

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM EMULADOR ELETRÔNICO DE
ARRANJOS FOTOVOLTAICOS**

Nome: Jackeline Apolinário da Silva	Código: 742031
Telefone: (43)9916-6550	e-mail: jack_apolinario@hotmail.com
Orientador: Sérgio Augusto Oliveira da Silva E-mail do orientador: augus@utfpr.edu.br	
Coorientador: Leonardo Poltronieri Sampaio E-mail do orientador: sampaio@utfpr.edu.br	

JACKELINE APOLINÁRIO DA SILVA

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM EMULADOR ELETRÔNICO DE
ARRANJOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.
Orientador: Sérgio Augusto Oliveira da Silva
Co-orientador: Leonardo Poltronieri Sampaio

CORNÉLIO PROCÓPIO
NOV/2014



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jackeline Apolinário da Silva

Estudo e implementação de um emulador eletrônico de arranjos fotovoltaicos

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:30hs do dia 28/11/2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Sergio Augusto Oliveira da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 PROBLEMA	9
4 OBJETIVOS	11
4.1 OBJETIVO GERAL	11
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
5 MÉTODO DE PESQUISA	12
6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
6.1 CIRCUITO EQUIVALENTE E MODELO MATEMÁTICO	13
6.2. MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	14
6.3 CONVERTOR BUCK.....	20
6.3.1 Dimensionamento dos Elementos do Conversor Buck	21
6.3.1.1 Dimensionamento do indutor	21
6.3.1.2 Dimensionamento do Capacitor	22
6.3.2 Modelagem AC de pequenos sinais através da técnica da média das equações.....	23
6.3.2.1 Obtenção das equações médias	23
6.3.2.2 Perturbação e Linearização	25
6.3.3 Função Transferência	27
6.4 CONTROLADOR PI	28
6.5 EMULADOR DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS	30
7 RESULTADOS	31
8 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE I – CURVA IxV OBTIDA POR MEIO DO MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR LU E NGUYEN (2012)	56
APÊNDICE II – PROJETO DO CONTROLADOR PI PARA FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA G_{ID}	57
APÊNDICE III – CÓDIGO IMPLEMENTADO NO SIMULINK PARA EMULADOR COMPUTACIONAL QUE UTILIZA O MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO POR LU E NGUYEN (2012)	59
ANEXO I – CURVA IxV OBTIDA ATRAVÉS DO CÓDIGO PROPOSTO EM CASARO E MARTINS (2012)	71

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e análise de um emulador eletrônico de arranjos fotovoltaicos, o qual é implementado por meio de um modelo matemático. A primeira etapa do desenvolvimento consiste na implementação do circuito equivalente e, conseqüentemente, do modelo matemático que representa uma célula fotovoltaica. Os conceitos envolvidos neste etapa são estendidos para arranjos fotovoltaicos compostos por várias células. O desenvolvimento de modelos matemáticos proposto neste trabalho, tem por objetivo gerar o sinal de referência de controle do conversor CC-CC Buck, a fim de que este reproduza em sua saída a curva tensão-corrente, característica de um arranjo fotovoltaico. O dimensionamento dos elementos passivos do conversor, bem como o projeto dos ganhos do controlador PI são apresentados. Finalmente, o comportamento e desempenho do emulador eletrônico é testado e analisado por meio de simulações computacionais, a fim de validar o desenvolvimento teórico proposto.

Palavras-chave— Emulador Eletrônico de Arranjos Fotovoltaicos, Conversor CC-CC Buck, Controlador PI.

ABSTRACT

This paper presents a photovoltaic arrays electronic emulator via computer simulation using SIMULINK[®] software MATLAB[®]. The first step to get it, is the implementation of the equivalent circuit, and consequently, the mathematical model of a photovoltaic cell. The concepts involved in this step are extended for photovoltaic arrays. The model proposed in this paper generates reference values for control of a buck converter, in order that it present in its output the voltage-current characteristic relationship of the photovoltaic array. Thus, necessary the sizing of the converter passive elements and controller gains. Finally, the behavior of the arrays photovoltaic electronics emulator is analysed through graphical representation of the current and voltage signals output of the buck converter.

Keywords - Photovoltaic Arrays Electronic Emulator, Buck CC-CC Converter, Controller Gains

1 INTRODUÇÃO

Segundo um estudo realizado pela Exxon Mobil, a demanda por energia aumentará 35% no período de 2010 e 2040. Esta perspectiva de crescimento torna cada vez mais necessário a utilização de fontes de energia renováveis e alternativas, tal como a solar (VIJAYAKUMAR; DEVARAJAN; DEVARAJAN, 2012). Este tipo de energia é convertido em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas (CF)s.

A eficiência destas CFs está diretamente relacionada à potência de saída disponível nos terminais de saída de um painel fotovoltaico (FV), a qual depende de suas características construtivas e das condições climáticas existentes, tais como radiação solar e temperatura ambiente. Segundo Casaro e Martins (2008), a corrente do arranjo diminui à medida que o nível de radiação solar diminui, porém a tensão não sofre interferências significativas. Já as altas temperaturas implicam numa diminuição da tensão disponibilizada pelo arranjo FV. Sabe-se também que a curva característica tensão-*versus*-corrente (IxV) do painel FV é não linear.

Desta forma, a utilização de um equipamento que emule as características de um painel fotovoltaico em diferentes níveis de radiação solar e temperatura, possibilita maior flexibilidade e agilidade no desenvolvimento de projetos envolvendo arranjos FV, tais como a avaliação e implementação de técnicas de rastreamento da máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* – MPPT), variação do perfil corrente-tensão (IxV) e potência-tensão (PxV).

O emulador eletrônico de arranjos FV foi obtido por meio de um conversor CC-CC Buck, o qual será controlado com o intuito de obter a relação de tensão-corrente característica do arranjo FV. Esta relação será obtida por meio de um modelo matemático baseado nas variáveis de entrada do sistema, ou seja, temperatura da célula FV, radiação solar e corrente de saída do emulador, como mostrado na Figura 1.

Diferente do emulador proposto neste trabalho, Lu e Nguyen (2012) apresenta um emulador eletrônico de arranjos FV composto por um conversor CC-CC Buck-Boost. Contudo, a escolha do conversor CC-CC Buck neste trabalho justifica-se pelo fato dele ser naturalmente estável, além de sua saída apresentar característica de uma fonte de corrente, ou seja, quando operando em modo de condução contínua, a corrente de saída do conversor é contínua, característica é semelhante a saída do arranjo FV.

Desta forma, este trabalho apresenta os conceitos envolvidos para a concepção de um emulador eletrônico de arranjos FV. O primeiro conceito abordado é sobre o circuito equivalente e a descrição do modelo matemático de um arranjo FV. Em seguida é apresentado

o dimensionamento dos elementos do conversor Buck, bem como a técnica de modelagem de pequenos sinais, a fim de encontrar a função de transferência deste conversor. Uma vez obtida a função transferência, são descritas as etapas para obtenção de um controlador, no caso deste trabalho, um compensador proporcional-integral (PI). Além disto, o emulador foi implementado considerando-se dois modelos matemáticos diferentes, permitindo a realização de uma análise comparativa entre estes.

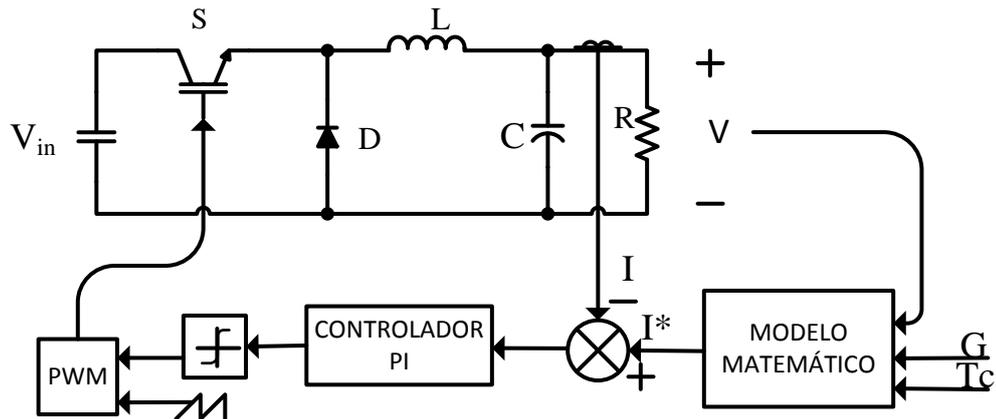


Figura 1 – Emulador eletrônico de arranjos fotovoltaicos

2 PROBLEMA

Para a implementação de técnicas ou estudos envolvendo arranjos FVs é necessário a realização de testes que os validem de forma qualitativa e/ou quantitativa.

Técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência– *Maximum power point tracking* – (MPPT) são um exemplo. O objetivo destas é fazer com que o painel FV opere no ponto de corrente e tensão (I_{MPPT} e V_{MPPT}) de modo que a máxima potência seja extraída. Desta forma, testes devem ser realizados para que a técnica mais eficiente de MPPT seja implementada.

Em outros casos, a potência fornecida pelo arranjo FV é maior que a consumida pela carga, a qual está conectado. Sendo assim, é possível que o excedente de potência gerada possa ser injetada na rede elétrica. Para esta situação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em 2012 a Resolução Normativa n° 482/2012, que estabelece a regulamentação necessária para a micro e mini geração distribuída utilizando arranjos FVs.

Entretanto, a distribuidora de energia elétrica responsável, tem o direito de requerer e de acompanhar os testes desempenho das centrais geradoras distribuídas, dos sistemas de distribuição e dos equipamentos conectados e dos pontos de conexão com as demais instalações de transmissão, conforme estabelece o módulo 4 dos Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST).

No entanto, há dificuldades para a realização de testes/ensaios utilizando arranjos FVs, uma vez que seu comportamento não está relacionado somente às suas características construtivas, mas também as condições climáticas como radiação solar e temperatura. Essa característica restringe as condições de testes para implementação de técnicas ou estudos utilizando arranjos FVs. Sendo assim, a realização de testes considerando vários níveis de radiação solar e temperatura da CF, tornando os mais completos, pode demandar muito tempo, e ainda pode ser inviável, uma vez que em algumas regiões do mundo não apresentam determinadas condições climáticas.

3 JUSTIFICATIVA

Devido o aumento da demanda por energia elétrica, cada vez mais fontes renováveis e alternativas de energia estão sendo utilizadas para suprir esta necessidade. Dentre estas fontes, há um crescimento significativo no cenário mundial na utilização da energia solar (Vijayakumari, Devarajan e Devarajan, 2012).

Este contexto, impulsiona o desenvolvimento de estudos com objetivo de maximizar eficiência dos arranjos FVs, de analisar o comportamento do painel FV quando sombreado, bem como, de implementar sistemas de anti-ilhamento. Por sua vez, o emulador eletrônico pode ser utilizado na validação de técnicas, sistemas ou até mesmo produtos resultantes destes estudos.

A utilização de um emulador eletrônico que apresente o comportamento de um arranjo FV para quaisquer níveis de radiação solar e temperatura do painel FV, possibilita uma maior agilidade e flexibilidade no desenvolvimento de projetos e testes envolvendo arranjos FVs, uma vez que as condições de testes são escolhidas, e não impostas pelo meio ambiente.

Outra propriedade do emulador proposto é a possibilidade de emular diferentes arranjos FVs, bem como, painéis de diferentes fabricantes, modificando as características construtivas do painel FV no programa implementado no MATLAB.

Uma vez que testes e projetos são realizados de forma mais rápidos, contribuindo de forma significativa com os estudos relacionados ao arranjo FV. Além disto, a possibilidade de considerar várias condições de temperatura da CF e radiação solar nos testes torna-os mais completos.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e simular um emulador fotovoltaico de até 600 W, empregando 2 modelos matemáticos de arranjos fotovoltaicos diferentes, por meio de simulação computacional.

A potência de 600 W permite que até três painéis sejam emulados. E foi limitada à este valor porque para emular arranjos FV com potência maiores, seria necessário que todos elementos do conversor Buck suportassem correntes elevadas (acima de 20 A), o que dificultaria a concepção deste emulador na prática.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- apresentar e analisar os circuitos elétricos que emule o comportamento estático e dinâmico de uma célula fotovoltaica cujo modelos estão disponíveis na literatura atual, bem como, analisar as equações que descrevem o circuito equivalente, que por sua vez fornecerão os sinais de referência do controle;
- implementar o emulador fotovoltaico eletrônico via simulação computacional, utilizando o *software* SIMULINK® do programa MATLAB®.
- realizar uma análise comparativa entre os modelos matemáticos do arranjo FV utilizados para obtenção do emulador fotovoltaico.

5 MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia de pesquisa empregada quanto ao objetivo é descritiva, pois é necessário analisar as características de um painel FV.

O trabalho se iniciou-se com um levantamento bibliográfico, principalmente com os relacionados aos temas: implementação de circuitos equivalentes de células FV, emuladores de arranjos FV, tipos de controle aplicado ao conversor Buck. Conforme referências sobre os temas citados foram encontradas, o estudo teórico iniciou-se de forma a fundamentar e auxiliar na execução da proposta do trabalho.

A partir dos estudos realizados sobre o circuito equivalente da célula FV, será realizada sua modelagem matemática. Posteriormente, o conversor Buck e o seu controlador PI serão projetados e utilizados nas simulações computacionais. Os algoritmos envolvidos no controle do conversor Buck implementados no MATLAB.

A fim de comparar o desempenho do emulador os sinais de tensão e corrente da saída do conversor Buck serão comparados com as curvas presentes do *datasheet* do painel FV, que devem ser os mesmos para uma mesma radiação solar e temperatura da célula.

6 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

6.1 CIRCUITO EQUIVALENTE E MODELO MATEMÁTICO

Primeiramente, para realizar o estudo e implementação de um emulador eletrônico fotovoltaico é necessário desenvolver um circuito elétrico que represente o comportamento eletrônico de um painel FV, o qual pode ser modelado de diferentes maneiras, como será apresentado a seguir.

Dentre as fontes bibliográficas encontradas na literatura e utilizadas no desenvolvimento e execução deste trabalho, o modelo mais simplificado é encontrado em Vijayakumari, Devarajan e Devarajan (2012) e Walker (2000), conforme ilustrado na Figura 1.

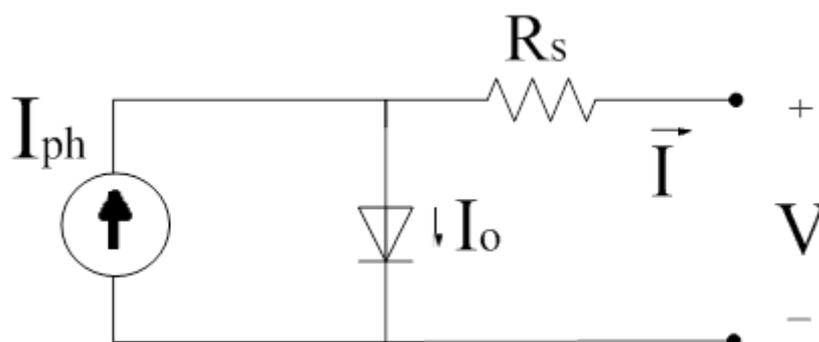


Figura 1 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

Note que a célula fotovoltaica (CF) é representada por uma fonte de corrente I_{ph} em paralelo com um diodo, e por fim em série com resistor série R_s .

A fonte de corrente I_{ph} representa a fotocorrente, que por sua vez está relacionada à radiação solar e temperatura da célula fotovoltaica. Já o diodo contribui com a parcela da corrente reversa de saturação da CF. Por último, R_s representa as perdas resistivas no material semiconductor.

Outro circuito equivalente é apresentado por Casaro e Martins (2008), Zhao e Kimball (2012), Seguel (2009), onde há a inclusão da resistência R_p colocada em paralelo com a fonte de corrente I_{ph} e o diodo D, como pode ser observado através da Figura 2.

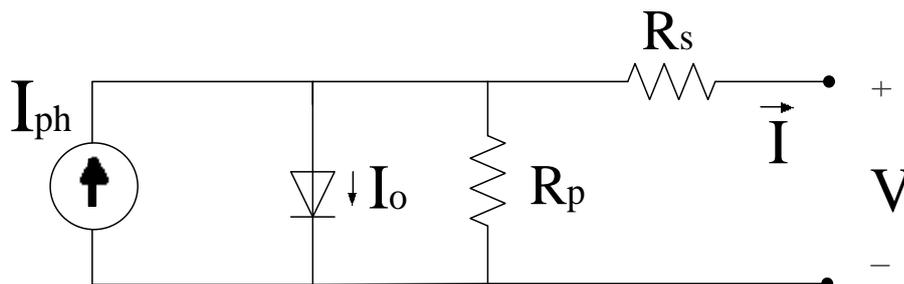


Figura 2 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, considerando R_p .

A resistência R_p representa as perdas que ocorre nas camadas da junção p-n do material semiconductor.

Desta forma, o circuito equivalente de uma CF e, conseqüentemente, a modelagem do mesmo, pode torna-se mais preciso e complexo conforme as não idealidades são consideradas através da inclusão de resistências série e paralela.

6.2. MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Para cada circuito equivalente, há uma forma de descrevê-lo matematicamente. Para o circuito da Figura 1, segundo Atlas e Sharaf (2007) a tensão de saída de uma CF pode ser representada como:

$$V = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_o - I}{I_o} \right) - R_s I \quad (1)$$

Sendo:

V: tensão de saída da CF;

A: fator de idealidade do diodo;

k: constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K);

T_c : temperatura da CF;

e: carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C);

I_{ph} : fotocorrente;

I_o : corrente reversa de saturação do diodo;

I: corrente de saída da CF;

R_s : resistência série da CF.

Os valores de A , I_{ph} , I_o e R_s da equação (1) variam de acordo com as características particulares do painel FV escolhido. De acordo com Vijayakumari, Devarajan e Devarajan (2012) é necessário determinar o valor de I_{ph} , o qual é igual a corrente de curto circuito (I_{sc}), considerando a temperatura da CF e a radiação solar em condições padrão de testes (STC – *Standard Test Condition*), encontrado nos *datasheets* de um determinado fabricante de painéis fotovoltaicos, como este trabalho baseia-se no do painel KC200GT da Kyocera, seus valores estão presentes na Tabela 1. Somente quando o painel FV possuir CFs conectadas em paralelo é preciso então dividir I_{sc} pelo número de conexões em paralelo.

TABELA 1- CARACTERÍSTICAS DO PAINEL MODELO KC200GT DA KYOCERA

Parâmetros	Condição	
	Condição de Teste Padrão ($G=1000W/m^2; T_c=25^\circ$)	Condição de Operação Nominal ($G=800W/m^2; T_c=47^\circ C$)
Máxima Potência – Pmax (W)	200	142
Tensão de MPPT (V)	26,3	23,2
Corrente de MPPT (A)	7,61	6,13
Tensão Voc (V)	32,8	29,9
Corrente de Isc (A)	8,21	6,62
Coefficiente α (V/ $^\circ C$)	-0,123	-
Coefficiente β (A/ $^\circ C$)	0,00328	-

Após encontrar I_{ph} , ainda restam três parâmetros a serem determinados, ou seja, A , I_o e R_s . Para obtê-los é necessário utilizar a curva $I \times V$, também disponibilizada no *datasheet* dos fabricantes do painel FV, ou seja, deve-se escolher três pontos desta curva, sendo um deles o ponto de máxima potência (MPPT), uma logo após o ponto de MPPT, e um ponto um pouco antes do ponto de MPPT e substituí-los na equação (1). Desta forma, encontram-se três equações com três incógnitas que possibilitará encontrar os valores de A , I_o e R_s . Uma vez encontrado tais valores, e substituindo-os na equação (1), obtém-se a expressão que representa V em função de I para condição de teste padrão.

O passo seguinte é obter a variação de V (ΔV), a fim de se obter o valor de V para qualquer condição de temperatura ambiente e radiação solar. A ΔV é ocasionada pela variação de corrente I (ΔI), e da temperatura da célula fotovoltaica ΔT_c , ou seja, na prática tanto a radiação solar como a temperatura da CF são valores diferentes daqueles encontrados nos *datasheets* para determinadas condições de teste padrão. Segundo Magid, Hooman, Chem, (2003), a variação tensão de saída de uma CF pode ser expressa como:

$$\Delta V = -\alpha \cdot \Delta T_C - R_S \Delta I \quad (2)$$

Onde:

α : coeficiente de temperatura da tensão encontrado nos *datasheets*

Já a variação de temperatura da célula (ΔT_C) é dado por:

$$\Delta T_C = T_C - T_{STC} \quad (3)$$

Onde T_{STC} é a temperatura da CF para condição de teste padrão, e T_C é a temperatura da célula fotovoltaica, a qual pode ser expressa em função da temperatura ambiente pela seguinte equação:

$$T_C = T_A + \frac{(T_{NOCT} - 20)}{G_{NOCT}} G \quad (4)$$

Onde:

T_A : temperatura ambiente;

T_{NOCT} : temperatura da CF em operação normal;

G_{NOCT} : radiação solar da CF em operação normal;

G : qualquer valor de radiação solar.

Por sua vez a variação da corrente ΔI pode ser expressa como:

$$\Delta I = \beta \frac{G}{G_{STC}} \Delta T_C + \left(\frac{G}{G_{STC}} - 1 \right) I_{SC,STC} \quad (5)$$

Sendo:

β : coeficiente de temperatura da corrente;

G_{STC} : é a radiação solar de condição de teste padrão;

$I_{SC,STC}$: é a corrente de curto circuito sob condição de teste padrão.

Desta forma, o valor V pode ser encontrado para qualquer condição de temperatura da CF e radiação solar, bastando apenas somar à equação (1) o termo correspondente ΔV , como segue:

$$V = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_o - I}{I_o} \right) - R_s I + \Delta V \quad (6)$$

De forma similar, a corrente de saída da célula FV é obtida por meio da soma da corrente encontrada em STC com a respectiva variação de corrente ΔI ou seja:

$$I = I_{SC,STC} + \Delta I \quad (7)$$

Para encontrar a tensão de um painel FV, basta multiplicar V pelo número células fotovoltaica agrupadas em série. Já para encontrar sua corrente basta multiplicar I pelo número de conexões em paralelo.

Em outro modelo matemático apresentado por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999), a corrente da CF é encontrada em função dela própria, conforme modelo representado matematicamente pela equação (8), além da tensão de saída do CF (V), das variáveis de temperatura da célula (T_c), radiação solar (G), e parâmetros adicionais, tais como a fotocorrente (I_{ph}), corrente reversa de saturação (I_o), constante de Boltzmann k , fator de idealidade do diodo (A), carga elétrica (q) e resistências série (R_s) e paralela (R_p). O circuito referente a este modelo está apresentado na Figura 2.

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT_c}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (8)$$

Através do circuito equivalente da Figura 2 é possível observar que a presença da resistência R_s resulta em uma queda de tensão na saída V , de modo a influenciar na inclinação da curva $I \times V$ após o ponto de MPPT. Já a resistência R_p é responsável pela geração de uma corrente I menor, influenciando na inclinação da curva $I \times V$ antes do ponto de MPPT.

Desta forma, estas resistências R_p e R_s , bem como o parâmetro “ A ” são inicialmente fixados, respectivamente, em 20Ω , $10 \text{ m}\Omega$ e $1,2$, conforme Grunow et al., (2004). Caso seja necessário, esses valores devem ser ajustados, a fim de obter a curva $I \times V$ semelhante à apresentada no *datasheet* do painel fotovoltaico em análise.

Já as correntes I_{ph} e I_o são calculadas, respectivamente, pelas equações (9) e (10) (CAVALCANTI; et al, 2007).

$$I_{ph} = [I_{C,STC} + \alpha(T_C - T_r)] \frac{G}{1000} \quad (9)$$

$$I_o = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r}\right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_C}\right)\right]} \quad (10)$$

Onde:

T_r : temperatura de referência, 298K;

I_{rr} : corrente de saturação reversa de referência;

E_g : Energia da banda proibida, 1,1 eV.

Para encontrar o termo desconhecido I_{rr} da equação (10), após substituir esta equação e a equação (9) na equação (8), adota-se o ponto $I=0$ e $V=V_{oc}$ (tensão de circuito aberto por célula), característico da curva I_xV do painel FV, e considera-se $T_C=T_r$, a fim de obter o valor de I_{rr} , conforme expresso pela equação abaixo.

$$I_{rr} = \frac{I_{SC,STC} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{qV_{oc}}{AkT_r}} - 1} \quad (11)$$

Como é possível observar, a equação (8) não pode ser resolvida algebricamente já que é impossível isolar a corrente de saída da CF, portanto é necessário empregar um método numérico tal como o Método de Newton-Raphson para solucionar esta equação. Este método iterativo é descrito pela equação (12), onde é necessário considerar o valor inicial de I igual a zero.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (12)$$

Onde:

n : n-ésima iteração do algoritmo;

$f'(x_n)$: derivada da função f em x_n .

Sendo assim, é necessário modificar equação (8) de tal forma que possa ser aplicada a este método, como apresentado na equação abaixo.

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT_c}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (13)$$

A derivada da equação (13) é dada por:

$$f'(I) = -1 - I_r e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT_c}} \frac{qR_s}{AkT_c} - \frac{R_s}{R_p} \quad (14)$$

Para encontrar a curva IxV de um painel FV específico é feita a mesma consideração quanto ao número de CF conectadas em série e/ou paralelo apresentado no modelo matemático anterior.

Já Lu e Nguyen (2012) adotam o modelo matemático proposto por Rivera e Peng (2005), o qual é representado pela equação (15).

$$I(V) = gI_{SC}\tau_i \left[1 - e^{\frac{V}{b(g\gamma+1-\gamma)(V_{oc}+\tau_v)}} - \frac{1}{b} \right] \quad (15)$$

Onde:

g: porcentagem efetiva da intensidade da luz;

b: constante da curva característica IxV;

γ : fator linear de sombreamento;

τ_i : taxa de variação da corrente (A);

τ_v : taxa de variação da tensão (V).

Através de Rivera e Peng (2005), obtêm-se as seguintes equações:

$$\tau_i = 1 + \frac{\beta}{100} (T - T_{NOCT}) \quad (16)$$

$$\tau_v = \frac{\alpha}{100} (T - T_{NOCT}) \quad (17)$$

Os valores g e γ são variáveis, assim como V e I. Exceto b, todos os demais parâmetros são encontrados nos *datasheets* dos fabricantes de painéis FVs. Para encontrar a constante b da

curva característica I_xV , basta substituir na equação (15) os valores de V e I de MPPT assim como os demais parâmetros existentes na respectiva equação.

Ao substituir o valor de b encontrado e os demais parâmetros na equação (15), obtém-se a equação genérica da corrente de saída do painel FV em função da sua tensão de saída. Percebe-se que a equação (15) é uma equação exponencial.

Para obter uma aproximação da curva não-linear I_xV gerada pela equação (15), N curvas lineares são obtidas através da seleção de $N+1$ pontos desta curva, como pode ser notado através da Figura X, apresentada na seção de resultados.

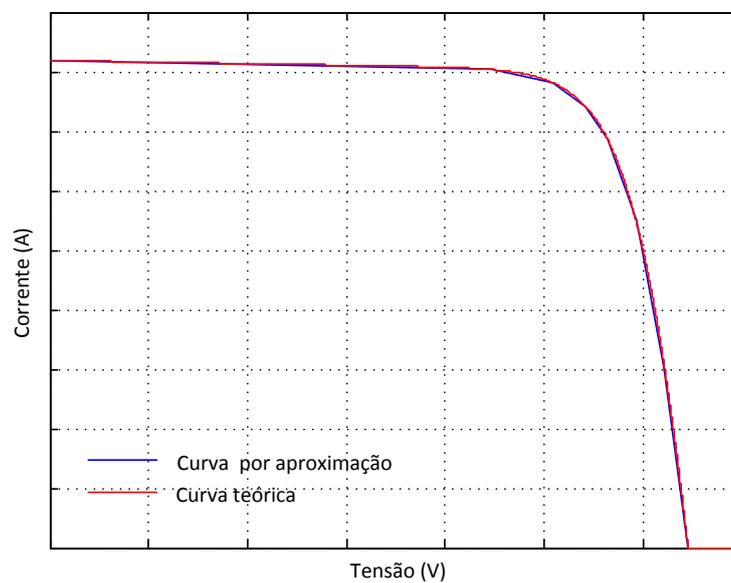


Figura 3 – Curva I_xV característica de um painel FV.

6.3 CONVERSOR BUCK

O Buck é um conversor CC-CC abaixador, cuja topologia pode ser observada através da Figura 4. Nesta seção são utilizados conceitos que propiciam o dimensionamento dos elementos de filtragem (L e C), a determinação do modelo de pequenos sinais e a função de transferência do conversor (Erickson; Marksimovic, 2001).

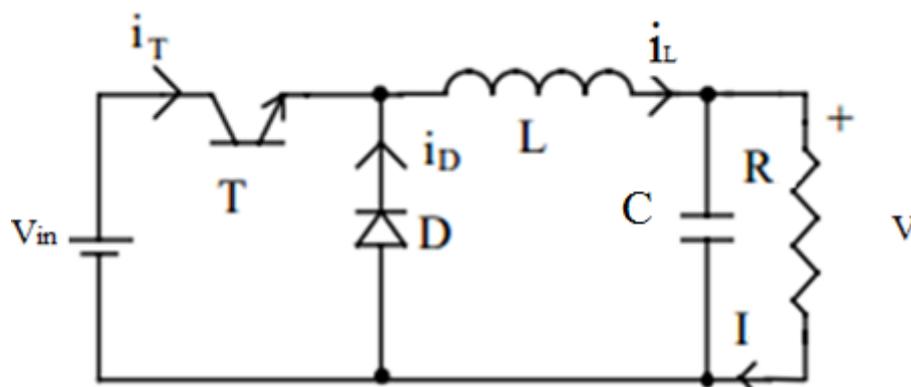


Figura 4 – Conversor Buck

O conversor Buck será controlado de tal forma que irá emular o comportamento de um arranjo FV, pois é um conversor de baixo custo, naturalmente estável, e seu controle é relativamente simples, além de sua saída apresentar característica de uma fonte de corrente, ou seja, a corrente de saída do emulador é contínua, quando operando em modo de condução contínua. Sendo assim, é necessário que os elementos deste sejam dimensionados, bem como sua função transferência seja obtida para permitir o projeto dos controladores.

6.3.1 Dimensionamento dos Elementos do Conversor Buck

Os elementos de um conversor devem ser bem dimensionados para que este apresente um desempenho satisfatório, e de acordo com os requisitos de projeto.

O indutor (L), o capacitor (C) são os elementos passivos do conversor Buck que serão dimensionados neste trabalho.

6.3.1.1 Dimensionamento do indutor

A fim de dimensionar o indutor, o comportamento do conversor Buck deve ser analisado em apenas em uma das duas etapas. Neste trabalho será considerada a primeira etapa, ou seja, quando a chave está fechada, como pode ser observado através da Figura abaixo.

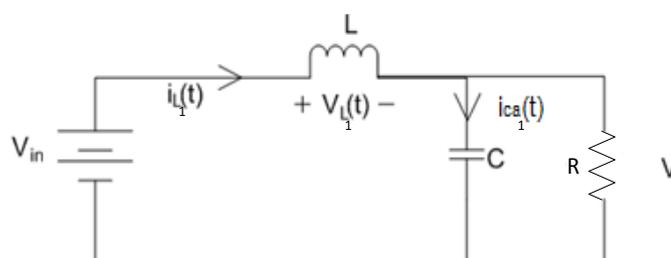


Figura 5 – Conversor Buck quando a chave está fechada

Através da Figura 5 nota-se que a tensão sobre indutor é igual a

$$V_{L1} = L \frac{d(i_{L1}(t))}{dt} = V_{in} - V \quad (18)$$

Considerando que $d(i_L(t)) = I_{LMAX} - I_{LMIN} = \Delta i_L$ e que $dt = T_1$, correspondente ao tempo que a chave está fechada, tem-se:

$$L \frac{\Delta i_{L1}}{T_1} = V_{in} - V \quad (19)$$

Isolando L, obtêm-se:

$$L = \frac{T_1(V_{in} - V)}{\Delta i_{L1}} \quad (20)$$

Sabendo que o inverso da frequência de chaveamento é o período T_s , e que razão cíclica (D) é definida pela relação entre o tempo que a chave permanece fechada e o período de chaveamento (T_1/T_s), dividindo e multiplicando a equação (20) por T_s , encontra-se:

$$L = \frac{T_s T_1 (V_{in} - V)}{T_s \Delta i_{L1}} = \frac{D(V_{in} - V)}{T_s \Delta i_{L1}} = \frac{D(V_{in} - V)}{f_s \Delta i_{L1}} \quad (21)$$

Onde D é igual a V dividido por V_{in} .

Como pode notar-se através da equação (21) o valor do indutor é determinado de acordo com alguns parâmetros de projeto, onde Δi_{L1} é a variação máxima da corrente do indutor determinado pelo projetista.

6.3.1.2 Dimensionamento do Capacitor

Para dimensionar o capacitor C é necessário analisar a corrente que flui através deste, considerando que somente a componente alternada da corrente do indutor L circule por ele, ou seja, $\Delta I_L = \Delta I_{Ca}$. Sabendo que a corrente média do capacitor que flui no período de pico a pico da ondulação do capacitor, é igual a

$$I_{Ca} = \frac{\Delta I_L}{4} \quad (22)$$

Obtêm-se:

$$I_{Ca} = \frac{\Delta I_L}{4} = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (23)$$

Considerando $dV(t) = \Delta V_{Ca}$, e $dt = T_s/2$, onde T_s é o inverso da frequência de chaveamento (f_s), e isolando C tem-se

$$C = \frac{T_s \Delta I_L}{8 \Delta V_{Ca}} = \frac{\Delta I_L}{8 f_s \Delta V_{Ca}} \quad (24)$$

Sendo assim, através da equação (24) é possível dimensionar o capacitor do conversor, onde ΔV_{Ca} é determinado a critério do projetista.

6.3.2 Modelagem AC de pequenos sinais através da técnica da média das equações

Considerando que os modelos matemáticos apresentados, forneçam valores de referência, seja de corrente ou de tensão, para a implementação do emulador de arranjos FVs, esta seção, apresenta modelos que propiciem a razão cíclica ao conversor Buck operando em modo de condução contínua. A técnica utilizada para obtenção da análise de pequenos sinais considerada que a tensão média do indutor e a corrente média do capacitor são nulas, em regime permanente e que as constantes de tempo do conversor são muito maiores que o período de chaveamento, o que permite que seja obtida a média das formas de onda da tensão do indutor e corrente do capacitor em um intervalo de tempo T_s , sem alterar significativamente a resposta do sistema. Desta forma, a análise de pequenos sinais do conversor Buck prediz o comportamento em baixa frequência do conversor, enquanto despreza as harmônicas em alta frequência produzidas pelo chaveamento.

Além disto, através da técnica de modelagem em pequenos sinais são obtidos modelos lineares, por meio da linearização em torno de um ponto de operação.

6.3.2.1 Obtenção das equações médias

Primeiramente é necessário obter a equação média do indutor e do capacitor, para isto deve se analisar a tensão sobre o indutor e corrente que flui pelo capacitor em duas etapas

distintas. A primeira etapa ocorre quando a chave está fechada, já a segunda quando a chave está aberta.

Através da Figura 5 o circuito do conversor Buck é apresentado quando a chave está fechada (0 a $D.T_s$), ou seja, na primeira etapa. Sendo assim, é possível observar que:

$$v_{L1}(t) = L \frac{d(i_L(t))}{dt} = v_{in}(t) - v(t) \quad (25)$$

$$i_{Ca1}(t) = C \frac{d(v(t))}{dt} = i_{L1}(t) - \frac{v(t)}{R} \quad (26)$$

Já na segunda etapa a chave está aberta no intervalo de tempo de DT_s a T_s . Nesta etapa, o circuito equivalente do conversor Buck é ilustrado através da Figura 6.

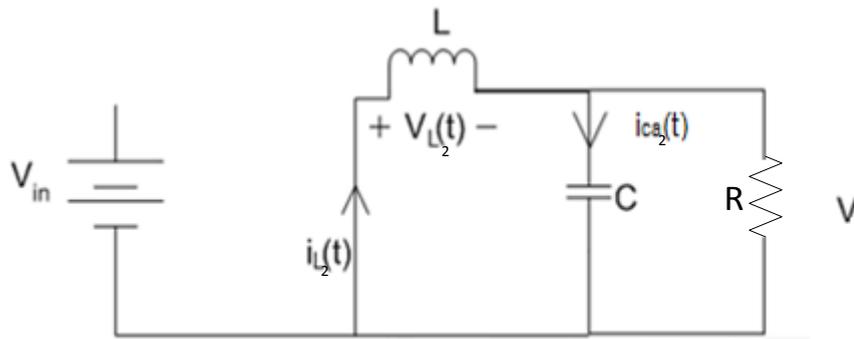


Figura 6 – Conversor Buck na segunda etapa

Analisando o circuito na segunda etapa tem-se

$$v_{L2}(t) = L \frac{d(i_L(t))}{dt} = -v(t) \quad (27)$$

$$i_{Ca2}(t) = C \frac{d(v(t))}{dt} = i_L(t) - \frac{v(t)}{R} \quad (28)$$

Aplicando a aproximação de pequenas ondulações nas equações (25) (26) (27) e (28), ou seja, substituindo as componentes em função do tempo pelo seu valor médio de um período, obtêm-se:

$$\langle v_{L1}(t) \rangle_{T_s} = L \frac{d \langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle v_{in}(t) \rangle_{T_s} - \langle v(t) \rangle_{T_s} \quad (29)$$

$$\langle i_{Ca1}(t) \rangle_{T_s} = C \frac{d \langle v(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle i_L(t) \rangle_{T_s} - \frac{\langle v(t) \rangle_{T_s}}{R} \quad (30)$$

$$\langle v_{L2}(t) \rangle_{T_S} = L \frac{d \langle i_L(t) \rangle_{T_S}}{dt} = - \langle v(t) \rangle_{T_S} \quad (31)$$

$$\langle i_{Ca2}(t) \rangle_{T_S} = C \frac{d \langle v(t) \rangle_{T_S}}{dt} = \langle i_L(t) \rangle_{T_S} - \frac{\langle v(t) \rangle_{T_S}}{R} \quad (32)$$

Aplicando o princípio de balanço volt-segundo no indutor, onde a tensão média no indutor é igual a zero, tem-se

$$\langle v_L(t) \rangle_{T_S} = 0 = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} v_L(t) d(t) = \frac{1}{T_S} \int_0^{D(t)T_S} v_{L1}(t) d(t) + \frac{1}{T_S} \int_{D(t)T_S}^{T_S} v_{L2}(t) d(t) \quad (33)$$

Substituindo as equações (29) e (31) na equação (33) a média da equação de tensão sobre indutor é encontrada por:

$$\langle v_L(t) \rangle_{T_S} = L \frac{d \langle i_L(t) \rangle_{T_S}}{dt} = D(t) \langle v_{in}(t) \rangle_{T_S} - \langle v(t) \rangle_{T_S} \quad (34)$$

Já ao aplicar o princípio de balanço de carga sobre o capacitor, onde a corrente média deste é nula, tem-se que:

$$\langle i_{Ca}(t) \rangle_{T_S} = 0 = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} i_{Ca}(t) d(t) = \frac{1}{T_S} \int_0^{D(t)T_S} i_{Ca1}(t) d(t) + \frac{1}{T_S} \int_{D(t)T_S}^{T_S} i_{Ca2}(t) d(t) \quad (35)$$

Substituindo as equações (30) e (32) na equação (35) a média da equação da corrente que flui pelo capacitor é encontrada como segue:

$$\langle i_{Ca}(t) \rangle_{T_S} = C \frac{d \langle v(t) \rangle_{T_S}}{dt} = \langle i_L(t) \rangle_{T_S} - \frac{\langle v(t) \rangle_{T_S}}{R} \quad (36)$$

6.3.2.2 Perturbação e Linearização

Uma vez encontradas a média das equações, para construir um modelo AC de pequenos sinais estas devem ser perturbadas e linearizadas em torno de um ponto de operação. Portanto, assume-se que tensão de entrada $\langle v_{in}(t) \rangle_{T_S}$ e a razão cíclica $D(t)$, são iguais a soma de uma

parcela CC (V_{in} , D) com pequenas variações AC ($\widehat{v}_{in}(t)$, $\widehat{d}(t)$), como descrito nas equações abaixo

$$\langle v_{in}(t) \rangle_{T_s} = V_{in} + \widehat{v}_{in}(t) \quad (37)$$

$$D(t) = D + \widehat{d}(t) \quad (38)$$

Em resposta a essas variações, a corrente no indutor, a tensão no capacitor e a corrente de entrada também serão composta por uma parcela CC somada a pequenas variações AC, como segue:

$$\langle i_L(t) \rangle_{T_s} = I_L + \widehat{i}_L(t) \quad (39)$$

$$\langle v(t) \rangle_{T_s} = V + \widehat{v}(t) \quad (40)$$

$$\langle i_{in}(t) \rangle_{T_s} = I_{in} + \widehat{i}_{in}(t) \quad (41)$$

Considerando módulo da parcela CA é muito menor que o módulo da parcela CC, tem-se que,

$$\begin{aligned} |V_{in}| &\gg |\widehat{v}_{in}(t)| \\ |I_L| &\gg |\widehat{i}_L(t)| \\ |V| &\gg |\widehat{v}(t)| \\ |D| &\gg |\widehat{d}(t)| \end{aligned} \quad (42)$$

Desta forma, as grandezas de corrente no indutor e tensão no capacitor podem ser linearizadas, através da substituição das equações (37) a (41) em (34) e (36). Sendo assim, para equação do indutor obtêm-se

$$L \frac{d(I_L + \widehat{i}_L(t))}{dt} = (D + \widehat{d}(t))(V_{in} + \widehat{v}_{in}(t)) - (V + \widehat{v}(t)) \quad (43)$$

Desenvolvendo a equação (43) tem-se

$$L \frac{d(I_L + \widehat{I}_L(t))}{dt} = (DV_{in} - V) + (D\widehat{V}_{in}(t) + \widehat{d}(t)V_{in} - \widehat{v}(t)) + d(t)\widehat{v}_{in}(t) \quad (44)$$

A fim de obter de um modelo CA de pequenos sinais os termos CC podem ser removidos, e os termos CA de segunda ordem podem ser desprezados, tendo assim:

$$L \frac{d(\widehat{I}_L(t))}{dt} = D\widehat{v}_{in}(t) + \widehat{d}(t)V_{in} - \widehat{v}(t) \quad (45)$$

Já para equação do capacitor obtêm-se

$$C \frac{d(V + \widehat{v}(t))}{dt} = I_L(t) + \widehat{I}_L(t) - \frac{V(t) + \widehat{v}(t)}{R} \quad (46)$$

Novamente removendo os termos CC, e desprezando os termos CA de segunda ordem, tem-se:

$$C \frac{d(\widehat{v}(t))}{dt} = \widehat{I}_L(t) - \frac{\widehat{v}(t)}{R} \quad (47)$$

Desta forma, as equações (45) (47) representam as equações do modelo matemático CA de pequenos sinais.

6.3.3 Função Transferência

Para que um controlador seja obtido com o objetivo que o Buck emule um arranjo FV, utilizando o primeiro e o terceiro modelo matemático apresentados neste trabalho, é necessário encontrar a função transferência G_{id} do conversor Buck, uma vez que o modelo matemático do circuito equivalente do arranjo FV fornecerá valores de corrente de referência e que o controle do emulador atuará na razão cíclica de modo anular o erro entre este valor de referência e o sinal de corrente medido na saída do emulador.

A função transferência G_{id} é definida como a relação da variação da corrente sobre a variação da razão cíclica, sendo a variação da tensão de entrada considera igual a zero. Esta função pode ser obtida aplicando a transformada de Laplace nas equações do modelo CA de pequenos sinais, ou seja, nas equações (47) e (45), considerando as condições iniciais de corrente no indutor e tensão no capacitor igual a zero, como é mostrado abaixo

$$\text{L. s. } \hat{i}_L(s) = \hat{d}(s)Vg - \hat{v}(s) \quad (48)$$

$$\text{C. s. } \hat{v}(s) = \hat{i}_L(s) - \frac{\hat{v}(s)}{R} \quad (49)$$

Isolando $v(s)$ da equação (49), tem-se

$$\hat{v}(s) = \frac{R}{RCs+1} \hat{i}_L(s) \quad (50)$$

Substituindo a equação (50) na equação (48), e rearranjando-a obtém-se a função transferência G_{id} do conversor Buck dada por

$$G_{id} = \frac{i(s)}{d(s)} = V_{in} \frac{(1+RCs)}{RLCs^2 + Ls + R} \quad (51)$$

6.4 CONTROLADOR PI

Um compensador/controlador PI é utilizado com o objetivo de reduzir o erro em regime estacionário (ANGÉLICO; CAMPANHOL; SILVA, 2014). Este controlador pode ser obtido por meio da análise no domínio da frequência, utilizando o diagrama de Bode. O objetivo deste controlador é garantir que o sistema possua margem de fase (MF) entre 30° e 90° em uma frequência de cruzamento desejada (f_c).

A fim de evitar que o sistema se torne instável, assim como a amplificação de sinais indesejados, a frequência de cruzamento deve ser pelo menos $1/4$ da frequência de chaveamento.

A função transferência ($G_C(s)$) do compensador PI é dada abaixo por

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (52)$$

ou ainda

$$G_C(s) = K_i \cdot \left(\frac{T_i \cdot s + 1}{s} \right) \quad (53)$$

Através das equações (52) e (53), observa-se que

$$K_p = K_i \cdot T_i \quad (54)$$

Onde K_p e K_i são os ganhos proporcional e integral, respectivamente, e T_i é a constante de tempo integral.

Para projetar o compensador PI, primeiramente a MF da planta do conversor na frequência de cruzamento desejada (f_c) deve ser obtida através do diagrama de Bode desta.

Uma vez conhecida a MF é necessário calcular a margem de fase que compensador deverá introduzir (ϕ). Em seguida deve-se verificar o ganho do sistema ($G_{id}(s).G_C'(s)$) através do diagrama de bode em f_c , sendo que

$$G_C'(s) = \frac{T_i \cdot s + 1}{s} \quad (55)$$

Nota-se que

$$\angle C(s)|_{f=f_c} = \phi = \tan^{-1}(f_c \cdot T_i) - 90^\circ \quad (56)$$

Portanto,

$$T_i = \frac{\tan(\phi + 90^\circ)}{2 \cdot \pi \cdot f_c} \quad (57)$$

Portanto uma vez calculado $G_{id}(s).G_C'(s)$, através do diagrama de bode o ganho (em módulo) de K_i de modo que o sistema apresente 0 dB em f_c . Em seguida, o valor de K_p pode ser encontrado através da equação (54). E por fim, substituindo os valores de K_i e K_p obtidos na equação (52) encontra-se o controlador PI.

Na Figura 7 é mostrado o diagrama de bloco de controle para emuladores que utilizam os modelos matemático proposto por Lu e Nguyen (2012), Casaro e Martins (2012) e Gow e Manning (1999).

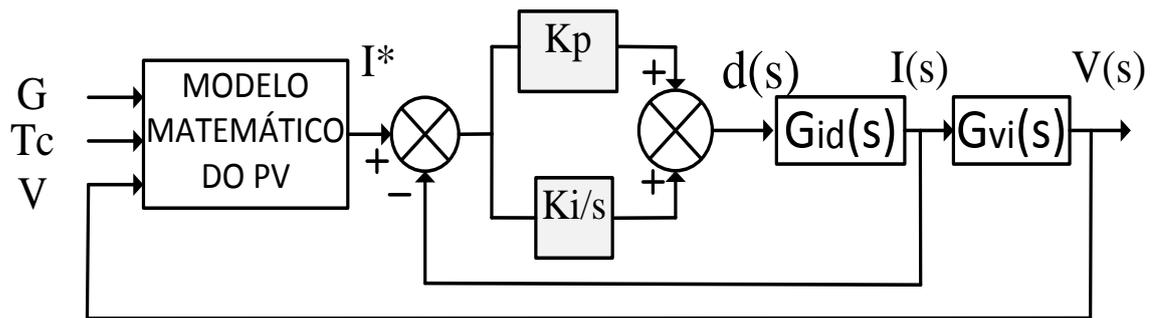


Figura 7 – Diagrama de blocos de controle

6.5 EMULADOR DE ARRANJOS FOTOVOLTAICOS

Uma vez dimensionado o conversor CC-CC e os ganhos do controlador PI e utilizando uma função que gere o valor de referência do arranjo FV, basta integrar todos os conceitos para obter um emulador eletrônico de arranjos fotovoltaicos, conforme ilustrado pelas figuras abaixo.

Como pode ser observado pela Figura 1 o modelo matemático que gera o valor corrente de referencia depende das variáveis de radiação solar, temperatura da célula fotovoltaica e tensão. Este valor gerado é comparado com a corrente atual do conversor. Quando houver uma diferença entre o valor medido e o de referência, gera-se um erro, o qual é corrigido pelo controlador PI de forma a anulá-lo, aumentando ou diminuindo a razão cíclica.

7 RESULTADOS

O presente capítulo faz apresentação dos seguintes resultados: os valores dos elementos passivos do conversor Buck, a curva característica IxV do painel FV, por meio de um modelo matemático, o comportamento dinâmico e estático do emulador eletrônico de arranjos FVs quando submetido a diferentes valores de ganhos K_p e K_i , o comportamento do emulador quando submetido a variação de carga na saída do conversor Buck, e a variações de radiação solar, e a comparação entre a curva IxV obtida por meio do modelo matemático e a obtida na saída do emulador eletrônico de arranjos fotovoltaicos.

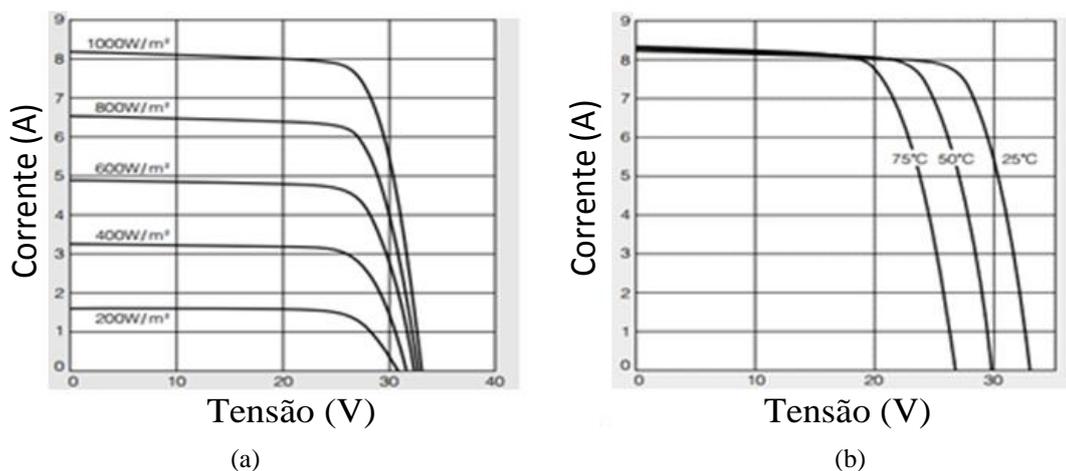
O objetivo do conversor Buck é emular um arranjo de painéis fotovoltaicos de até 600 W, o que equivale, por exemplo, à conexão em série de 3 painéis modelo KC200GT da Kyocera, cujas características elétricas são mostradas através da Tabela 1. Além disto, a especificação da tensão de entrada do conversor é de 180 V. Para especificar a tensão média de saída do conversor (V_{out}) é considerada a tensão de MPPT de 78,9 V. Já a frequência de chaveamento adotada é de 20kHz. Outras especificações, tais como o ripple de corrente do indutor e o ripple de tensão capacitor são, respectivamente, 5% de I_L (corrente média no indutor de filtragem) e 0,5% de V (tensão média de saída).

Através destas especificações e das equações (21) e (24) obtêm $L = 2,4\text{mH}$ e $C = 115,48\mu\text{F}$.

Os demais resultados presentes neste trabalho foram obtidos a partir de simulação computacional, utilizando o software SIMULINK® do programa MATLAB®.

Os primeiros resultados apresentados têm por objetivo validar o código de programa em MATLAB apresentado no Apêndice I, referente ao modelo matemático proposto em Lu e Nguyen (2012), através da comparação com o código de Casaro e Martins (2012) (Anexo I) e com as curvas extraídas do datasheet do painel modelo KC200GT da Kyocera.

A Figura 9 (a) extraída do *datasheet* do painel KC200GT apresenta curvas IxV do painel FV quando submetido às radiações de 1000, 800, 600, 400, 200 W/m² à uma temperatura de 25°C. Já a figura 9 (b), quando submetido a temperatura de 75, 50, 25 °C e a radiação solar de 1000 W/m².



Fonte: *Datasheet* do painel KC2000GT da Kyocera

Figura 9 – (a) Curvas IxV para diferentes níveis de radiação solar extraída do *datasheet* (b) Curvas IxV para diferentes temperaturas da CF.

As Figuras 10, 11 foram obtidas através da implementação dos modelos matemáticos em código no MATLAB, respectivamente, proposto por Casaro e Martins (2012), e Lu e Nguyen (2012), considerando as mesmas condições climáticas presentes nas curvas obtidas no *datasheet* do painel KC2000GT.

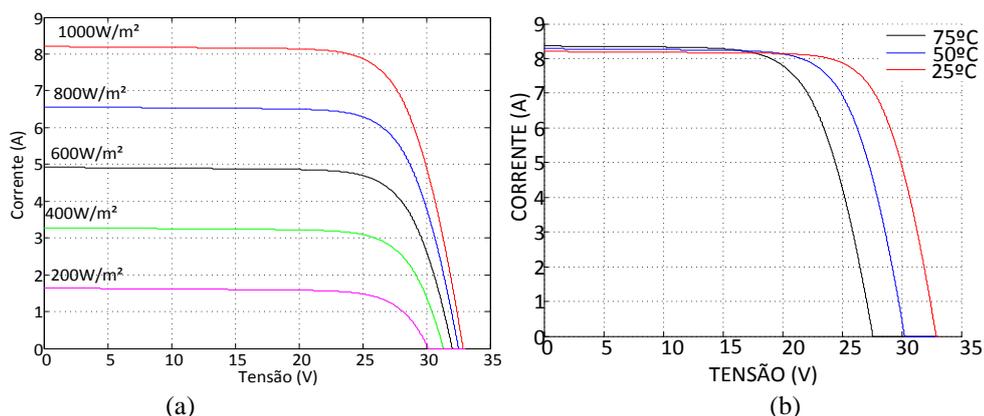


Figura 10 – Curvas IxV obtidas pelo modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012) (a) para diferentes níveis de radiação solar (b) diferentes temperaturas da CF.

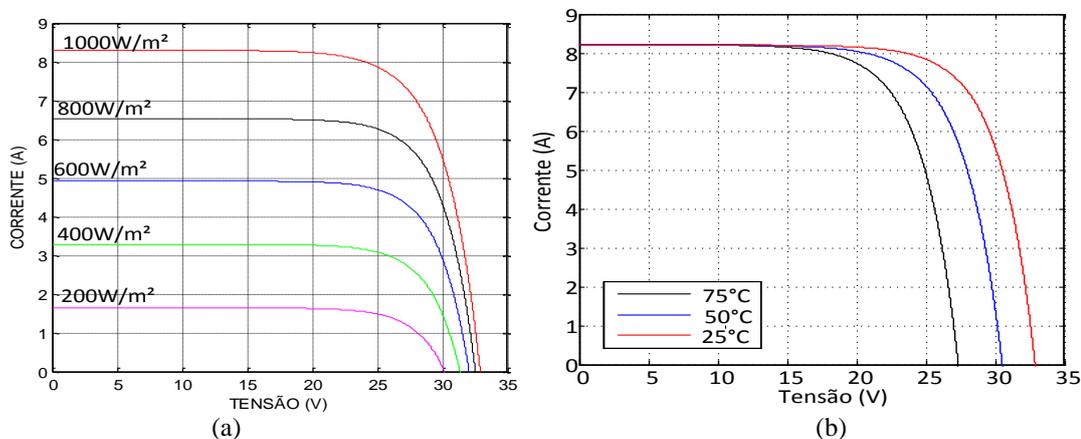


Figura 11 – Curvas IxV obtidas pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012) (a) para diferentes níveis de radiação solar (b) diferentes temperaturas da CF.

Desta forma, comparando as Figuras de 10 e 11, nota-se que para mesma temperatura da CF e radiação solar estas são similares, validando os códigos propostos. As pequenas diferenças se justificam pelo fato do modelo matemático do modelo apresentado em Lu e Nguyen (2012) não considerar as perdas R_p e R_s , apenas uma constante característica da curva (b).

Considerando o modelo matemático proposto Casaro e Martins (2012), a fim de analisar o comportamento do emulador para cada uma das frequências de cruzamento (f_c) desejadas (adotadas) equivalente a um, dois e três kHz definiu-se as margens de fase desejadas (MFd) de 35° , 60° , e 85° , sendo projetados diversos ganhos dos controladores PI, ou seja, diversos valores de K_i e K_p , utilizando o código do Apêndice II. A análise é realizada através dos valores de corrente de saída em função do tempo, onde no decorrer do tempo há variação da tensão de saída do emulador, através de degraus de carga.

A seguir são apresentadas diversas figuras que apresentam a corrente e tensão de saída do emulador para diferentes valores de margem de fase e frequência de cruzamento, porém para a mesma variação de tensão uma mesma variação de tensão e corrente.

No tempo de 0 a 0,02s, após atingir a estabilidade, a tensão de saída do emulador é igual a 91,2. Já no intervalo de 0,02 a 0,04s a tensão é igual a tensão de MPPT de três painéis FVs conectados em série, ou seja 78,93 V. E por último durante 0,04 a 0,06s, a tensão é igual 42,38 V.

Desta forma para uma $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=35^\circ$, obtêm-se $K_i = 402,3692$ e $K_p = 0,0441$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 12.

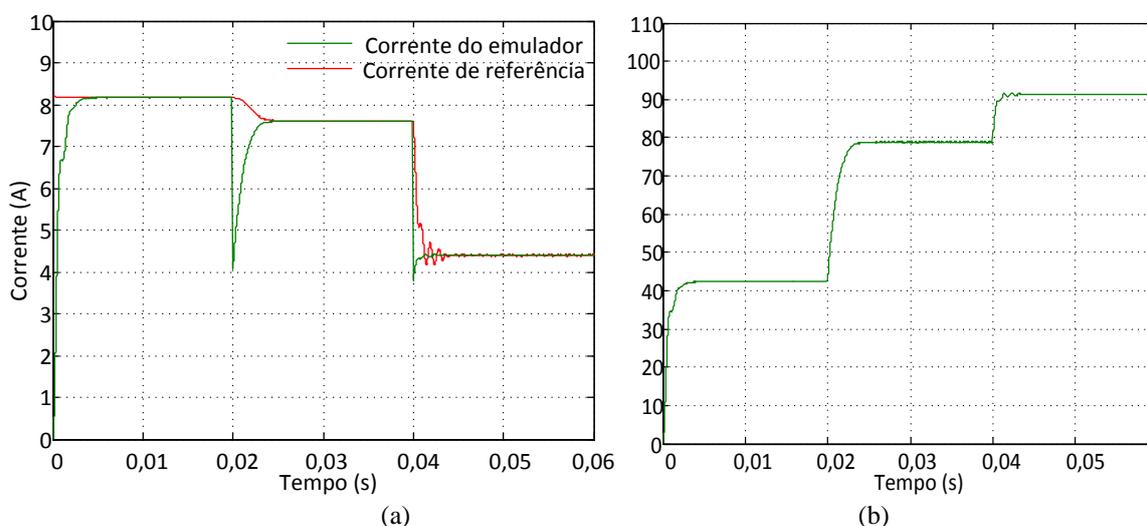


Figura 12 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=35^\circ$

Para $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=60^\circ$, encontra-se $K_i = 247,6927$ e $K_p = 0,0670$. E o comportamento do emulador é ilustrado através da Figura 13.

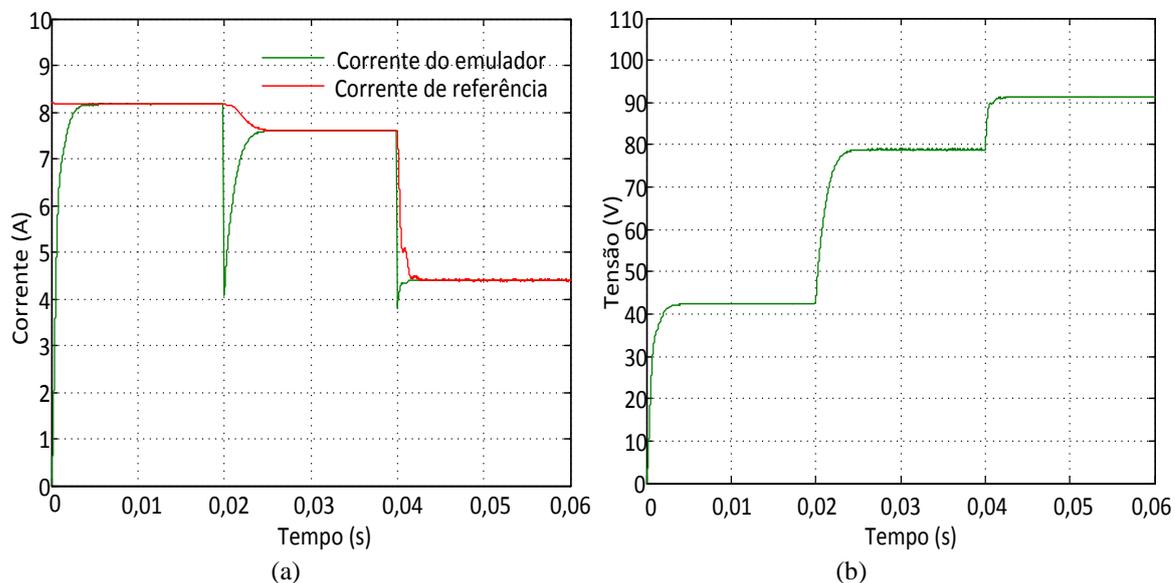


Figura 13 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=60^\circ$

Já para $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=85^\circ$, encontra-se $K_i = 46,6025$ e $K_p = 0,0774$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 14.

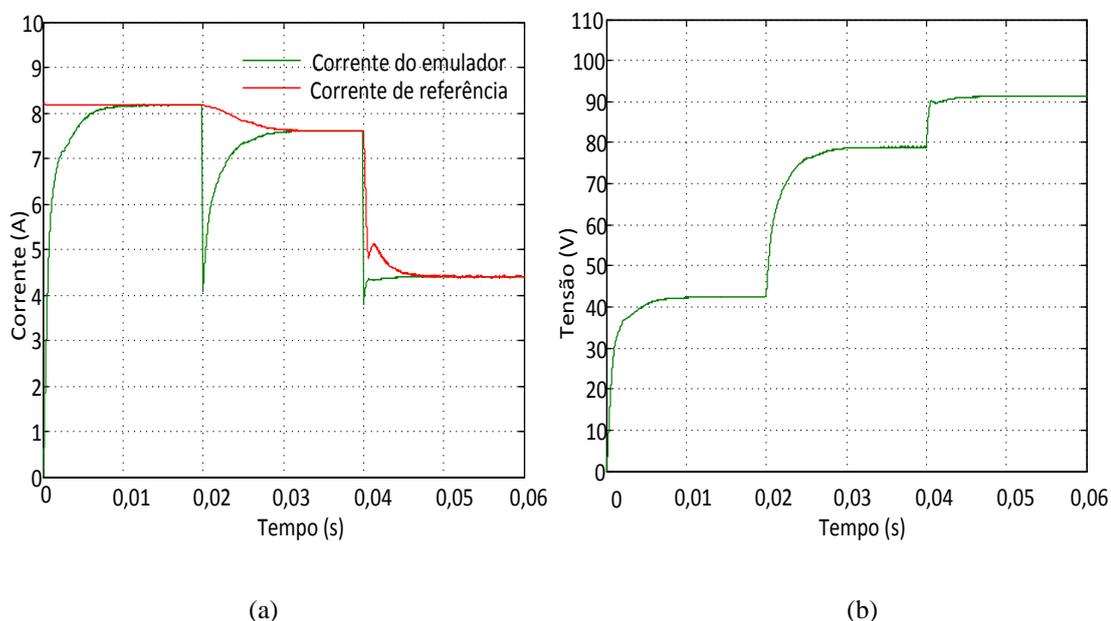


Figura 14 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=85^\circ$

Comparando os resultados apresentados através das Figura 12 a 14, é possível observar que para uma mesma frequência de cruzamento, quanto menor a margem de fase, menor é o tempo de assentamento.

Mudando a frequência de cruzamento para 2kHz e $MFd=35^\circ$, encontra-se $K_i = 1718,5$ e $K_p = 0,0956$. E o comportamento do emulador é ilustrado através da Figura 15.

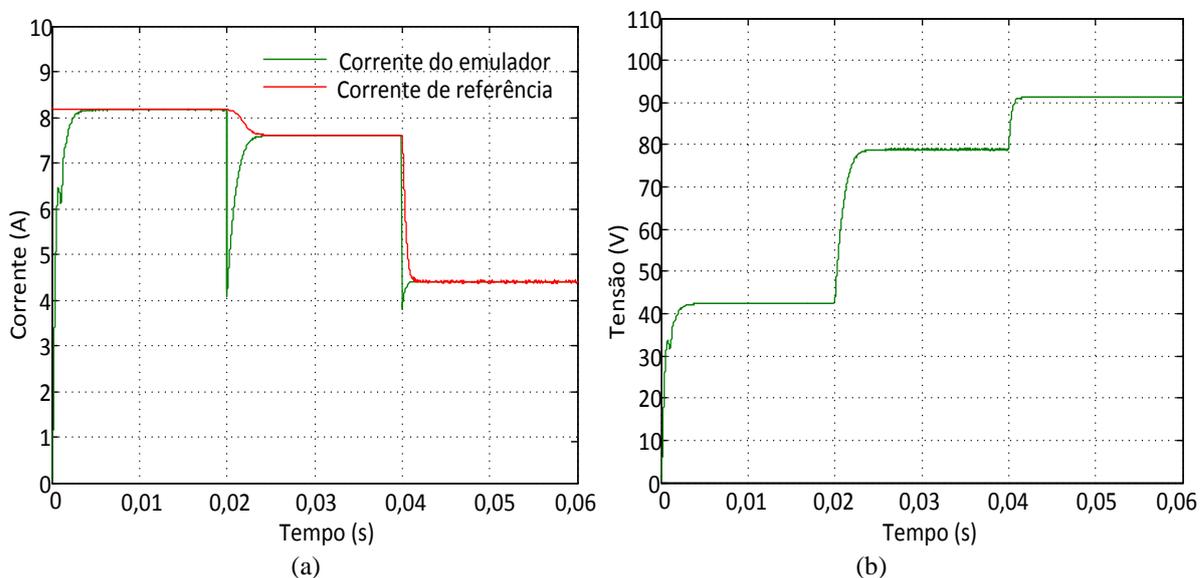


Figura 15 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=2\text{kHz}$ e $MFd=35^\circ$

No entanto para $f_c=2\text{kHz}$ e $MFd=60^\circ$, encontra-se $K_i = 1050$ e $K_p = 0,1444$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 16.

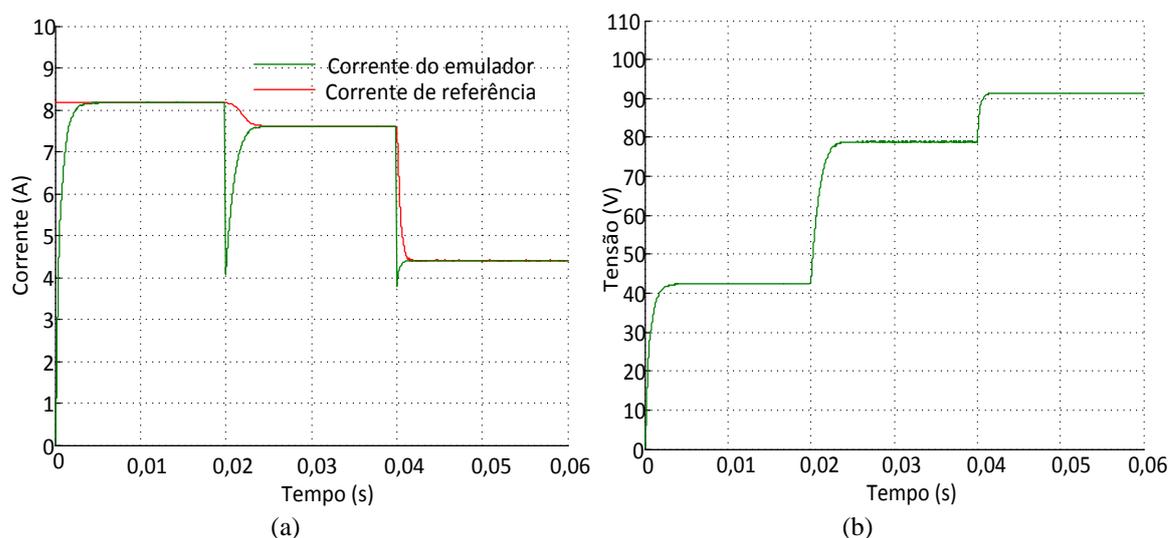


Figura 16 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=2\text{kHz}$ e $MFd=60^\circ$

E quando $f_c=2\text{kHz}$ e $MFd=85^\circ$, encontra-se $K_i = 184,7510$ e $K_p = 0,1662$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 17.

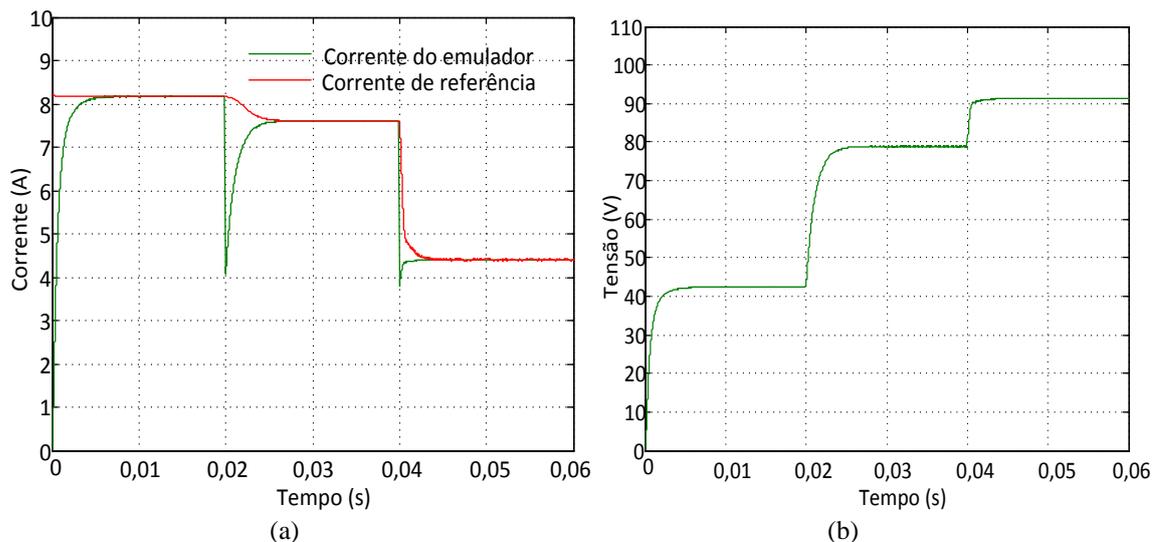


Figura 17 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=2\text{kHz}$ e $\text{MFd}=85^\circ$

Através dos resultados mostrados nas Figuras 15 a 17, é possível observar, assim como, nos resultados anteriores a estes, que para uma mesma frequência de cruzamento, quanto menor a margem de fase, menor o tempo de assentamento.

Novamente mudando a frequência de cruzamento, $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=35^\circ$, encontra-se $K_i = 3913,9$ e $K_p = 0,1453$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 18.

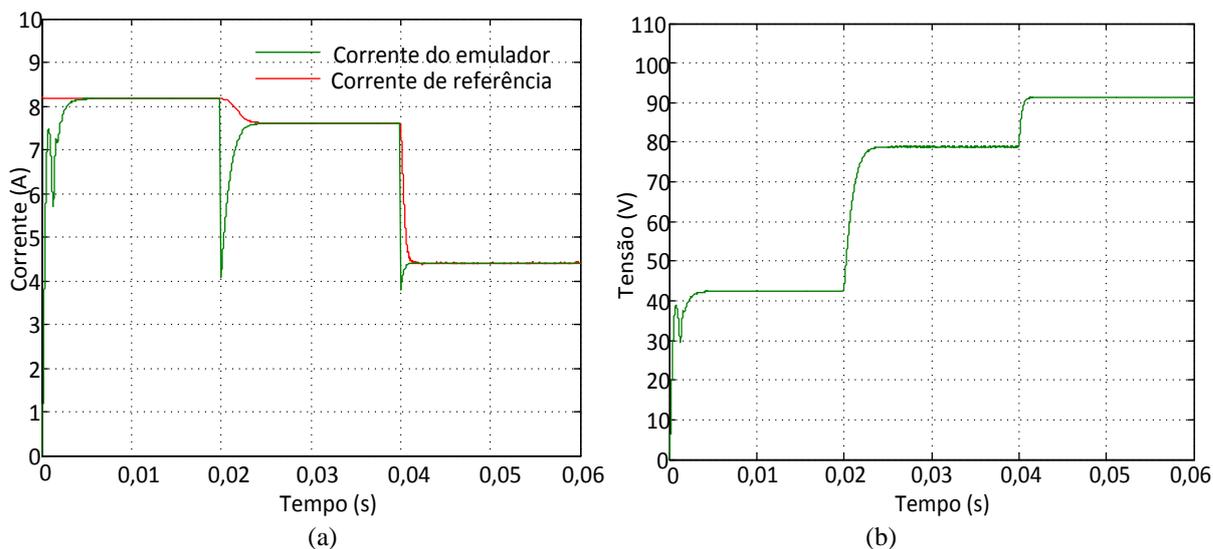


Figura 18 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=35^\circ$

Para $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=60^\circ$, encontra-se $K_i = 2,3897$ e $K_p = 0,2194$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 19.

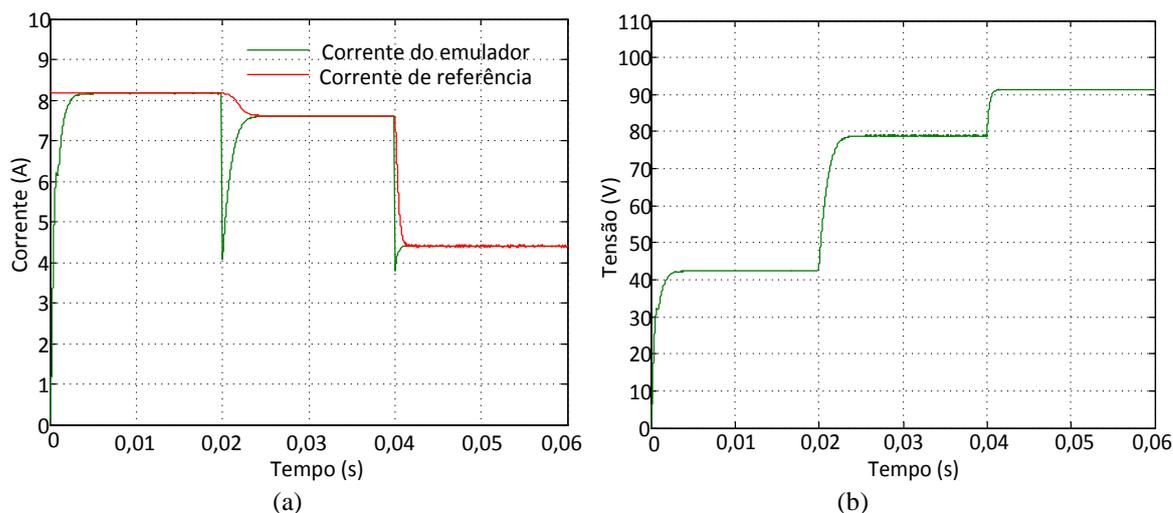


Figura 19 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=60^\circ$

E por último $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=85^\circ$, encontra-se $K_i = 417,7038$ e $K_p = 0,2525$. E o comportamento do emulador é apresentado através da Figura 20.

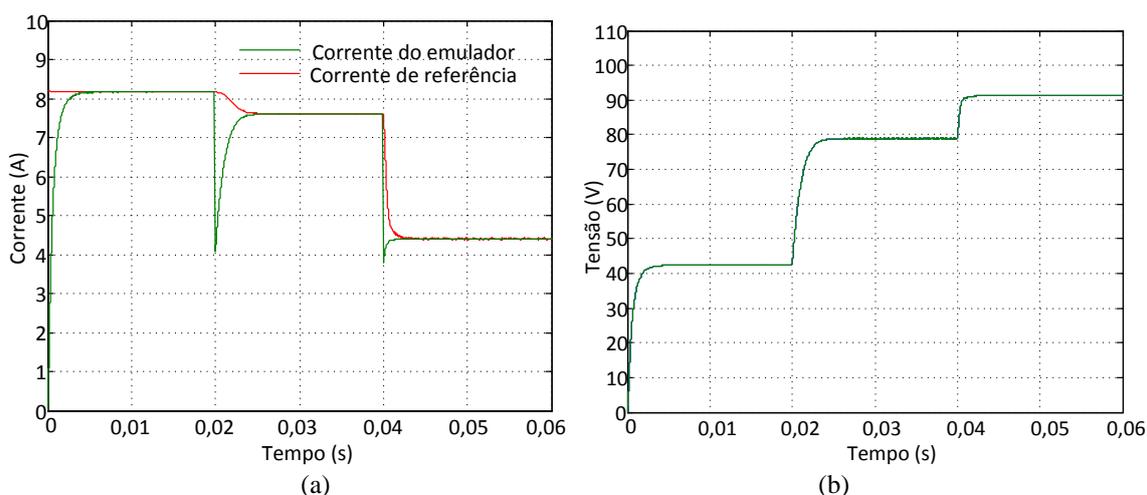


Figura 20 – (a) Corrente de saída (b) Tensão de saída para $f_c=3\text{kHz}$ e $\text{MFd}=85^\circ$

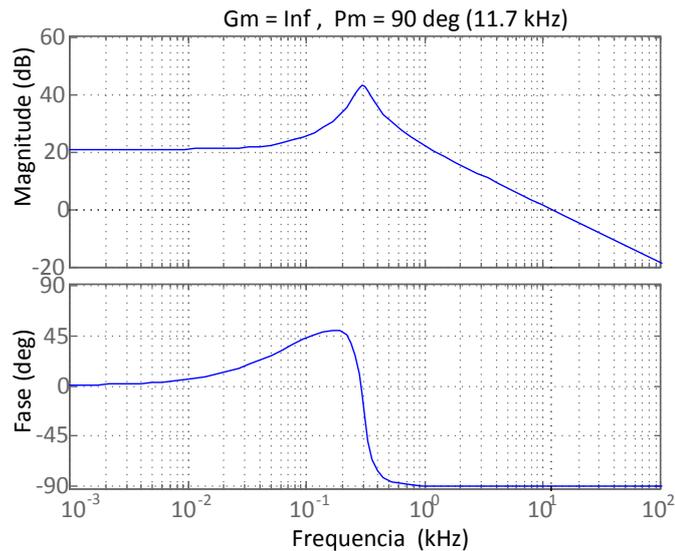
Os resultados mostrados pelas Figuras 18 a 20 confirma que quanto menor a margem de fase, menor é o tempo de assentamento para uma mesma frequência de cruzamento.

O PI projetado para um frequência de cruzamento 3kHz e margem de fase a 60° apresenta uma pequena vantagem em relação ao outros quando se trata de um equilíbrio entre oscilação, tempo de assentamento. Porém, este controlador não opera satisfatoriamente quando há uma grande variação de potência do conversor, o que é necessário para este desempenhar a função de emulador de um arranjo de painéis fotovoltaicos.

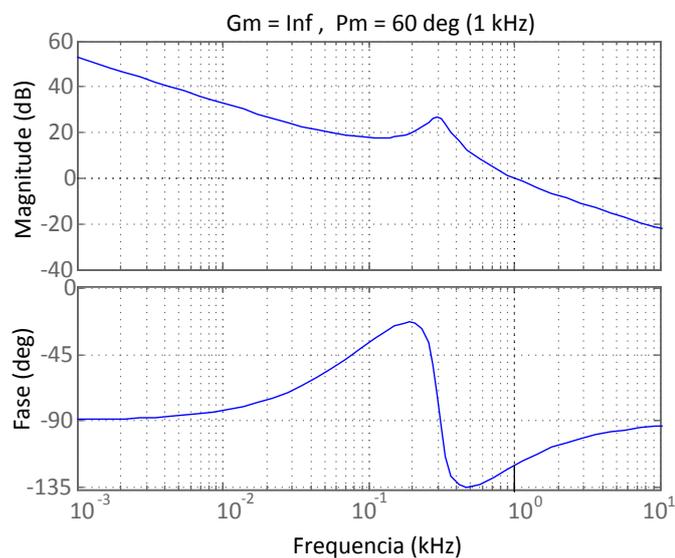
Desta forma, é necessária a escolha de um PI com uma frequência de cruzamento menor, pois isto permite que o conversor opere de forma adequada para pontos mais distantes que ao

de MPPT de três painéis conectados em série para uma radiação solar de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura da CF igual a 25°C , ou seja o ponto quiescente sobre o qual o controlador é projetado.

Portanto, o controlador escolhido será de $f_c=1\text{kHz}$ e $\text{MFd}=60^\circ$. Através da Figura 21 (a) é mostrado o diagrama de bode da função transferência do conversor, já pela Figura 21 (b) é possível observar a influência do controlador projetado.



(a)



(b)

Figura 21 – (a) Diagrama de Bode sem o controlador. (b) Diagrama de Bode com o controlador

A escolha dos ganhos (K_p e K_i) do controlador para o emulador que utiliza o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012), ocorreu da mesma forma. Através da análise do comportamento do emulador para diferentes valores de margem de fase e frequência de cruzamento desejados, foram adotados os ganhos $K_p=0,1444$ e $K_i=1050$, para

uma frequência de cruzamento de 2 kHz e uma margem de fase de 60°. Desta forma, o diagrama de bode sem controlador pode ser observado através da Figura 21 (a). Já pela Figura 22 é possível observar a influência do controlador no diagrama de bode do sistema.

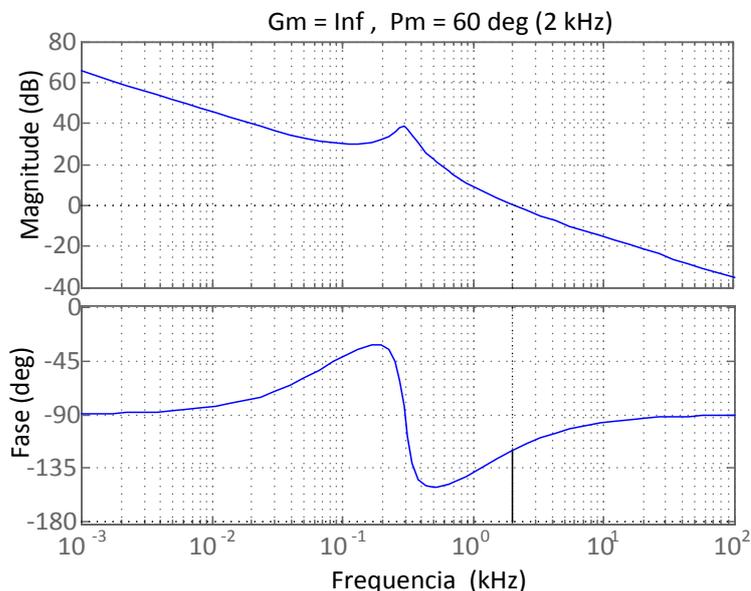


Figura 22 – Diagrama de Bode da função transferência do conversor Buck com o controlador

Uma vez dimensionado o conversor CC-CC e os ganhos do controlador PI e utilizando uma função que gere o valor de referência do arranjo FV, a qual é obtida pelo código de programa presente nos Anexos I e Apêndice III, e os implementando via computacional, é possível analisar o desempenho do emulador, que neste trabalho consistirá em três etapas.

A primeira etapa tem por objetivo obter o comportamento transitório do emulador quando submetido a uma variação no ponto de operação, que se refere à tensão e corrente de saída do emulador, considerando diferentes condições climáticas. A segunda etapa caracteriza-se pela análise do comportamento do emulador na ocorrência de uma mudança no nível de radiação solar. Já na terceira etapa é obtida a curva experimental IxV. Além disto, o estudo leva em consideração o comportamento do emulador para diferentes arranjos FVs.

Para obter os resultados da primeira etapa é realizada uma comparação entre os valores de corrente de referência obtidos por meio do modelo matemático e o sinal medido na saída do emulador, para uma dada condição de temperatura da célula fotovoltaica e radiação solar. Nesta análise, é introduzida no decorrer do tempo uma variação na tensão de saída do conversor Buck. Além disto, através das Figuras 23 e 24 (b) e (c) são mostradas a corrente e tensão de saída do conversor Buck.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa entre os emuladores que apresenta modelos matemáticos diferentes, estes são submetidos às mesmas condições de teste.

O rastreamento da corrente e da tensão de saída do emulador fotovoltaico considerando apenas um painel, para radiação solar de 500 W/m^2 e temperatura da CF igual a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, utilizando o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999), é mostrado na Figura 23. Para as mesmas condições descritas acima, porém para um emulador que utiliza o modelo matemático apresentado Lu e Nguyen (2012), o comportamento do emulador pode ser avaliado através da Figura 24.

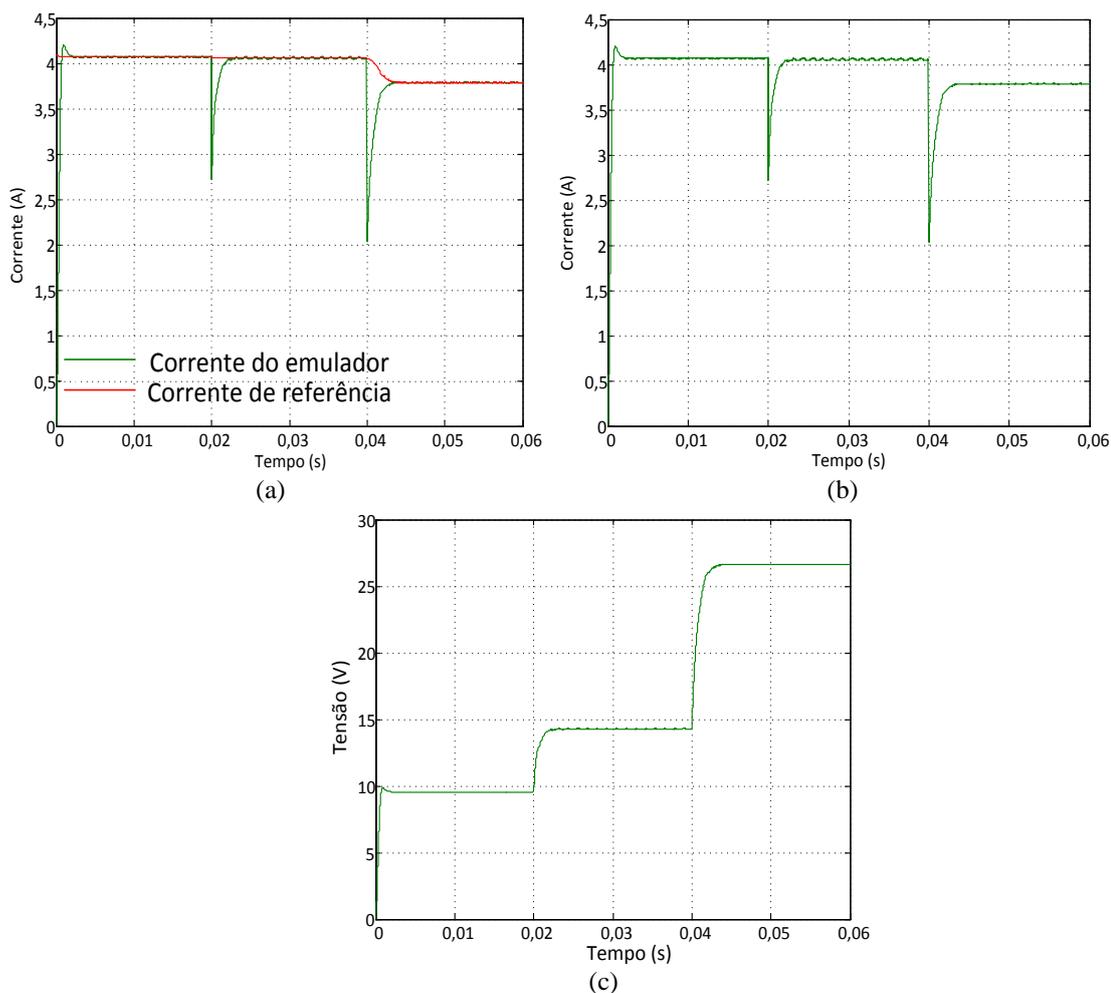


Figura 23 – (a) Corrente de referência e saída. (b) Corrente de saída. (c) Tensão de saída de um painel para $G=500\text{W/m}^2$ e $T_c=20^\circ\text{C}$

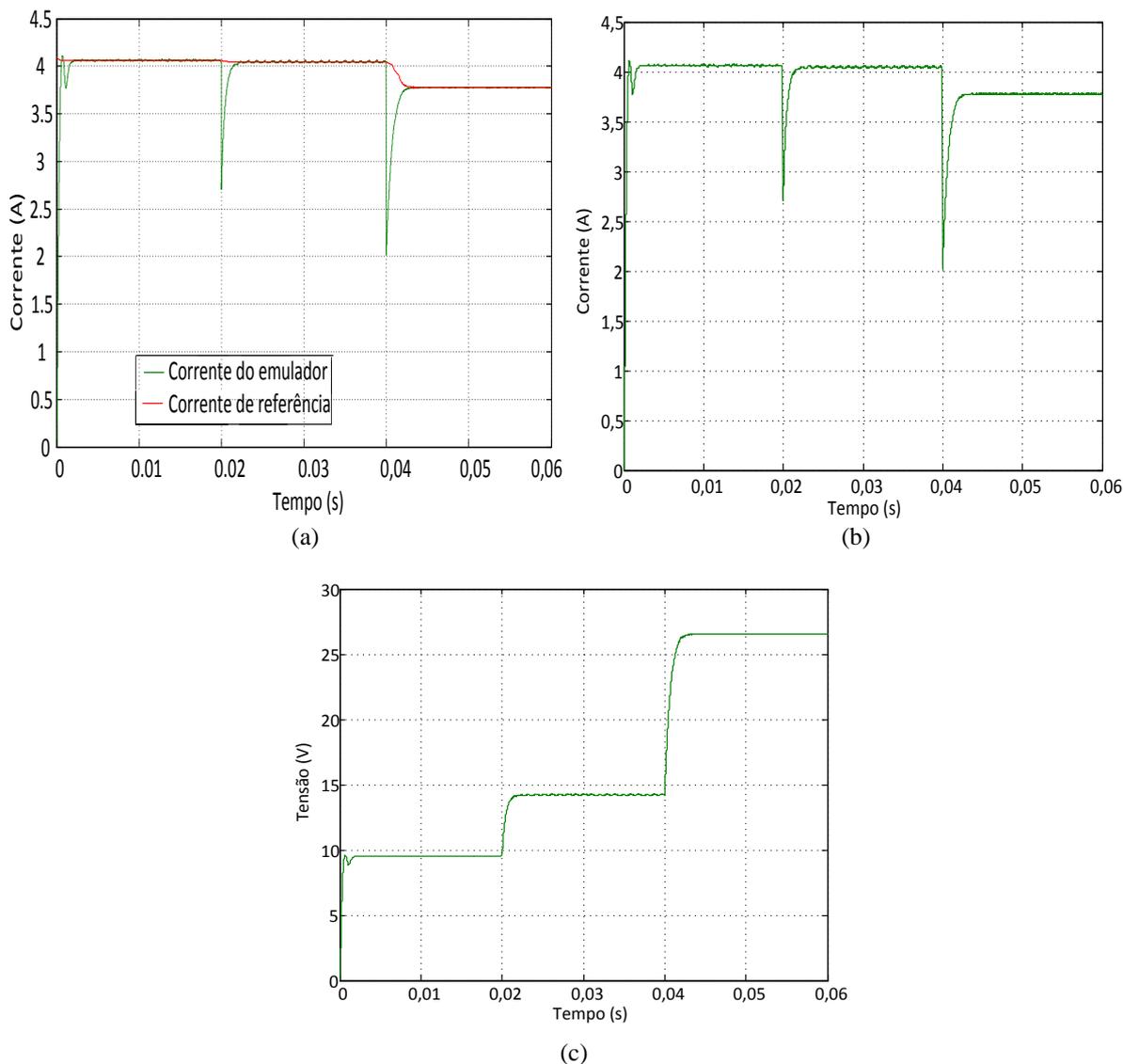


Figura 24 – (a) Corrente de referência e saída. (b) Corrente de saída. (c) Tensão de saída de um painel para $G=500\text{W/m}^2$ e $T_c=20^\circ\text{C}$

Ao comparar os resultados das Figuras 23 e 24, é possível observar que o tempo de assentamento é um pouco menor no emulador composto pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012). Além disto, é possível observar que praticamente não houveram oscilações no momento do degrau de carga.

O comportamento da corrente e da tensão de saída do emulador considerando um arranjo fotovoltaico de dois painéis conectados em paralelo, para $G=800\text{ W/m}^2$ e $T_c = 30^\circ\text{C}$, pode ser observado através das Figuras 25 e 26, respectivamente, para os emuladores composto pelo o modelo matemático apresentados em Casaro e Martins (2012), e Lu e Nguyen (2012).

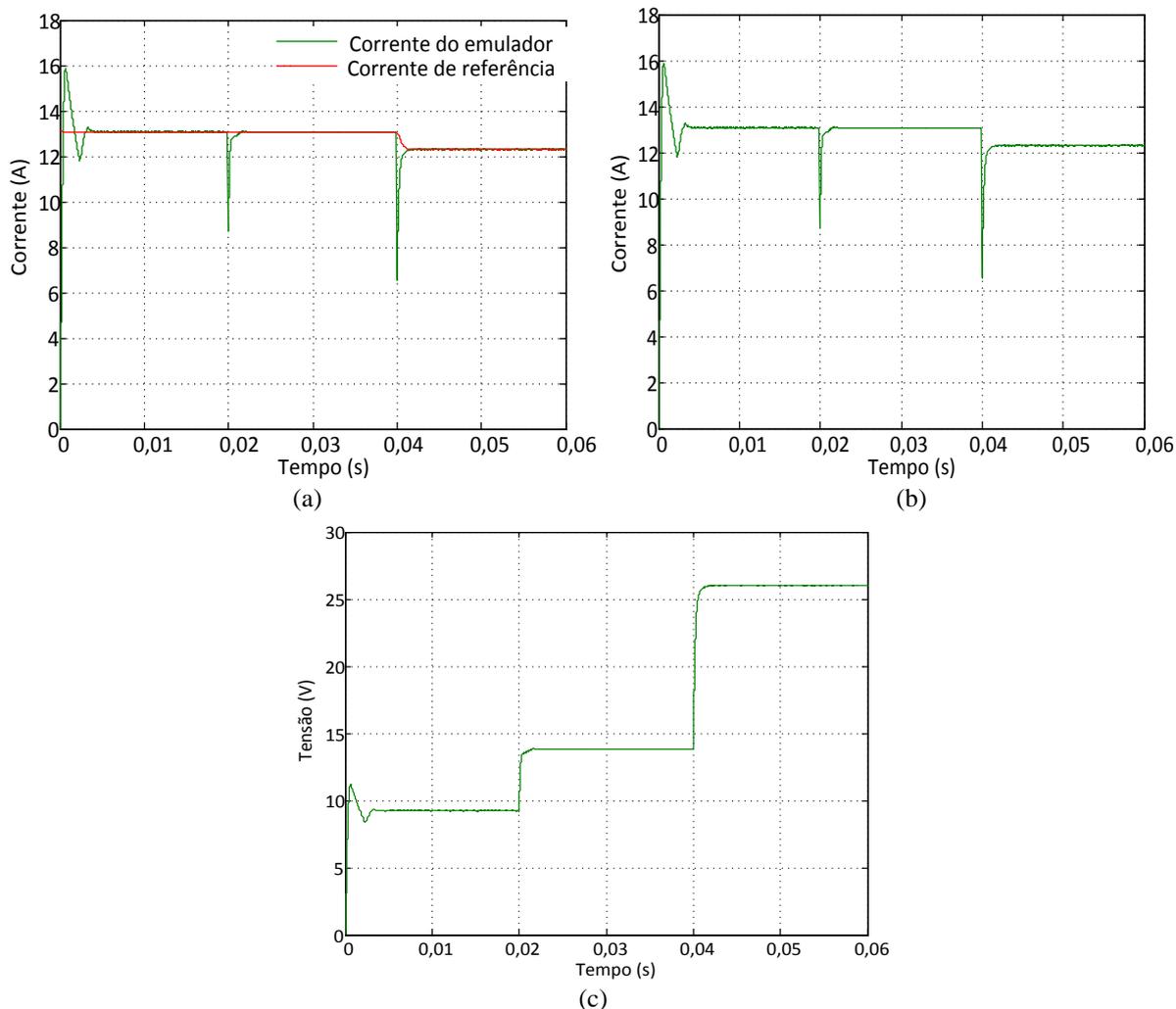


Figura 25 – (a) Corrente de referência e saída (b) Corrente de saída (c) Tensão de saída dois painéis conectados em paralelo para $G=800\text{W/m}^2$ e $T_c=30^\circ\text{C}$

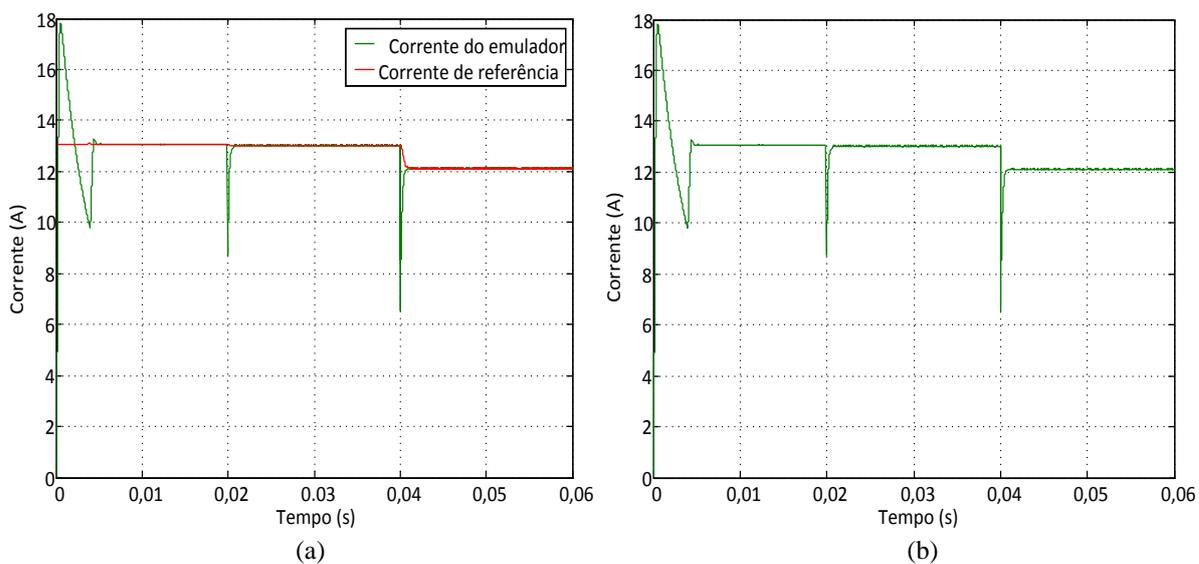


Figura 26– (a) Corrente de referência e saída (b) Corrente de saída de dois painéis conectados em paralelo para $G=800\text{W/m}^2$ e $T_c=30^\circ\text{C}$

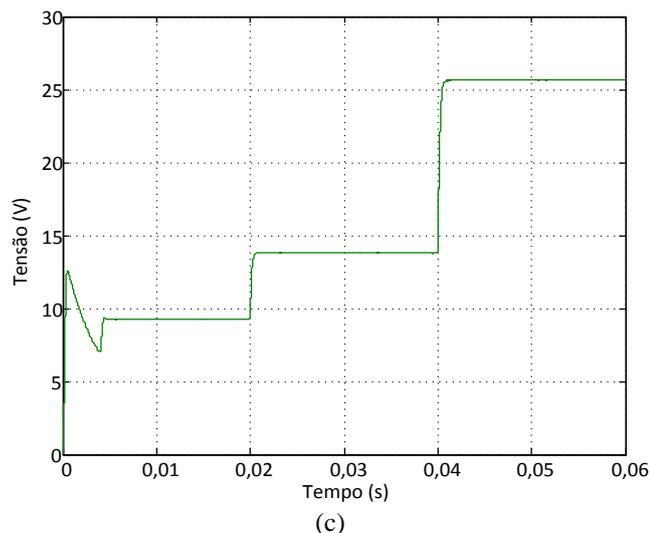


Figura 26 – (c) Tensão de saída de dois painéis conectados em paralelo para $G=800\text{W/m}^2$ e $T_c=30^\circ\text{C}$

Ao observar os resultados para dois painéis conectados em paralelo, através das Figura 25 e 26, nota-se novamente que o tempo de assentamento é um pouco menor no emulador composto pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012), entretanto, este apresentou um sobressinal de 5A. Já o emulador que utiliza o modelo matemático proposto em Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999), apresentou um sobressinal de 3A .

A Figuras 27 ilustra o comportamento de um arranjo de três painéis conectados em série, considerando $G=1000\text{W/m}^2$ e $T_c = 25^\circ\text{C}$, para um emulador que utiliza o modelo matemático apresentado em Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999). Para as mesmas condições, através da Figura 28, o comportamento do emulador constituído pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012) é mostrado.

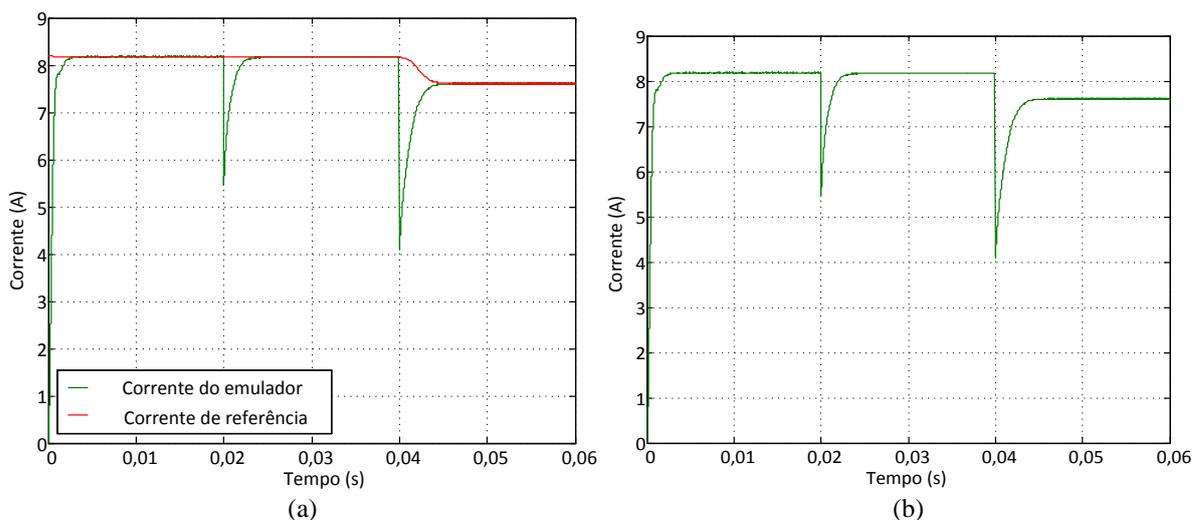


Figura 27 – (a) Corrente de referência e saída. (b) Corrente de saída três painéis conectados em série para $G=1000\text{W/m}^2$ e $T_c=25^\circ\text{C}$

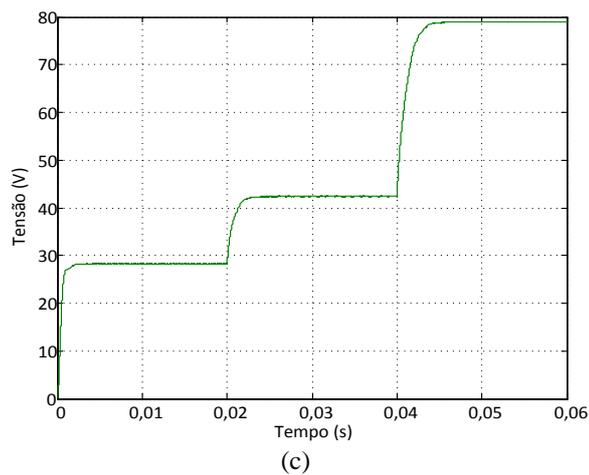


Figura 27 – (c) Tensão de saída três painéis conectados em série para $G=1000\text{W/m}^2$ e $T_c=25^\circ\text{C}$

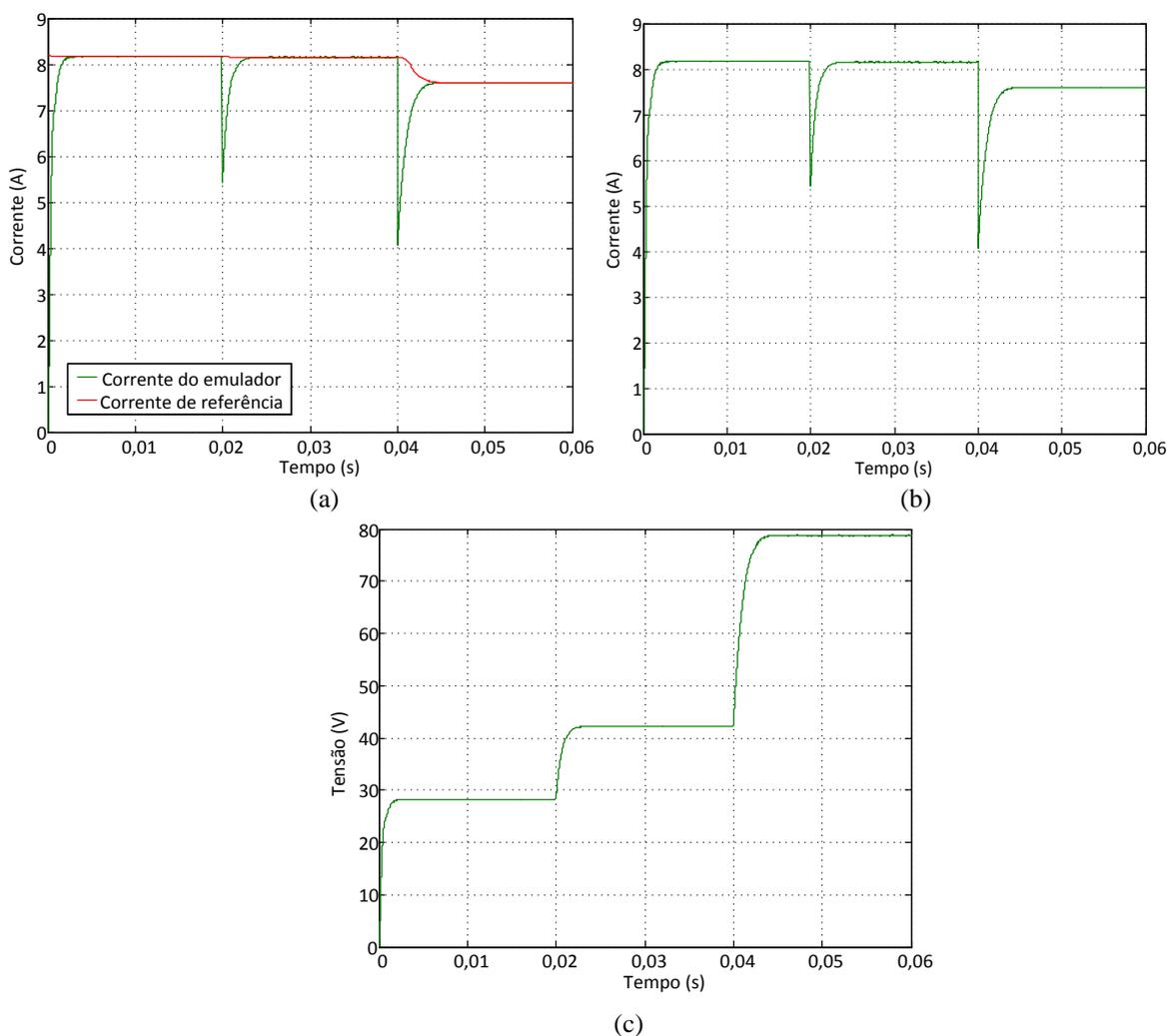


Figura 28 – (a) Corrente de referência e saída. (b) Corrente de saída. (c) Tensão de saída três painéis conectados em série para $G=1000\text{W/m}^2$ e $T_c=25^\circ\text{C}$

Nos resultados apresentados pelas Figuras 27 e 28 praticamente não há diferença entre os tempos de assentamentos dos emuladores, também não há sobressinal nem oscilações.

Em todos os resultados no intervalo de 0 a 0,02s é gerado um valor de referência de acordo com a carga resistiva conectada na saída do conversor Buck. Já no intervalo de 0,02 a 0,04s, bem como, no intervalo de 0,04 a 0,06s, é possível analisar o comportamento dinâmico do emulador de arranjos FVs quanto à variações do ponto de operação por meio de mudanças de cargas resistivas.

Avaliando os resultados apresentado nas Figuras 23 a 28 é possível notar que o maior tempo de assentamento é de 3 ms. Outro aspecto importante avaliado através dos resultados obtidos está relacionado com o bom desempenho do emulador eletrônico quando este atua em pontos de operação diferentes daqueles com os quais os ganhos dos controladores foram ajustados.

Além disto, é possível notar que o emulador constituído pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012) apresenta uma melhor ação de controle, ou seja, atua de forma com que o emulador atinja o valor de referência imposto pelo modelo matemático em menos tempo quando comparado ao modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012). Isso se deve ao fato deste modelo matemático proposto não utilizar um método iterativo para gerar valores de referência de corrente, gerando-os de modo mais rápido, permitindo assim, que os ganhos do PI deste emulador sejam projetados para uma frequência de cruzamento maior.

Os resultados da segunda etapa tem por objetivo a avaliação do comportamento do emulador quando este é submetido às variações de níveis de radiação solar. Portanto, novamente é realizada uma comparação entre os valores de corrente obtidas pelo modelo matemático e a corrente de saída do emulador de arranjos FVs.

Para os resultados apresentados através das Figuras 29 e 30, considera-se apenas um painel FV e $T_C=20^\circ\text{C}$. Além disto, no intervalo de 0 a 0,02s é gerado um valor de referência correspondente a $G = 1000 \text{ W/m}^2$. No intervalo de 0,02 a 0,04s, o valor de referência corresponde a $G = 800 \text{ W/m}^2$. Já no terceiro intervalo, de 0,04 a 0,06 é gerado um valor de referência correspondente a $G = 500 \text{ W/m}^2$. Por último, no quarto intervalo a referência corresponde, novamente, a $G = 1000 \text{ W/m}^2$. Através da Figura 29 é apresentado o comportamento do emulador constituído pelo modelo matemático apresentado em Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999). Já através da Figura 30, o comportamento do emulador composto pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

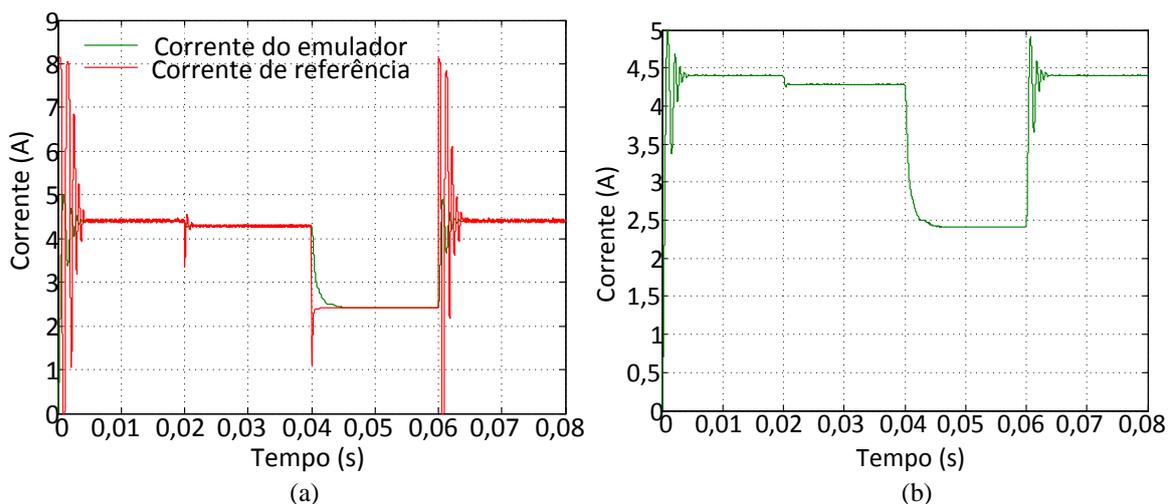


Figura 29 – (a) Corrente de Referência e saída (b) Corrente de saída considerando apenas 1 painel e o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999)

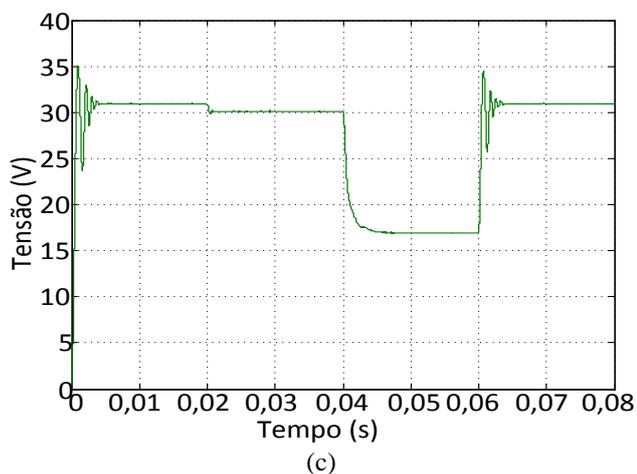


Figura 29 – (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando apenas 1 painel e o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999).

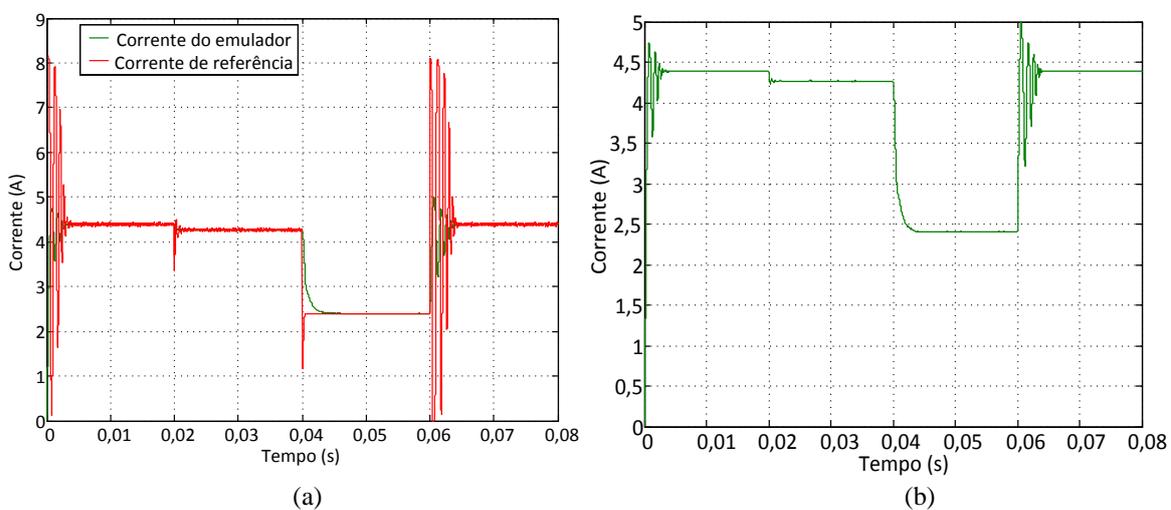
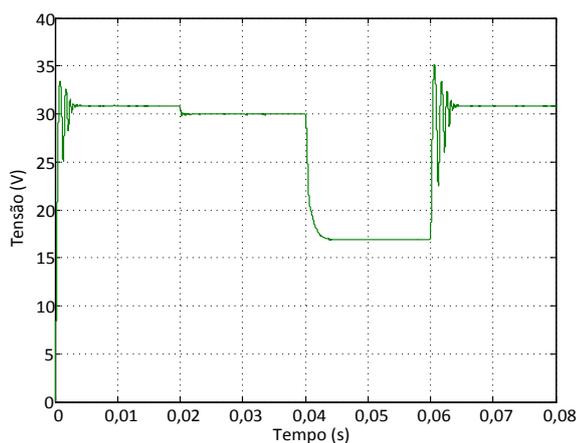


Figura 30 – (a) Corrente de Referência e saída (b) Corrente de saída, considerando apenas 1 painel e o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

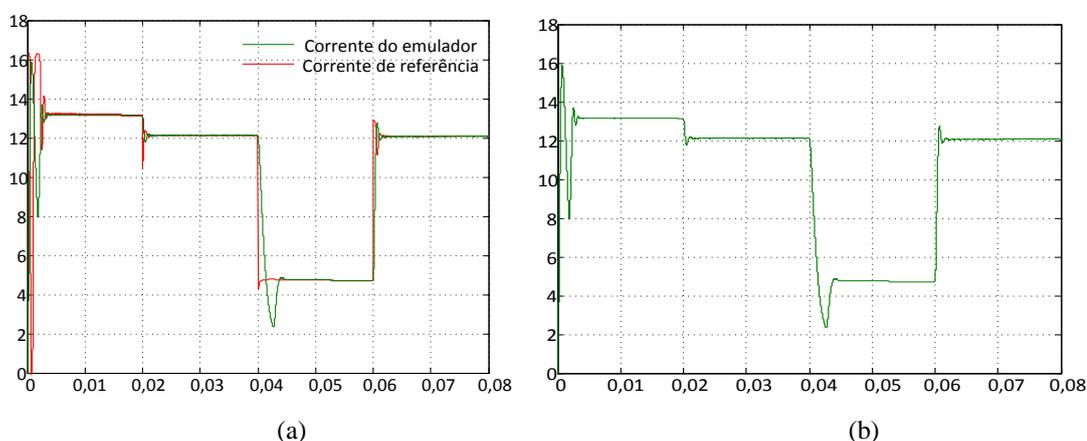


(c)

Figura 30 – (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando apenas 1 painel e o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

Diferentemente, dos resultados considerando variação de carga, os emuladores apresentaram oscilações quando submetidos à variação de radiação. Ao comparar os dois emuladores, estes apresentaram praticamente o mesmo sobressinal e tempo de assentamento.

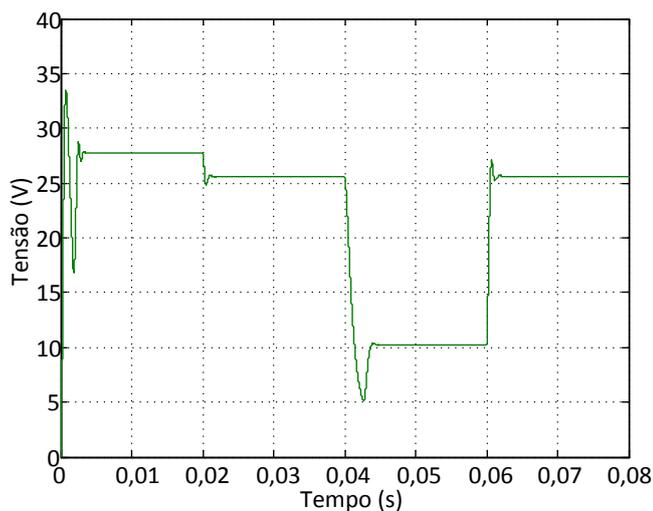
Já para os resultados mostrados através das Figuras 31 e 32, considera-se dois painéis conectados em paralelo e $T_C=30^\circ\text{C}$. Além disto, no intervalo de 0 a 0,02s é gerado um valor de referência correspondente a $G = 1000 \text{ W/m}^2$. No intervalo de 0,02 a 0,04s, o valor de referência corresponde a $G = 800 \text{ W/m}^2$. Já no terceiro intervalo, de 0,04 a 0,06 é gerado um valor de referência correspondente a $G = 300 \text{ W/m}^2$. Por último, no quarto intervalo a referência corresponde, novamente, a $G = 800 \text{ W/m}^2$. Através da Figura 31 é apresentado o comportamento do emulador composto pelo modelo matemático apresentado em Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999). E através da figura 32, o comportamento do emulador que utiliza o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).



(a)

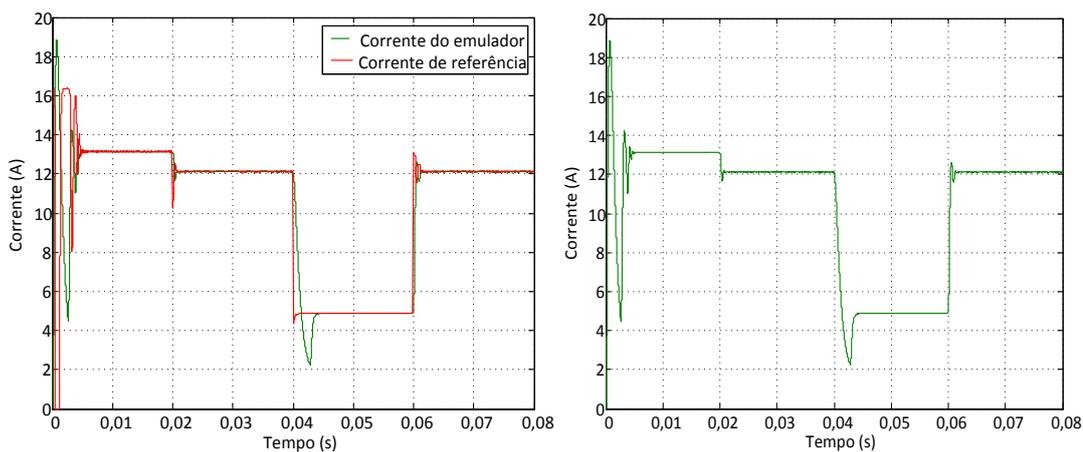
(b)

Figura 31 – (a) Corrente de saída e referência (b) Corrente de saída, considerando dois painéis conectados em paralelo e o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999)



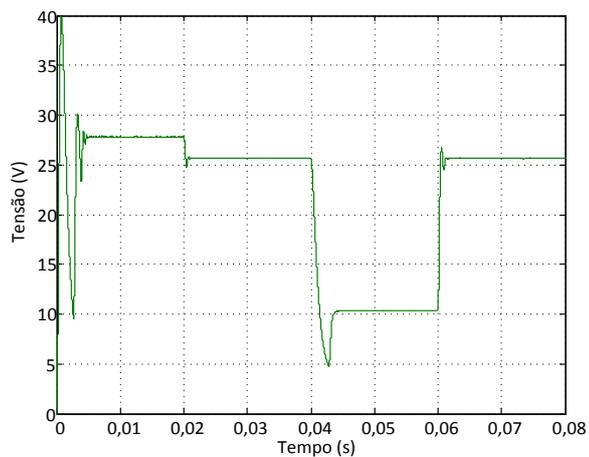
(c)

Figura 31 – (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando dois painéis conectados em paralelo e o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999)



(a)

(b)



(c)

Figura 32 – (a) Corrente de saída e referência (b) Corrente de saída (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando dois painéis conectados em paralelo e o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

Assim como nos resultados apresentados para variação de carga considerando dois painéis em paralelo, é possível observar através dos resultados das Figuras 31 e 32, que o emulador que utiliza o modelo matemático apresentado por Lu e Nguyen (2012) apresenta um sobressinal maior do que o emulador composto pelo modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999).

E por último, para os resultados desta etapa, mostrados através das Figuras 33 e 34, considera-se três painéis conectados em série e $T_c=30^\circ\text{C}$. Além disto, no intervalo de 0 a 0,02s é gerado um valor de referência correspondente a $G = 1000 \text{ W/m}^2$. No intervalo de 0,02 a 0,04s, o valor de referência corresponde a $G = 800 \text{ W/m}^2$. Já no terceiro intervalo, de 0,04 a 0,06 é gerado um valor de referência correspondente a $G = 300 \text{ W/m}^2$. Por último, no quarto intervalo a referência corresponde, novamente, a $G = 1000 \text{ W/m}^2$. Através da Figura 33 é apresentado o comportamento do emulador composto pelo modelo matemático apresentado em Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999). Já através da Figura 34, o comportamento do emulador constituído pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

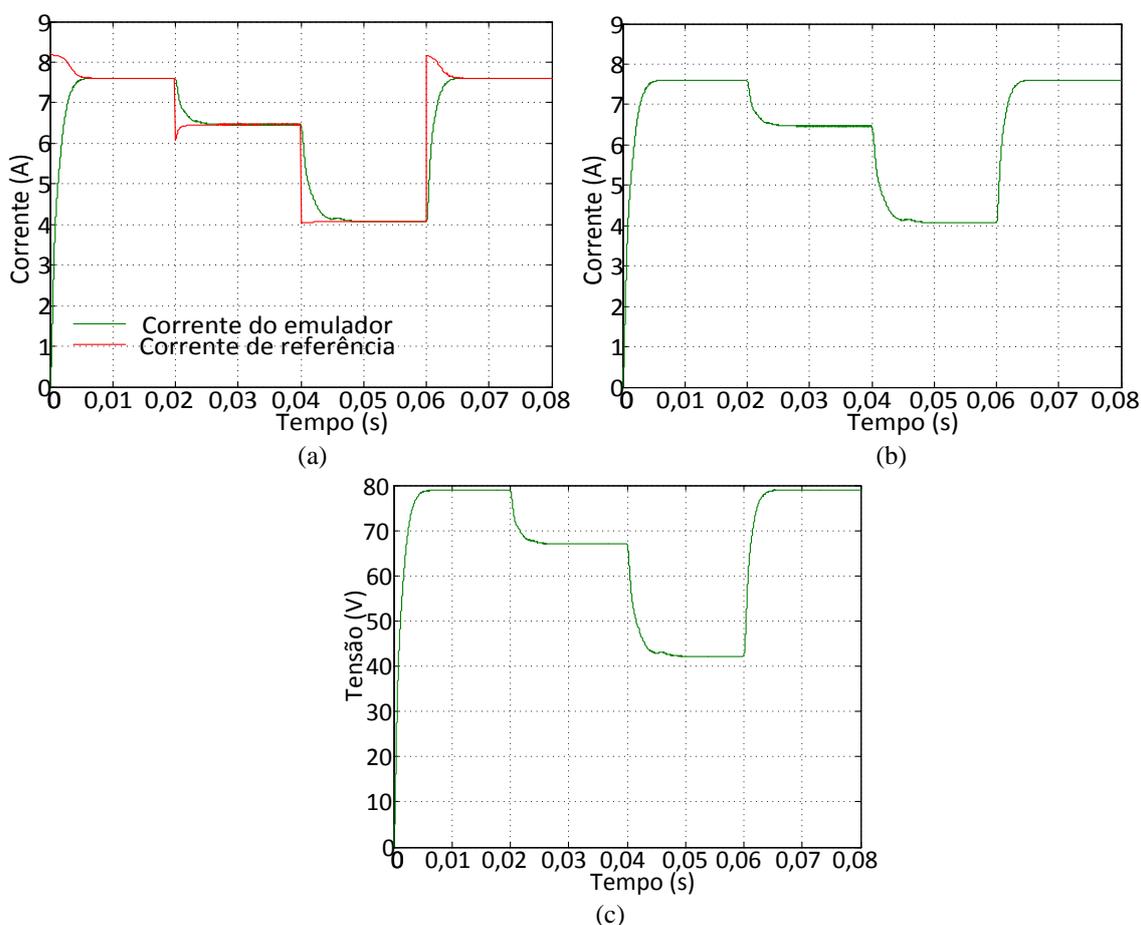


Figura 33 – (a) Corrente de saída e referência (b) Corrente de saída (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando três painéis conectados em série e o modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999).

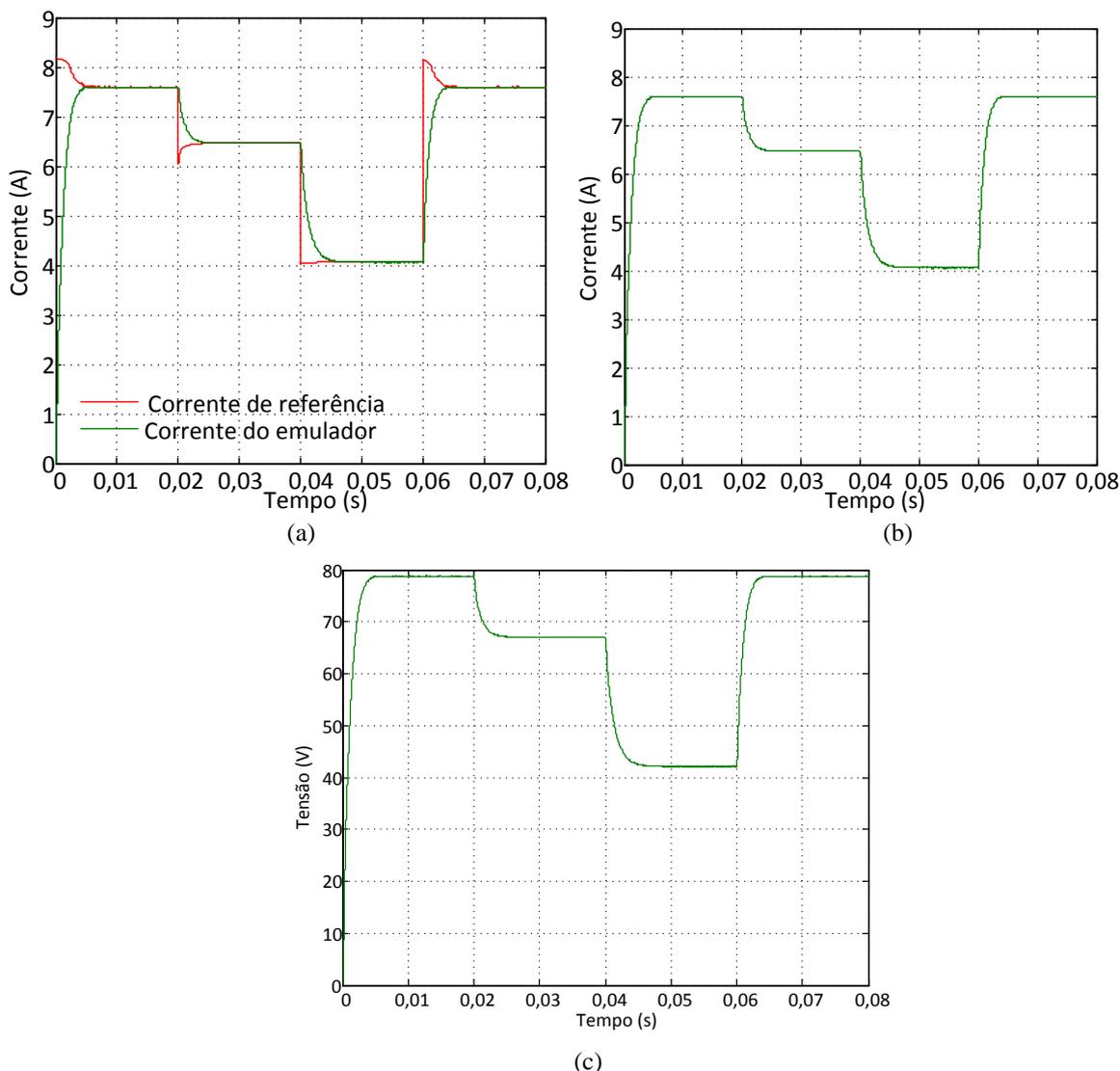


Figura 34 – (a) Corrente de saída e referência (b) Corrente de saída (c) Tensão de saída para diversos níveis de radiação solar, considerando três painéis conectados em série e o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

Através das Figura 33e 34, nota-se que o tempo de assentamento é um pouco menor no emulador composto pelo modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012) e que ambos não apresentam oscilações, nem sobressinal.

Ao comparar os resultados obtidos de um arranjo FV para valores de radiação solar diferentes, é possível notar a influência dessa condição climática na potência disponível na saída do emulador. Além disto, através das Figuras 29 a 34 nota-se que tempo de acomodação é menor que 4,5 ms.

Por último, a terceira etapa consiste na comparação da curva teórica $I \times V$, obtida por meio do modelo matemático da célula fotovoltaica, e a curva experimental do emulador eletrônico, a fim de avaliar o comportamento do emulador em regime permanente.

Na Figura 35 é apresentada a curva IxV de apenas um painel fotovoltaico quando submetido a uma radiação solar igual a 1000 W/m^2 e $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando que o emulador é constituído pelo modelo matemático proposto por Casaro e Martins (2012), Gow e Manning (1999).

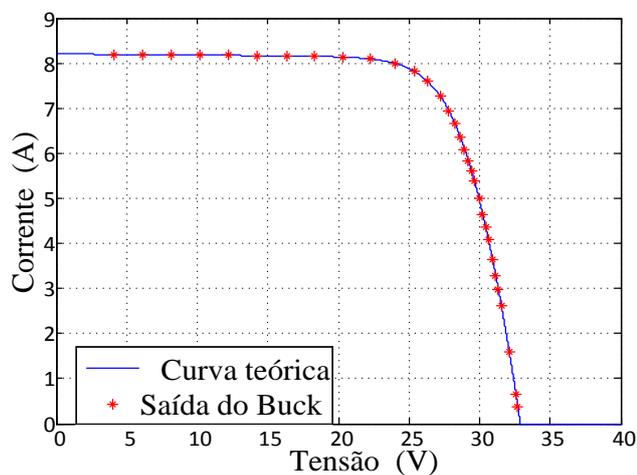


Figura 35 – Curva IxV de apenas 1 painel

E na Figura 36 é apresentada a curva IxV de dois painéis conectados em paralelo quando submetido a uma radiação solar igual a 800 W/m^2 e $T_C = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, considerando que o emulador utiliza o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012).

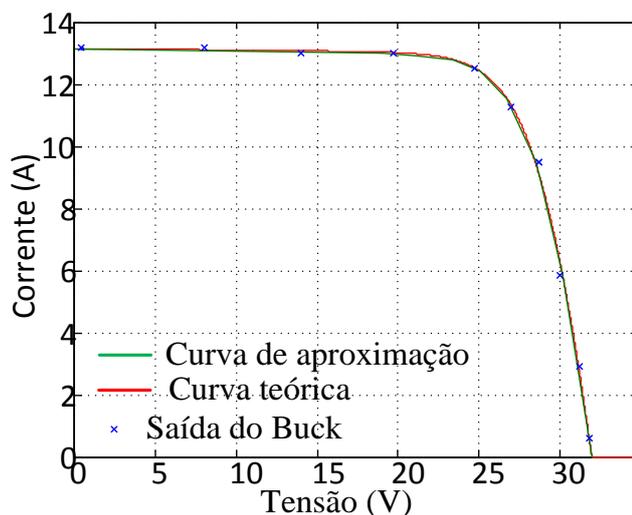


Figura 36 – Curva IxV de 3 painéis conectados em série

Ao comparar a curva teórica com os pontos de operação obtidos na saída com do conversor Buck, através das Figuras 35 e 36, nota-se que o emulador, independente do modelo matemático utilizado, se comporta de modo satisfatório em regime permanente.

8 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de um emulador eletrônico capaz de emular as características de um arranjo fotovoltaico. O sistema foi implementado em software de simulação e foi avaliado considerando variações climáticas, tais como radiação solar e temperatura, supondo condições típicas nas quais os painéis fotovoltaicos estão sujeitos ao ambiente. Adicionalmente, dada a característica do sistema proposto, o emulador é capaz de sintetizar diferentes tipos de arranjos fotovoltaicos, como pode ser observado a partir dos resultados de simulação apresentados.

Através da execução deste trabalho nota-se que quanto mais não idealidades são consideradas no circuito equivalente, mais complexa torna-se sua modelagem matemática, sendo até mesmo necessária a aplicação de um método iterativo para solucionar a equação que descreve o comportamento da célula fotovoltaica.

Quanto aos resultados obtidos ao projetar e simular vários controladores PI, tendo como dados de projeto a frequência de cruzamento e margem de fase, é possível notar que quanto maior a frequência de cruzamento e menor a margem de fase, mais rápido é a resposta do conversor a um determinado distúrbio, menor o tempo de assentamento e maior o sobressinal. Porém o sistema tem uma margem mais restrita de operação em torno do ponto quiescente (I,V) em que o conversor foi projetado, causando oscilações ou até mesmo instabilidade quando o conversor opera fora do ponto de operação, que no caso é o ponto de MPPT referente à conexão em série de três painéis FVs.

Avaliando os resultados quanto ao comportamento transitório dos emuladores, apresentados nas Figuras 23 a 34, é possível notar que o maior tempo de assentamento é de 4 ms e o maior máximo sobressinal é de 14 V.

Os sistemas propostos apresentaram um bom comportamento dinâmico, apresentado uma rápida resposta com baixo tempo de assentamento quando submetido aos testes de variações de níveis de radiação solar, de temperatura, bem como, de carga na saída do emulador.

Já em regime permanente demonstraram-se eficiente ao gerar via simulação, uma curva IxV (corrente-tensão) na saída do conversor similar a curva característica do painel fotovoltaico em estudo.

Outro aspecto importante avaliado através dos resultados obtidos está relacionado com o bom desempenho do emulador eletrônico quando este atua em pontos de operação diferentes daqueles com os quais os ganhos dos controladores foram ajustados.

Além disto, ao observar os resultados obtidos de um painel FV para valores de radiação solar diferentes, através das Figuras 29 a 34 é possível notar a influência dessa condição climática na potência disponível na saída do emulador.

Quanto ao modelos matemáticos apresentados, nota-se que os dois modelos matemáticos apresentam vantagens e desvantagens. Por exemplo, dentre os modelos matemáticos, o que melhor representa o comportamento de um painel fotovoltaico real é o proposto por Casaro e Martins (2012), devido as não-idealidades consideradas no modelo matemático. Entretanto, a não-idealidade R_p considerada neste modelo faz com que seja necessário que um método iterativo seja aplicado para obtenção dos valores de referência.

Já o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012) não necessita de um método iterativo. Além disto, quando implementado em um emulador, apresentou um bom desempenho dinâmico, e um tempo de assentamento menor quando comparado ao outro modelo matemático. Contudo, para a implementação deste modelo em um emulador, é necessário que uma curva de aproximação seja obtida para cada valor de temperatura da CF e radiação solar. Desta forma, o emulador restringe-se a emular o comportamento de um painel para poucas condições de temperatura da CF e radiação solar, ou a implementação deste modelo matemático torna-se trabalhosa.

REFERÊNCIAS

ANGÉLICO, Bruno Augusto; CAMPANHOL, Leonardo Bruno Garcia; SILVA, Sérgio Augusto Oliveira da. **Proportional–integral/proportional–integral derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram**. IET Power Electron, p. 1-13, 2014.

ATLAS, I. H.; SHARAF, A. M.. **A photovoltaic array simulation model for MATLAB simulink GUI environment**. PESC, p. 341– 345, 2007.

CASARO, Márcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação**. Eletrônica de Potência, vol. 13, no. 3, p. 141-146, Ago de 2008.

CAVALCANTI, Marcelo Cabral; OLIVEIRA, Kleber Carneiro de; AZEVEDO, Gustavo Medeiros de Souza.; NEVES, Francisco de Assis dos Santos. **Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems**. Brazilian Journal of Power Electronics, vol.12, no. 2, p. 163-171, Jul de 2007.

ERICKSON, Robert W.; MARKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of Power Electronics**. Ed. Kluwer Academic Publishers, 2^a ed, 2001.

GOW, J. A.; MANNING, C. D.. **Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies**. IEEE Proc. on Electric Power Applications, vol. 146, no. 2, p. 193-200, Mar de 1999.

GRUNOW, P.; LUST, S.; SAUTER, D.; et al. **Weak Light Performance and Annual Yields of PV Modules and Systems as a Result of the Basic Parameter Set of Industrial Solar Cells**. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p. 2190-2193, 2004.

LU, Dylan D. C.; NGUYEN, Quang Ngoc. **A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller**. Elsevier. SciVerseScienceDirect. Solar Energy 86, p. 1477–1484, 2012.

MAGID, N.; HOOMAN, D.; CHEM, N. A.. **DSP-controlled photovoltaic system with maximum power point tracking**. AUPEC 2003. Archive: itee.uq.edu.au, Paper No. 129; 2003.

RIVERA, E.O., PENG, F.. **Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet**. Em: Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, p. 2087–2091, 2005.

SEGUEL, J. L. L.. **Projeto de um Sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação de mestrado. Foco de pesquisa: Eletrônica de Potencia, PPGEE – UFMG, 2009.

SEVERO, Leonardo. **Estudo E Implementação De Métodos De Proteção De Anti-Ilhamento Aplicados A Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação para obtenção do grau de mestre. Instituto De Eletrônica De Potência. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

VIJAYAKUMARI, A.; DEVARAJAN, A. T.; DEVARAJAN, N.. **Design and development of a model-based hardware simulator for photovoltaic array**. Elsevier. Electrical Power and Energy Systems 43.p. 40 – 46, 2012.

WALKER, Geoff. **Evaluating MPPT Converter Topologies using a Matlab PV model**. Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, vol.21, p. 49-51.

ZHAO, J.; KIMBALL, J.. **A Digitally implemented photovoltaic simulator with a double current mode controller**. Electrical and Computer Enbngineering Missouri, S & T, 2012.

Apêndice I – Curva IxV obtida por meio do modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012)

```
Vpa = 0:0.01:32.9;
```

```
G=1
```

```
Isc=8.21;
```

```
Voc = 32.9;
```

```
Vmppt=26.3;
```

```
Imppt=7.61;
```

```
T=25;
```

```
Tnoct=47;
```

```
beta=3.18e-3;
```

```
alfa=-0.123;
```

```
di = 1 + beta/100*(T-Tnoct);
```

```
dv = alfa/100*(T - Tnoct);
```

```
b=0.1;
```

```
for j=1:180
```

```
b = b - (- Imppt*(1 - exp(-1/b)) + Isc*(1 - exp(Vmppt/b/(Voc+dv) - 1/b)))/(Imppt*b.^(-2)*exp(-1/b) - Isc*(exp(Vmppt/b/(Voc+dv) - 1/b)*b.^(-2) - exp(Vmppt/b/(Voc+dv) - 1/b)*Vmppt*b.^(-2)/(Voc+dv)))
```

```
end
```

```
I = G*di*Isc*(1 - exp(Vpa/(b*(Voc+dv)) - (1/b)))/(1-exp(-1/b));
```

```
figure(1);
```

```
plot(Vpa,I,'b');
```

```
grid on;
```

```
hold on;
```

Apêndice II – Projeto do Controlador PI para função transferência G_{id}

```

clear all;
clc;
close all;

P=3*200;
Vg=180;
Voc=3*32.9;
V=3*32.9;
Vp=32.9;
fs=20000;

I=P/Vp
Dmax=Voc/Vg
dI=0.05*I
dV=0.0005*V
L=(Vg-V)*Dmax/(fs*dI)
C= Vg*Dmax*(1-Dmax)/(8*fs^2*dV*L)
R=V^2/P

% função transferencia de malha aberta
s=tf('s');

Gid= Vg*(1+ R*C*s)/(R + L*s + R*L*C*s^2)

FTMA=Gid
bode(FTMA)
grid;

margin(FTMA)

% projetar o compensador para que o sistema apresente margem de fase
% desejada (MFd) para uma frequencia de cruzamento desejada (fc)

fc=2000
wc=2*pi*fc
MFd = 60

% - margem de fase do sistema em fc

[ganho,fase]=bode(FTMA,wc)
MF= -180 - (fase)

% - fase a ser introduzida pelo compensador

fi = MFd + MF
Ti= tand(fi +90)/wc

% ganho do compensador sem o ganho ki

Gcl = (Ti*s +1)/s
figure(2);
bode(FTMA*Gcl);
grid;

```

```
% Encontrar KI..primeiro encontra-se o absoluto da margem de ganho de
% FTMA*Gcl
[ganho,fase]=bode(FTMA*Gcl,wc)

% depois encontre ki satisfazendo a seguinte igualdade FTMA*Gcl*Ki= 1

Ki=1/ganho
Kp=Ki*Ti

% o novo Gc, fica igual a:

Gc=Ki*(Ti*s +1)/s

% plotando o sistema com o compensador

figure(3)
margin(FTMA*Gc);
grid
```

Apêndice III – Código implementado no Simulink para emulador computacional que utiliza o modelo matemático proposto por Lu e Nguyen (2012)

```
function Ipa = PV_Array(V, Psun, T)
I=0;
```

```
if Psun == 1000 && T==25
%1
if V>=0 && V<=61.32
V0=0;
V1=61.32;
I0=8.2;
I1=8.133;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>61.32 && V<=69.03
V0=61.32;
V1=69.03;
I0=8.133;
I1=8.064;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>69.03 && V<=77.95
V0=69.03;
V1=77.95;
I0=8.064;
I1=7.691;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>77.95 && V<=81.61
V0=77.95;
V1=81.61;
I0=7.691;
I1=7.27;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>81.61 && V<=85.87
V0=81.61;
V1=85.87;
I0=7.27;
I1=6.378;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>85.87 && V<=90.35
V0=85.87;
V1=90.35;
I0=6.378;
I1=4.801;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
```

```

    end
%7
if V>90.35 && V<=98.7
    V0=90.35;
    V1=98.7;
    I0=4.801;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 800 && T==25
%1
if V>=0 && V<=66.94
    V0=0;
    V1=66.94;
    I0=6.563;
    I1=6.464;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>66.94 && V<=74.78
    V0=66.94;
    V1=74.78;
    I0=6.464;
    I1=6.309;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>74.78 && V<=80.9
    V0=74.78;
    V1=80.9;
    I0=6.309;
    I1=5.893;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>80.9 && V<=85.02
    V0=80.9;
    V1=85.02;
    I0=5.893;
    I1=5.257;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>85.02 && V<=89.05
    V0=85.02;
    V1=89.05;
    I0=5.257;
    I1=4.172;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>89.05 && V<=93.48

```

```

V0=89.05;
V1=93.48;
I0=4.172;
I1=2.321;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>93.48 && V<=97.58
V0=93.48;
V1=97.58;
I0=2.321;
I1=0;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 500 && T==25
%1
if V>=0 && V<=60.69
V0=0;
V1=60.69;
I0=4.102;
I1=4.041;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>60.69 && V<=70.41
V0=60.69;
V1=70.41;
I0=4.041;
I1=3.986;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>70.41 && V<=76.08
V0=70.41;
V1=76.08;
I0=3.986;
I1=3.871;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>76.08 && V<=80.2
V0=76.08;
V1=80.2;
I0=3.871;
I1=3.669;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>80.2 && V<=86.24
V0=80.2;
V1=86.24;
I0=3.669;

```

```

I1=2.945;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>86.24 && V<=90.71
V0=86.24;
V1=90.71;
I0=2.945;
I1=1.819;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>90.71 && V<=95.51
V0=90.71;
V1=95.51;
I0=1.819;
I1=0;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 1000 && T==30
%1
if V>=0 && V<=18.99
V0=0;
V1=18.99;
I0=16.44;
I1=16.32;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>18.99 && V<=23.56
V0=18.99;
V1=23.56;
I0=16.32;
I1=16;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>23.56 && V<=25.58
V0=23.56;
V1=25.58;
I0=16;
I1=15.31;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>25.58 && V<=26.68
V0=25.58;
V1=26.68;
I0=15.31;
I1=14.51;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;

```

```

end
%5
if V>26.68 && V<=27.87
    V0=26.68;
    V1=27.87;
    I0=14.51;
    I1=13.07;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>27.87 && V<=29.95
    V0=27.87;
    V1=29.95;
    I0=13.07;
    I1=8.579;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>29.95 && V<=32.54
    V0=29.95;
    V1=32.54;
    I0=8.579;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 800 && T==30
%1
if V>=0 && V<=21.19
    V0=0;
    V1=18.99;
    I0=13.15;
    I1=12.98;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>21.19 && V<=23.4
    V0=21.19;
    V1=23.56;
    I0=12.98;
    I1=12.8;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>23.4 && V<=25.06
    V0=23.4;
    V1=25.06;
    I0=12.8;
    I1=12.44;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>25.06&& V<=26.76

```

```

V0=25.06;
V1=26.76;
I0=12.44;
I1=11.53;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>26.76 && V<=28.51
    V0=26.76;
    V1=28.51;
    I0=11.53;
    I1=9.468;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>28.51 && V<=30.19
    V0=28.51;
    V1=30.19;
    I0=9.468;
    I1=5.852;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>30.19 && V<=32
    V0=30.19;
    V1=32;
    I0=5.852;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 300 && T==30
    %1
    if V>=0 && V<=19.1
        V0=0;
        V1=19.1;
        I0=4.932;
        I1=4.822;
        m=(I1-I0)/(V1-V0);
        I=m*(V-V0) + I0;
    end
    %2
    if V>19.1 && V<=23.4
        V0=19.1;
        V1=23.4;
        I0=4.822;
        I1=4.69;
        m=(I1-I0)/(V1-V0);
        I=m*(V-V0) + I0;
    end
    %3
    if V>23.4 && V<=22.9
        V0=23.4;
        V1=22.9;
        I0=4.69;

```

```

I1=4.723;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>22.9 && V<=24.64
V0=22.9;
V1=24.64;
I0=4.7234;
I1=4.559;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>24.64 && V<=25.87
V0=24.64;
V1=25.87;
I0=4.559;
I1=4.303;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>25.87 && V<=27.75
V0=25.87;
V1=27.75;
I0=4.303;
I1=3.395;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>27.75 && V<=30.3
V0=27.75;
V1=30.3;
I0=3.395;
I1=0;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 1000 && T==20
%1
if V>=0 && V<=22.51
V0=0;
V1=22.51;
I0=8.188;
I1=8.09;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>22.51 && V<=25.1
V0=22.51;
V1=25.1;
I0=8.09;
I1=7.936;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;

```

```

end
%3
if V>25.1 && V<=26.91
    V0=25.1;
    V1=26.91;
    I0=7.936;
    I1=7.587;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>26.91 && V<=27.89
    V0=26.91;
    V1=27.89;
    I0=7.587;
    I1=7.209;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>27.88 && V<=29.36
    V0=27.88;
    V1=29.36;
    I0=7.209;
    I1=6.222;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>29.36 && V<=31.5
    V0=29.36;
    V1=31.5;
    I0=6.222;
    I1=3.587;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>31.5 && V<=33.43
    V0=31.5;
    V1=33.43;
    I0=3.587;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 800 && T==20
%1
if V>=0 && V<=22.92
    V0=0;
    V1=22.92;
    I0=6.551;
    I1=6.452;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;

```

```

end
%2
if V>22.92 && V<=25.35
    V0=22.92;
    V1=25.35;
    I0=6.452;
    I1=6.318;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>25.35 && V<=26.8
    V0=25.35;
    V1=26.8;
    I0=6.318;
    I1=6.093;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>26.8 && V<=28
    V0=26.8;
    V1=28;
    I0=6.093;
    I1=5.719;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>28 && V<=29.25
    V0=28;
    V1=29.25;
    I0=5.719;
    I1=5.024;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>29.25 && V<=31.32
    V0=29.25;
    V1=31.32;
    I0=5.024;
    I1=2.871;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>31.32 && V<=33.06
    V0=31.32;
    V1=33.06;
    I0=2.871;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
end

if Psun == 300 && T==20
    %1
    if V>=0 && V<=22.5

```

```

V0=0;
V1=22.5;
I0=2.456;
I1=2.382;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>22.5 && V<=24.64
    V0=22.5;
    V1=24.64;
    I0=2.382;
    I1=2.336;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>24.64 && V<=26.18
    V0=24.64;
    V1=26.18;
    I0=2.336;
    I1=2.247;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>26.18 && V<=27.37
    V0=26.18;
    V1=27.37;
    I0=2.247;
    I1=2.1;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>27.37 && V<=28.86
    V0=27.37;
    V1=28.86;
    I0=2.1;
    I1=1.718;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
6
if V>28.86 && V<=30.22
    V0=28.86;
    V1=30.22;
    I0=1.718;
    I1=1.022;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;
end
7
if V>30.22 && V<=31.42
    V0=30.22;
    V1=31.42;
    I0=1.022;
    I1=0;
    m=(I1-I0)/(V1-V0);
    I=m*(V-V0) + I0;

```

```

end
end
if Psun == 500 && T==20
%1
if V>=0 && V<=22.3
V0=0;
V1=22.3;
I0=4.094;
I1=4.018;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%2
if V>22.3 && V<=25.4
V0=22.3;
V1=25.4;
I0=4.018;
I1=3.912;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%3
if V>25.4 && V<=27.08
V0=25.4;
V1=27.08;
I0=3.912;
I1=3.712;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%4
if V>27.08 && V<=28.19
V0=27.08;
V1=27.37;
I0=3.712;
I1=3.436;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%5
if V>28.19 && V<=29.64
V0=28.19;
V1=29.64;
I0=3.436;
I1=2.751;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%6
if V>29.64 && V<=31.1
V0=29.64;
V1=31.1;
I0=2.751;
I1=1.502;
m=(I1-I0)/(V1-V0);
I=m*(V-V0) + I0;
end
%7
if V>31.1 && V<=32.28
V0=31.1;

```

```
V1=32.28;  
I0=1.502;  
I1=0;  
m=(I1-I0)/(V1-V0);  
I=m*(V-V0) + I0;  
end  
end  
Ipa=I;
```

Anexo I – Curva IxV obtida através do código proposto em Casaro e Martins (2012)

```

Psun = 500;
T = 20;
Vpa = 0:0.01:35;
% AJUSTE DA CARACTERÍSTICA I-V
Rs = 0.005;
Rp = 7;
Ms = 1;
Mp = 1;
% DADOS DE CATÁLOGO
Ns = 54;
Voc = 32.9/Ns;
Isc = 8.21;
a = 3.18e-3;
% CONSTANTES
n = 1.2;
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
EG = 1.1;
Tr = 273 + 25;
% CÁLCULOS
T = 273 + T;
Vt = n*k*T/q;
V = Vpa/Ns/Ms;
Iph = (Isc+a*(T-Tr))*Psun/1000;
Irr = (Isc-Voc/Rp)/(exp(q*Voc/n/k/Tr)-1);
Ir = Irr*(T/Tr)^3*exp(q*EG/n/k*(1/Tr-1/T));
I = zeros(size(V));
for j=1:80;
I = I-(Iph-I-Ir.*(exp((V+I.*Rs)./Vt)-1)-(V+I.*Rs...
)./Rp)./(-1-Ir.*exp((V+I.*Rs)./Vt).*Rs./Vt-Rs./Rp);
end
for j=1:length(I);
if I(j)<0
I(j)=0;
end
end
Ipa = I*Mp;
% GERAÇÃO DE CURVAS I-V E P-V
figure(1);
plot(Vpa,Ipa,'r');

```