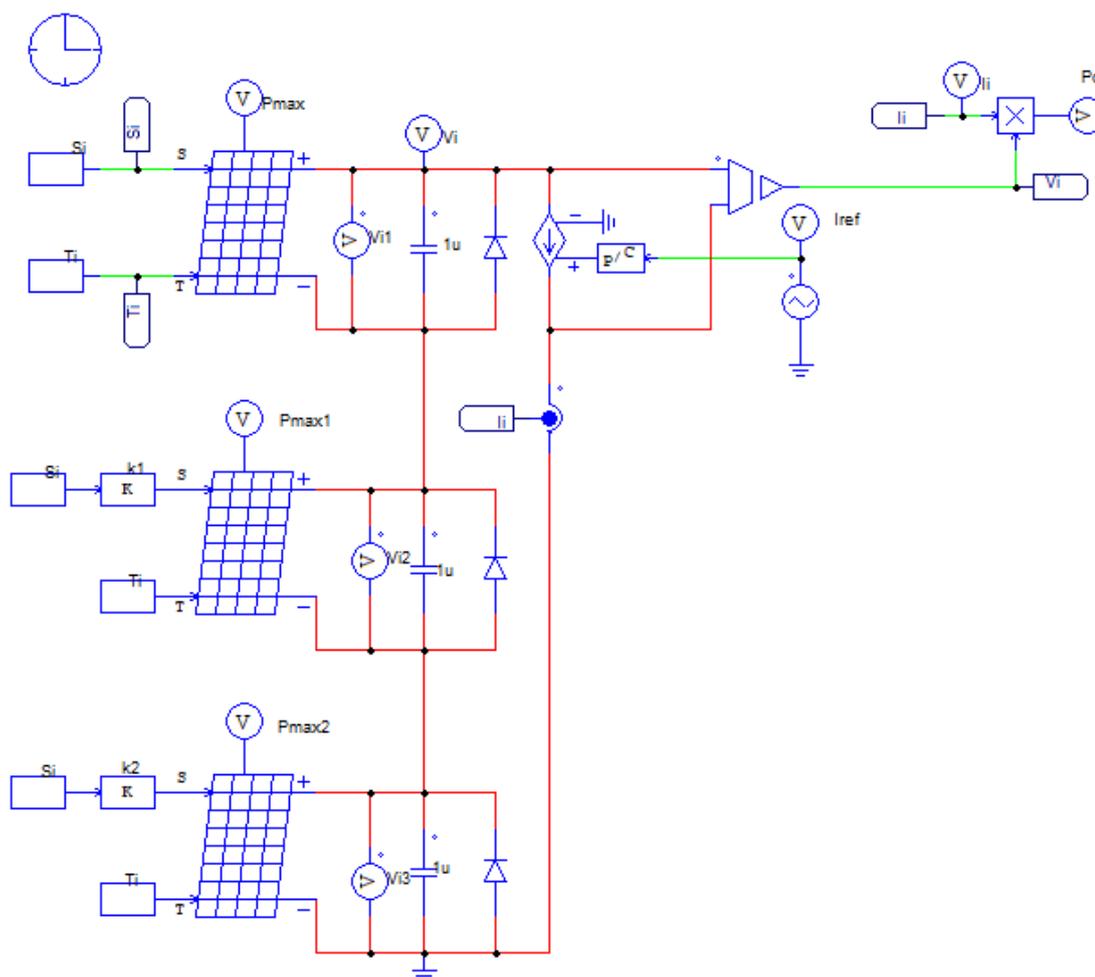
Fonte: Autoria própria (2020).

Legenda: Curva de potência (vermelho) e curva de tensão (azul).

Analogamente ao sistema de dois painéis, apresenta-se o sistema composto por três painéis em série, como pode ser visto na Figura 34.

Os painéis recebem a mesma temperatura (T_i) e o primeiro painel recebe a irradiância S_i (medida em termos de irradiância). Foi inserido, mais uma vez, os blocos k_1 e k_2 , que correspondem a constantes multiplicadoras, indicando quanto de S_i chega ao segundo painel e ao terceiro painel, respectivamente.

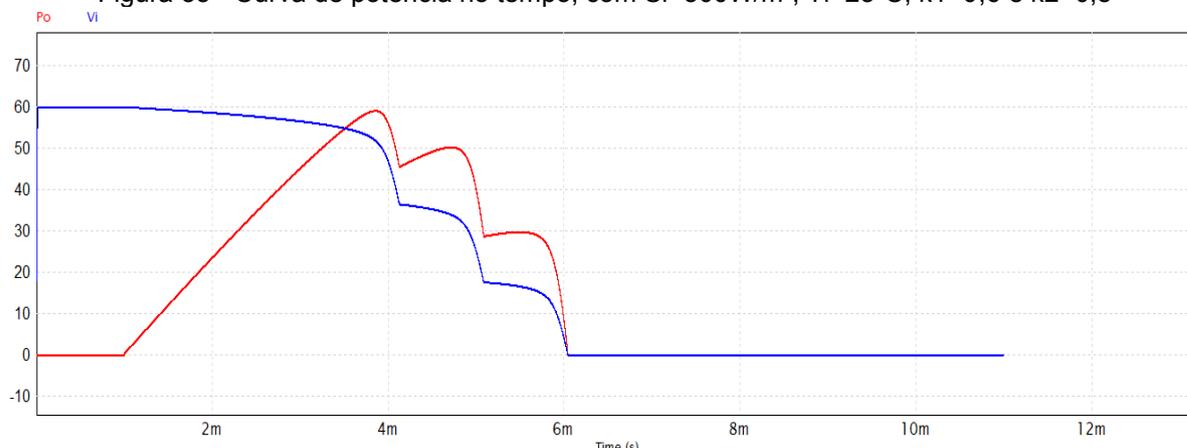
Figura 34 - Circuito emulador de carga para rastreamento de máxima potência com três painéis



Fonte: Autoria própria (2020).

Para verificar o funcionamento do conjunto, considera-se $S_i = 500 \text{ W/m}^2$, $T_i = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, agora $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$. A curva resposta pode ser vista na Figura 35.

Figura 35 - Curva de potência no tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$, $k_1=0,6$ e $k_2=0,8$



Fonte: Autoria própria (2020).

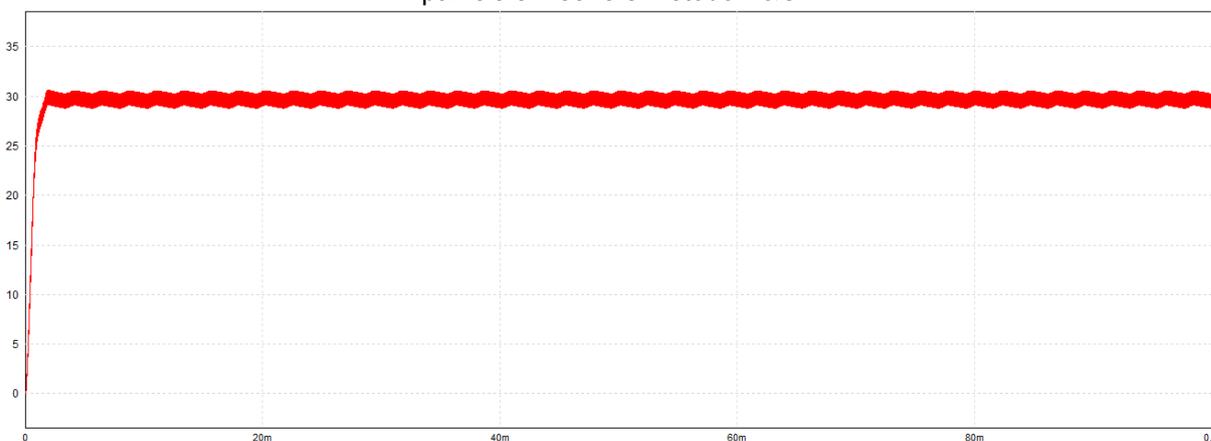
Legenda: Curva de potência (vermelho) e curva de tensão (azul).

Observa-se novamente o efeito de sombreamento parcial, agora mais notável, uma vez que a irradiância do segundo painel é o produto de S_i e k_1 e do terceiro painel o produto de S_i e k_2 , ou seja, 300W/m^2 e 400W/m^2 , respectivamente. Verifica-se também que nesta condição o sistema apresenta agora três máximos. No entanto, o máximo global nesta configuração é $P_o = 59,207\text{ W}$, em $V_i = 52,023\text{ V}$, que determinam o ponto de potência máxima deste sistema.

3.8.2 Sombreamento Parcial para Métodos Convencionais de MPPT

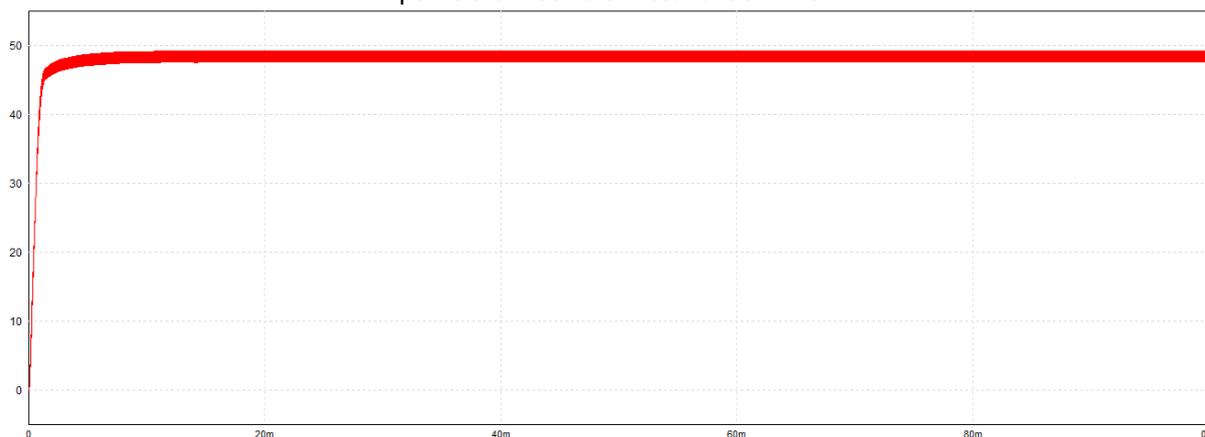
Para as condições de irradiância e temperatura apresentadas na Figura 33, foram simulados os métodos convencionais, já apresentados, em sistemas com dois painéis ligados em série. Nas figuras 36 a 38, observam-se a operação dos sistemas com os três diferentes métodos (P&O, CondInc e TenConst).

Figura 36 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método P&O



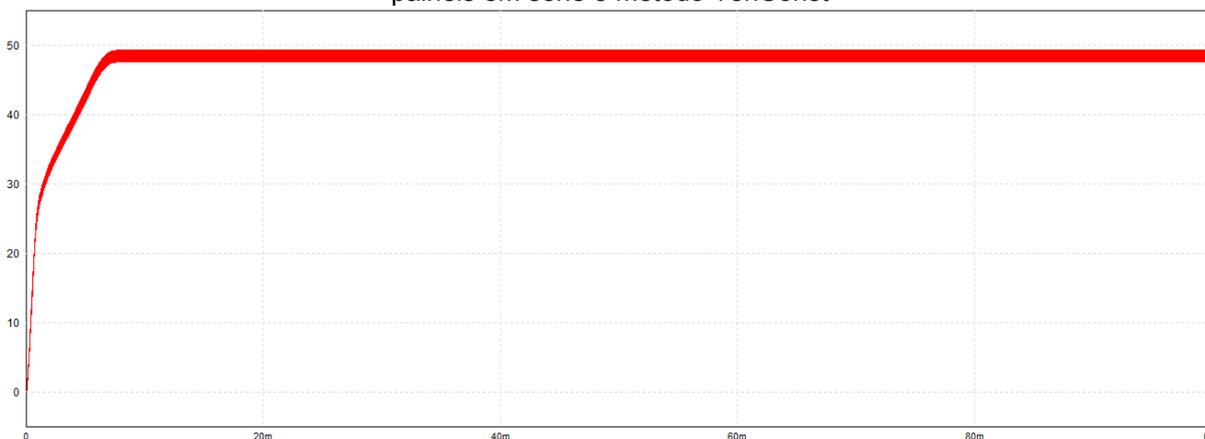
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 37 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método CondInc



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 38 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$ e $k_1 = 0,8$, para sistema de 2 painéis em série e método TenConst



Fonte: Autoria própria (2020).

Dessa vez, observa-se que os métodos de P&O e CondInc não se mostraram tão efetivos, com destaque ao método de P&O, que encontrou o ponto de máximo local, próximo de $P = 30\text{W}$ (de acordo com a Figura 36). O método de TenConst se mostrou mais efetivo nesta simulação devido a temperatura de 25°C , que é a mesma das condições de teste, de onde vem o valor da tensão de máximo que foi grampeada no método, cujo valor é de $17,1\text{V}$ para um painel. A tensão grampeada foi de $34,2\text{V}$, já que temos dois painéis em série.

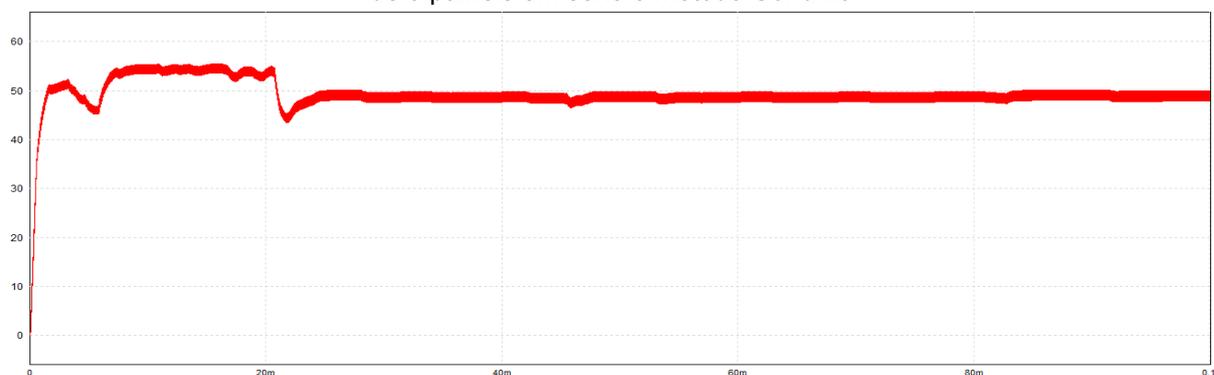
Para as condições de irradiância e temperatura apresentadas na Figura 35 foram simulados os métodos convencionais, já apresentados, em sistemas com três painéis ligados em série. Nas Figuras 39 a 41, observam-se a operação dos sistemas com os três diferentes métodos (P&O, CondInc e TenConst).

Figura 39 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método P&O



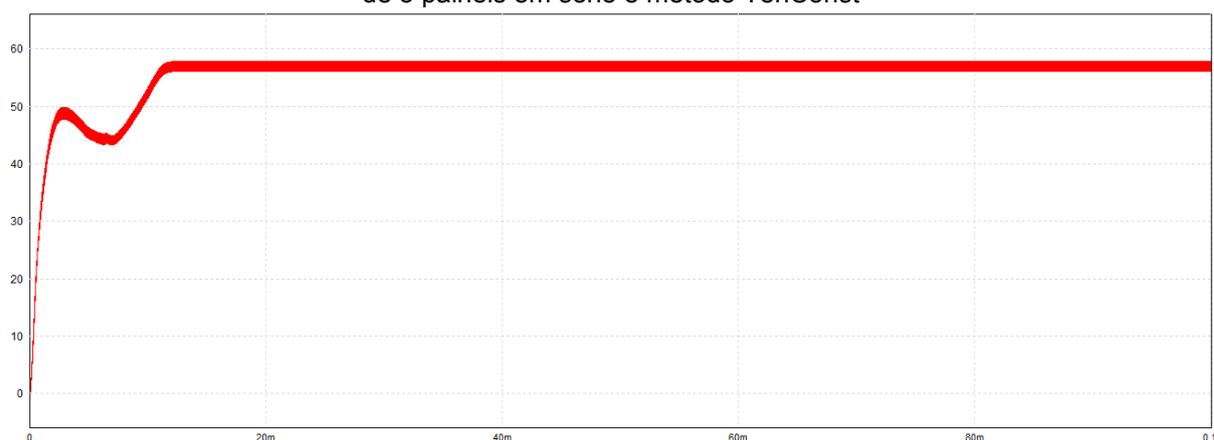
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 40 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método CondInc



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 41 - Curva de potência x tempo, com $S_i=500\text{W/m}^2$, $T_i=25^\circ\text{C}$, $k_1 = 0,6$ e $k_2 = 0,8$, para sistema de 3 painéis em série e método TenConst



Fonte: Autoria própria (2020).

Mais uma vez, observa-se que os métodos de P&O e CondInc não se mostraram tão efetivos, não encontrando o ponto de máximo global, onde $P = 59,207\text{W}$ (de acordo com a Figura 35). Novamente, o método de TenConst se mostrou

mais efetivo nesta simulação devido a temperatura de 25°C. A tensão grampeada foi de 51,3V, já que temos três painéis em série.

3.9 CONCLUSÕES

Antes de avançar em novas técnicas, assim como a proposta deste trabalho, percebeu-se como necessário o estudo de sistemas já implementados que contam com uma grande complexidade tecnológica, que possibilitaram o aprimoramento dos conhecimentos da área de estudo. Os métodos convencionais estudados se mostraram problemáticos em algumas condições de sombreamento parcial e alteração brusca de temperatura. Os resultados das simulações em condições de sombreamento parcial, utilizando-se cada um dos métodos apresentados, serão abordados novamente e comparados com o método de MPPT com Internet das Coisas, na seção 4.3 deste trabalho.

4 MPPT COM BANCO DE DADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Como visto no capítulo anterior, há vários métodos que já são utilizados para se obter o ponto de máxima potência na geração de energia fotovoltaica. No entanto, tem como desvantagem muitas oscilações em torno do MPP. Essas variações no ciclo ativo são como perturbações ao sistema, o que também não é muito desejável, por causarem perda de energia elétrica. O método P&O, por exemplo, que é um método de razoável capacidade de rastreamento de MPP, apresenta muito esta desvantagem, e, em situações de sombreamento parcial também não consegue encontrar o ponto de máximo global de potência do sistema (FIGUEIREDO, 2019).

Tendo isso em vista, propõe-se um novo método para se obter este ponto de máxima potência através do monitoramento da tensão e da corrente do painel, combinado a informações de irradiância recebida e temperatura no local, advindas de dispositivos sensores. Através da utilização destas informações em cálculos computacionais, espera-se acionar um ciclo ativo específico para o conversor acoplado ao painel solar, sem que seja necessário fazer diversas variações no ciclo ativo, não causando tanta perturbação ao sistema, e removendo limitações relacionadas a diferentes condições de radiação solar e temperatura. Além disso, o novo método proposto permite menor esforço computacional, uma vez que não serão necessários cálculos de derivadas, por exemplo, como o método visto anteriormente de Condutância Incremental.

Para o novo método a ser implementado, será utilizado o mesmo conceito do método de Tensão Constante, no qual também se grampeará um valor de tensão ao sistema para que o este busque operar na tensão determinada. Porém, neste novo método, serão determinados diferentes valores de tensão para diferentes conjuntos de valores de temperatura e irradiância do arranjo fotovoltaico. Estes dados serão advindos de simulações experimentais, que serão documentadas a seguir, criando um banco de dados que será acessado pelo sistema a cada iteração. A coleta da tensão de operação de máxima potência é feita por meio da conexão do software em que o MPPT está implementado com o banco de dados, através dos dados de corrente,

tensão, temperatura e irradiância fornecidos pelas informações geradas através dos sensores do sistema a todo momento. Com isso, espera-se que o arranjo sempre opere no ponto de máxima potência de geração, mesmo quando estiver submetido a condições de sombreamento parcial.

4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO MÉTODO MPPT COM BANCO DE DADOS

4.2.1 Software MATLAB

Para que fosse possível obter dados de potência máxima capaz de ser gerada pelos arranjos fotovoltaicos, escolhidos em diferentes possíveis condições climáticas, foi necessário simular as estruturas montadas no PSIM, apresentadas na Figura 32 e Figura 34 da seção 3.8.1 deste trabalho, dentro do software MATLAB, uma vez que este tornaria possível a automatização das mudanças de condições de temperatura e irradiância assim como a captação dos dados relacionados a máxima potência.

Dessa forma, criou-se uma rotina de iterações variando-se a temperatura em 1°C , de 1°C a 60°C , e a irradiância em 25 W/m^2 , desde 100 W/m^2 até 1000 W/m^2 . Realizou-se o mesmo com os valores de k_1 e k_2 , quando utilizados, variando-os em 0,05 para cada iteração do programa, de 0,05 a 1. Com isso, para cada um dos dados de entrada, se obtém o registro do dado de saída que equivale a tensão do ponto de máxima potência capaz de ser fornecida pelo sistema, a qual será utilizada pelo método de MPPT Tensão Constante para fornecer a potência desejada. O código para o programa do MATLAB foi fornecido pelo Prof. Dr. Adriano Ruseler, sendo de sua própria autoria.

4.2.2 Banco de Dados

Os bancos de dados gerados pelo MATLAB foram armazenados em um servidor MySQL, gerenciado pelo “phpmyadmin”. Esta ferramenta de software é capaz de executar a maioria das tarefas de administração, podendo-se fazer a criação do

banco de dados, executar consultas de valores e adicionar usuários que utilizarão as informações que este contém. Pode-se verificar na Figura 42, parte do banco de dados, com irradiância (S_i) igual a 500W/m^2 e a temperatura (T_i) variando de 25°C a 49°C , onde todos os dados são resultados da simulação no software PSIM.

Figura 42 - Parcela do registro do banco de dados com as máximas do sistema com 1 painel

id	Ti	Si	Pomax	Vomax	Iomax	Remax	Voc
30526	25	500	29.8042	16.7301	1.7776	9.4118	20.3304
30527	26	500	29.6856	16.6634	1.7776	9.374	20.2536
30528	27	500	29.567	16.5597	1.7815	9.2952	20.1767
30529	28	500	29.448	16.4929	1.7816	9.2575	20.0998
30530	29	500	29.3285	16.4259	1.7816	9.2196	20.0229
30531	30	500	29.2089	16.3224	1.7855	9.1414	19.9459
30532	31	500	29.0891	16.2553	1.7856	9.1036	19.869
30533	32	500	28.9687	16.1879	1.7856	9.0656	19.7919
30534	33	500	28.8481	16.0846	1.7895	8.9881	19.7149
30535	34	500	28.7273	16.0172	1.7896	8.9502	19.6378
30536	35	500	28.6061	15.9495	1.7896	8.9121	19.5607
30537	36	500	28.4844	15.8463	1.7936	8.8351	19.4836
30538	37	500	28.3628	15.7786	1.7936	8.7971	19.4064
30539	38	500	28.2408	15.7106	1.7936	8.759	19.3292
30540	39	500	28.1182	15.6423	1.7937	8.7208	19.252
30541	40	500	27.9956	15.5395	1.7976	8.6446	19.1748
30542	41	500	27.8728	15.4713	1.7976	8.6064	19.0975
30543	42	500	27.7494	15.4027	1.7977	8.5681	19.0202
30544	43	500	27.6257	15.3001	1.8016	8.4925	18.9429
30545	44	500	27.5021	15.2315	1.8016	8.4542	18.8655
30546	45	500	27.378	15.1627	1.8017	8.4158	18.7881
30547	46	500	27.2535	15.0937	1.8017	8.3773	18.7107
30548	47	500	27.1287	14.9913	1.8056	8.3025	18.6333
30549	48	500	27.0039	14.9222	1.8057	8.264	18.5558
30550	49	500	26.8786	14.853	1.8057	8.2255	18.4783

Fonte: Autoria própria (2020).

Observa-se na Figura 42, os dados que correspondem ao ponto de máxima potência do sistema onde cada item das linhas do banco de dados corresponde a:

Id – Índice do registro no Banco de dados;

Ti – Temperatura local de entrada;

Si – Irradiância local de entrada;

Pomax – Potência máxima do sistema nas condições de T_i e S_i ;

Vomax – Tensão fornecida pelo painel no ponto de máxima potência do sistema;

Iomax – Corrente fornecida pelo painel no ponto de máxima potência do sistema;

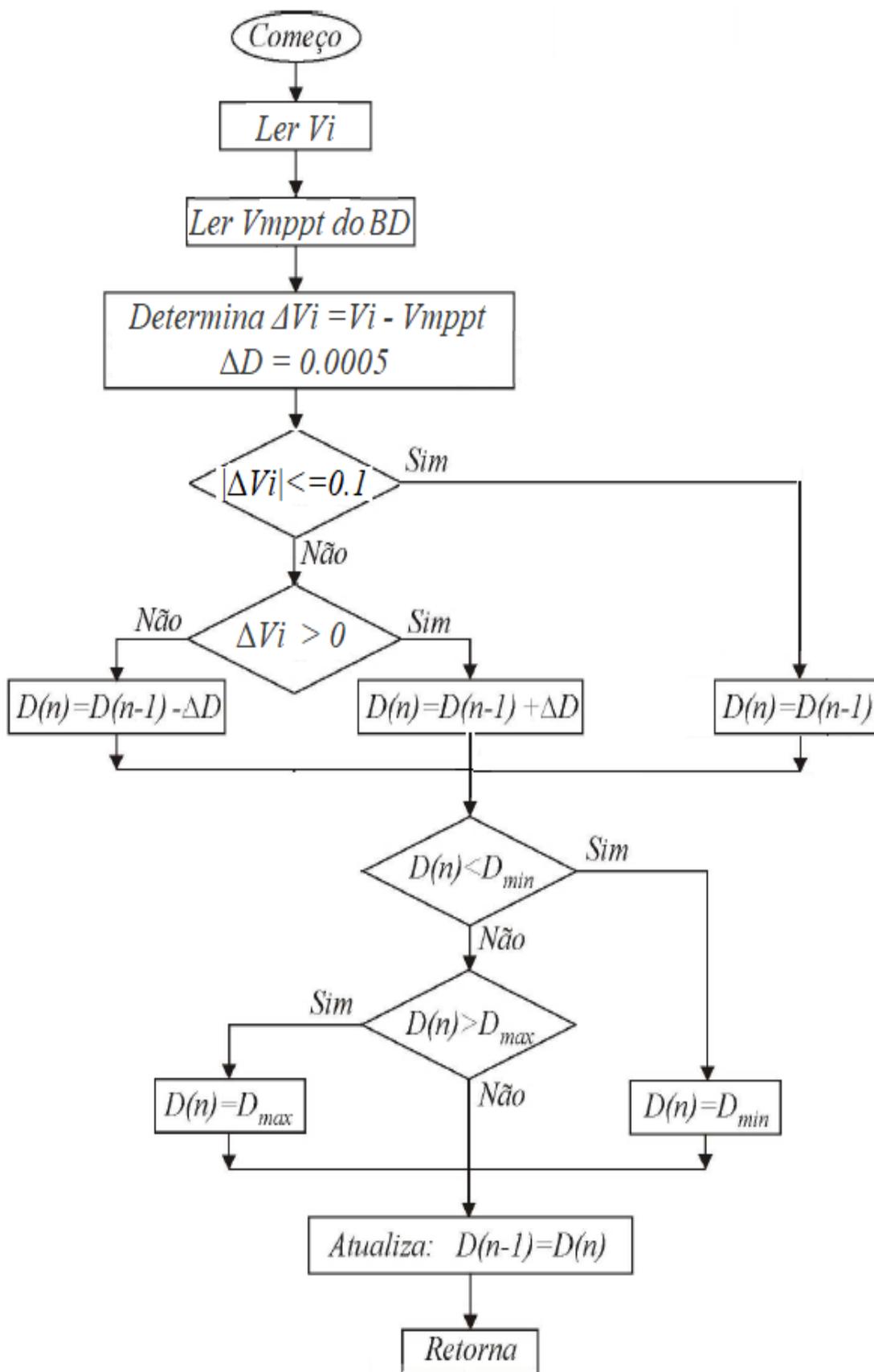
Remax – Máxima resistência emulada no ponto de máxima potência do sistema;

Voc – Tensão de Circuito aberto nas condições de T_i e S_i .

O item relevante do banco de dados, o qual permitirá o estudo e elaboração do método de MPPT, é o Vomax, que determinará a tensão na qual o painel deve operar para que forneça a máxima potência ao sistema (V_{mppt}), implementando assim o algoritmo de rastreamento.

O fluxograma da Figura 43 resume o funcionamento do método citado.

Figura 43 - Fluxograma do Método de Rastreo por Internet das Coisas

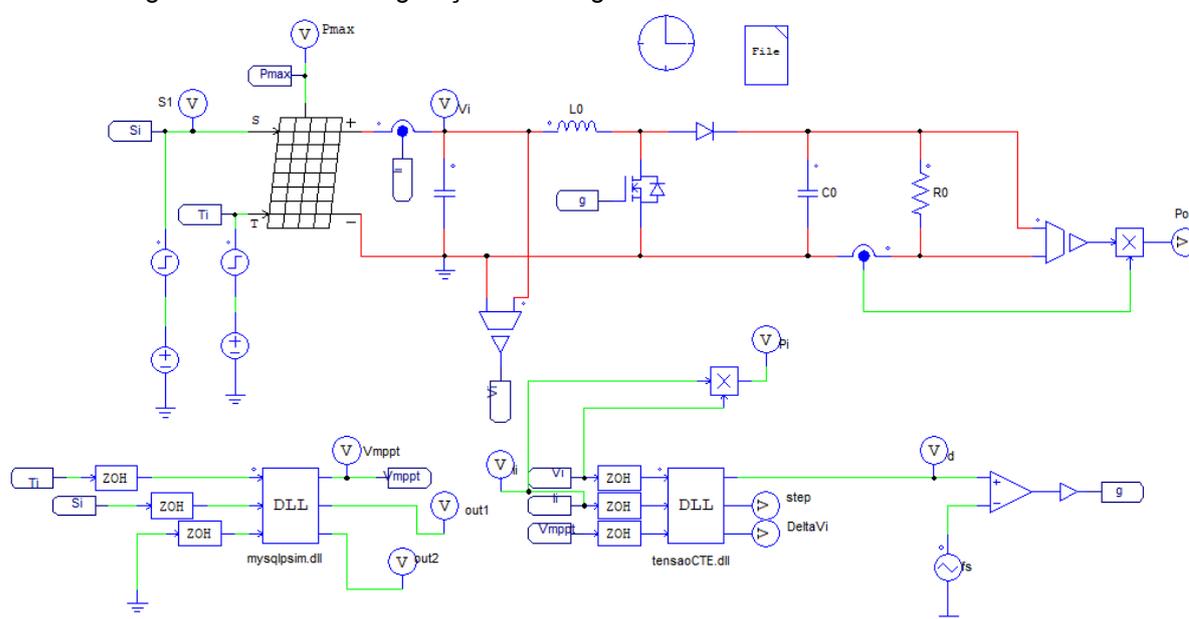


Fonte: Autoria própria (2020).

4.2.3 Simulação

Para que fosse possível testar o método de MPPT por Internet das Coisas via simulações, escolheu-se o software PSIM. A Figura 44 mostra o circuito de geração de energia fotovoltaico com o método de rastreamento desenvolvido. O conversor *Boost* deste projeto foi o mesmo utilizado nas simulações dos métodos tradicionais de MPPT.

Figura 44 - Circuito de geração de energia fotovoltaico com rastreamento via IoT

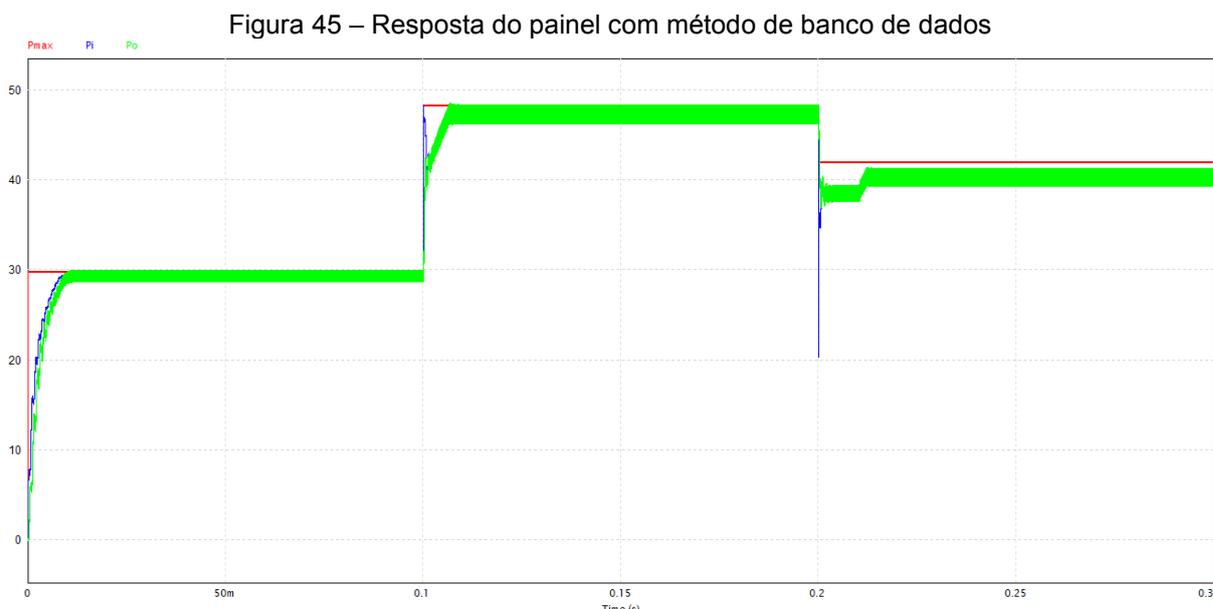


Fonte: Autoria própria (2020).

O painel observado na Figura 44 recebe uma taxa de irradiância (S_i) e temperatura local (T_i), determinando a condição de operação da geração de energia deste. Nas condições descritas, o painel será capaz de gerar uma certa faixa de tensão que necessitará de rastreamento para operar no ponto que gera a máxima potência.

A implementação do método de MPPT com Internet das Coisas foi feita utilizando-se código de programação em C++, inseridos em dois diferentes DLLs. Um destes contém o código que faz conexão com o banco de dados e retira os valores de tensão de máxima potência. Já o outro considera este valor de tensão para realizar o método tradicional de MPPT Tensão Constante e fornecer a potência desejada ao sistema. Os códigos utilizados estão descritos no APÊNDICE D deste trabalho.

Pode-se ver o resultado da simulação na Figura 45. Em azul, encontra-se a potência máxima (P_{max}) que o painel pode fornecer em diferentes condições de radiação solar e temperatura. E, em vermelho, vê-se a potência gerada pelo painel com o método utilizado.



4.2.4 Simulações do Sistema em Condições de Sombreamento Parcial

Como visto anteriormente, situações de sombreamento parcial são importantes para a coleta de dados do ponto de máxima potência em diferentes condições. Dessa forma, foram simulados circuitos com mais de um painel, a semelhança dos circuitos apresentados na seção 3.8.2, para os métodos convencionais, para verificar o funcionamento do método na condição de sombreamento.

4.2.4.1 Sombreamento parcial utilizando dois painéis

Para apresentar a eficiência do método, são demonstrados alguns dados de simulação referentes a diferentes condições de operação em sombreamento parcial

dos arranjos fotovoltaicos nos quatro diferentes métodos. Os dados de simulação de algumas condições climáticas e de sombreamento parcial são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Potência gerada em sombreamento parcial com dois painéis

Ti (°C)	Si (W/m ²)	K1	Pmáx-BD (W)	Pmáx-CondInc (W)	Pmáx-TensConst (W)	Pmáx-P&O (W)	Pmáx-IOT (W)
15	1000	0,6	81,5728	78,2612	79,0426	78,3420	78,3820
15	800	0,5	54,0552	50,5266	51,4468	49,3949	51,9607
15	700	0,3	43,9659	17,0180	22,9179	43,2264	42,3264
15	500	0,7	46,0406	42,9194	44,0539	30,2590	44,2002
20	1000	0,6	80,1386	76,8127	77,9457	77,0386	77,0654
20	800	0,5	53,3930	51,1291	51,2095	48,4154	51,2125
20	700	0,3	43,0842	16,9623	23,1624	42,3951	41,5339
20	500	0,7	45,3376	43,6772	43,7719	29,7221	43,5396
25	1000	0,6	78,6859	75,6695	76,6265	75,7194	75,7515
25	800	0,5	52,5470	50,3459	50,7955	47,4211	50,4313
25	700	0,3	42,1951	17,7309	23,3790	41,4941	40,6931
25	500	0,7	44,6147	42,8586	43,2795	29,1647	42,8425

Fonte: Autoria própria (2020).

Os índices das Tabelas 5 a 8 correspondem a: Temperatura do arranjo (Ti), Irradiância (Si), Constante que representa a porcentagem de Irradiância Si (K) e Potência Máxima (Pmáx) que refere se a Banco de Dados (BD) que é a referência de cálculo, para os métodos de Condutância Incremental (CondInc), Tensão Constante (TensConst), Perturba e Observa (P&O) e o método projetado de Internet das Coisas (IOT).

Observando os dados da Tabela 4, é possível verificar que em certas condições todos os métodos são bem eficazes, uma vez que todos eles conseguem de certa forma se aproximar da máxima potência do sistema. Por outro lado, em alguns pontos como em Ti = 25 °C, Si = 700 W/m², k1 = 0,3, isto é, com a irradiância no segundo painel igual a 210 W/m², os métodos de Condutância Incremental e Tensão constante não conseguem rastrear devidamente o ponto de máxima potência. Para análise da produtividade, que diz relação a eficiência energética de cada método de rastreo, calculou-se a média das potências encontradas por cada método e, com elas, a Equação 36. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

$$Produtividade (\%) = \frac{P_{\text{máx do método}}}{P_{\text{máx BD}}} * 100 \quad (36)$$

Tabela 5 - Produtividade efetiva com 2 painéis

Ti (°C)	Si (W/m ²)	K1	Pmáx-CondInc (%)	Pmáx-TensConst (%)	Pmáx-P&O (%)	Pmáx-IOT (%)
15	1000	0,6	95,94	96,90	96,04	96,09
15	800	0,5	93,47	95,17	91,38	96,13
15	700	0,3	38,71	52,13	98,32	96,27
15	500	0,7	93,22	95,68	65,72	96,00
20	1000	0,6	95,85	97,26	96,13	96,17
20	800	0,5	95,76	95,91	90,68	95,92
20	700	0,3	39,37	53,76	98,40	96,40
20	500	0,7	96,34	96,55	65,56	96,03
25	1000	0,6	96,17	97,38	96,23	96,27
25	800	0,5	95,81	96,67	90,25	95,97
25	700	0,3	42,02	55,41	98,34	96,44
25	500	0,7	96,06	97,01	65,37	96,03

Fonte: Autoria própria (2020).

Os métodos convencionais possuem a capacidade de produção de energia diminuída em alguns pontos condicionantes. Nos pontos descritos no parágrafo anterior, por exemplo, a produtividade chega a ficar abaixo de 60% nos métodos de Condutância Incremental e Tensão Constante. O método Perturba e Observa também em alguns pontos fica abaixo dos 70% da produção máxima. No entanto, observa-se que método de MPPT com IoT consegue garantir uma geração superior a 95,92% da potência máxima sob todas as condições relatadas na Tabela 5, apresentando-se mais eficaz que os métodos convencionalmente usados.

Apesar de se considerar apenas um pequeno número de amostras, é possível constatar que para todos os casos de sombreamento descritos nas tabelas, o novo método demonstrou um bom desempenho em comparação com os outros métodos testados em relação a aproximação dos pontos de máxima potência global que estão alocados no banco de dados.

4.2.4.2 Sombreamento parcial utilizando três painéis

Em sistemas onde a geração de energia é maior, é essencial reconhecer e verificar quais são as perdas e interferências que o sombreamento parcial pode causar na efetividade do sistema. Para isso, apresenta-se o levantamento de potência gerada com três painéis, sob diferentes condições e utilizando-se diferentes métodos, na Tabela 6.

Tabela 6 - Potência gerada em sombreamento parcial com 3 painéis

Ti (°C)	Si (W/m ²)	K1	K2	Pmáx-BD (W)	Pmáx-CondInc (W)	Pmáx-TensConst (W)	Pmáx-P&O (W)	Pmáx-IOT (W)
15	1000	0,6	0,4	84,0266	80,9518	77,2405	77,6170	81,1408
15	800	0,5	0,3	54,2190	51,9663	44,8033	51,8128	52,5281
15	700	0,8	0,5	73,9505	70,1271	66,9454	71,7652	71,8155
15	500	0,7	0,4	46,0406	44,3807	31,1653	43,5751	44,6072
20	1000	0,6	0,4	82,8013	79,5146	77,6696	75,4058	80,0066
20	800	0,5	0,3	53,3930	51,2934	45,3672	51,2057	51,7751
20	700	0,8	0,5	72,5998	69,4798	67,3650	69,9567	70,2937
20	500	0,7	0,4	45,3376	43,7754	32,1856	43,1700	43,9549
25	1000	0,6	0,4	81,5501	78,5437	77,7347	76,3000	78,8398
25	800	0,5	0,3	52,5469	50,5990	45,8875	50,6289	50,9977
25	700	0,8	0,5	71,2305	68,2661	67,4592	68,0182	68,9992
25	500	0,7	0,4	45,3376	42,3609	33,2225	42,6828	43,2706

Fonte: Autoria própria (2020).

Tomando-se novamente como referência a potência máxima contida no banco de dados, que representa a máxima potência possível sob cada condição de irradiância e temperatura, calculou-se a eficiência produtiva, vista na Tabela 7.

Tabela 7 - Produtividade efetiva com 3 painéis

Ti (°C)	Si (W/m ²)	K1	K2	Pmáx- CondInc (%)	Pmáx-TensConst (%)	Pmáx-P&O (%)	Pmáx-IOT (%)
15	1000	0,6	0,4	96,34	91,92	92,37	96,57
15	800	0,5	0,3	95,85	82,63	95,56	96,88
15	700	0,8	0,5	94,83	90,53	97,04	97,11
15	500	0,7	0,4	96,39	67,69	94,64	96,89
20	1000	0,6	0,4	96,03	93,80	91,07	96,62
20	800	0,5	0,3	96,07	84,97	95,90	96,97
20	700	0,8	0,5	95,70	92,79	96,36	96,82
20	500	0,7	0,4	96,55	70,99	95,22	96,95
25	1000	0,6	0,4	96,31	95,32	93,56	96,68
25	800	0,5	0,3	96,29	87,33	96,35	97,05
25	700	0,8	0,5	95,84	94,71	95,49	96,87
25	500	0,7	0,4	93,43	73,28	94,14	95,44

Fonte: Autoria própria (2020).

Em relação a produtividade, verifica-se que o método de MPPT com IoT demonstra maior eficiência, apresentando uma produtividade mínima de 95,44%, na condição de: Ti = 25 °C, Si = 500 W/m², k1 = 0,7 e k2 = 0,4. Neste mesmo ponto de operação o método de Condutância Incremental apresentou um erro de 93,43%, o Tensão Constante 73,28%, o Perturba e Observa 94,14%.

O novo método apresentou eficiência na geração de energia ao se aproximar do ponto de máxima potência global em relativamente todos os pontos discutidos e apresentados de sombreamento do conjunto, composto por três painéis em série,

demonstrada, assim, a veracidade e estabilidade do método, para diferentes cenários climáticos.

4.3 CONCLUSÕES

O novo método MPPT com busca da tensão de operação em banco de dados é eficiente em condições adversas citadas no decorrer do trabalho. Pode se observar que o método tem efetividade produtiva equivalente e em alguns casos superiores a outros já estudados e implementados em sistemas de geração fotovoltaica.

Apesar de verificar que o meio de rastreamento apresentado é considerado eficaz, o mesmo possui algumas limitações, quando se trata de informações providas do banco de dados uma vez que a temperatura inserida neste sempre é um número inteiro (positivo), isto é, se por exemplo o sensor de temperatura em campo ler uma temperatura $T=25,1^{\circ}\text{C}$, o banco de dados não comportará tal dado e possivelmente o rastreamento não será tão preciso para condições deste tipo.

Para a ampliação do arranjo de geração, no caso de 4 ou mais painéis, será necessário a elaboração de um banco de dados mais robusto e de certa forma muito mais complexo. Se buscássemos atingir 100% das condições climáticas, de sombreamento e do número total de painéis de um arranjo específico, seria preciso um banco de dados com uma grande quantidade de dados e haveria a necessidade de um grande esforço computacional para contornar cada limitação de geração.

5 MODELO DO MÉTODO DE MPPT COM BANCO DE DADOS PROVENIENTES DA INTERNET DAS COISAS

5.1 INTRODUÇÃO

Para a implementação do método de MPPT com busca de tensão em banco de dados, será utilizado o conceito de Internet das Coisas. Acoplado aos painéis solares haverá dispositivos de leitura (sensores) de corrente, tensão, temperatura e irradiância, os quais em tempo real, transferirão essas informações a um microcontrolador que atuará na mudança da razão cíclica de um conversor CC-CC.

Analisando a viabilidade de implementação e suas vantagens, viu-se que o uso desta tecnologia pode proporcionar a otimização e facilitar o controle de processos de rastreamento de máxima potência em geração de energia fotovoltaica. O conceito básico de interconexão de dispositivos via internet, deixou de ser apenas um conceito ou tendência, mas sim uma ferramenta do cotidiano. Por outro lado, para se implementar o conceito de Internet das Coisas em algum processo específico, é necessário o conhecimento da compatibilidade dos componentes a serem utilizados e seus protocolos de comunicação.

Diante disso apresenta-se as principais ferramentas necessárias para se realizar o método de rastreamento proposto neste trabalho. Serão expostos os equipamentos necessários e os softwares que poderão ser utilizados para o desenvolvimento do projeto, com o intuito de se conectar todo o conjunto a internet.

5.2 COMPONENTES ELETRÔNICOS

5.2.1 Microcontroladores

Os microcontroladores são de extrema importância para a obtenção do MPP, uma vez que são estes dispositivos que trabalham a lógica computacional programada do método que se deseja implementar.

Já que o conceito de IoT será explorado, há necessidade de um microcontrolador que se comunique com outros dispositivos na mesma rede. Um sistema de controle com comunicação Wi-Fi e Bluetooth se mostra ideal para a aplicação desejada.

Um exemplo para a confecção do sistema de controle é o ESP32, que pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Modelo ESP32



Fonte: Robocore (2018).

O microcontrolador em questão pode interagir com outros sistemas para fornecer funcionalidades Wi-Fi e Bluetooth por meio de suas interfaces SPI/SDIO ou I2C/UART. Além disso, é capaz de funcionar de forma confiável em ambientes industriais, com uma temperatura de operação que varia de -40°C a 125°C . Uma vez que é alimentado por circuitos avançados de calibração, o ESP32 pode remover dinamicamente as imperfeições do circuito externo e adaptar-se às mudanças nas condições externas (ROBOCORE, 2018).

No Quadro 1, encontram-se as especificações técnicas do módulo.

Quadro 1 - Informações técnicas do módulo ESP32

Especificações	
Processador	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
Memória Flash programável	4MB
Memória RAM	520KBytes
Memória ROM	448KBytes
Clock máximo	240MHz
Pinos Digitais GPIO	11 (todos com PWM)
Resolução do PWM	até 16 bits (ajustável via código)
Wireless	802,11 b/g/n – 2,4GHz (antena integrada)
Modos de operação	Access Point / Estação / Access Point + Estação
Bluetooth	Low Energy padrão 4.2 integrado

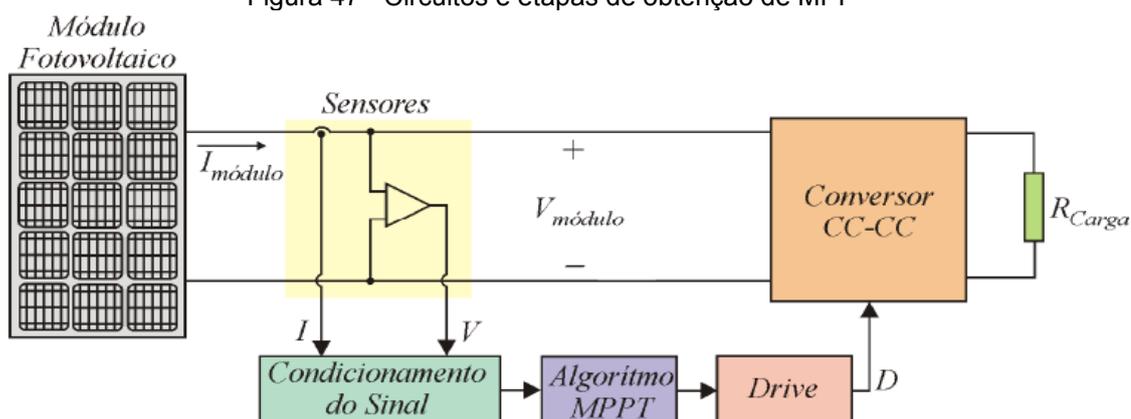
Fonte: Robocore (2018).

Este módulo será conectado à internet, captando as informações de temperatura e irradiância que serão transmitidas em tempo real por sensores acoplados ao arranjo fotovoltaico e possibilitando a comunicação e utilização de informação alojadas em bancos de dados previamente elaborados. A obtenção dos dados poderá ocorrer em cada painel ou cada grupo de painéis do sistema, dependendo da precisão desejada e da forma como foi arquitetado o seu arranjo.

5.2.2 Sensores

Conforme já apresentado, necessita-se da coleta de informações do sistema, tanto de corrente como de tensão de saída do painel, para o rastreamento do MPP. A figura 47 demonstra o conjunto de controle e rastreamento.

Figura 47 - Circuitos e etapas de obtenção de MPP



Fonte: COELHO (2008, p.75).

Em suma, o condicionamento depende diretamente da obtenção de tensão e corrente de saída do painel com uso de sensores, para que possam ser tratadas essas informações e com isso seja tomada a decisão necessária para que o conversor trabalhe sobre o ponto de máxima potência.

5.2.2.1 Sensor de corrente

A necessidade de obter a corrente de circuitos em ambientes externos e submetidos a variações climáticas exige a utilização de componentes de alta resistência e precisão. Para que isso seja possível, é necessário o uso de sensores especiais que possibilitam a maior exatidão e, ao mesmo tempo, que sejam capazes de transferir o valor lido para um microcontrolador, assim como o usado no desenvolvimento deste trabalho. Os sensores de efeito Hall, são os mais utilizados, devido a sua confiabilidade.

O sensoriamento por efeito Hall consiste na leitura de corrente pela variação de campo magnético gerada por esta, a qual percorre um condutor. Isto é, a corrente é capaz de gerar um campo magnético que pode ser lido por um sensor do tipo Hall. Os sensores invólucros possuem maior vantagem, já que não necessitam da interrupção do sistema para medição.

5.2.2.2 Sensor de tensão

Analogamente ao sensor de corrente, necessita-se a utilização de um equipamento de leitura de tensão, ligado a saída do painel. Com esse propósito, utilizam-se sensores de tensão que podem ser interligados entre o sistema e o controlador.

Para a leitura desta grandeza utilizam-se sensores especiais de tipo Hall, como citados anteriormente ou, com o uso de divisores de tensão, resistores que podem ser calibrados dependendo da configuração do microcontrolador a ser utilizado.

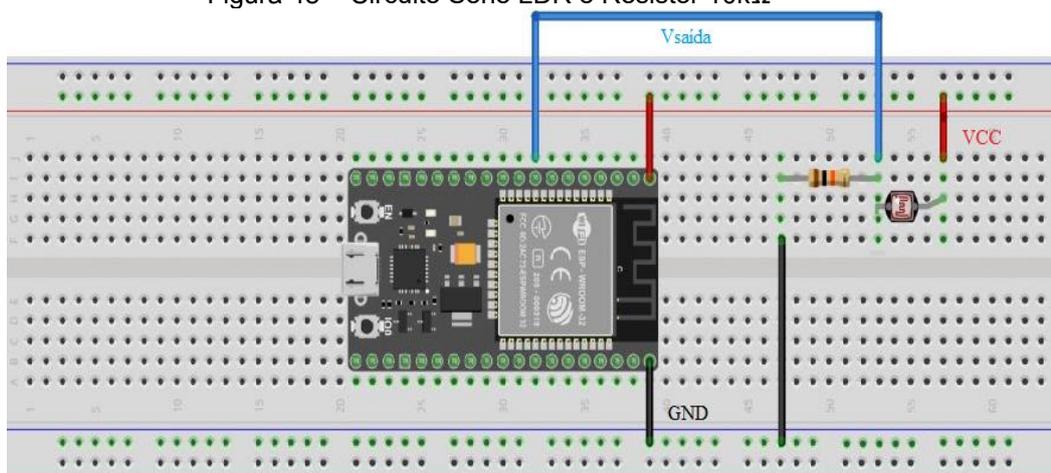
5.2.2.3 Sensor de irradiância (LDR)

O LDR ou o sensor de intensidade luminosa, é um tipo de resistor que sofre mudança na característica resistiva quando é exposto à luz. Esse componente resistivo também conhecido como fotorresistores, possuem alta resistência elétrica na ausência de luz e alta condutividade quando submetidos à ação da luz (MENESES, 2017).

Sua composição construtiva baseia se em materiais semicondutores, como por exemplo o Sulfeto de Cádmio (CdS) ou o Sulfeto de Chumbo (PbS), que variam sua resistência conforme o índice de luminosidade a eles expostos. A resistência elétrica do LDR sob luz intensa (10 Lux) pode variar entre 1 K Ω e 10 K Ω e na ausência de luminosidade é sempre superior a 200 K Ω , levando em conta os datasheets dos fabricantes (MENESES, 2017).

Segundo, para se encontrar os valores de irradiância é preciso utilizar a saída analógica do microcontrolador do modelo ESP32, ligando o sensor de luminosidade LDR em série com uma resistência de 10 k Ω (VIEIRA et al., 2015), como se vê na Figura 48.

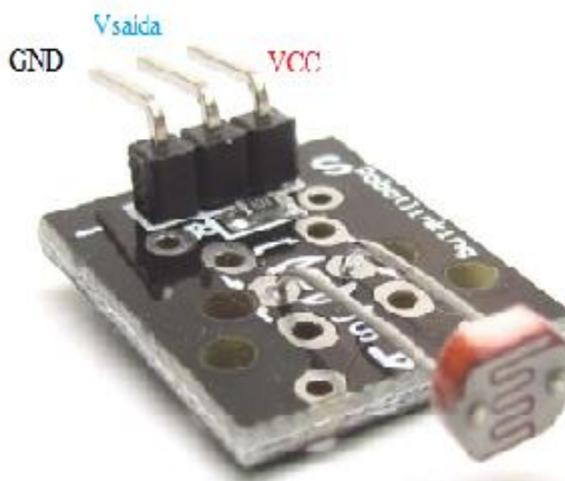
Figura 48 – Circuito Série LDR e Resistor 10kΩ



Fonte: IOMAKER (2018).

Ou utilizando um módulo, como na Figura 49.

Figura 49 - Circuito Série LDR e Resistor 10kΩ com módulo



Fonte: E-commerce de dispositivos eletrônicos¹.

Segundo o projeto desenvolvido por Vieira et al. (2015), que correspondem a dados empíricos do autor, submetendo-se a equação que converte a leitura de tensão do sensor para irradiância solar em W/m^2 , da seguinte forma:

$$Rad = 4464,9 \times e^{-17,73 \cdot Vsaída} \quad (37)$$

¹ Disponível em: <<https://www.tecnotronics.com.br/>>. Acessado em 02 nov. 2020.

Onde:

Rad - Irradiância Solar (W/m^2);

Vsaída - Tensão de saída lida pelo Microcontrolador.

5.3 SOFTWARES

5.3.1 PlatformIO

A Plataforma IoT utilizada para compilar a programação do ESP32 será a PlatformIO. Esta é um construtor de código entre plataformas e gerenciador de bibliotecas com plataformas como Arduino ou suporte a MBED. Esta Plataforma ainda pode operar em Windows, Mac ou Linux (PLATFORMIO, 2018).

O desenvolvimento do código a ser implementado não é feito diretamente no PlatformIO. Primeiramente, se escolhe o sistema operacional a ser utilizado e o editor de códigos. Posteriormente, o PlatformIO faz o trabalho de garantir que o código seja compilado, preparado e enviado para todos os painéis de interesse (PLATFORMIO, 2018).

O interessante desta plataforma é que ela facilita a transferência de projetos de um computador para o outro. Como é independente da plataforma em que está sendo executada, permite o fácil compartilhamento de projetos entre membros da equipe, independentemente do sistema operacional com o qual eles estejam trabalhando (PLATFORMIO, 2018).

5.3.2 Node-Red

O Node-RED é uma ferramenta de programação para conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online. Utiliza-se este software para tal aplicação, pois possui uma maneira simples de implementar as conexões que se necessitam (NODE-

RED, 2018). Basicamente, as edições da programação das conexões são feitas por nós e fluxos, sendo o editor de fluxos simples de usar, com um design relativamente intuitivo.

O Node-RED possui também um tempo de execução leve, cujo responsável por isso é o Node.js, o qual apresenta um modelo sem bloqueio e é orientado a eventos. Esta característica torna o software uma ótima ferramenta para se utilizar com sistemas com hardware de baixo custo, como o ESP32 (NODE-RED, 2018).

Os fluxos criados no Node-RED são armazenados usando o JSON, que também facilita a importação e exportação do conteúdo destes, a fim de auxiliar no seu compartilhamento (NODE-RED, 2018).

Portanto, este programa será o grande responsável pelas comunicações de hardware do nosso sistema. Todo recebimento de informações e a comunicação entre os dispositivos será guiada pelos fluxogramas que estarão contidos no software.

5.3.3 Protocolo MQTT

O MQTT foi o protocolo escolhido para conexão máquina-máquina (M2M) do sistema IoT. Este protocolo é pequeno e extremamente leve, possuindo baixo consumo de energia. Seu principal objetivo é transportar as informações que serão compartilhadas em pacotes de dados minimizados e com uma distribuição eficiente de informações. Ele é recomendável caso o local de implementação do projeto possua baixa largura de banda de rede e o sistema ofereça pouca memória de processamento (MQTT, 2018).

Além disso, é um protocolo muito utilizado para sistemas de automação de pequeno porte, como o utilizado neste projeto, com um único microcontrolador. Também é ideal para aplicativos móveis, caso se queira fazer um sistema de supervisão via celular ou tablet (MQTT, 2018).

5.3.4 Visual Studio Code

O Visual Studio Code é uma multiplataforma de edição de texto que a Microsoft disponibiliza para desenvolvedores de aplicações web, com suporte principalmente a ferramentas como ASP.NET 5 e Node.js. Portanto, todo o código será editado e desenvolvido nesta plataforma, que, associada ao PlatformIO, irá fazer a leitura e compilação de toda a programação.

Este software é de essencial interação com a aplicação deste trabalho e os softwares utilizados, destacando-se principalmente o Node-RED. O desenvolvimento web com essa ferramenta conta com ambientes conhecidos, assim como o Mac e Linux, mantendo a compatibilidade com Windows (DEVMEDIA, 2018).

O visual Studio, conta com serviços inteligentes de preenchimento de códigos, o IntelliSense, que auxilia na elaboração dos códigos desenvolvidos, com o uso de suas ferramentas e recursos. A depuração, isto é, a localização e remoção dos erros de software pode ser feita diretamente no editor.

Outro fato a se ressaltar é a compatibilidade do editor com a maioria das linguagens de programação. As linguagens comumente utilizadas no desenvolvimento web acompanham o produto, sendo elas: o JavaScript, CSS (Cascading Style Sheets), TypeScript e HTML. O pacote conta ainda com extensões avançadas do marketplace do editor, que fornecem suportes a centenas de outras linguagens (DEVMEDIA, 2018). E ainda mais importante que o Visual Studio Code torna possível a realização de trabalho locais e remotos, sendo o segundo o ponto crucial a aplicação desta ferramenta na realização deste, pois a implementação ocorre em armazenamento em nuvem, com o uso de banco de dados no próprio editor (DEVMEDIA, 2018).

5.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo se introduziu e discorreu sobre alguns dos dispositivos e ferramentas necessárias para a implementação do novo método proposto, que foram

utilizadas e aprofundadas com objetivo de demonstrar as características, vantagens e desvantagens e limitações do novo método.

Com isso, apesar de não sido feita a implementação prática do projeto, viu-se interessante transcrever sobre os equipamentos, softwares e os protocolos de comunicação destes via internet. Com o intuito de estimular o avanço tecnológico e científico, a fim de se buscar maior eficiência e sustentabilidade energética, foi aqui exposto todo o conhecimento adquirido para a elaboração deste projeto.

6 CONCLUSÕES FINAIS

Em meio a mudanças climáticas e ao progresso tecnológico que impactam diretamente ao meio ambiente, é de extrema necessidade o estudo e aprimoramento de alternativas na geração de energia afim de preservar as fontes naturais ainda não exploradas. Novas técnicas e projetos na exploração de energia estão sendo estudados e desenvolvidos no intuito de se diminuir os impactos ambientais em rumo à sustentabilidade.

A geração fotovoltaica por si só, ou seja, o objeto painel solar, possui pequena capacidade produtiva devido as limitações já explanadas nesse documento. Para contornar as restrições produtivas desta fonte energética, são apresentados e estudados métodos de rastreamento do ponto de máxima potência do sistema fotovoltaico.

Observou-se que os métodos convencionais são extremamente eficazes no rastreamento de máxima potência, apesar de cada um possuir suas limitações. Verificou-se pela literatura e no decorrer do estudo em forma de simulações, que o sombreamento parcial do arranjo fotovoltaico é o maior fator delimitador dos métodos convencionais apresentados.

Diante disso, desenvolveu-se um método que se baseia na busca do ponto de máxima potência em banco de dados, o qual também será posteriormente implementado via Internet das Coisas, buscando conformar a tecnologia fotovoltaica com a crescente tendência do uso do IoT. O método foi desenvolvido baseado no método de rastreamento de Tensão Constante, porém, variando-se a tensão que leva ao ponto de máxima potência do sistema de acordo com o banco de dados.

O método desenvolvido mostrou se eficaz, contornando as condições de sombreamento impostas e demonstrou ótima resposta no rastreamento de máxima potência na maioria das configurações de arranjo vistos no decorrer do trabalho.

O uso de IoT tornou-se uma ferramenta interessante que permite a comunicação mútua de equipamentos e dispositivos via internet. O conceito de internet das coisas tornou se comumente comentado no dia a dia do mundo tecnológico. A principal tendência para o uso dessa ferramenta é o fato de não utilizar

cabos para transmissão de dados, mas sim conexão via wireless. Outro fator e não menos importante, é a exploração e o aprimoramento do uso desse conceito em diversas áreas, como no monitoramento e controle de geração de energia fotovoltaica.

O método imposto apesar de apresentar suas vantagens, também possui algumas limitações, baseadas na obtenção computacional de informações a serem inseridas no banco de dados criado. A interpolação de temperatura e irradiância para um arranjo complexo pode tornar o banco de dados gigantesco e de difícil acesso. Outro fato enfrentado, é que para se emular o sistema, deve se conhecer todas as características dos painéis nele presente para que seja possível a criação da base de dados. Diferenciando-se de outros métodos que, apesar de serem limitados nas condições de sombreamento por exemplo, são capazes de rastrear o ponto de máxima potência conhecendo-se as mínimas características do sistema em que estão inseridos.

REFERÊNCIAS

ALIGER. 2019. **Os sensores IoT e suas aplicações na agricultura e pecuária**. Disponível em: <https://www.aliger.com.br/blog/conheca-os-sensores-iot-e-sua-aplicabilidade-na-agricultura-e-pecuaria>. Acesso em: 10-nov-2020.

ANEEL, **ENERGIA SOLAR**. São Paulo. 2018.

ASHTON, Kevin et al. That 'internet of things' thing. **RFID journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009.

AWS IOT. Amazon Web Services, 2018. **Serviços de IoT para soluções de uso industrial, de consumo e comerciais**. Disponível em: <https://bityli.com/qUQgV>. Acesso em: 13-nov-2018.

CARNEIRO, J. **Electromagnetismo b módulos fotovoltaicos características e associações**. Universidade do Minho Escola de Ciências Departamento de Física Campus de Azurém, Guimarães. 2010.

CARVALHO, Edson de Paula. **Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos**. 2012.

COELHO, Roberto Francisco et al. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos**. 2008.

DA SILVA, Thalita Bento et al. **A internet das coisas: será a internet do futuro ou está prestes a se tornar a realidade do presente?**. Engenharias On-line, v. 1, n. 1, p. 41-50, 2015.

DE ABREU, Ricardo Augusto Santos. **Caracterização elétrica de células solares de tripla junção–GaInP/GaAs/Ge**. 2006. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

DEVMEDIA. 2018. **Introdução ao Visual Studio Code**. Disponível em: <https://www.devmedia.com.br/introducao-ao-visual-studio-code/34418>. Acesso em: 23-nov-2018.

FRAAS, L. M.; PARTAIN, L. D. **Solar cells and their applications**. John Wiley & Sons, 2010.

GALEGALE, Gustavo Perri et al. INTERNET DAS COISAS APLICADA A NEGÓCIOS-UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO. **JISTEM-Journal of Information Systems and Technology Management**, v. 13, n. 3, p. 423-438, 2016.

IOMAKER. 2018. **Sensor LDR Com Arduino e ESP32**. Disponível em: <https://www.iomaker.com.br/sensor-ldr-com-arduino-e-esp32/>. Acesso em: 16-nov-2020.

IPESI. Observatórios SESI/ SENAI/ IELS. **Weg e IBM produzem painel solar monitorado pela internet das coisas**. Disponível em: <https://bityli.com/rRan6>. Acesso em: 18-nov-2018.

JÚNIOR, O. L. **Conversor Buck/Boost a quatro chaves com modo bypass em MPPT aplicado ao carregamento de baterias a partir de painéis fotovoltaicos**. Escola de Engenharia Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, v. 22, 2013.

LIMA, Welton Dias. A internet das coisas. **TECNOLOGIAS EM PROJEÇÃO**, v. 8, n. 2, p. 67-78, 2017.

LOPES, Ricardo Jorge Cabral. **Efeito do sombreamento nos painéis fotovoltaicos**. 2013. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

MAIA, Rian Sardinha et al. **Energia solar: o desenvolvimento de um novo mercado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2018.

MENESES, André. **Tudo sobre LDR**. Mundo Engenharia. 3 de outubro de 2017. Disponível em: <http://mundoengenharia.com.br/tudo-sobre-ldr-resistor-dependente-da-luz>. Acesso em: 06-nov-2020.

MEZAROBA. **Modulação PWM**. Disponível em: http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/mezaroba/materiais/Modulacao_PW M.pdf. Acesso em: 24-nov-2018.

MICROSOFT AZURE. 2018. **Visual Studio Code – Editor de códigos | Microsoft Azure**. Disponível em: <https://azure.microsoft.com/pt-br/products/visual-studio-code/>. Acesso em: 23-nov-2018.

MQTT. 2018. **MQTT: The Standard for IoT Messaging**. Disponível em: <https://mqtt.org/>. Acesso em: 22-nov-2018.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasília. Câmara dos Deputados, 2017.

NODE-RED. 2018. **Low-code programming for event-driven applications**. Disponível em: <https://nodered.org/>. Acesso em: 22-nov-2018.

OLIVEIRA, Fernando Marcos de et al. **Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PETRY, Clóvis Antônio. **Introdução aos Conversores CC-CC**. 2001.

PINTO, Bruno Schoralick; VALENTE, Wander Antunes Gaspar. **A internet das coisas aplicada às cidades inteligentes**. Caderno de Estudos em Sistemas de Informação, v. 1, n. 1, 2014.

PLANA-FATTORI, Artemio; CEBALLOS, Juan Carlos. **Glossário de Termos Técnicos em Radiação Atmosférica**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, v. 2, 2009. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/glossar/glossar.htm>. Acesso em: 19-nov-2020.

PLATFORMIO. 2014. **What is PlatformIO?**. Disponível em: <https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>. Acesso em: 22-nov-2018.

ROBOCORE. 2018. **ESP32 - WiFi & Bluetooth**. Disponível em: <https://www.robocore.net/loja/produto/esp32-wifi-bluetooth.html>. Acesso em: 19-nov-2018.

SHAYANI, Rafael Amaral; OLIVEIRA, MAG de; CAMARGO, IM de T. **Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais**. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (V CBPE). Brasília. 2006. p. 60.

SILVA, Rutelly Marques da. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, 2015.

SOLAREX. **MSX-60 and MSX-64 Photovoltaic Modules**. Maryland: [s.n.], 1998.

TENÓRIO, A. N. de O. L. **Projeto e construção de um conversor boost para rastreamento de máxima potência em sistemas fotovoltaicos**. 2017.

VALLÊRA, Antônio M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, v. 1, n. 2, p. 17, 2006.

VIEIRA, ROMÊNIA GURGEL. et al. **Medição de radiação solar global utilizando sensor Idr**. 2015.

ZAGO, Ricardo Mazza et al. **Sistema de baixo custo para monitoramento da geração de energia solar com conexão para Internet das Coisas**. 2018.

ZATIONS, Deividi F. et al. Comparative analysis of buck and boost converters applied to different maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems. In: **2017 Brazilian power electronics conference (COBEP)**. IEEE, 2017. p. 1-6.

APÊNDICE A – Código DLL do P&O

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "dll.h"
#include <windows.h>
#include <math.h>

double t; /*!< Time, passed from PSIM by value */
double delt; /*!< Time step, passed from PSIM by value */
double *in; /*!< Input array, passed from PSIM by reference */
double *out; /*!< Output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM) */

/** \brief DLL routine funtion.
 * \param t: Time, passed from PSIM by value
 * \param delt: Time step, passed from PSIM by value
 * \param in: Input array, passed from PSIM by reference
 * \return output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM)
 *
 * The maximum length of the input and output array "in" and "out" is
30.
 *
 * PSIM calls the DLL routine at each simulation time step. However,
when the inputs of the DLL block are connected to the output of one of
these discrete elements
 * (zero-order hold, unit delay, integrator, differentiator, z-
domain transfer function block, and digital filters),
 * the DLL block is considered as a discrete element. In this
case, the DLL block is called only at the discrete times.
 *
 * The DLL block receives the values from PSIM as the input,
performs the calculation, and sends the output back to PSIM.
 * The node assignments are: the input nodes are on the left, and
the output nodes are on the right. The sequence is from the top to the
bottom.
 *
 */

__stdcall void simuser (double t, double delt, double *in, double *out)
{
// Place your code here.....begin

/// Define "sum" as "static" in order to retain its value.
static double Pi1=0, Vi1=0, D1=0;

double delta_duty_cycle = 0.0005;
double max_val = 0.90;
double min_val = 0.40;

```

```

static double duty_cycle=0.6;
static double step;
double DeltaPi, DeltaVi, DeltaD;
//double R0; /*!< Variable to recieve voltage value */
//double Pmax; /*!< Variable to recieve current value */
double Vi; // tensão de entrada
double Ii; // corrente de entrada
double Pi; // potência de entrada

Vi = in[0]; // tensão de entrada
Ii = in[1]; // corrente de entrada

Pi=Vi*Ii; // Calcula potência de entrada

DeltaPi=Pi-Pi1; // Delta de Potencia
DeltaVi=Vi-Vi1; // Delta de tensão

if( DeltaPi == 0){ // Sem variação de potência
    step = 0; // Mantém razão cíclica
}
else if( DeltaPi > 0){ // Incremento de potência
    if(DeltaVi > 0) // Incremento de tensão
        step = -1*delta_duty_cycle; // Reduz a razão cíclica
    else
        step = delta_duty_cycle; // Incrementa a razão cíclica
}
else if( DeltaPi < 0){ // Decremento de potência
    if(DeltaVi > 0) // Incremento de tensão
        step = delta_duty_cycle; // Incrementa razão cíclica
    else
        step = -1*delta_duty_cycle; // Decrementa razão cíclica
}

duty_cycle = duty_cycle + step; // Aplica incremento na razão cíclica
if(duty_cycle < min_val) // Limita a razão cíclica
    duty_cycle = min_val;
else if(duty_cycle > max_val)
    duty_cycle = max_val;

Vi1=Vi; // Atualiza tensão anterior
Pi1=Pi; // Atualiza potência anterior

out [0]=duty_cycle;
out [1]=DeltaPi;
out [2]=DeltaVi;

}

```

APÊNDICE B - Código DLL do Condutância Incremental

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "dll.h"
#include <tchar.h>
#include <stdlib.h>
#include <windows.h>
#include <math.h>

double t; /*!< Time, passed from PSIM by value */
double delt; /*!< Time step, passed from PSIM by value */
double *in; /*!< Input array, passed from PSIM by reference */
double *out; /*!< Output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM) */

/** \brief DLL routine funtion.
    * \param t: Time, passed from PSIM by value
    * \param delt: Time step, passed from PSIM by value
    * \param in: Input array, passed from PSIM by reference
    * \return output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM)
    *
    * The maximum length of the input and output array "in" and "out" is
30.
    * PSIM calls the DLL routine at each simulation time step. However,
when the inputs of the DLL block are connected to the output of one of
these discrete elements
    * (zero-order hold, unit delay, integrator, differentiator, z-
domain transfer function block, and digital filters),
    * the DLL block is considered as a discrete element. In this
case, the DLL block is called only at the discrete times.
    *
    * The DLL block receives the values from PSIM as the input,
performs the calculation, and sends the output back to PSIM.
    * The node assignments are: the input nodes are on the left, and
the output nodes are on the right. The sequence is from the top to the
bottom.
    *
    */
__stdcall void simuser (double t, double delt, double *in, double *out){

/// Define "sum" as "static" in order to retain its value.
    static double Pi1=0, Vi1=0, Ii1=0;
    static double delta_duty_cycle =0;

    double max_val = 0.90;
    double min_val = 0.40;
    static double duty_cycle=0.6;
    static double step;

```

```

double DeltaPi, DeltaVi, DeltaIi;
double Vi; // tensão de entrada
double Ii; // corrente de entrada
double Pi; // potência de entrada

Vi = in[0]; // Delta de tensão de entrada
Ii = in[1]; // Delta de potência na entrada

Pi=Vi*Ii; // Calcula potência de entrada
DeltaVi=Vi-Vi1; // Delta de tensão
DeltaIi=Ii-Ii1; // Delta de corrente
DeltaPi=Pi-Pi1; // Delta de Potencia
delta_duty_cycle = (0.0005*(abs(DeltaPi/DeltaVi))); //0.0003;

if( DeltaVi == 0){ // Sem variação de potência
    if(DeltaIi == 0){
        step = 0;
    }
    else if(DeltaIi > 0){
        step = delta_duty_cycle;
    }
    else
        step = -1*delta_duty_cycle;
}

if( DeltaVi != 0){

if(((DeltaIi/DeltaVi)+(Ii/Vi))==0){
    step = 0;
}
else if(((DeltaIi/DeltaVi)+(Ii/Vi))>0)
    step = -1*delta_duty_cycle;

else
step =delta_duty_cycle;
}

duty_cycle = duty_cycle + step; // Aplica incremento na razão cíclica
if(duty_cycle < min_val) // Limita a razão cíclica
    duty_cycle = min_val;
else if(duty_cycle > max_val)
    duty_cycle = max_val;

Vi1=Vi; // Atualiza tensão anterior
Ii1=Ii;
Pi1=Pi; // Atualiza potência anterior

out [0]=duty_cycle;
out [1]=DeltaPi;
out [2]=step;

}

```

APÊNDICE C - Criação DLL do Tensão Constante

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "dll.h"
#include <windows.h>
#include <math.h>

double t; /*!< Time, passed from PSIM by value */
double delt; /*!< Time step, passed from PSIM by value */
double *in; /*!< Input array, passed from PSIM by reference */
double *out; /*!< Output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM) */

/** \brief DLL routine funtion.
 * \param t: Time, passed from PSIM by value
 * \param delt: Time step, passed from PSIM by value
 * \param in: Input array, passed from PSIM by reference
 * \return output array, sent back to PSIM (Note: the values of
out[*] can be modified in PSIM)
 *
 * The maximum length of the input and output array "in" and "out" is
30.
 *
 * PSIM calls the DLL routine at each simulation time step. However,
when the inputs of the DLL block are connected to the output of one of
these discrete elements
 * (zero-order hold, unit delay, integrator, differentiator, z-
domain transfer function block, and digital filters),
 * the DLL block is considered as a discrete element. In this
case, the DLL block is called only at the discrete times.
 *
 * The DLL block receives the values from PSIM as the input,
performs the calculation, and sends the output back to PSIM.
 * The node assignments are: the input nodes are on the left, and
the output nodes are on the right. The sequence is from the top to the
bottom.
 *
 */
*/

__stdcall void simuser (double t, double delt, double *in, double *out)
{
// Place your code here.....begin

/// Define "sum" as "static" in order to retain its value.
    static double Pi1=0, Vi1=0, D1=0;
    static double duty_cycle=0.6;
    static double step;

    double delta_duty_cycle = 0.0005;
    double max_val = 0.9;

```

```

    double min_val = 0.3;

    double DeltaPi, DeltaVi, DeltaD;
    //double R0; /*!< Variable to recieve voltage value */
    //double Pmax; /*!< Variable to recieve current value */
    double Vi; // tensão de entrada
    double Ii; // corrente de entrada
    double Pi; // potência de entrada
    double Vmppt; // Tensão de MPPT

Vi = in[0]; // tensão de entrada
Ii = in[1]; // corrente de entrada
Vmppt = in[2]; // Tensão de MPPT

//Pi=Vi*Ii; // Calcula potência de entrada

// DeltaPi=Pi-Pi1; // Delta de Potencia
DeltaVi=Vi-Vmppt; // Delta de tensão

if( (abs(DeltaVi)) <= 0.1){ // Sem variação de tensão
    step = 0; // Mantém razão cíclica
}
else if( DeltaVi > 0){ // Incremento de tensão
    step = delta_duty_cycle; // Incrementa a razão cíclica
}
else if( DeltaVi < 0){ // Decremento de tensão
    step = -1*delta_duty_cycle; // Incrementa razão cíclica
}

duty_cycle = duty_cycle + step; // Aplica incremento na razão cíclica
if(duty_cycle < min_val) // Limita a razão cíclica
    duty_cycle = min_val;
else if(duty_cycle > max_val)
    duty_cycle = max_val;

Vi1=Vi; // Atualiza tensão anterior
Pi1=Pi; // Atualiza potência anterior

out [0]=duty_cycle;
out [1]=step;
out [2]=DeltaVi;

}

```

APÊNDICE D – Criação do DLL para banco de dados

Busca Tensão de Máxima Potência 1 Pannel:

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "main.h"
#include <windows.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <iostream>
#include <mysql.h>
#include <mysqld_error.h>
#include <string.h>

extern "C"
{

    //////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
    // FUNCTION: SimulationStep
    // This function runs at every time step.
    //double t: (read only) time
    //double delt: (read only) time step as in Simulation control
    //double *in: (read only) zero based array of input values. in[0]
is the first node, in[1] second input...
    //double *out: (write only) zero based array of output values.
out[0] is the first node, out[1] second output...
    //int *pnError: (write only) assign *pnError = 1; if there is an
error and set the error message in szErrorMsg
    // strcpy(szErrorMsg, "Error message here...");
    DLL_EXPORT void SimulationStep(
        double t, double delt, double *in, double *out,
        int *pnError, char * szErrorMsg,
        void ** ptrUserData, int nThreadIndex, void *
pAppPtr)
    {

        // Place your code here.....begin

        MYSQL *conn; //Ponteiro para Objeto MYSQL
        MYSQL_RES *res; //Aguarda os resultados para serem definidos
        MYSQL_ROW row;
        double result=0;
        char *voltage; /*Ponteiro para armazenar o retorno do valor da tensão*/

        int Tint = (int)round(in[0]);

```

```

    int Sint = (int)round(in[1]);

    std::string consultaSQL = "SELECT Vomax FROM mppt01 WHERE Ti = "+
std::to_string(Tint) +" and Si = "+ std::to_string(Sint); //Query para ser
rodada no banco de dados
const char *ponteiroConsultaSQL = consultaSQL.c_str(); //Ponteiro char da
consultaSQL, pois a função mysql_query() só aceita char*.

    //Inicializa a conexão MYSQL
    if(!(conn = mysql_init(0))){
        out[2] = 1;
    }else{
        out[2] = 0;
    }

    //Cria uma conexão com Servidor MYSQL com base nos parâmetros
definidos acima.
    conn = mysql_real_connect(conn, "localhost", "matla",
"yOT14iH8KZaybgw8", "matla", 3306, NULL, 0);

    //Faz uma consulta SQL no banco de dados.
    mysql_query(conn, ponteiroConsultaSQL);

    //Armazena uma referência dos resultados da consulta na memória.
    res = mysql_use_result(conn);

    while ((row = mysql_fetch_row(res)) != NULL)
    {
        voltage = row[0]; //Ponteiro do resultado da consulta
        result = atof(voltage);
        //      std::cout << "success, " << " x = " << result << std::endl;
        //      printf(voltage); //Imprime o valor do ponteiro
    }

    //Encerra a conexão
    mysql_free_result(res); //Libera o resultado da Memória.
    mysql_close(conn); //Encerra a conexão MYSQL.

        out[0] = result;
        out[1] = Tint;
        out[2] = Sint;

    // Place your code here.....end

        *pnError = 0; //Success
    }
}

```

Busca Tensão de Máxima Potência 2 Painéis:

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "main.h"
#include <windows.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <iostream>
#include <mysql.h>
#include <mysql_error.h>
#include <string.h>

extern "C"
{

    //////////////////////////////////////
    // FUNCTION: SimulationStep
    // This function runs at every time step.
    //double t: (read only) time
    //double delt: (read only) time step as in Simulation control
    //double *in: (read only) zero based array of input values. in[0]
is the first node, in[1] second input...
    //double *out: (write only) zero based array of output values.
out[0] is the first node, out[1] second output...
    //int *pnError: (write only) assign *pnError = 1; if there is an
error and set the error message in szErrorMsg
    // strcpy(szErrorMsg, "Error message here...");
    DLL_EXPORT void SimulationStep(
        double t, double delt, double *in, double *out,
        int *pnError, char * szErrorMsg,
        void ** ptrUserData, int nThreadIndex, void *
pAppPtr)
    {

        // Place your code here.....begin

        MYSQL *conn; //Ponteiro para Objeto MYSQL
        MYSQL_RES *res; //Aguarda os resultados para serem definidos
        MYSQL_ROW row;
        double result=0;
        char *voltage; /*Ponteiro para armazenar o retorno do valor da tensão*/

        int Tint = (int)round(in[0]);
        int Sint = (int)round(in[1]);
        double Klint = (in[2]);

```

```

std::string consultaSQL = "SELECT Vomax FROM mppt02 WHERE Ti = "+
std::to_string(Tint) +" and Si = "+ std::to_string(Sint) +" and K1 = "+
std::to_string(K1int); //Query para ser rodada no banco de dados
const char *ponteiroConsultaSQL = consultaSQL.c_str(); //Ponteiro char da
consultaSQL, pois a função mysql_query() só aceita char*.

```

```

//Inicializa a conexão MYSQL
if(!(conn = mysql_init(0))){
    out[2] = 1;
}else{
    out[2] = 0;
}

//Cria uma conexão com Servidor MYSQL com base nos parâmetros
definidos acima.
conn = mysql_real_connect(conn, "localhost", "matla",
"yOT14iH8KZAybgw8", "matla", 3306, NULL, 0);

//Faz uma consulta SQL no banco de dados.
mysql_query(conn, ponteiroConsultaSQL);

//Armazena uma referência dos resultados da consulta na memória.
res = mysql_use_result(conn);

while ((row = mysql_fetch_row(res)) != NULL)
{
    voltage = row[0]; //Ponteiro do resultado da consulta
    result = atof(voltage);
    // std::cout << "success, " << " x = " << result << std::endl;
    // printf(voltage); //Imprime o valor do ponteiro
}

//Encerra a conexão
mysql_free_result(res); //Libera o resultado da Memória.
mysql_close(conn); //Encerra a conexão MYSQL.

    out[0] = result;
    out[1] = Tint;
    out[2] = Sint;

// Place your code here.....end

    *pnError = 0; //Success
}

}

```

Busca Tensão de Máxima Potência 3 Painéis:

```

/* Replace "dll.h" with the name of your header */
#include "main.h"
#include <windows.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <iostream>
#include <mysql.h>
#include <mysql_error.h>
#include <string.h>

extern "C"
{

    //////////////////////////////////////
    // FUNCTION: SimulationStep
    // This function runs at every time step.
    //double t: (read only) time
    //double delt: (read only) time step as in Simulation control
    //double *in: (read only) zero based array of input values. in[0]
is the first node, in[1] second input...
    //double *out: (write only) zero based array of output values.
out[0] is the first node, out[1] second output...
    //int *pnError: (write only) assign *pnError = 1; if there is an
error and set the error message in szErrorMsg
    // strcpy(szErrorMsg, "Error message here...");
    DLL_EXPORT void SimulationStep(
        double t, double delt, double *in, double *out,
        int *pnError, char * szErrorMsg,
        void ** ptrUserData, int nThreadIndex, void *
pAppPtr)
    {

        // Place your code here.....begin

        MYSQL *conn; //Ponteiro para Objeto MYSQL
        MYSQL_RES *res; //Aguarda os resultados para serem definidos
        MYSQL_ROW row;
        double result=0;
        char *voltage; /*Ponteiro para armazenar o retorno do valor da tensão*/

        int Tint = (int)round(in[0]);
        int Sint = (int)round(in[1]);
        double K1int = (in[2]);
        double K2int = (in[3]);

```

```

std::string consultaSQL = "SELECT Vomax FROM mppt03 WHERE Ti = "+
std::to_string(Tint) +" and Si = "+ std::to_string(Sint) +" and K1 = "+
std::to_string(K1int) +" and K2 = "+ std::to_string(K2int); //Query para
ser rodada no banco de dados
const char *ponteiroConsultaSQL = consultaSQL.c_str(); //Ponteiro char da
consultaSQL, pois a função mysql_query() só aceita char*.

//Inicializa a conexão MYSQL
if(!(conn = mysql_init(0))){
    out[2] = 1;
}else{
    out[2] = 0;
}

//Cria uma conexão com Servidor MYSQL com base nos parâmetros
definidos acima.
conn = mysql_real_connect(conn, "localhost", "matla",
"yOT14iH8KZAybgw8", "matla", 3306, NULL, 0);

//Faz uma consulta SQL no banco de dados.
mysql_query(conn, ponteiroConsultaSQL);

//Armazena uma referência dos resultados da consulta na memória.
res = mysql_use_result(conn);

while ((row = mysql_fetch_row(res)) != NULL)
{
    voltage = row[0]; //Ponteiro do resultado da consulta
    result = atof(voltage);
    // std::cout << "success, " << " x = " << result << std::endl;
    // printf(voltage); //Imprime o valor do ponteiro
}

//Encerra a conexão
mysql_free_result(res); //Libera o resultado da Memória.
mysql_close(conn); //Encerra a conexão MYSQL.

    out[0] = result;
    out[1] = Tint;
    out[2] = Sint;

// Place your code here.....end

    *pnError = 0; //Success
}

}

```

