

**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica**

Aplicação do Algoritmo de Busca de Ponto de Máxima Potência (P&O) e Controle PI para a Regulação da Tensão Terminal de Painéis Fotovoltaicos

Autor: Murilo Augusto Pinheiro

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos
2016

MURILO AUGUSTO PINHEIRO

**Aplicação do Algoritmo de Busca de
Ponto de Máxima Potência (P&O) e
Controle PI para a Regulação da
Tensão Terminal de Painéis
Fotovoltaicos**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado

São Carlos
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P654a

Pinheiro, Murilo Augusto
Aplicação do Algoritmo de Busca de Ponto de Máxima
Potência (P&O) e Controle PI para a Regulação da Tensão
Terminal de Painéis Fotovoltaicos / Murilo Augusto
Pinheiro; orientador Ricardo Quadros Machado. São
Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. MPPT. 2. Perturb&Observe. 3. Painel
fotovoltaico. 4. Conversor elevador. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Murilo Augusto Pinheiro

Título: "Aplicação do algoritmo de busca de ponto de máxima potência (P&O) e controle PI para a regulação da tensão terminal de painéis fotovoltaicos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 14/06/2016,

com NOTA 7,0 (sete, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Quadros Machado - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Mestre Klebber de Araújo Ottoboni - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Mestre Elian João Agnoletto - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, que apesar das dificuldades, puderam me proporcionar todo o apoio, tranquilidade e oportunidade para que eu possa seguir o meu caminho. Aos familiares que sempre torcem pelo meu sucesso e à Leena que, apesar da distância, sempre me motiva a ser cada vez melhor.

Agradeço, também, a oportunidade de estudar no COTUCA que me proporcionou uma educação em todos os sentidos, e a oportunidade de realizar intercâmbio nos Estados Unidos que contribuiu significativamente para minha formação acadêmica e pessoal.

Sou grato a todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica pelos ensinamentos e contribuições. Em especial ao Prof. Ricardo que me proporcionou a oportunidade de desenvolver esse trabalho sob sua tutoria.

Por fim, agradeço todas pessoas e amigos que fizeram parte desta jornada e que contribuíram de alguma maneira para que eu pudesse seguir em frente com meus objetivos.

Resumo

Conversores CC-CC são fundamentais em aplicações de sistemas fotovoltaicos devido à possibilidade de controlar a tensão terminal dos painéis fotovoltaicos. Dessa maneira, esse trabalho possui como objetivo a aplicação de um algoritmo de busca do ponto de máxima potência (MPPT) do tipo perturbação e observação (P&O) como intuito de manter um painel fotovoltaico operando sempre no ponto ótimo. Para atingir o objetivo proposto, determina-se um modelo de pequenos sinais para o conversor *boost*, que acoplado ao modelo linearizado do painel fotovoltaico, permite que seja implementado um controlador proporcional e integral discreto a partir da realimentação da tensão terminal do painel. Tal proposta de controle possibilita uma melhora no desempenho do algoritmo MPPT inclusive quando o painel fotovoltaico é submetido à rápidas mudanças na irradiação solar. A partir das simulações realizadas pôde-se verificar que o controlador PI implementado não oferece uma resposta suficientemente rápida para obter os resultados desejados, desta forma sugerindo que outras técnicas sejam avaliadas.

Palavras chave: Controlador PI, Conversor *boost*, fontes alternativas de energia, *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), *Perturb and Observe* (P&O), painel fotovoltaico.

Abstract

DC-DC converters are fundamental parts in photovoltaic systems applications due to its capacity to control the terminal voltage of photovoltaic arrays. Thus, this work purpose is to employ a Perturb and Observe (P&O) Maximum Power Point Tracking algorithm (MPPT) in order to maintain the photovoltaic array operating on its optimal point. Moreover, a small signal model for the converter is coupled to a linearized photovoltaic array model aiming to design a discrete PI controller that is based on feedback of the photovoltaic array terminal voltage. Such proposed control allows a better performance of the MPPT algorithm even when the photovoltaic array is affected by quick changes in solar irradiation. After evaluating the systems as a whole through simulation, it was verified that the PI controller implemented does not offer a response quick enough to obtain the desired results, therefore it is suggested that other methods should be tested.

Keywords: Boost converter, Maximum Power Point Tracking (MPPT), Perturb and Observe (P&O), photovoltaic array, PI controller, renewable energy sources.

Lista de Ilustrações

FIGURA 1.1: EVOLUÇÃO DOS INVESTIMENTOS EM FONTES RENOVÁVEIS (EM BILHÕES DE DÓLARES).....	2
FIGURA 1.2: INVESTIMENTOS GLOBAIS EM ENERGIA RENOVÁVEL POR TECNOLOGIA EM 2014 .	3
FIGURA 1.3: COMPARATIVO ENTRE A DENSIDADE DE POTÊNCIA DE VÁRIAS FONTES DE ENERGIA.....	4
FIGURA 2.1: EXEMPLO DE ASSOCIAÇÕES DE CELULAR FOTOVOLTAICAS	8
FIGURA 2.2: RESUMO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS	9
FIGURA 2.3: MODELO EXPONENCIAL DUPLO PARA UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	10
FIGURA 2.4: MODELO PARA ASSOCIAÇÕES DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	12
FIGURA 2.5: RESPOSTA CARACTERÍSTICA I X V DO PAINEL KC130TM PARA VÁRIOS NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO.....	13
FIGURA 2.6: RESPOSTA CARACTERÍSTICA P X V DO PAINEL KC130TM PARA VÁRIOS NÍVEIS DE IRRADIAÇÃO.....	13
FIGURA 2.7: CIRCUITO DE CONTROLE DA TENSÃO TERMINAL DO PAINEL E CIRCUITO EQUIVALENTE COM CARGA DO SECUNDÁRIO REFERIDA AO PRIMÁRIO	14
FIGURA 2.8: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO MPPT P&O	16
FIGURA 2.9: COMPORTAMENTO DA TENSÃO TERMINAL E DA POTÊNCIA DO PAINEL FOTOVOLTAICO DURANTE O REGIME PERMANENTE UTILIZANDO O ALGORITMO MPPT P&O COM PASSO FIXO	17
FIGURA 2.10: LINEARIZAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO EM TORNO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (PMP).....	19
FIGURA 2.11: CIRCUITO EQUIVALENTE DO MODELO LINEARIZADO EM TORNO DO PONTO DE INTERESSE	20
FIGURA 2.12: DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO PROPOSTO	21

FIGURA 2.13: MODELO DO CONVERSOR BOOST CONECTADO AO MODELO LINEARIZADO DO PAINEL E AO BARRAMENTO CC	22
FIGURA 2.14: CIRCUITO EQUIVALENTE COM A CHAVE DESLIGADA.....	23
FIGURA 2.15: CIRCUITO EQUIVALENTE COM A CHAVE LIGADA.....	23
FIGURA 2.16: COMPORTAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (PMP) COM A VARIAÇÃO DA IRRADIAÇÃO.....	27
FIGURA 2.17: COMPORTAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (PMP) COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA.....	28
FIGURA 2.18: SISTEMA COMPLETO COM DESTAQUE PARA A MALHA DE CONTROLE EM AZUL .	29
FIGURA 2.19: RESPOSTA TEMPORAL DA TENSÃO TERMINAL DO PAINEL FOTOVOLTAICO COM CONTROLE PI COM UMA REFERÊNCIA DE 1	31
FIGURA 2.20: DIAGRAMA UTILIZADO NA SIMULAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	33
FIGURA 2.21: POTÊNCIA GERADA PELO PAINEL	34
FIGURA 2.22: TENSÃO TERMINAL DO PAINEL	35
FIGURA 2.23: RESPOSTA DA POTÊNCIA GERADA QUANDO O SISTEMA SOFRE UMA VARIAÇÃO BRUSCA DE IRRADIAÇÃO EM $T=0,9s$	36
FIGURA 2.24: RESPOSTA DA TENSÃO TERMINAL DO PAINEL FOTOVOLTAICO QUANDO O SISTEMA SOFRE UMA VARIAÇÃO BRUSCA DE IRRADIAÇÃO EM $T=0,9s$	36
FIGURA 2.25: RESPOSTA DA POTÊNCIA GERADA QUANDO O SISTEMA SOFRE UMA VARIAÇÃO BRUSCA DE TEMPERATURA EM $T=1s$	37
FIGURA 2.26: RESPOSTA DA TENSÃO TERMINAL DO PAINEL FOTOVOLTAICO QUANDO O SISTEMA SOFRE UMA VARIAÇÃO BRUSCA DE TEMPERATURA EM $T=1s$	38

Lista de Tabelas

TABELA 2.1: ESPECIFICAÇÕES ELÉTRICAS DO CONJUNTO DE DOIS PANEIS FOTOVOLTAICO KC130TM...	18
TABELA 2.2: PARÂMETROS DO MODELO AJUSTADO DO CONJUNTO DE DOIS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS KC130TM ASSOCIADOS EM SÉRIE	18
TABELA 2.3: PARÂMETROS DO CONVERSOR BOOST UTILIZADO	26

Lista de Abreviaturas e Siglas

CC: Corrente Contínua

MPPT: *Maximum Power Point Tracking* (busca de ponto máximo de potência)

P&O: *Perturb and Observe* (pertubar e observar)

PI: Proporcional e Integral

InC: *Incremental Conductance* (condutância incremental)

MOSFET: *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transistor*

PWM: *Pulse Width Modulation*

DSP: *Digital Signal Processor*

ZOH: *Zero-order Hold*

CA: Corrente Alternada

PMP: Ponto de Máxima Potência

Lista de Símbolos

GW: Unidade de potência [Giga-Watt]

V: Unidade de tensão elétrica [Volt]

I_{PV} : Corrente induzida pela luz [A]

R_s : Resistência série do painel [Ω]

R_p : Resistência paralelo do painel [Ω]

D_1 : Diodo de recombinação de portadores

D_2 : Diodo de recombinação de portadores

I_{sc} : Corrente de curto-circuito do painel [A]

V_{oc} : Tensão de circuito aberto do painel [V]

I_o : Corrente de saturação do diodo [A]

Φ : Fator de idealidade do diodo

V_t : Tensão térmica do painel [V]

k: Constante de Boltzmann [$1,3806503 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$]

T: Temperatura da junção P-N [K]

W: Unidade de potência [Watt]

N_p : Número de células em paralelo

N_s : Número de células em série

α : Relação de transformação

P_{max} : Potência máxima [W]

V_{mp} : Tensão de máxima potência [V]

I_{mp} : Corrente de máxima potência [A]

C_v : Coeficiente de temperatura de V_{oc} [V/°C]

C_l : Coeficiente de temperatura de I_{sc} [A/°C]

A: Unidade de corrente elétrica [Ampere]

g : Condutância do modelo linearizado do painel [S]

V_{eq} : Tensão equivalente do modelo linearizado do painel [V]

R_{eq} : Resistência equivalente do modelo linearizado do painel [Ω]

r_{pv} : Resistência dinâmica do painel [Ω]

Ω : Unidade de medida de resistência elétrica [Ohm]

d : Ciclo de trabalho do conversor

i_L : Corrente do indutor [A]

R_L : Resistência do indutor [Ω]

V_L : Tensão do indutor [V]

V_{cc} : Tensão do barramento CC [V]

C : Capacitância [F]

L : Indutância [H]

V_C : Tensão do capacitor [V]

f_{ch} : Frequência de chaveamento do conversor [Hz]

ξ : Fator de amortecimento do sistema painel + conversor

T_ε : Período mínimo de amostragem do MPPT [s]

R_C : Resistência do capacitor [Ω]

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	6
2. DESENVOLVIMENTO	7
2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	7
2.1.1 <i>Painel fotovoltaico</i>	7
2.1.2 <i>Modelo generalizado do painel fotovoltaico</i>	9
2.1.3 <i>Método de busca de ponto de máxima potência (MPPT)</i>	15
2.1.4 <i>Modelo linearizado do painel</i>	17
2.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	20
2.2.1 <i>Conversor CC-CC</i>	21
2.2.2 <i>Modelo do sistema fotovoltaico</i>	22
2.2.3 <i>Modelo de pequenos sinais</i>	24
2.2.4 <i>Projeto do controlador</i>	26
2.3 RESULTADOS.....	31
2.3.1 <i>Resposta dinâmica do sistema</i>	32
2.3.2 <i>Variações nas condições de irradiação e temperatura</i>	35
3. CONCLUSÃO.....	40
3.1 CONCLUSÕES GERAIS	40
3.2 TRABALHOS FUTUROS	41
4. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	42

1. Introdução

1.1 Motivação

Embora a ciência e tecnologia estejam avançando rapidamente, os métodos de transporte terrestre e os sistemas de distribuição de energia elétrica ainda se baseiam nos moldes em que foram criados. Veículos elétricos e os chamados “*smart grids*” irão, inevitavelmente, substituir tais sistemas dados como ultrapassados.

As constantes buscas por novas fontes de energia após o rápido desenvolvimento tecnológico ocasionado pela 1^a Revolução Industrial, fez com que a energia elétrica tenha se tornado indispensável no dia a dia da sociedade. Esta dependência aliada a um mundo onde questões ambientais estão cada vez mais sendo levadas em consideração, as fontes alternativas de energia apresentam-se como ótimas soluções para o meio ambiente e terão um papel fundamental na geração de energia elétrica (Bastos, 2013). Nos últimos 11 anos, o aumento do crescimento de investimentos realizados nestes tipos de fontes tem chamado atenção e foi analisado por (Frankfurt School – UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance, 2015) como pode ser observado na figura 1.1:

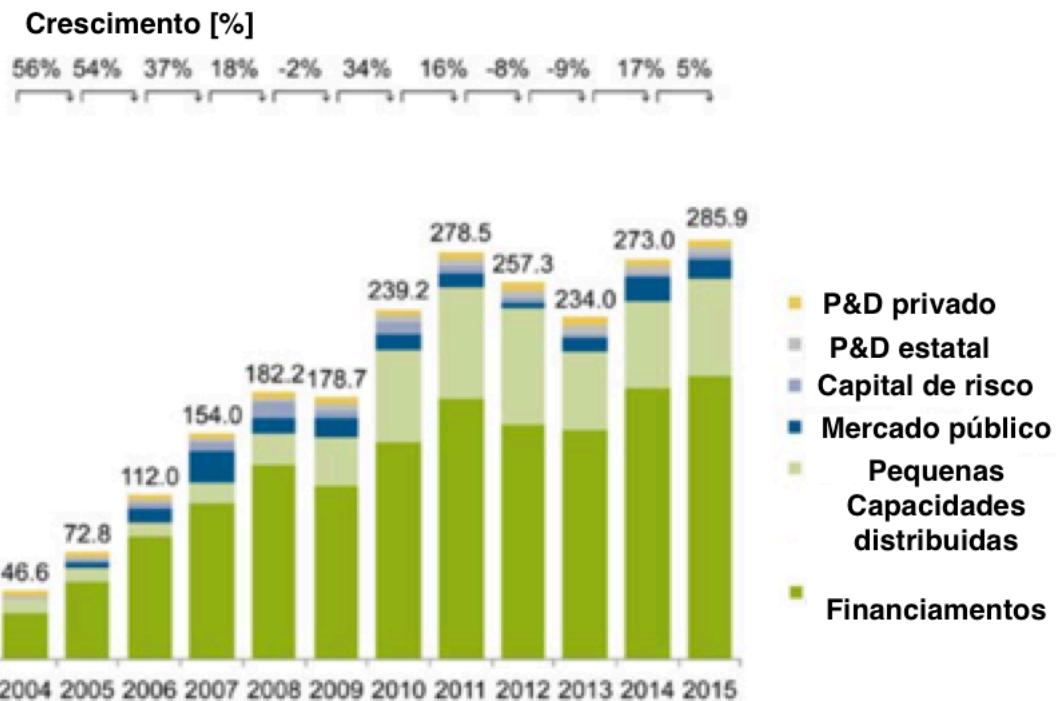


Figura 1.1: Evolução dos Investimentos em Fontes Renováveis (em bilhões de dólares) (Frankfurt

School – UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance, 2016)

Além disto, é importante salientar que embora os números entre os anos de 2011 e 2015 sejam parecidos, a capacidade de produção energética destes investimentos aumentou de 86GW para 134GW devido à redução dos custos de produção, em específico dos painéis fotovoltaicos e dos geradores eólicos, durante este período (Frankfurt School – UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance, 2016). Além dos geradores solares e eólicos citados anteriormente, existem vários outros tipos de tecnologias capazes de produzir energia elétrica a partir de fontes alternativas, como por exemplo, pequenas centrais hidrelétricas, maré-motriz, célula de combustível, entre outras. Conforme retratado pela REN21 na figura 1.2 a seguir, é possível avaliar como cada uma compõe os investimentos realizados em fontes renováveis (DAS and KUMAR PRADHAN, 2011).

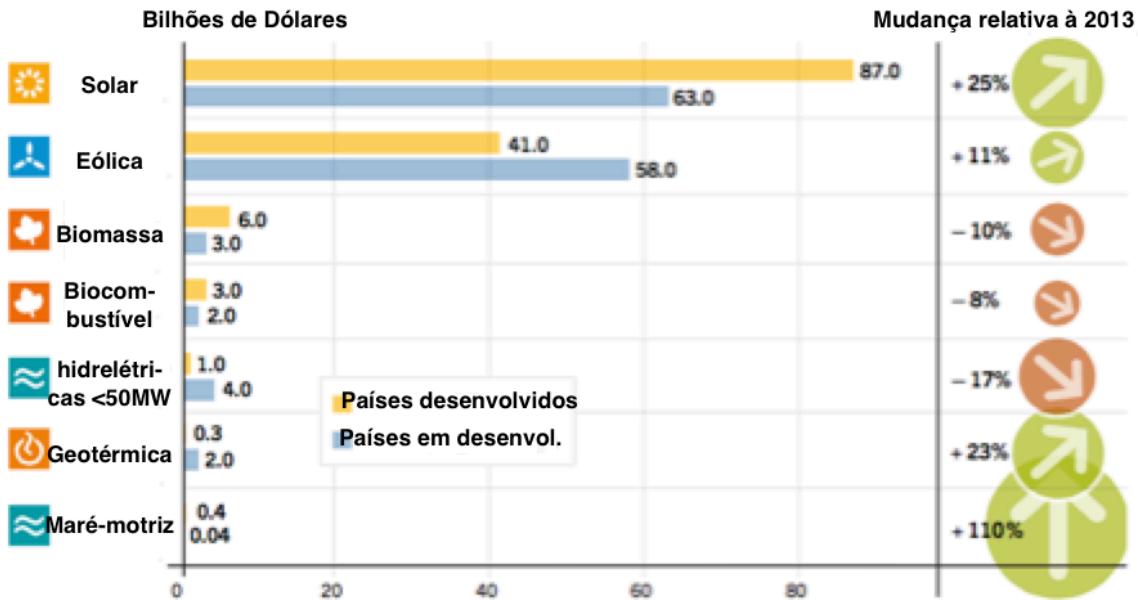


Figura 1.2: Investimentos globais em energia renovável por tecnologia em 2014 (REN21, 2015)

Verifica-se que há uma dominância das tecnologias solares e eólicas sobre as demais. Contudo, os painéis fotovoltaicos têm se destacado ainda mais devido à grande redução do seu custo de produção. Outros fatores que contribuem com a liderança dos painéis solares são a abundância de seu recurso natural, o sol, e pelo fato de sua escala ser reduzida, não havendo necessidade de sua implantação em grandes usinas, uma vez que esta possui a maior densidade de potência dentre as fontes renováveis como é possível observar na figura 1.3 (Smil, 2010).

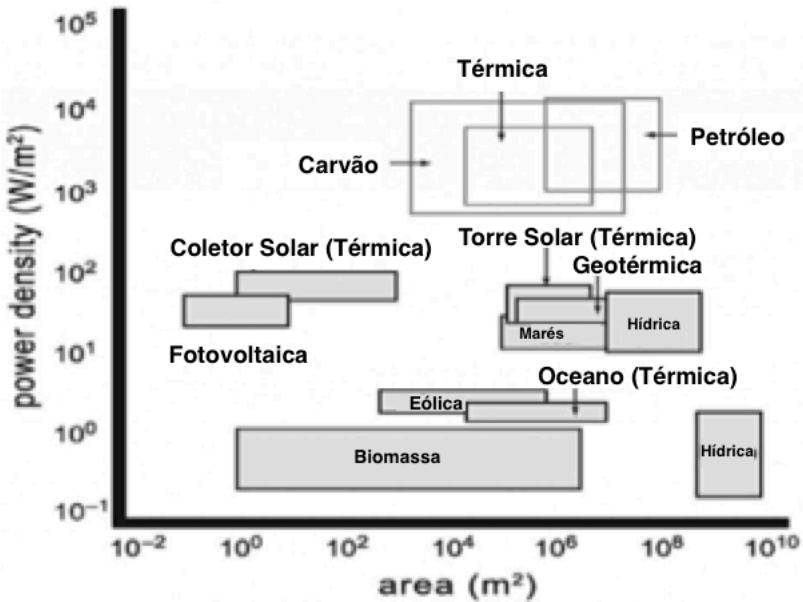


Figura 1.3: Comparativo entre a densidade de potência de várias fontes de energia (Smil, 2010)

Normalmente os sistemas fotovoltaicos são compostos pelas células fotovoltaicas que podem ser conectadas tanto em paralelo quanto em série, de modo a obter diversos valores de tensão e corrente. Possuem também conversores de potência e podem ou não conter dispositivos armazenadores de energia que por ventura podem ser necessários devido às variações da incidência solar. Além disso, contam com componentes de controle. As aplicações dos painéis fotovoltaicos são variadas e normalmente são classificadas em 4 classes estabelecidas pela *International Energy Agency*. São elas: sistemas fotovoltaicos domésticos isolados da rede (*off-grid domestic systems*). Neste sistema, a energia é fornecida para uma carga que não esteja conectada ao sistema elétrico de distribuição. Comumente, este tipo de aplicação é destinada para o acionamento equipamentos domésticos de baixa potência.

Sistemas fotovoltaicos não domésticos e isolados da rede (*off-grid non-domestic systems*), que assim como o anterior, fornece energia para cargas que não estão ligadas à rede, porém esta categoria aplica-se em dispositivos que têm alto valor

agregado, como por exemplo, sistemas de telecomunicações, bombeamento de água, entre outros.

Sistemas fotovoltaicos distribuídos e conectados à rede (*grid-connected distributed PV systems*) entregam energia tanto para um usuário conectado à rede quanto diretamente para o sistema elétrico de distribuição. Nesta categoria, os sistemas começam a ter um tamanho elevado dada a potência necessária.

Por fim, os sistemas fotovoltaicos centralizados e conectados à rede (*grid-connected centralized systems*), os quais representam verdadeiras usinas geradoras de energia elétrica que não são associadas à usuários particulares. (Moçambique, 2012)

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar e simular um sistema composto por um painel fotovoltaico e um conversor CC-CC do tipo elevador de tensão (*boost*) não-isolado com a finalidade de controlar a tensão terminal do painel fotovoltaico para que seja fornecida potência a um barramento CC pertencente a um sistema de geração renovável. Deseja-se, também, que o sistema opere com máxima eficiência de modo que seja gerado a maior quantidade de energia elétrica possível de acordo com as condições ambientais. Para atingir tal objetivo, faz-se necessária a implementação de um algoritmo de busca do ponto de máxima potência (*MPPT – Maximum Power Point Tracking*), o qual permite que o sistema sempre opere no ponto de máxima potência do painel fotovoltaico.

Objetivos específicos:

- Implementar o algoritmo por perturbação e observação (P&O) para a busca de ponto de máxima potência;
- Modelar o painel fotovoltaico e o conversor CC-CC;

- Projetar um controlador PI para garantir que o sistema opere com máxima eficiência.

1.3 Organização do texto

Este documento está organizado em 3 capítulos. Além deste introdutório, o capítulo 2 é o desenvolvimento do trabalho e se divide em duas partes: primeiramente são apresentados os princípios fundamentais da geração fotovoltaica, assim como estabelece o algoritmo de busca utilizado. Em adição à estes conceitos, são realizadas as modelagens do painel e do conversor e o projeto do controlador PI. Já na segunda etapa, são apresentados e analisados os resultados das simulações do sistema implementado.

Por fim, no capítulo 3, são retratadas as conclusões gerais deste trabalho, bem como sugestões de soluções alternativas e trabalhos futuros.

2. Desenvolvimento

2.1 Fundamentos teóricos e descrição do sistema

2.1.1 Painel fotovoltaico

Os painéis fotovoltaicos são compostos por unidades chamadas células fotovoltaicas. Estas são capazes de gerar energia elétrica a partir da incidência de raios solares através do efeito fotovoltaico. Tal fenômeno foi descoberto por Alexandre-Edmond Becquerel em 1839 quando ele presenciou o surgimento de uma diferença de potencial elétrico nos terminais de um semicondutor quando exposto à luz. Este efeito se origina quando fótons com energia suficiente atingem a superfície de um material semicondutor, de modo que ele cria um par elétron-lacuna ao absorver esta energia. (CRESESB, 2006)

As células fotovoltaicas são basicamente compostas por uma junção p-n formada por um material semicondutor que permite que a criação dos pares elétron-lacuna possam gerar uma diferença de potencial entre as extremidades do material. Assim, ao conectar galvanicamente as duas extremidades, é criada uma corrente proporcional à intensidade luminosa e limitada pelo material semicondutor utilizado. (PVEDUCATION)

Devido à baixa tensão produzida pelas células (cerca de 0,5V), associam-se várias delas, em série para aumentar a tensão e em paralelo para aumentar a corrente, formando módulos fotovoltaicos. Uma vez que a potência fornecida por esses módulos ainda não é suficiente para acionar cargas residenciais ou comerciais uma nova associação desses módulos pode ser realizada, dando origem aos painéis fotovoltaicos ou, em inglês, os *photovoltaic arrays*. As três classificações citadas acima são exemplificadas pela figura 2.1. (DAS and KUMAR PRADHAN, 2011)

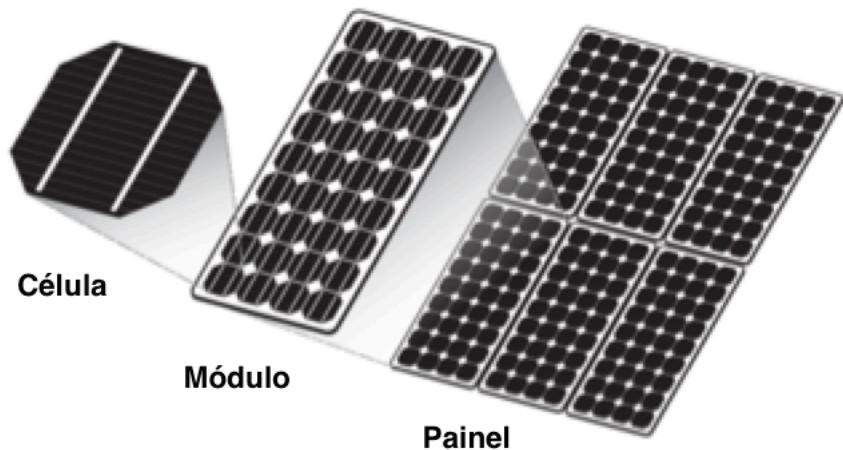


Figura 2.1: Exemplo de associações de celular fotovoltaicas

Quanto à tecnologia utilizada, as células fotovoltaicas são classificadas como de primeira, segunda ou terceira geração. As células de primeira geração são as mais antigas e mais comumente utilizadas devido sua eficiência elevada. Elas podem ser classificadas tanto como mono-cristalinas que são levemente mais eficazes quanto poli-cristalinas que são produzidas mais facilmente e com custo reduzido. Ambas são feitas a partir de fatias finas retiradas de um único cristal ou bloco de silício, fato que explica sua diferenciação. As células de segunda geração são feitas a partir de finos filmes de silício (*thin film*), construídos através da deposição de camadas ultrafinas de material fotovoltaico sobre um suporte que pode ser de vidro, plástico, aço inoxidável ou até mesmo materiais flexíveis. Quando comparadas às células de primeira geração, a segunda geração é menos eficiente e possui um custo de produção reduzido. (Kibria, Ahammed and Sony, 2014)

Finalmente, as células de terceira geração incluem: concentradores fotovoltaicos, células termo-fotovoltaicas e células fotovoltaicas orgânicas. Os concentradores fotovoltaicos de silício ou da multijunção de outros semicondutores concentram mediante lentes a irradiação direta da luz solar para o local das células

fotovoltaicas. Por outro lado, as células termo-fotovoltaicas são usadas em sistemas híbridos (termal e elétrico), já as células fotovoltaicas orgânicas, são constituídas por cadeias de polímeros semicondutores de baixo custo, que ainda operam com uma eficiência inferior a 10%. (Moçambique, 2012)

A figura 2.2 mostra um comparativo entre a eficiência e o preço de cada uma das gerações de células fotovoltaicas.

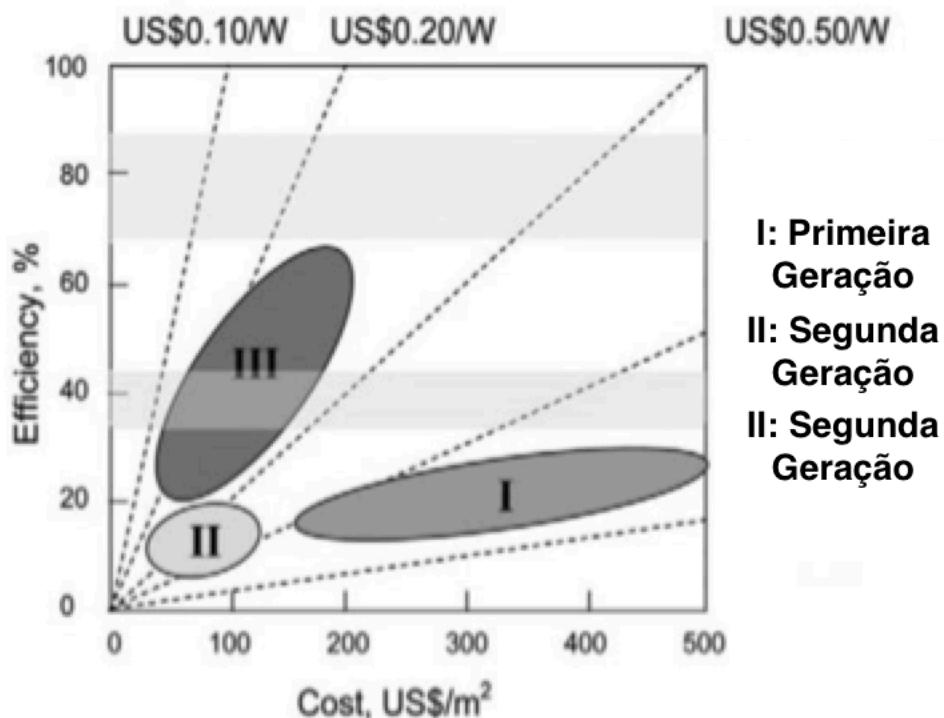


Figura 2.2: Resumo comparativo entre as tecnologias. (Kibria, Ahammed and Sony, 2014)

2.1.2 Modelo generalizado do painel fotovoltaico

O modelo generalizado da célula fotovoltaica é derivado da natureza da junção p-n e representa precisamente o comportamento das células fotovoltaicas, especialmente as do tipo cristalinas de silício. (GOW and MANNING, 1999) Este modelo, conhecido por modelo exponencial duplo, por possuir dois diodos que

representam a corrente de saturação e o efeito da recombinação dos portadores da junção. (Villalva, Gazoli and Filho, 2009)

O modelo é constituído por cinco parâmetros: uma fonte de corrente que possui uma dependência linear da irradiação solar (I_{PV}), resistências série e paralelo (R_s e R_p , respectivamente) e dois diodos (D_1 e D_2) conforme apresentado na figura 2.3:

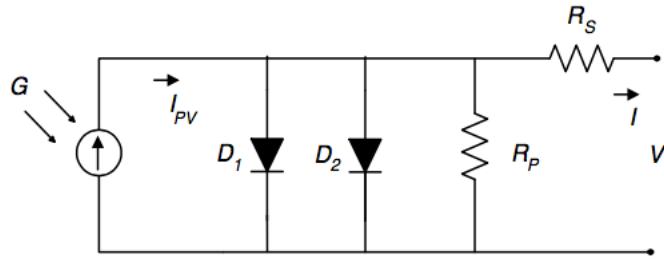


Figura 2.3: Modelo exponencial duplo para uma célula fotovoltaica (Moçambique, 2012)

Nota-se que R_s está diretamente relacionado com a corrente de curto circuito (I_{sc}) da célula enquanto R_p afeta sua tensão de circuito aberto (V_{oc}). Os cinco parâmetros do modelo são dependentes da irradiação luminosa e da temperatura da célula. Contudo, a relação em especial da intensidade luminosa é complexa, sendo necessário um conjunto de testes experimentais. Desta maneira, para o propósito deste trabalho, é possível reduzir o modelo a um diodo sem perda de generalidade. (Moçambique, 2012) O modelo da célula fotovoltaica pode ser expresso pela equação (1) que é apresentada em GOW and MANNING, 1999. Tal equação é implícita e não linear, isto é, sua solução só é possível através do uso de métodos iterativos. (Bastos, 2013)

$$I = I_{PV} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (1)$$

I_{pv} é a corrente induzida pela luz, I_o é a corrente de saturação do diodo, Φ é o fator de idealidade do diodo, R_s é a resistência série equivalente do módulo e R_p é a resistência equivalente em paralelo do módulo, $V_t = kT/q$ é a tensão térmica da célula, k é a constante de Boltzmann [1,3806x10⁻²³], T é a temperatura da junção p-n em Kelvin, q é a carga elementar do elétron [1,602176x10⁻¹⁹]. A corrente I_{pv} depende tanto do nível de irradiação, quanto da temperatura do painel, enquanto que I_o depende apenas da temperatura. (Moçambique, 2012)

As células fotovoltaicas produzem menos que 2W sob uma tensão de aproximadamente 0,5V, portanto os sistemas fotovoltaicos necessitam de associações de células para produzir uma potência suficientemente alta. Sendo N_p e N_s o número de células conectadas em paralelo e em série respectivamente, a equação (1) pode ser reescrita como: (Tsai, Tu and Su, 2008)

$$I = N_p I_{PV} - N_p I_o \left[\exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{kT\Phi} \right] - 1 \right] - \frac{\frac{N_p V}{N_s} + R_s I}{R_p} \quad (2)$$

A eficiência da célula fotovoltaica é sensível a pequenas variações de R_s , visto que R_s encontra-se na parcela exponencial da equação (2), por outro lado sua eficiência é insensível à variação de R_p . Quando trata-se de painéis e módulos que possuem muitas células em série, a associação de R_p acaba por ser desprezível visto que esta é inversamente proporcional à N_s . A figura 2.4 ilustra as expressões dos novos valores de R_p e R_s , assim como o modelo simplificado para os casos de módulos ou painéis fotovoltaico. (Tsai, Tu and Su, 2008)

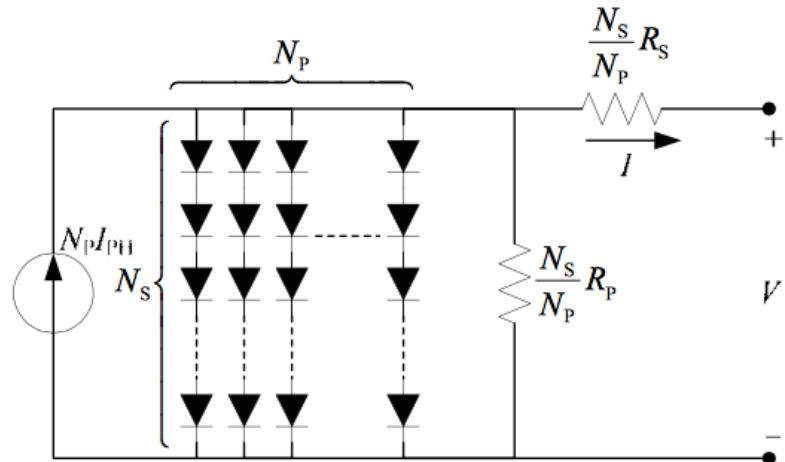


Figura 2.4: Modelo para associações de células fotovoltaicas. (Tsai, Tu and Su, 2008)

É importante lembrar que para o objetivo deste trabalho, não é necessário nenhum experimento para se determinar os parâmetros do modelo nem a solução iterativa da equação $I \times V$, visto que estes dados estão presentes nas folhas de dados dos fabricantes.

As figuras 2.5 e 2.6, a seguir, apresentam a relação não-linear entre a corrente e a tensão, bem como a relação entre a potência e tensão do painel KC130TM fabricado pela Kyocera, cujo é utilizado nesse trabalho.

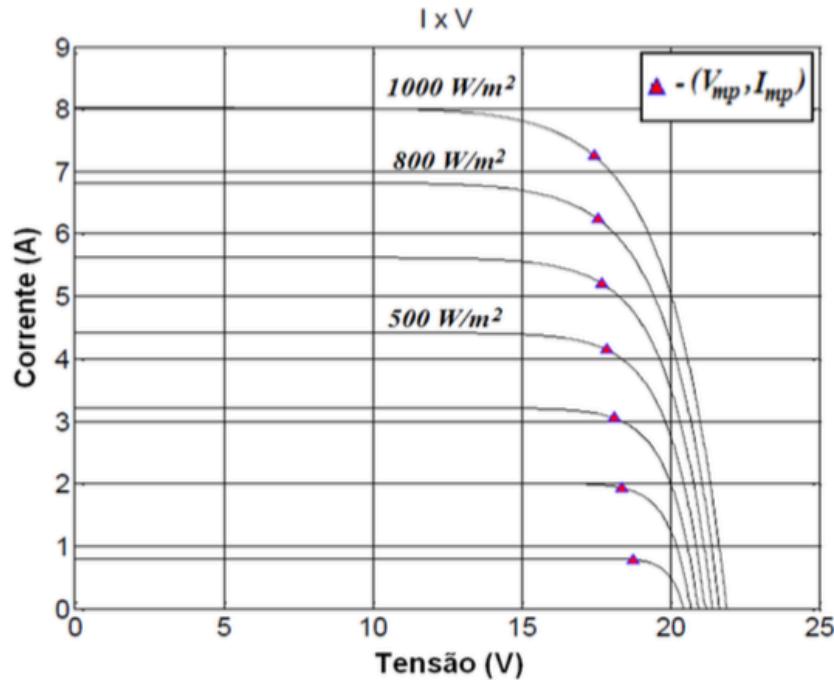


Figura 2.5: Resposta característica I x V do painel KC130TM para vários níveis de irradiação.
(Bastos, 2013)

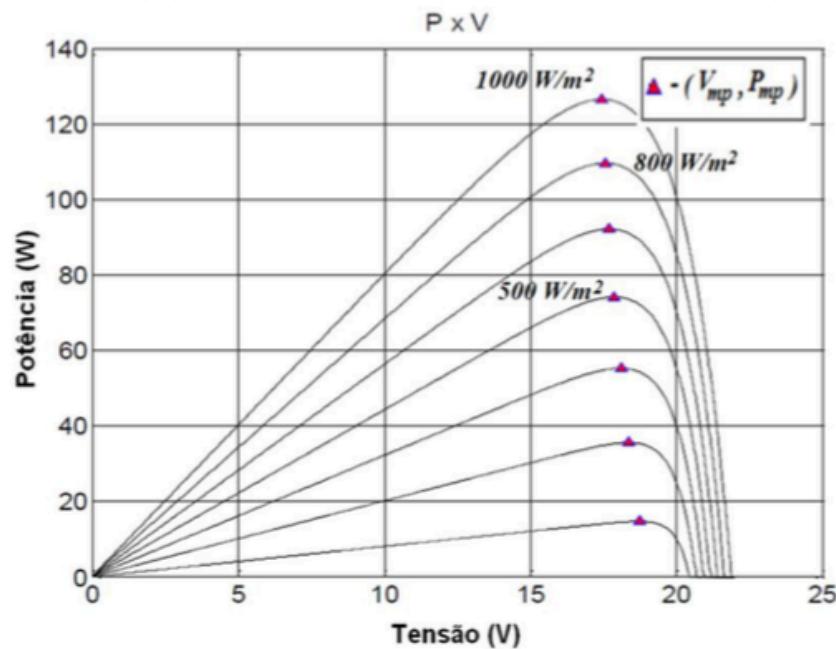


Figura 2.6: Resposta característica P x V do painel KC130TM para vários níveis de irradiação.
(Bastos, 2013)

Nas figuras apresentadas acima, nota-se que há um ponto (V_{mp} , I_{mp}) representado por Δ , tal que se refere ao ponto de operação de máxima potência do painel fotovoltaico. Portanto, é fácil observar que ao alterar o valor da tensão terminal do painel, é possível controlar a potência de saída do painel e consequentemente o seu rendimento. Entretanto, com a finalidade de controlar a tensão nos terminais do painel, que pode ser entendido como uma fonte de corrente, é necessário utilizar um circuito conversor CC-CC de tal modo que este altere a resistência equivalente vista pelo painel.

Para entender como o circuito conversor altera a resistência vista pelo painel, pode-se realizar uma analogia com um transformador. Assim, a carga pode ser refletida para o primário do conversor utilizando um fator α (relação de transformação do conversor) conforme ilustrado pela figura 2.7, em outras palavras, ao controlar o ponto de operação do conversor, controla-se a carga vista pelo painel e consequentemente a tensão nos terminais do painel. Desta forma, utiliza-se um algoritmo de busca de ponto de máxima potência (MPPT) para ajustar o ponto de operação do conversor e garantir que o painel opere com eficiência.

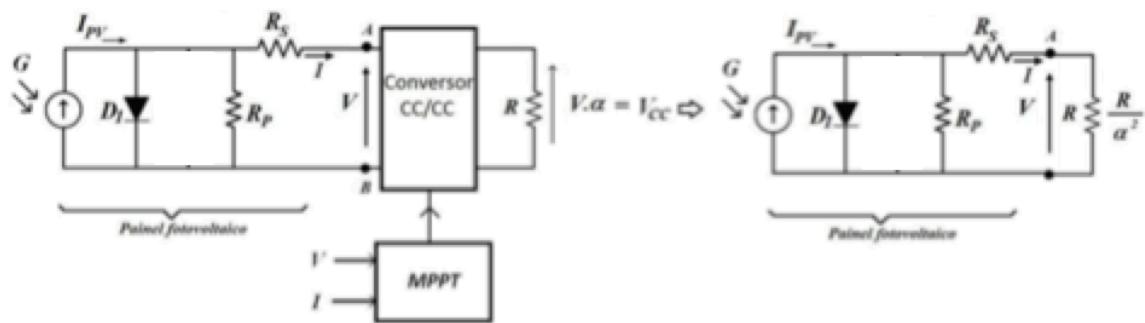


Figura 2.7: Circuito de controle da tensão terminal do painel e circuito equivalente com carga do secundário referida ao primário

2.1.3 Método de busca de ponto de máxima potência (MPPT)

Conforme mencionado previamente, os algoritmos MPPT são extremamente importantes para uma utilização otimizada da energia solar disponível. Seu objetivo é garantir que o sistema fotovoltaico opere de modo a maximizar a produção de energia elétrica, mesmo quando há variações de intensidade luminosa ou temperatura.

Atualmente na literatura já existem diversos algoritmos MPPT propostos, simulados e até mesmo implementados experimentalmente. Sendo que eles podem ser classificados em três classes: algoritmos baseados em modelo, que dependem de um modelo matemático para o cálculo da tensão ou corrente do ponto de máxima potência, assim como os métodos de aproximação em função das características do painel fotovoltaico. (Moçambique, 2012)

Os métodos baseado em treinamento são aqueles que usam fundamentos de inteligência artificial como por exemplo, lógica *fuzzy* e redes neurais artificiais. Tais técnicas permitem uma resposta rápida e precisa além de não exigir um conhecimento detalhado do sistema fotovoltaico, porém possuem um custo maior de implementação. (Moçambique, 2012)

Por fim, os algoritmos MPPT heurísticos são aqueles que se baseiam em medidas de corrente e tensão realizada nos terminais do painel para realizar a tomada de decisão do aumento ou diminuição da variável de controle. Possuem a vantagem de não ser necessário conhecer as características do painel. Sua complexidade pode variar dependendo da técnica utilizada, porém os mais simples e que acabam sendo os mais adotados são o método de condutância incremental (InC) e o método de perturbação e observação (P&O), o qual este ultimo será utilizado no desenvolvimento deste trabalho. (Moçambique, 2012)

O algoritmo MPPT implementado através da técnica P&O se baseia no fluxograma apresentado pela figura 2.8 e pode ser resumido pelo seguinte critério: se a

tensão dos terminais do painel for perturbada em uma dada direção (positiva ou negativa) e se a potência entregue observada aumentar, isto significa que o ponto de operação foi deslocado em direção ao ponto de máxima potência e portanto, a tensão do sistema deve continuar sendo perturbada na mesma direção. Por outro lado, se dada a mesma perturbação a potência entregue for reduzida, o ponto de operação afastou-se do ponto procurado, logo a direção da perturbação deve ser invertida. O algoritmo MPPT opera incrementando/decrementando periodicamente a tensão do painel fotovoltaico. Se uma perturbação realizada implica em um aumento (diminuição) da potência disponível no painel, então a próxima perturbação deve ser realizada na direção a favor (contra) a anterior. Este procedimento é então mantido até que o ponto de máxima potência seja alcançado. (Attou, Massoum and Saidi, 2014)

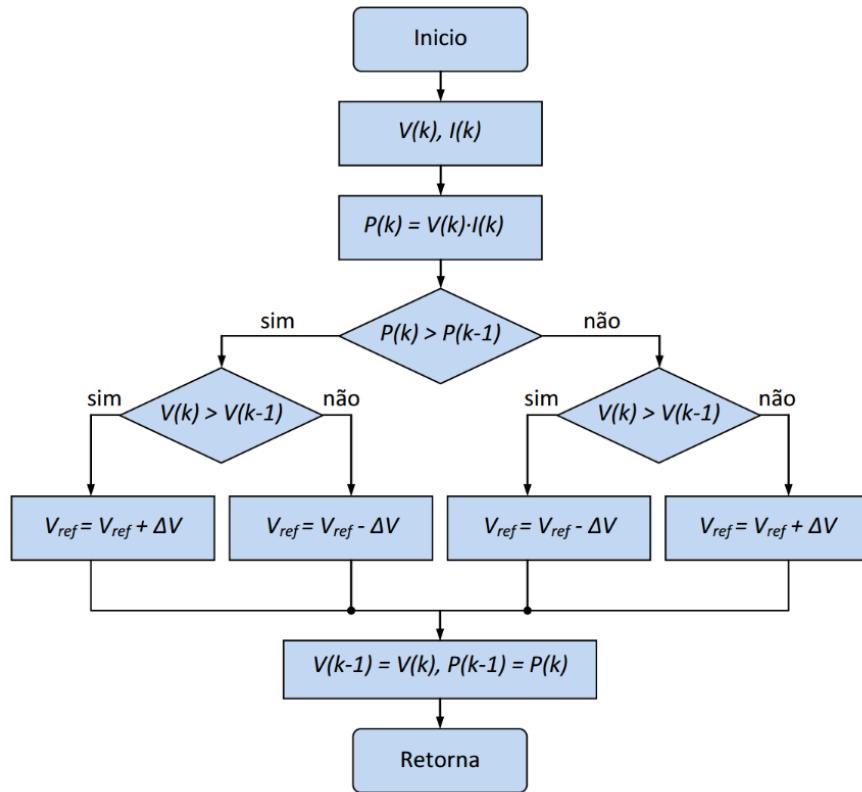


Figura 2.8: Fluxograma do algoritmo MPPT P&O (Bastos, 2013)

Porém, como consequência deste método, a potência e a tensão terminal são oscilantes em torno do seu valor ideal, conforme apresentado pela figura 2.9, fazendo com que sua eficiência seja reduzida. O valor da perturbação pode ser reduzido para diminuir a amplitude da oscilação, mas o tempo de convergência do algoritmo fica mais lento. Uma solução para esse inconveniente é adotar uma perturbação variável de modo que se chegue rapidamente ao valor ideal e que tenha uma oscilação reduzida em torno dele. (Bastos, 2013)

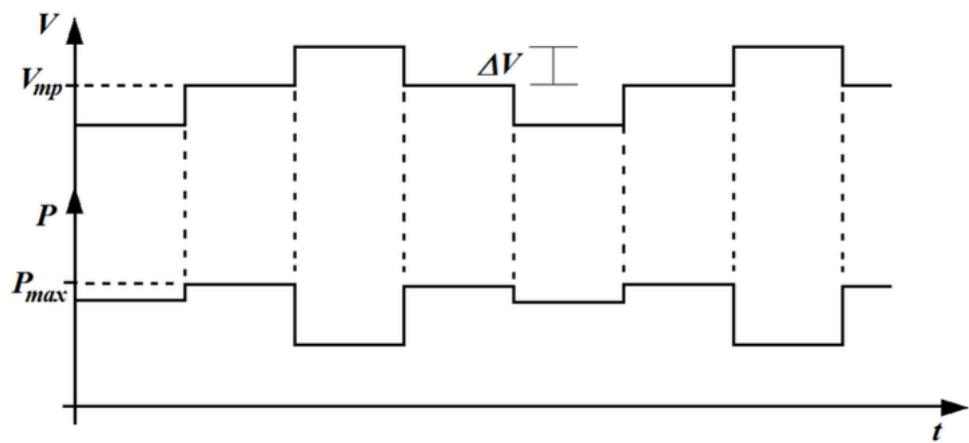


Figura 2.9: Comportamento da tensão terminal e da potência do painel fotovoltaico durante o regime permanente utilizando o algoritmo MPPT P&O com passo fixo. (Bastos, 2013)

2.1.4 Modelo linearizado do painel

Conforme apresentado anteriormente, o modelo do painel fotovoltaico é não-linear. Porém, com a utilização de um algoritmo MPPT, sua operação normalmente estará localizada em torno do ponto de máxima potência. Sendo assim, é possível que o painel fotovoltaico seja linearizado em torno deste ponto. (Bastos, 2013)

As tabelas 2.1 e 2.2 detalham os parâmetros de um conjunto de dois painéis fotovoltaicos conectados em série, fabricado pela Kyocera (KC130TM), os quais são utilizados neste trabalho.

Tabela 2.1: Especificações elétricas do conjunto de dois painéis fotovoltaicos KC130TM

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
P_{MAX}	Potência máxima	260,1	W
V_{MP}	Tensão em P_{MAX}	35,2	V
I_{MP}	Corrente em P_{MAX}	7,39	A
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	43,8	V
I_{SC}	Corrente de circuito aberto	8,02	A
C_V	Coeficiente de temperatura de V_{OC}	$-8,21 \times 10^{-2}$	V/°C
C_I	Coeficiente de temperatura de I_{SC}	$-3,18 \times 10^{-3}$	A/°C
	Tensão máxima do sistema	600	V

Tabela 2.2: Parâmetros do modelo ajustado do conjunto de dois painéis fotovoltaicos KC130TM associados em série

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
I_{PV}	Corrente gerada pela luz	8,0378	A
I_0	Corrente de saturação do diodo	3,598	nA
a	Fator de idealidade do diodo	1,1	
R_P	Resistência paralelo equivalente	176,27	Ω
R_S	Resistência série equivalente	0,18	Ω

De acordo com a equação (1) do modelo generalizado do painel fotovoltaico apresentado no item 2.1.2, a linearização é realizada em torno do ponto de máxima potência (PMP) conforme mostrado na figura 2.10:

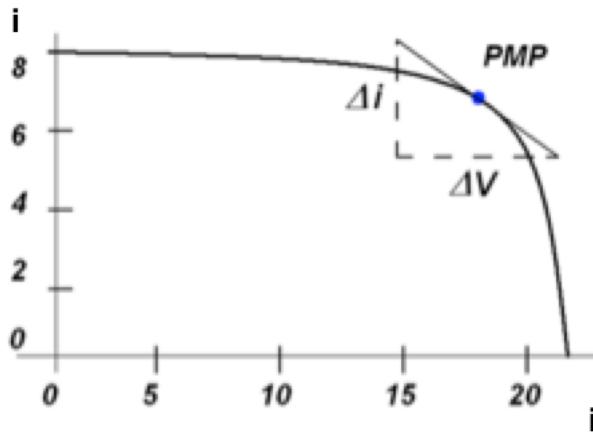


Figura 2.10: Linearização do painel fotovoltaico em torno do ponto de máxima potência (PMP)

A linearização do modelo é explicitada pela reta tangente à curva no ponto de máxima potência conforme dito em (Bastos, 2013). Assim, o modelo pode ser escrito como:

$$i = g(v - V_{mp}) + I_{mp} \quad (3)$$

Tal que:

$$g = \frac{di}{dv} = \frac{1}{r_{pv}} \approx \frac{\Delta i}{\Delta v} \quad (4)$$

Onde r_{pv} é a resistência dinâmica da célula que depende da irradiação e da temperatura, logo, possui um comportamento variante no tempo. Utilizando a equação (3), determina-se o circuito equivalente ao redor do ponto de interesse como mostrado na figura 2.11 sendo $R_{eq} = -\frac{1}{g}$ e $V_{eq} = V_{mp} - \frac{I_{mp}}{g}$. (Bastos, 2013)

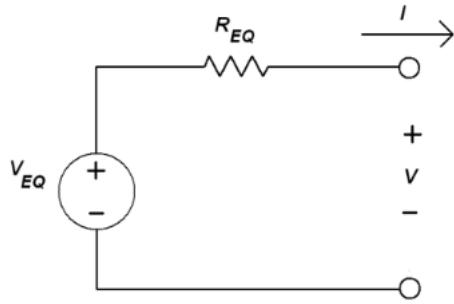


Figura 2.11: Circuito equivalente do modelo linearizado em torno do ponto de interesse

Ao utilizar os parâmetros das tabelas 2.1 e 2.2 juntamente com as equações do modelo linearizado no ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos, obtém-se $R_{eq} = 4,58\Omega$ e $V_{eq} = 69,07V$.

2.2 Descrição do sistema

No item 2.1.2 foi vista a importância da utilização de um conversor CC-CC para manter o painel fotovoltaico operando em sua máxima capacidade. Entretanto, para determinar o conversor a ser utilizado, é importante conhecer as características desejadas do sistema.

O sistema fotovoltaico apresentado neste trabalho é constituído por dois painéis fotovoltaicos conectados em série de modo que o conjunto alimente um conversor CC-CC conectado a um barramento CC de 120V. Portanto, necessita-se de um conversor elevador de tensão visto que é esperado que a tensão de operação da fonte fotovoltaica seja de 35,2V.

Diversos conversores atendem este requisito, tais como: *Boost*, *Buck-Boost*, *Cuk*, *SEPIC*, e outros conversores isolados. (Erickson, DC-DC Power Converters) Entretanto, deseja-se utilizar o menor número de componentes armazenadores de energia. Além

disso, por se tratar de uma aplicação que, em situações reais, podem lidar com altas potências, os conversores isolados não são indicados devido ao seu custo, peso e volume elevado. (Bastos, 2013) Sendo assim, o conversor *Boost* se mostra a solução mais conveniente para a aplicação desejada.

Por fim, a implementação de uma malha de controle combinado com o algoritmo MPPT faz com que o sistema fotovoltaico trabalhe de forma mais eficaz ao longo do processo de busca do ponto de máxima potência durante rápidas variações de temperatura ou irradiação. Uma vez que a malha de controle atua melhorando a resposta transitória do sistema como um todo, as mudanças bruscas da irradiação ou na temperatura são amenizadas na saída, de modo a melhorar o comportamento do sistema no geral. (Moçambique, 2012)

A figura 2.12, a seguir, representa o diagrama de blocos do sistema fotovoltaico proposto e nos próximos tópicos, os blocos do conversor e do controlador serão desenvolvidos.

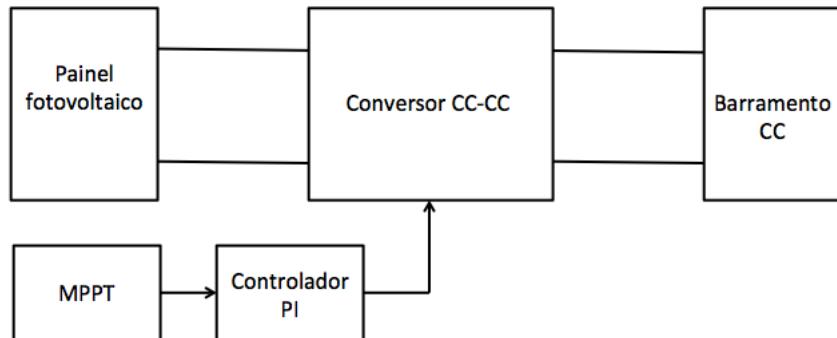


Figura 2.12: Diagrama de bloco do sistema fotovoltaico proposto

2.2.1 Conversor CC-CC

Basicamente os conversores CC-CC tem o objetivo de transformar uma tensão de entrada, de modo a obter uma saída com amplitude maior ou menor e possivelmente

com polaridade oposta ou isolada da entrada. (Erickson and Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2004) Sendo assim, estes circuitos tem um comportamento muito similar aos transformadores, entretanto eles utilizam elementos de chaveamento (transistores bipolares, MOSFET's e IGBT's), ao invés de princípios eletromagnéticos. Devido sua característica chaveada, é necessário que a análise do seu ganho seja realizada em duas etapas: com a chave aberta e com a chave fechada. Assim, para obter o resultado final basta ponderar cada etapa em suas respectivas participações no tempo.

2.2.2 Modelo do sistema fotovoltaico

Considerando o modelo linearizado do painel fotovoltaico e que o barramento CC pode ser representado por uma fonte de tensão fixa, tem-se que o modelo do conversor *boost* acoplado ao painel e ao barramento pode ser representado conforme ilustrado pela figura 2.13 (Bastos, 2013):

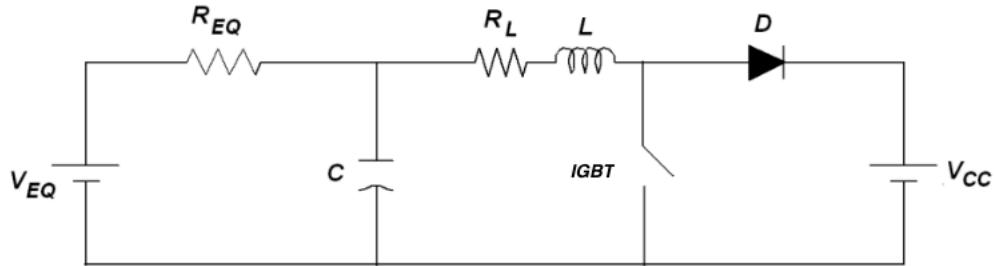


Figura 2.13: Modelo do conversor *boost* conectado ao modelo linearizado do painel e ao barramento CC

Assim como exposto no item anterior, o modelo para o circuito da figura 2.13 será obtido a partir das análises de chave aberta e chave fechada:

- **Modelo com chave aberta**

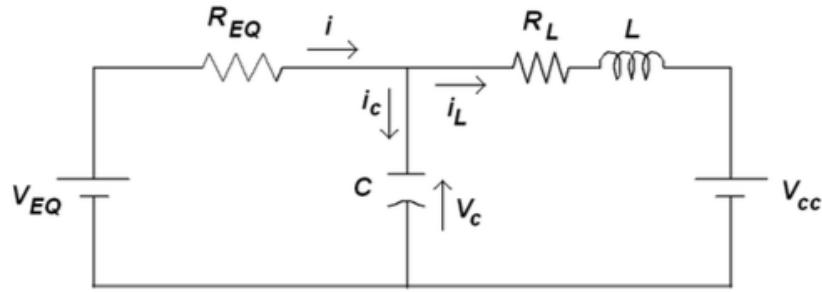


Figura 2.14: Circuito equivalente com a chave desligada

Equacionando o circuito da figura 2.14, obtém-se o conjunto de equações a seguir:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L i_L}{L} + \frac{V_c}{L} - \frac{V_{cc}}{L} \quad (5)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{i_L}{C} - \frac{v_c}{CR_{EQ}} + \frac{V_{EQ}}{CR_{EQ}} \quad (6)$$

- **Modelo com chave fechada:**

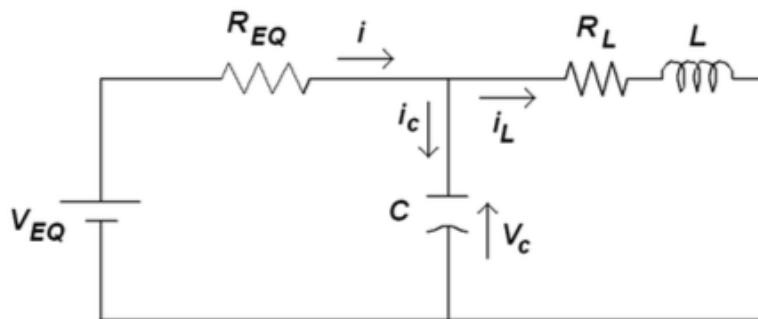


Figura 2.15: Circuito equivalente com a chave ligada

Equacionando o circuito da figura 2.15, obtém-se o conjunto de equações a seguir:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{R_L i_L}{L} + \frac{v_C}{L} \quad (7)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{i_L}{C} - \frac{v_C}{CR_{EQ}} + \frac{V_{EQ}}{CR_{EQ}} \quad (8)$$

Com as equações levantadas para cada posição da chave, basta apenas ponderá-las nos tempos em que cada modo opera. (Erickson and Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2004) Portanto, as equações (5), (6), (7) e (8) podem ser resumidas nas seguintes equações:

$$\frac{di_L}{dt} = \left(-\frac{R_L i_L}{L} + \frac{v_C}{L} \right) d + \left(-\frac{R_L i_L}{L} + \frac{V_C}{L} - \frac{V_{CC}}{L} \right) (1-d) \quad (9)$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{i_L}{C} - \frac{v_C}{CR_{EQ}} + \frac{V_{EQ}}{CR_{EQ}} \quad (10)$$

Onde, d é a razão cíclica de acionamento da chave.

2.2.3 Modelo de pequenos sinais

Com a finalidade de obter uma representação de pequenos sinais em torno do ponto de operação do conversor, é necessário considerar que as variáveis i_L , v_C e d possuem componentes de valor médio assim como pequenas perturbações. Para tal consideração adota-se a seguinte notação:

$$x = X + \hat{x}$$

$$\begin{aligned} i_L &= I_L + \hat{i}_L \\ v_C &= V_C + \hat{v}_C \\ d &= D + \hat{d} \end{aligned} \tag{11}$$

Onde, X representa os valores médios, enquanto \hat{x} representa as perturbações.

Sendo assim, aplicando as equações representadas por (11) nas equações (9) e (10) e separando os valores médios das perturbações obtém-se o conjunto de equações a seguir, que representam a resposta de regime permanente (equação 12) e o modelo de pequenos sinais (equação 13).

$$V_C - R_L I_L - V_{CC}(1 - D) = 0 \tag{12}$$

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_L}{dt} = -\frac{R_L \hat{i}_L}{L} + \frac{\hat{v}_C}{L} + \frac{V_{CC}}{L} \hat{d} \\ \frac{d\hat{v}_C}{dt} = -\frac{\hat{i}_L}{C} - \frac{\hat{v}_C}{R_{EQ} C} \end{cases} \tag{13}$$

Ao aplicar a transformada de Laplace em (13), é possível obter a função de transferência do conversor *boost* acoplado ao painel fotovoltaico e ao barramento CC, onde a saída é a tensão terminal do painel (\hat{v}_C) enquanto a entrada é o ciclo de trabalho do conversor (\hat{d}). Portanto, a função de transferência em questão é dada por:

$$\frac{\hat{v}_C}{\hat{d}} = -\frac{V_{CC} R_{EQ}}{(LCR_{EQ})s^2 + (CR_L R_{EQ} + L)s + (R_{EQ} + R_L)} \tag{14}$$

É importante lembrar que esta função de transferência representa apenas as variações em torno de um ponto médio de funcionamento, isto é, não sendo o suficiente para realizar a simulação do funcionamento do conversor com esta planta. A principal razão desta modelagem no domínio da frequência é fornecer informações necessárias ao projeto da malha de controle. (Erickson and Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2004) Esta planta representa o funcionamento do circuito em torno do ponto médio, cujo é definido pelo valor da variável X , que corresponde aos valores médios de regime permanente das variáveis i_L e v_C , sendo as mesmas escritas em função das entradas CC, dos elementos do circuito e do ciclo de trabalho das chaves.

2.2.4 Projeto do controlador

Para completar a função de transferência apresentada pela equação (14) e assim realizar o projeto do controlador para o sistema fotovoltaico em questão necessita-se dos parâmetros dos componentes utilizados no circuito do conversor *boost*, os quais são apresentados pela tabela 2.3:

Tabela 2.3: Parâmetros do conversor *boost* utilizado

Símbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
C	Capacitor de entrada	1	mF
L	Indutor	5	mH
R_L	Resistência do indutor	0,3	Ω
D	Ciclo de trabalho	0,707	(adimensional)
V_{CC}	Tensão do barramento CC	120	V
f_{CH}	Frequência de chaveamento	10	kHz

É importante lembrar que a função de transferência obtida poderia também ter \hat{t}_L como saída. Porém, é mais conveniente adotar a tensão terminal do painel para a realização do controle devido às suas características físicas.

A variação do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico é um fator acima de tudo dependente da irradiação solar e da temperatura, conforme apresentado pelas figuras 2.16 e 2.17:

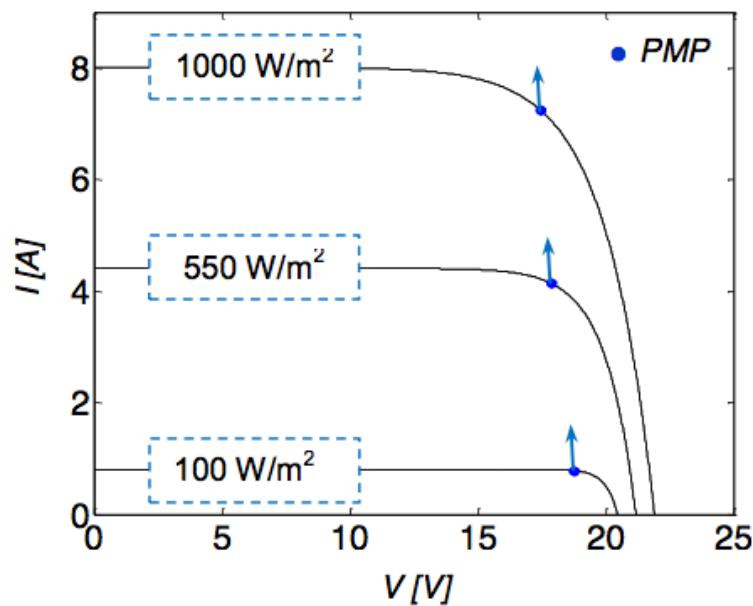


Figura 2.16: Comportamento do ponto de máxima potência (PMP) com a variação da irradiação

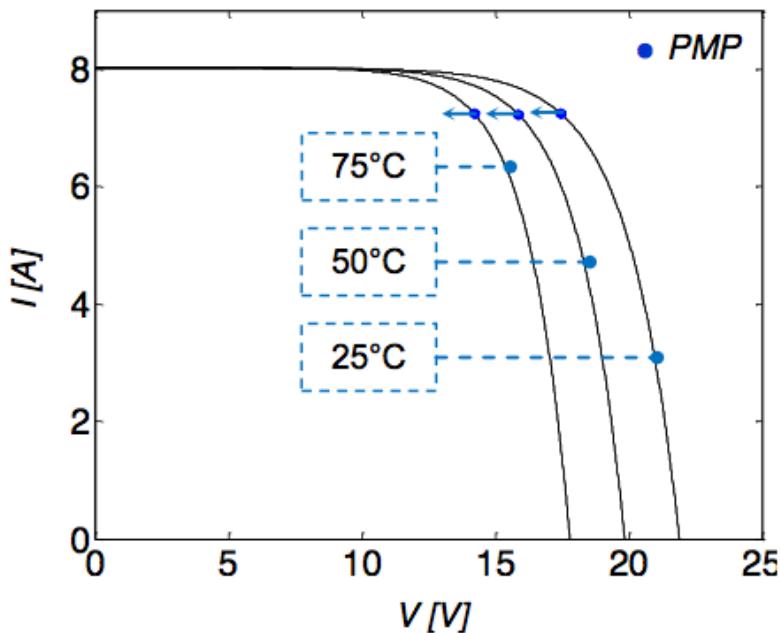


Figura 2.17: Comportamento do ponto de máxima potência (PMP) com a variação da temperatura

Nota-se que para variações de irradiação, a tensão no PMP quase não se altera, enquanto que variações de temperatura implicam em uma pequena variação da corrente no PMP. Na prática observa-se que as mudanças de irradiação são mais comuns e abruptas por conta do sombreamento das células causado frequentemente em dias parcialmente nublados. Já, as mudanças de temperatura ocorrem de modo mais lento e em intervalos definidos. Portanto, prefere-se realizar o controle por tensão por este exigir uma resposta menos dinâmica quando comparado com o controle por corrente, isto é, grandes variações de irradiação causam pequenas variações na tensão. (Xiao, Dunford and Palmer, 2007)

Para o projeto da malha de controle, representada em azul na figura 2.18, deseja-se que algoritmo MPPT apresente o valor da tensão de referência a ser seguida para que então seja gerado um ciclo de trabalho que acionará a chave eletrônica através de um dispositivo PWM. Além disto, com a finalidade de normalizar o sistema

de controle e obter um entendimento mais intuitivo das variáveis de controle, utiliza-se um sensor de tensão com ganho $H_v = 1/35,2$. Sendo assim, quando o valor medido pelo sensor de tensão for unitário, o sistema possui erro nulo, caso a medida indique 0,9 ou 1,1, entende-se que existe um erro de -10% ou +10% na saída.

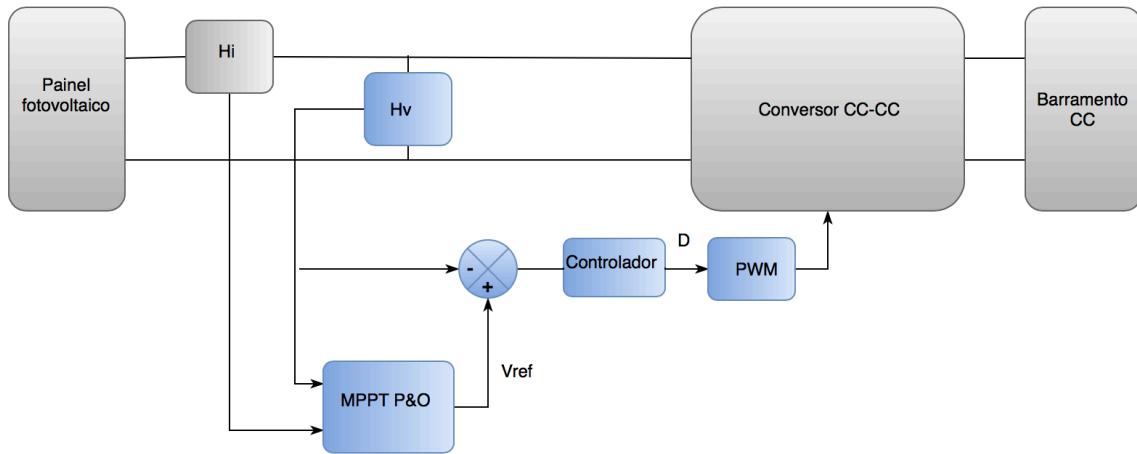


Figura 2.18: Sistema completo com destaque para a malha de controle em azul

Em termos dos critérios de desempenho para o sistema controle, deseja-se que este responda o mais rápido possível, com mínimo sobressinal e sem erro de regime. Além disto, é necessário que a resposta do controlador seja suficientemente mais rápida que a resposta do algoritmo MPPT de modo a garantir a estabilidade do sistema como um todo.

Por se tratar de um sistema não-linear, o projeto do sistema de controle é sofisticado. Contudo, a função de transferência obtida anteriormente permite que controladores lineares clássicos sejam desenvolvidos nas regiões em torno do ponto de máxima potência. Como em situações práticas emprega-se dispositivos microprocessados (DSP) para realizar o sistema controle, este trabalho irá utilizar técnicas de controle digital para implementar um controle PI. Assim, utiliza-se uma

frequência de amostragem de 10kHz e método *ZOH* (*Zero-order Hold*) para a discretização do sistema, ou seja, realizam-se medidas da tensão terminal do painel a cada 100 μ s e a variável de Laplace (s) da função de transferência é substituída pela seguinte relação:

$$z = e^{sT_o} \quad (15)$$

Onde, T_o é a frequência de amostragem.

Através da ferramenta *Sisotool* (*Matlab Toolbox*), que utiliza o método dos lugares das raízes, determina-se os seguintes ganhos proporcional e integral do controlador:

$$K_P = 0,084051 \quad (16)$$

$$K_I = 0,0772933 \quad (17)$$

Após obter o controlador PI discreto, a resposta ao degrau do sistema representado pela figura 2.18 foi obtida através do *Simulink* (*Matlab software*) e está apresentada a seguir:

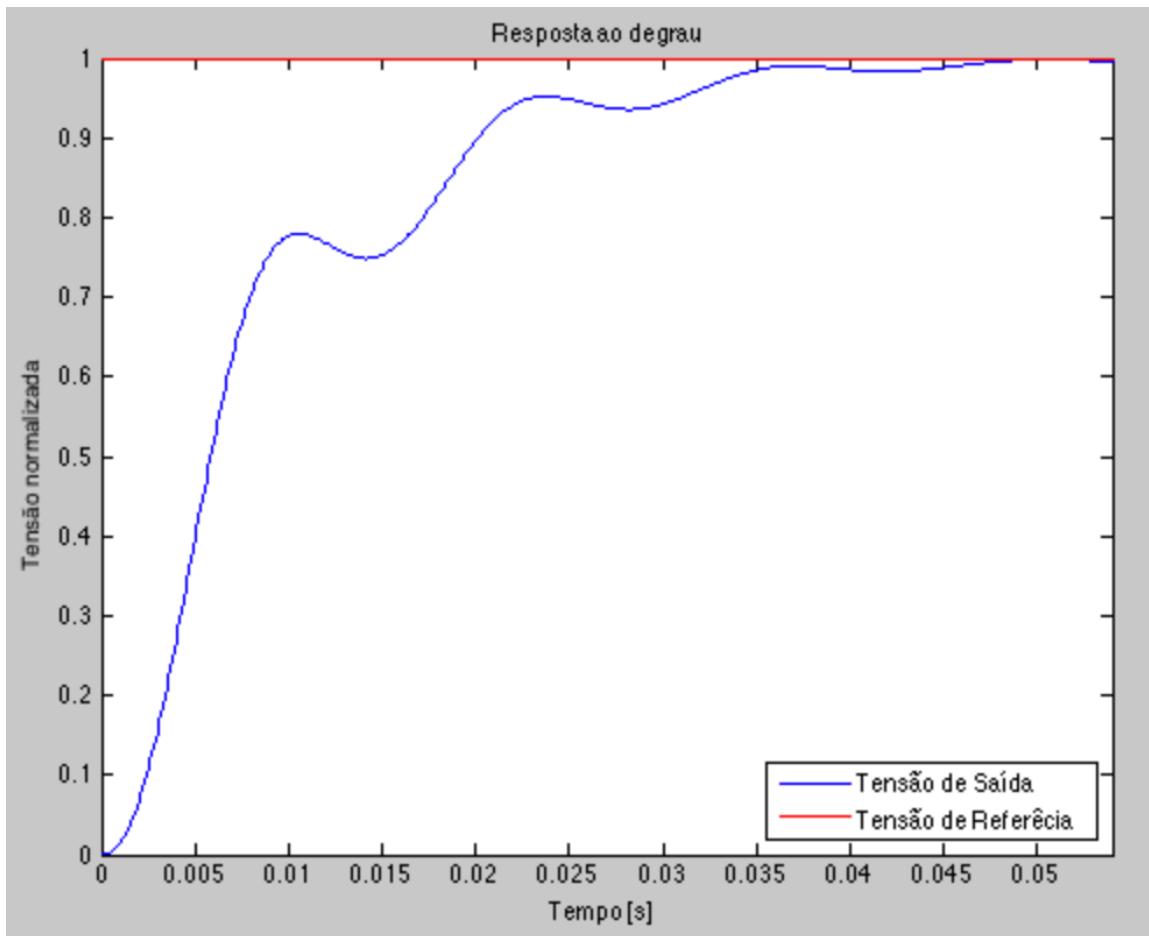


Figura 2.19: Resposta temporal da tensão terminal do painel fotovoltaico com controle PI

2.3 Resultados

Como resultado, realiza-se a simulação do sistema proposto com o intuito de verificar o comportamento do projeto quando este for implementado na prática. Em outras palavras, a simulação pode ser entendida como uma prova final do desenvolvimento do projeto, na qual será apontado se as especificações de projeto foram ou não atendidas.

As simulações deste trabalho foram realizadas com o auxílio do software *PSIM* que, de maneira conveniente, oferece bibliotecas específicas para fontes alternativas de energia que tornam o processo mais simples. Para uma melhor organização, os

resultados das simulações estão divididos em duas partes (Resposta dinâmica do sistema e Variações nas condições de irradiação e temperatura), e serão apresentados a seguir.

2.3.1 Resposta dinâmica do sistema

Para realizar a simulação do sistema fotovoltaico desenvolvido, é necessário conhecer as condições iniciais dos componentes armazenadores de energia do conversor utilizado e, além disto, determinar a frequência de amostragem para a implementação do algoritmo de modo a garantir sua estabilidade.

Primeiramente, para determinar as condições iniciais do sistema, considera-se que o sistema esteja desligado, isto é, existe um tempo suficientemente grande para que se possa considerar que o capacitor de entrada esteja carregado com a tensão de circuito aberto dos conjunto de painéis e portanto, isto implica que a corrente inicial do indutor presente no circuito do conversor seja nula.

Por fim, o tempo de amostragem do algoritmo MPPT deve garantir que o conjunto de painéis fotovoltaicos tenha tempo suficiente para que ele se estabilize, e assim, reduza o número de oscilações em torno do ponto de máxima potência durante o regime permanente. De acordo com (Femia, Petrone and Vitelli, 2015), o tempo limite é pode ser aproximadamente calculado por:

$$T_\varepsilon \cong -\frac{\sqrt{LC}}{\xi} \ln (\varepsilon) \quad (18)$$

Onde ξ é o fator de amortecimento que é dado por:

$$\xi = 0,5 \frac{I_{mp}}{V_{mp}} \sqrt{\frac{L}{C}} + \left(\frac{R_c + R_L}{2} \right) \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (19)$$

Normalmente considera-se $\varepsilon = 0,1$ um valor razoável para assumir que o transiente esteja finalizado. (Femia, Petrone and Vitelli, 2015) Usando os valores apresentados na Tabela 2.1 e 2.3, obtém-se $\xi = 0,3018$ e $T_{0,1} = 1,706ms$. Devido à resposta do controlador ser mais lenta que o tempo limite calculado, utilizou-se na simulação, $T = 50ms$ para a taxa de atualização do MPPT, de modo que o controlador tenha tempo suficiente de se estabilizar antes de um próximo passo de busca. O diagrama implementado no PSIM para a simulação é apresentado pela figura 2.20 a seguir:

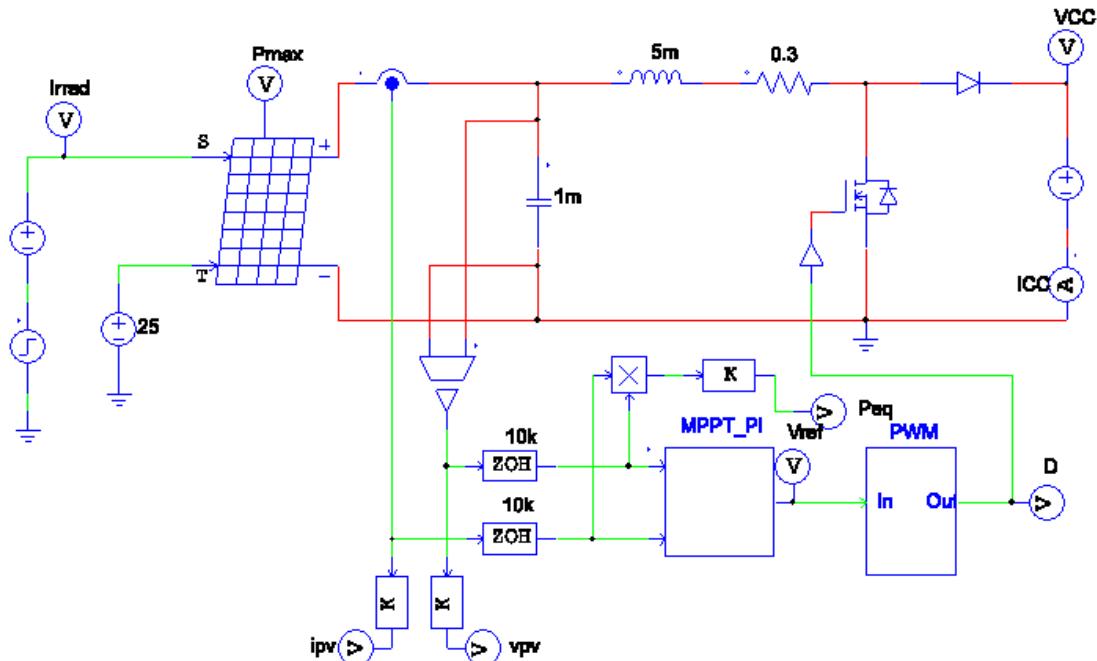


Figura 2.20: Diagrama utilizado na simulação do sistema fotovoltaico

Através de sua simulação é possível obter as respostas dinâmicas da tensão terminal e da potência gerada pelos painéis fotovoltaicos. Conforme explicado na seção

2.1.3, a saída gerada pelo algoritmo implica em uma potência gerada pelo painel que oscila em torno do ponto de máximo (260W) quando o sistema atinge regime permanente. O resultado obtido para a resposta da potência gerada pode ser visto na figura 2.21:

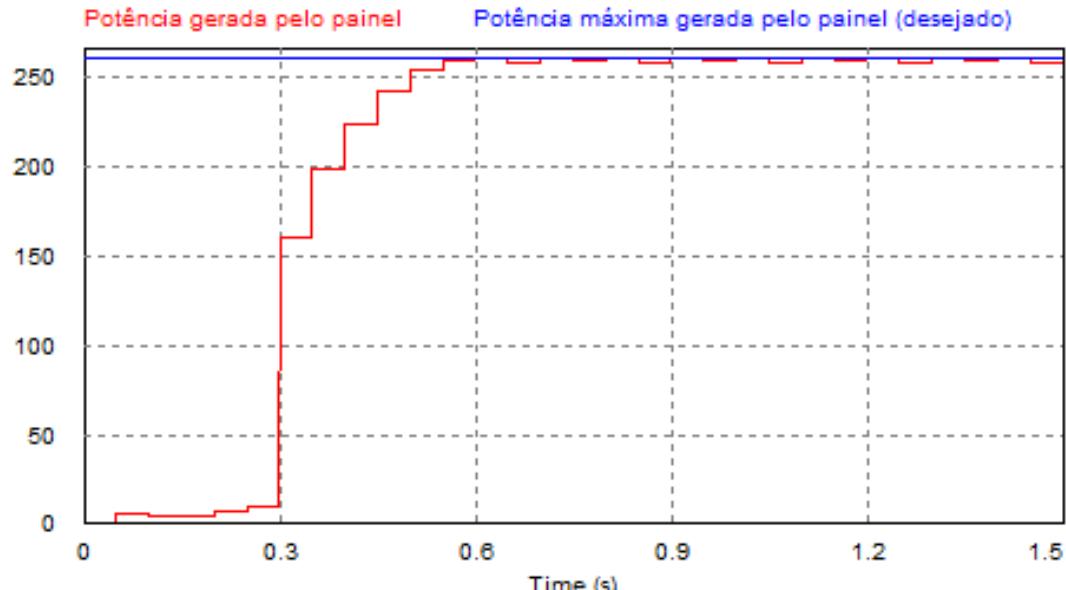


Figura 2.21: Potência gerada pelo painel

Já na figura 2.22, apesar da tensão terminal também oscilar em torno do seu ponto de operação ($35,2V$ a $25^{\circ}C$ e $1000W/m^2$) como é de se esperar, ela contém traços da resposta transitória lenta do sistema de controle.

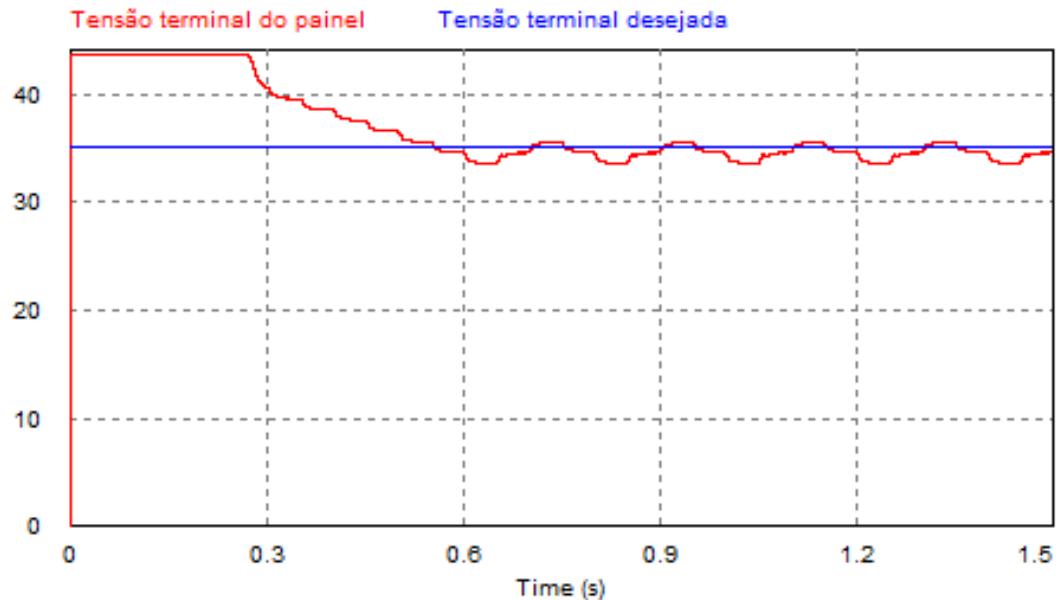


Figura 2.22: Tensão terminal do painel

2.3.2 Variações nas condições de irradiação e temperatura

Como visto na seção 2.2.4, o ponto de máxima potência é suscetível à variações da irradiação e da temperatura e portanto deseja-se garantir que o sistema fotovoltaico continue operando em sua capacidade máxima. Assim, realiza-se simulações, nas quais são variadas tais grandezas com o intuito de verificar o comportamento do sistema diante essas perturbações. As figuras 2.23 e 2.24 mostram o efeito de uma redução de 30% da irradiação na resposta do sistema. Nota-se que quando ocorre a mudança súbita, o sistema logo se estabiliza seguindo a tensão terminal de referência para a qual se maximiza a potência produzida.

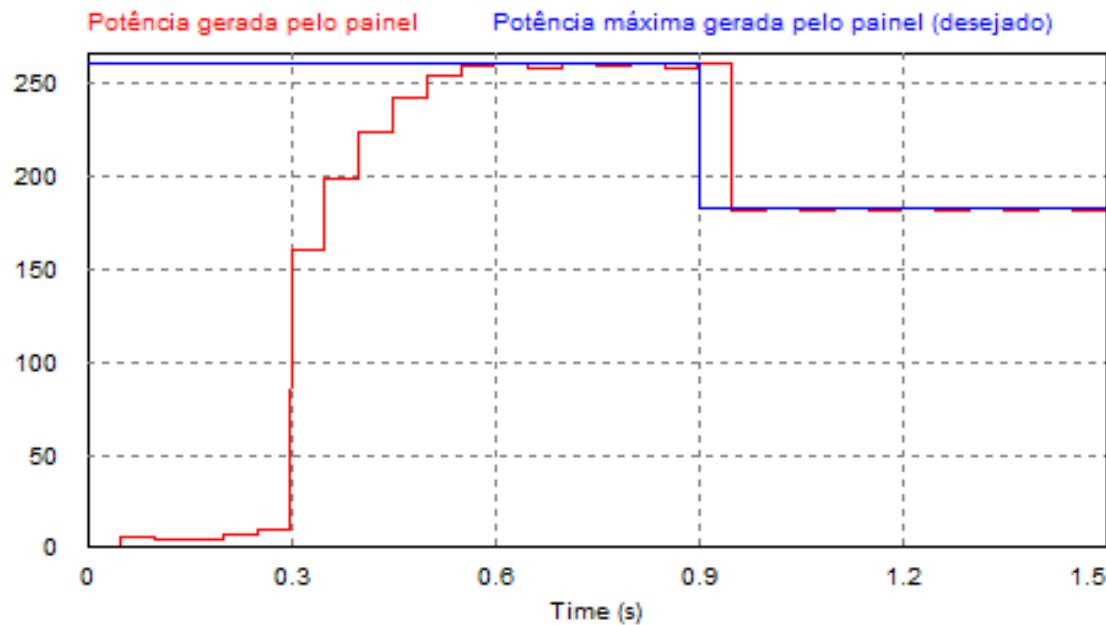


Figura 2.23: Resposta da potência gerada quando o sistema sofre uma variação brusca de irradiação em $t=0,9\text{s}$

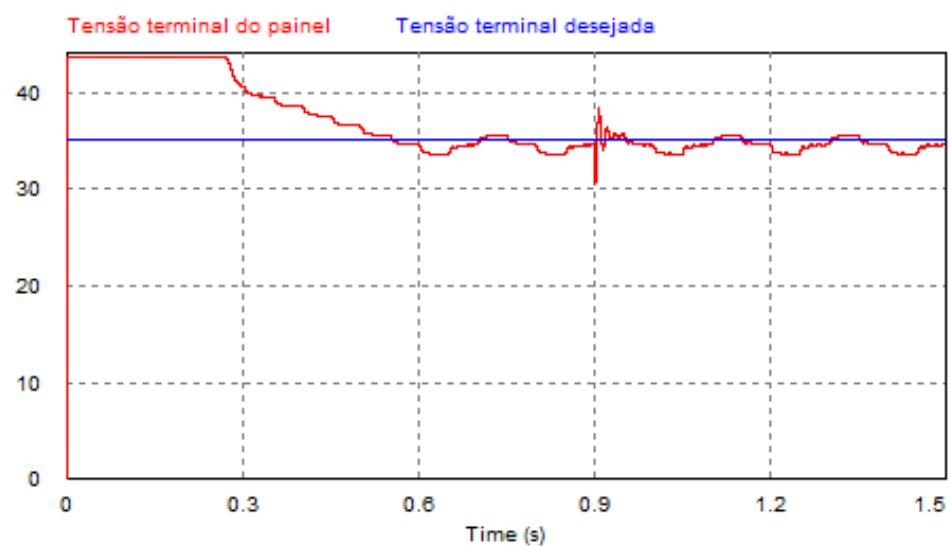


Figura 2.24: Resposta da tensão terminal do painel fotovoltaico quando o sistema sofre uma variação brusca de irradiação em $t=0,9\text{s}$

Já as figuras 2.25 e 2.26, representam a resposta em relação a um aumento repentino de 25°C para 75°C da temperatura. Apesar dessa variação, a potência produzida continua a ser máxima como no caso anterior, entretanto isto ocorre às custas de uma mudança no referencial da tensão terminal do painel, o que implica em um gasto de tempo maior para que o sistema retorne ao seu ponto ideal de operação.

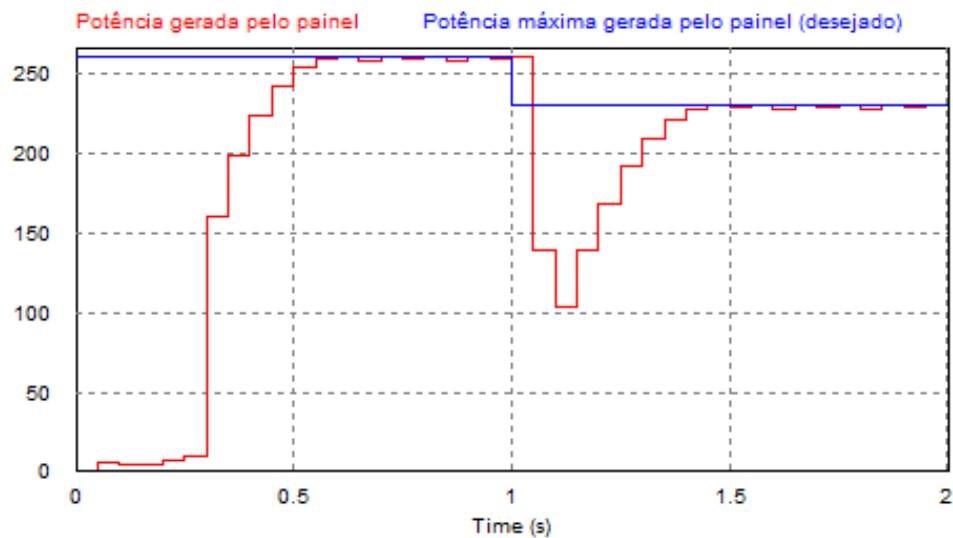


Figura 2.25: Resposta da potência gerada quando o sistema sofre uma variação brusca de temperatura em $t=1s$

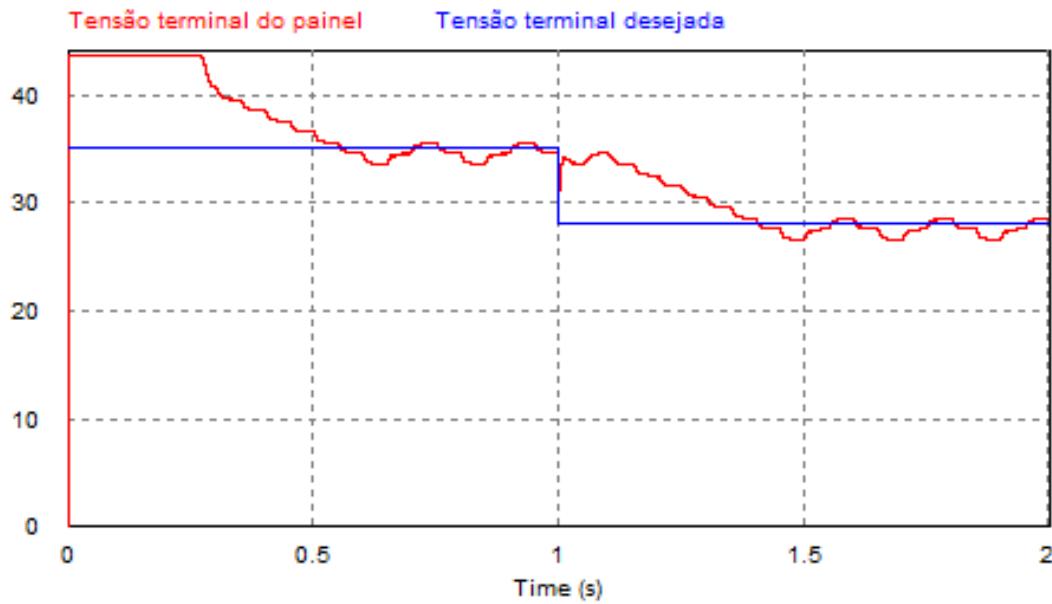


Figura 2.26: Resposta da tensão terminal do painel fotovoltaico quando o sistema sofre uma variação brusca de temperatura em t=1s

Além do efeito da mudança do referencial da tensão terminal causado pela variação da temperatura do painel, nota-se que o desempenho do sistema fotovoltaico é muito mais suscetível a variação na irradiação do que na temperatura, justificando assim a proposta de controle realizada pela tensão terminal do painel.

3. Conclusão

3.1 Conclusões gerais

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo apresentar uma proposta de um sistema de controle para geração de energia fotovoltaica. Teve seu inicio com uma base teórica sobre os principais componentes envolvidos em um sistema fotovoltaico. A partir de então, foi implementado o algoritmo de busca de ponto de máxima potência do tipo P&O, cujo tem como objetivo obter um valor referência para que o sistema de controle possa manter o painel fotovoltaico operando eficientemente. Por fim, para implementar o sistema de controle, foi necessário obter um modelo linearizado do sistema composto pelo painel e pelo conversor CC.

Através deste trabalho, foi possível verificar a importância do algoritmo MPPT uma vez que os geradores solares são sensíveis à mudanças de temperatura e principalmente de irradiação. O desempenho do algoritmo aliado à resposta do sistema de controle afeta diretamente a eficiência com que o sistema fotovoltaico irá operar em seu ponto ótimo, seja no tempo necessário para atingir regime permanente ou na proximidade do ponto de operação desejado. Além disto, embora o sistema tenha apresentado resultados satisfatórios para um sistema de controle lento, eles foram obtidos à custa de um ajuste no período de atualização do algoritmo MPPT, que resultou em um maior período para estabelecer regime permanente, afetando assim, a eficiência do sistema. Uma solução sugerida para o problema encontrado no decorrer deste trabalho seria a utilização de controladores mais sofisticados, os quais melhorariam o tempo de resposta do sistema de controle, permitindo assim que seja possível utilizar o período mínimo para atualizar o passo de busca, de modo a melhorar desempenho do sistema fotovoltaico com um todo.

3.2 Trabalhos futuros

No decorrer deste trabalho identificaram-se como propostas para trabalhos futuros:

- Implementação de outras técnicas mais complexas de controle, como por exemplo *Fuzzy*, associado a utilização de diversos métodos para a busca de ponto de máxima potência visando a maximização da eficiência;
- Estudo da influência da carga durante o processo de regulação da tensão terminal do painel fotovoltaico;
- Implementação de um sistema fotovoltaico conectado à rede por meio de conversores CC-CA;
- Implementação de um sistema fotovoltaico associado a uma bateria de modo a garantir uma potência constante para uma carga independentemente de variações na irradiação.

4. Referência Bibliográfica

Attou, A., A. Massoum e M. Saidi. Photovoltaic Power Control Using MPPT and Boost Converter. 2014.

Bastos, Renan Fernandes. Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo- Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída. Tese de Mestrado. São Carlos: EESC-USP, 2013.

CRESESB. ENERGIA SOLAR PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES. 2006.

DAS, DEBASHIS e SHISHIR KUMAR PRADHAN. MODELING AND SIMULATION OF PV ARRAY WITH BOOST CONVERTER: AN OPEN LOOP STUDY. 2011.

Erickson, Robert W. DC-DC Power Converters. Boulder.

Erickson, Robert W. e Dragan Maksimović. Fundamentals of Power Electronics. Boulder: Kluwer Academic Publishers, 2004.

Femia, Nicola, Giovanni Petrone e Massimo Vitelli. Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. July de 2005.

Frankfurt School – UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance. "Global Trends in Renewable Energy Investment 2015." 2015.
—. "Global Trends in Renewable Energy Investment 2016." 2016.

GOW, J.A. e C.D. MANNING. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. March de 1999.

Kibria, Mohammad Tawheed, et al. A Review: Comparative studies on different generation solar cells technology. Dhaka, 2014.

Moçambique, Nilton Eufrázio Martinho. Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos. São Carlos , 2012.

PVEDUCATION. A collection of resources for the photovoltaic educator.

REN21. "Renewables 2015 Global Status Report." 2015.
<www.pveducation.org>

Smil, Vaclav. Power Density Primer: Understanding the Spatial Dimension of the Unfolding Transition to Renewable Electricity Generation. 08 de May de 2010.

Tsai, Huan-Liang, Ci-Siang Tu e and Yi-Jie Su. Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. San Francisco, 2008.

Villalva, Marcelo Gradella, Jonas Rafael Gazoli e Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. May de 2009.

Xiao, Weidong, et al. Regulation of Photovoltaic Voltage. 2007.