

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PAULO HENRIQUE MATTOS DE VILHENA MOURA**

**PROJETO DE UM EMULADOR FOTOVOLTAICO EMPREGANDO O  
CONVERSOR *BUCK* SÍNCRONO**

**Alegrete  
2020**

**PAULO HENRIQUE MATTOS DE VILHENA MOURA**

**PROJETO DE UM EMULADOR FOTOVOLTAICO EMPREGANDO O  
CONVERSOR *BUCK* SÍNCRONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

**Alegrete  
2020**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M331p Moura, Paulo Henrique Mattos de Vilhena  
Projeto de um Emulador Fotovoltaico Empregando o Conversor *Buck* Síncrono  
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2020.

"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto".

1. Eletrônica de potência. 2. Emulador Fotovoltaico. 3. Conversor *buck* síncrono. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal do Pampa

**PAULO HENRIQUE MATTOS DE VILHENA MOURA**

**PROJETO DE UM EMULADOR FOTOVOLTAICO EMPREGANDO O CONVERSOR BUCK SÍNCRONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de Dezembro de 2020.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto  
Orientador  
UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Guilherme Sebastião da Silva

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon

UNIPAMPA



Documento assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME SEBASTIAO DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FELIPE BOVOLINI GRIGOLETTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/12/2020, às 14:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0415414** e o código CRC **EDA7FBC5**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete  
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550  
Telefone: (55) 3422-8400

## AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço à Deus pelo dom da vida e por me guiar nos momentos de angústia e sofrimento.

Diversas pessoas contribuíram para que este trabalho pudesse ser finalizado e, desde já, sinceramente, agradeço à todas.

Aos meus pais, Paulo e Roberta, aos meus avós, Augusto, Lair e Tânia, às bisavós, Alvina (*in memoriam*) e Ieda, e todos os demais familiares, sem nenhuma exceção, agradeço pelo apoio, incentivo e ensinamentos ao longo das trajetórias do curso e da vida, sem eles seria impossível superar as dificuldades encontradas no meu percurso.

Agradeço ao professor Felipe Bovolini Grigoletto por acreditar no meu potencial para realização deste trabalho e por todo o auxílio ao longo deste ano, que mesmo diante das dificuldades devido à pandemia não mediu esforços para que pudéssemos finalizar o projeto.

Estendo meu agradecimento aos demais professores, técnicos e colaboradores da UNIPAMPA que contribuíram de forma expressiva para o meu crescimento nos âmbitos profissional e pessoal.

Aos meus colegas e amigos, que por receio de esquecer algum nome, agradeço de forma geral e não menos significativa, pelo convívio, troca de conhecimentos e momentos de descontração.

*“O primeiro dever da inteligência é desconfiar dela mesma”.*

***Albert Einstein***

## RESUMO

Diante de um cenário de carência de combustíveis fósseis e baixa disponibilidade hídrica para a geração de eletricidade, fontes alternativas de energia renovável tornaram-se indispensáveis. No que tange à energia renovável e geração distribuída, no contexto atual, a energia fotovoltaica tem sido destaque como fonte de energia alternativa. A dificuldade de reprodutibilidade de resultados em função de variáveis climáticas motivou o desenvolvimento de sistemas capazes de emular os painéis fotovoltaicos por meios eletrônicos. Desta forma, estes sistemas são emulados da maneira mais autêntica possível. Este trabalho apresenta um estudo dirigido a análise e projeto de um emulador de painéis fotovoltaicos utilizando um conversor *buck* síncrono. O trabalho aborda conceitos relacionados aos sistemas fotovoltaicos como a estrutura e funcionamento de uma célula fotovoltaica, a influência de fatores climáticos na geração de energia, discorre sobre as condições padronizadas de teste e aborda as curvas características dos módulos. Em seguida, uma revisão sobre emuladores fotovoltaicos é apresentada, seguida pela modelagem matemática dos módulos fotovoltaicos. Posteriormente, apresenta-se a análise e dimensionamento do conversor e, logo após, aborda-se o controle do emulador fotovoltaico. Por fim, são apresentados os resultados e as considerações finais.

**Palavras-chave:** Eletrônica de potência, Emulador fotovoltaico, Conversor *buck* síncrono.



## ABSTRACT

Faced with a shortage of fossil fuels and low water availability for electricity generation, alternative sources of renewable energy have become indispensable. With regard to renewable energy and distributed generation, in the current context, photovoltaic energy has been highlighted as an alternative energy source. The difficulty of reproducibility of results due to climatic variables motivated the development of systems capable of emulating photovoltaic panels by electronic means. In this way, these systems are emulated in the most authentic way possible. This work presents a study aimed at the analysis and design of a photovoltaic panel emulator using a synchronous buck converter. The work addresses concepts related to photovoltaic systems such as the structure and functioning of a photovoltaic cell, the influence of climatic factors on energy generation, discusses the standardized test conditions and addresses the characteristic curves of the modules. Then, a review of photovoltaic emulators is presented, followed by mathematical modeling of the photovoltaic modules. Subsequently, the analysis and dimensioning of the converter is presented and, soon after, the control of the photovoltaic emulator is addressed. Finally, the results and final considerations are presented.

**Keywords:** Power electronics, Photovoltaic emulator, Synchronous *buck* converter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Semicondutores com excesso de lacunas e elétrons. ....	20
Figura 2 - Recombinação de cargas na criação da junção pn (a) e surgimento da região de depleção (b). ....	21
Figura 3 – Componentes da radiação solar.....	23
Figura 4 – Determinação do Índice de Massa de Ar em função do ângulo zenital entre a Terra e o raio solar incidente.....	24
Figura 5 – Célula fotovoltaica.....	25
Figura 6 - Módulos Fotovoltaicos. ....	26
Figura 7 – Arranjo fotovoltaico em Alegrete-RS. ....	27
Figura 8 – Curva típica corrente x tensão (curva I-V) do módulo KD210GX-LP gerada no MATLAB.....	28
Figura 9 – Curva típica potência x tensão (curva P-V) do módulo KD210GX-LP gerada no MATLAB.....	29
Figura 10 - Estrutura de emulador fotovoltaico com cargas resistivas. ....	31
Figura 11 - Curva característica não-linear $I_xV$ de um painel solar e o modelo linear equivalente no ponto de máxima potência. ....	31
Figura 12 - Topologia de emulador fotovoltaico baseado em conversor <i>buck</i> , com indutância na saída. ....	32
Figura 13 - Topologia de emuladores fotovoltaicos com retificador não-controlado na entrada.....	33
Figura 14 – Emulador Fotovoltaico Baseado em Estágio de retificação PWM e conversor bidirecional. ....	34
Figura 15 – Conversor <i>buck</i> síncrono. ....	34
Figura 16 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica. ....	36
Figura 17 – Fluxograma ilustrando o algoritmo de ajuste da curva I-V. ....	43
Figura 18 – Primeira etapa de operação do conversor buck síncrono. ....	45
Figura 19 - Segunda etapa de operação do conversor <i>buck</i> síncrono.....	46
Figura 20 – Modelo comutado do conversor Buck síncrono.....	48
Figura 21 - Formas de onda da tensão em Q2 e corrente em Q1 do conversor <i>Buck</i> síncrono.....	49
Figura 22 – Modelo médio de grandes sinais do conversor <i>Buck</i> síncrono. ....	49
Figura 23 – Modelo médio de pequenos sinais do conversor <i>Buck</i> síncrono.....	51

Figura 24 – Circuito proposto para controle da corrente no conversor <i>buck</i> síncrono. .....	52
Figura 25 – Diagrama de blocos para controle da corrente de saída <i>i<sub>out</sub></i> .....	53
Figura 26 – Diagrama de Bode do Sistema em Malha Aberta Compensado em Comparação com o Sistema em Malha Aberta Não Compensado. ....	56
Figura 27- Comparação entre a corrente de saída do sistema em malha aberta e a corrente de saída do modelo de pequenos sinais utilizando-se a carga nominal de 3,36 $\Omega$ . ....	58
Figura 28 - Tensão de saída em malha aberta do conversor <i>buck</i> síncrono.....	59
Figura 29 - Corrente de saída e corrente no indutor em malha aberta do conversor <i>buck</i> síncrono. ....	59
Figura 30 – Corrente de saída do emulador fotovoltaico utilizando uma corrente de referência constante de 3 A.....	60
Figura 31 – Corrente de saída do emulador fotovoltaico utilizando uma corrente de referência constante de 10 A.....	61
Figura 32 - Tensão no capacitor e tensão de carga do emulador em malha fechada. .....	61
Figura 33 – Corrente no indutor e corrente de saída do emulador em malha fechada. .....	62
Figura 34 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de curto- circuito.....	62
Figura 35 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de circuito aberto.....	63
Figura 36 – Variações na carga de 50% para 100%. ....	64
Figura 37 – Curvas I-V Teórica e Simulada para o nível de irradiação igual a 1000 W/m <sup>2</sup> .....	64
Figura 38 – Corrente e tensão de saída do emulador para o nível de irradiação de 800 W/m <sup>2</sup> .....	65
Figura 39 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para condição de curto-circuito.....	66
Figura 40 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de circuito aberto.....	66
Figura 41 - Variações na carga de 50% para 100%. ....	67

Figura 42 – Curvas I-V Teórica e Simulada para o nível de irradiação igual a 800  
W/m<sup>2</sup>.....68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação das grandezas presentes na Figura 16. ....	37
Tabela 2 - Parâmetros da equação (4.11) que não haviam sido descritos. ....	39
Tabela 3 – Especificações elétricas do módulo KD210GX-LP no STC.....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 <i>História da Geração Fotovoltaica</i> .....	16
1.2 <i>Motivação e justificativa</i> .....	17
1.3 <i>Objetivos</i> .....	19
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	19
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	19
1.4 <i>Organização do trabalho</i> .....	19
<b>2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>20</b>
2.1 <i>Introdução</i> .....	20
2.2 <i>Estrutura e Funcionamento da Célula Fotovoltaica</i> .....	20
2.3 <i>Fatores Climáticos</i> .....	22
2.4 <i>Condições Padronizadas de Teste</i> .....	24
2.5 <i>Diferença entre Célula, Módulo e Arranjo Fotovoltaico</i> .....	24
2.5.1 <i>Célula Fotovoltaica</i> .....	25
2.5.2 <i>Módulo Fotovoltaico</i> .....	25
2.5.2.1 <i>Silício Monocristalino</i> .....	26
2.5.2.2 <i>Silício Policristalino</i> .....	27
2.5.3 <i>Arranjo Fotovoltaico</i> .....	27
2.6 <i>Curvas Características dos Módulos Fotovoltaicos</i> .....	28
<b>3. REVISÃO SOBRE EMULADORES FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>30</b>
3.1 <i>Introdução</i> .....	30
3.2 <i>Emulador Fotovoltaico Fundamentado no Circuito de Thévenin</i> .....	30
3.3 <i>Emuladores Fotovoltaicos Baseados em Conversor Buck com Tensão de Entrada Constante</i> .....	32
3.4 <i>Emuladores Fotovoltaicos Baseados em Conversor CC/CC com Estágio de Retificação</i> .....	33
3.5 <i>Emulador Fotovoltaico Baseado na Topologia Buck Síncrono com Tensão de Entrada Constante</i> .....	34
<b>4. MODELAGEM MATEMÁTICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>36</b>
4.1 <i>Introdução</i> .....	36

4.2 Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica .....	36
4.3 Análise do Circuito .....	37
4.4 Validação do modelo.....	41
4.5 Método iterativo proposto por (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009) .....	41
<b>5. MODELAGEM E CONTROLE DO EMULADOR FOTOVOLTAICO.....</b>	<b>44</b>
5.1 Introdução .....	44
5.2 Dimensionamento .....	44
5.3 Etapas de operação do conversor .....	44
5.4 Determinação da Função de Transferência .....	48
5.5 Estratégia de Controle.....	52
5.6 Obtenção da função de transferência .....	53
5.7 Projeto do Compensador .....	54
<b>6. RESULTADOS E SIMULAÇÕES .....</b>	<b>58</b>
6.1 Introdução .....	58
6.2 Validação do modelo.....	58
6.3 Simulações em malha aberta.....	59
6.4 Validação da estratégia de controle em malha fechada exibindo o regime transitório .....	60
6.5 Simulações em malha fechada exibindo o regime permanente .....	61
6.6 Resultados para irradiação de 800 W/m <sup>2</sup> .....	65
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE A – CÓDIGO EM MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA DETERMINAR A CORRENTE DE SAÍDA DO MÓDULO KD210GX-LP DA KYOCERA.....</b>	<b>74</b>
INFORMAÇÕES DA FOLHA DE DADOS DO PAINEL SOLAR KD210GX-LP .....	74
CÁLCULOS DO MODELO.....	74
SAÍDAS.....	78

## 1. INTRODUÇÃO

A solidificação da tecnologia fotovoltaica como alternativa na área de produção de energia elétrica vem acontecendo aos poucos durante aproximadamente duzentos anos de história, estando vinculada ao advento de materiais mais eficazes direcionados à foto-conversão, diminuição dos custos e aumento de produtividade.

Neste capítulo serão abordados tópicos relacionados à tecnologia fotovoltaica e sobre o presente trabalho. Em um primeiro momento será desenvolvida uma breve revisão histórica a partir do surgimento da primeira célula até os dias atuais, seguida da motivação do trabalho, pelos objetivos do mesmo e, finalmente, pela organização deste trabalho.

### 1.1 História da Geração Fotovoltaica

A primeira análise de eletrificação de objetos por atrito possivelmente tenha sido na Grécia antiga, onde em meados de 600 a.c. filósofos como Tales de Mileto já haviam percebido que ao se atritar uma peça de âmbar com um pedaço de lã ou pele, conferia-se ao âmbar a característica de atrair pedaços de palha (OKA, 2000).

As observações da eletricidade foram então se tornando cada vez mais específicas a partir dessa época, sendo que no século XIX diversas contribuições nesse âmbito foram realizadas, como o projeto e construção das primeiras usinas geradoras que forneciam eletricidade em corrente contínua por Thomas Edison, desenvolvimento de equações fundamentais do eletromagnetismo por James Maxwell, primeiro sistema de energia elétrica em corrente alternada por George Westinghouse e geração de energia elétrica trifásica por Nikola Tesla (WALTER, 2009).

O efeito fotovoltaico foi constatado pela primeira vez no ano de 1839 por Edmond Becquerel, o qual percebeu que placas metálicas de platina ou de prata quando mergulhadas num eletrólito geravam uma diferença de potencial quando entravam em contato com a luz. Entretanto, foi apenas em 1953 que a primeira célula de silício foi desenvolvida por Calvin Fuller, em Nova Jersey, nos Estados Unidos. Desde então, começou o aperfeiçoamento das ditas placas fotovoltaicas, as quais transformam energia solar em energia elétrica. O silício se tornou a substância principal na área fotovoltaica, sendo esse retirado da sílica  $\text{SiO}_2$ , conhecida



usualmente como areia e encontrada em grande quantidade na superfície terrestre. Diante disso houve o estabelecimento no mercado dos denominados módulos fotovoltaicos, conhecidos também por módulos PV (do inglês *photovoltaic*), o qual é um agrupamento de células solares conectadas em uma estrutura única para geração de energia elétrica (POMILIO, 2014).

Diante das necessárias aplicações espaciais, devido a Guerra Fria, da crise do petróleo de 1970 e das solicitações para se utilizar energias renováveis, a energia fotovoltaica emergiu mundialmente, tornando-se também uma fonte de energia revolucionária para residências e indústrias (VALLÊRA; BRITO, 2004).

No século XX, ao mesmo tempo em que a tecnologia fotovoltaica evoluiu, tiveram início os estudos no campo da eletrônica de potência, sendo esta encarregada pelo processamento de energia elétrica. Seu uso passa por inversores para acionamento de máquinas elétricas, carregadores de baterias, fontes de alimentação, iluminação e conexão de painéis fotovoltaicos com a rede elétrica. O avanço na eletrônica de potência foi fundamental para o progresso da tecnologia fotovoltaica (POMILIO, 2014).

## **1.2 Motivação e justificativa**

No momento atual, os estudos em eletrônica de potência com aplicação para geração fotovoltaica têm aumentado consideravelmente no Brasil e no mundo, vinculados principalmente pela expansão da geração distribuída. No ano de 2012 com a publicação da Resolução Normativa Nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) as unidades consumidoras passaram a ser compensadas com créditos de energia com validade de 5 anos diante do fornecimento da geração excedente de energia para a rede elétrica. Desta forma os sistemas fotovoltaicos têm crescido exponencialmente, desenvolvendo as pesquisas nessa área (ANEEL, 2012).

Em abril de 2015, o convênio ICMS 16 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ) criou a chance dos estados eximirem a tributação do ICMS da eletricidade oriunda de estruturas fotovoltaicas e introduzida na rede de distribuição. Tal providência possibilitou minimizar o preço da fatura de energia nas residências que apresentavam painéis fotovoltaicos (COLAFERRO, 2018).

Evidentemente, o crescimento de sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica também acompanha preocupações no que diz respeito a instabilidades e

ressonâncias no sistema elétrico. Desse modo, é fundamental a realização de uma pesquisa rigorosa dos sistemas fotovoltaicos, na busca de um dimensionamento eficaz. Apesar dos custos dos sistemas fotovoltaicos terem diminuído consideravelmente nos últimos anos os mesmos ainda são elevados e o seu desempenho relacionado diretamente às condições climáticas, dessa forma o uso em laboratórios pode se tornar impraticável (DOLAN et al., 2010).

Diante disso, com o objetivo de simular sistemas fotovoltaicos, originaram-se os denominados “Emuladores Fotovoltaicos”, que é o foco principal desse trabalho. De acordo com Dolan, Durago, Crowfoot e Taufik (2010) e Shah e Rana (2015), define-se um emulador fotovoltaico como um conversor CC/CC que contém características elétricas de corrente e tensão (curva corrente versus tensão, conhecida como curva I-V) semelhantes à de um módulo fotovoltaico.

Alguns dos benefícios da utilização de emuladores fotovoltaicos são enunciados a seguir:

- O uso de módulos reais necessita de bastante espaço físico, além do custo ser alto;
- Podem-se realizar ensaios em horários variados sem a necessidade de verificação das condições climáticas;
- É complicado reproduzir e preservar características semelhantes e repetitivas com um módulo real, fator que não ocorre com o emprego de emuladores fotovoltaicos;
- Pode-se reproduzir cenários diversos e características repetidamente sem adição de custos, bastando variar o algoritmo do emulador;
- Podem ser dispostos como fontes de tensão ou corrente.

Na bibliografia encontram-se trabalhos que discorrem sobre vários tipos de emuladores fotovoltaicos. A diferença principal está na topologia do conversor, no método de controle utilizado para emular o módulo fotovoltaico e a quantidade de potência a ser utilizada.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o projeto de um sistema apropriado para emular a curva característica de um módulo fotovoltaico comercial, utilizando um conversor *buck* síncrono.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudo da caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos;
- Revisão sobre emuladores fotovoltaicos;
- Verificação dos circuitos da topologia referida;
- Elaboração do projeto de controle para o sistema;
- Realização das simulações do emulador;
- Abordagem perante os resultados obtidos.

## 1.4 Organização do trabalho

Este documento está organizado em 8 capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma visão geral sobre a evolução da geração fotovoltaica seguido da motivação do trabalho e dos objetivos do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta um estudo dirigido aos módulos fotovoltaicos, evidenciando suas principais características.

No Capítulo 3 são apresentadas topologias referentes a sistemas de emulação fotovoltaica presentes na literatura. Além disso, é evidenciada a topologia projetada neste trabalho.

No Capítulo 4 é apresentada a modelagem dos módulos fotovoltaicos, com o propósito de se solucionar numericamente as equações não-lineares que descrevem seu comportamento elétrico.

O Capítulo 5 apresenta a análise e dimensionamento do conversor *buck* síncrono, conversor definido para ser utilizado como simulador fotovoltaico neste trabalho e aborda o projeto de controle do emulador fotovoltaico.

No Capítulo 6 são expostos os resultados e simulações do trabalho.

O Capítulo 7, por fim, apresenta algumas considerações finais sobre o trabalho.

## 2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

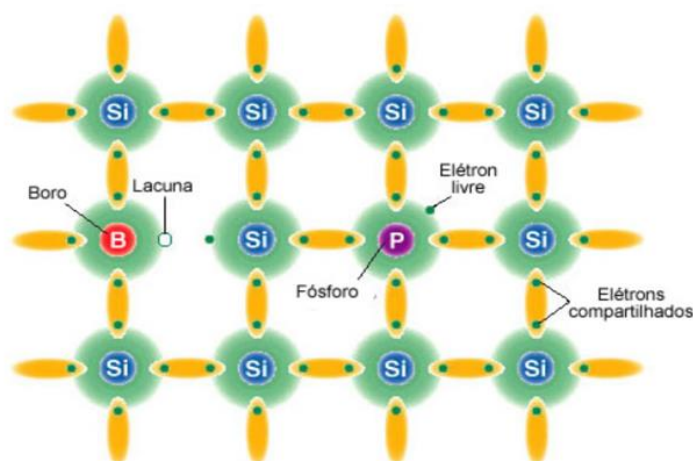
### 2.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a análise do fenômeno físico que permite a foto-geração: o efeito fotovoltaico e a definição de suas principais propriedades. Serão abordadas as características dos módulos fotovoltaicos e a importância da temperatura, radiação e sombreamento com relação a potência gerada.

### 2.2 Estrutura e Funcionamento da Célula Fotovoltaica

Como já mencionado no Capítulo 1, os geradores fotovoltaicos, em sua maioria, são formados por Silício cristalino. Um cristal de Silício na sua forma pura é denominado intrínseco. Neste tipo de semicondutor, a estrutura atômica é regular e formada por ligações covalentes advindas da associação dos quatro elétrons da camada de valência de cada um dos átomos. No momento em que se adicionam impurezas de forma moderada ao semicondutor, o mesmo muda do estado intrínseco para o estado extrínseco ou dopado. Através do processo de dopagem com elementos trivalentes (geralmente boro) e pentavalentes (geralmente fósforo), podem-se obter substratos de silício com excesso de lacunas ou elétrons, conforme apresenta a Figura 1 (CAMACHO; RODRIGUES; MATOS, 2015).

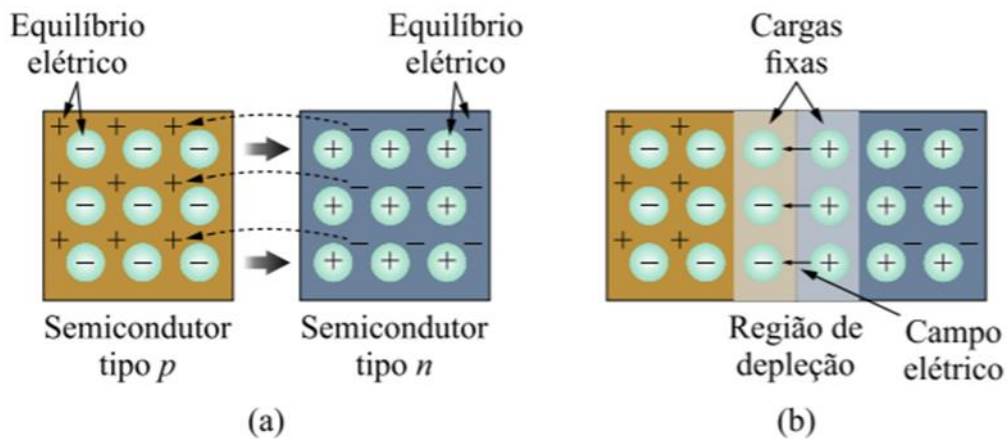
Figura 1 - Semicondutores com excesso de lacunas e elétrons.



Fonte: Adaptado de (DEMPSTER; HENDERSON, 2017).

O semiconductor que apresenta excesso de lacunas é denominado de tipo p (pelo fato de ser positivo no que se refere ao silício intrínseco); e o semiconductor com excesso de elétrons, de tipo n (por ser negativo). Os portadores de carga oriundos do processo de dopagem do cristal intrínseco são chamados majoritários. Verifica-se que ambas as estruturas (tipo p e tipo n) permanecem eletricamente neutras, uma vez que possuem o mesmo número de prótons e elétrons, representados pelo mesmo número de sinais positivos e negativos na Figura 2 (a) (COELHO, 2008; KNABBEN, 2017).

Figura 2 - Recombinação de cargas na criação da junção pn (a) e surgimento da região de depleção (b).



Fonte: (KNABBEN, 2017).

Diante da junção dos substratos p e n, gera-se uma ligação pn distanciada por uma camada de depleção que surge devido à recombinação de alguns elétrons do lado n que passam para o lado p e algumas lacunas do lado p que passam para o lado n. Dessa forma, nas proximidades da junção pn, surge um acúmulo de cargas positivas do lado n e negativas do lado p, que originam um campo elétrico e, conseqüentemente, a uma diferença de potencial ( $V_{pn}$ ), como evidencia a Figura 2 (a) e (b) (COELHO, 2008).

É necessário evidenciar que a diferença de potencial atua como uma barreira à movimentação dos portadores de carga para o lado p e lacunas para o lado n e, quanto maior a difusão dos elétrons, maior será a diferença de potencial (COELHO, 2008; SOUZA, 2017).

O contato de fótons com os elétrons da ligação pn é capaz de desprendê-los da estrutura cristalina e formar pares elétron-lacuna na camada de depleção. O campo

elétrico presente na camada de depleção passa a atrair os elétrons livres para o lado n e as lacunas para o lado p, gerando corrente elétrica (KNABBEN, 2017).

O deslocamento de elétrons e lacunas, chamado de fotocorrente, é correspondente à intensidade da luz que incide na placa. Na busca de se obter alimentação para uma carga, colocam-se contatos elétricos em ambos os substratos da junção pn (KNABBEN, 2017).

## **2.3 Fatores Climáticos**

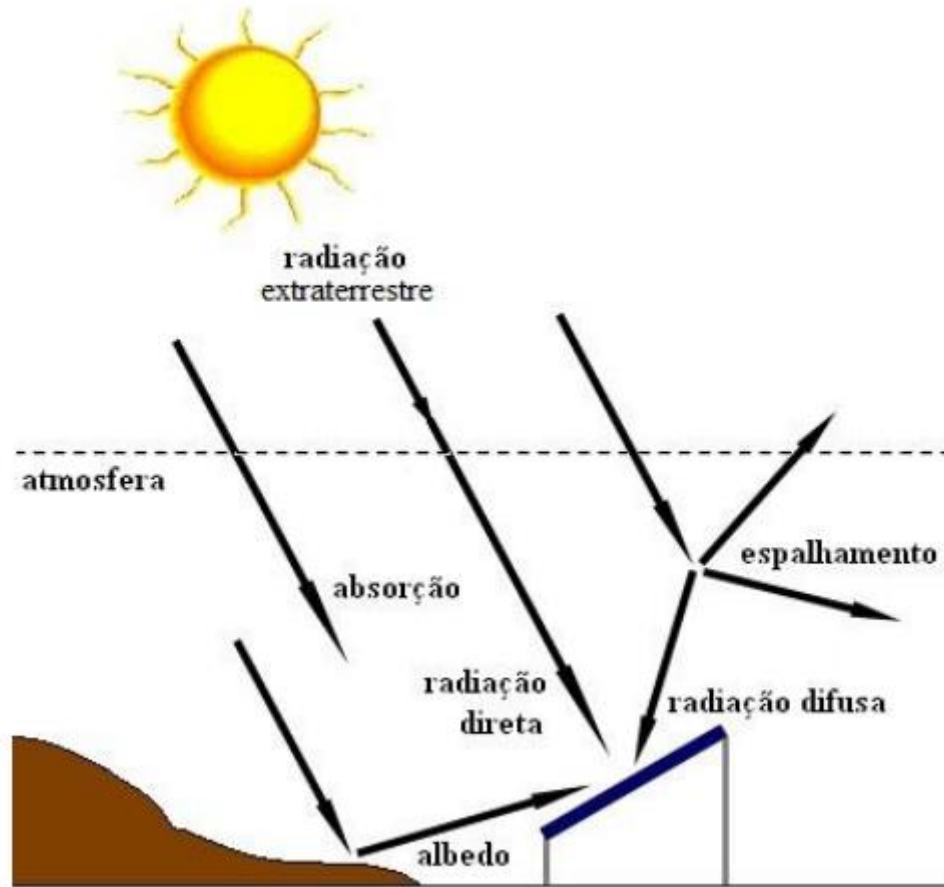
### **2.3.1 Radiação Solar**

A energia proveniente do Sol alcança a superfície da Terra por meio de ondas eletromagnéticas as quais se difundem no vácuo na velocidade da luz, produzindo a radiação solar. De acordo com a OMM (Organização Mundial de Meteorologia) a porção externa da atmosfera terrestre está sujeita a uma irradiação de aproximadamente  $1366 \text{ W/m}^2$ . Entretanto, como ocorrem efeitos de reflexão e absorção na camada atmosférica, fica-se retido apenas  $1000 \text{ W/m}^2$  no momento em que se mede na linha do Equador ao meio dia. Obviamente, a radiação solar não se distribui uniformemente na superfície terrestre, alterando-se conforme a latitude, nebulosidade e demais ocorrências meteorológicas. A Figura 3 dispõe dos elementos básicos da radiação solar, na configuração difusa, direta e refletida pela camada atmosférica (COELHO, 2008).

Conforme a Figura 3, a radiação máxima em uma estrutura localizada na superfície da Terra é gerada pela soma das parcelas direta e difusa, pelo fato de que a refletida não penetra a atmosfera. A radiação direta pode ser designada como a energia proveniente do Sol, na qual não ocorrem mudanças de direção, com exceção da causada pela refração atmosférica. De outra forma, a radiação difusa é a qual um objeto adquire, por causa da direção dos raios solares ser alterada por meio de reflexão ou espalhamento na atmosfera (PINHO; GALDINO, 2014).

A radiação solar é uma propriedade indispensável nesta atividade, uma vez que a fotocorrente originada por uma célula fotovoltaica está associada diretamente a ela.

Figura 3 – Componentes da radiação solar.



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).

### 2.3.2 Temperatura

A temperatura é um parâmetro da intensidade de agitação das moléculas. Em razão da constituição dos pares elétron-lacuna no Silício extrínseco ser altamente relacionado a este parâmetro, é fundamental supramencioná-la (KNABBEN, 2017).

### 2.3.3 Massa de ar

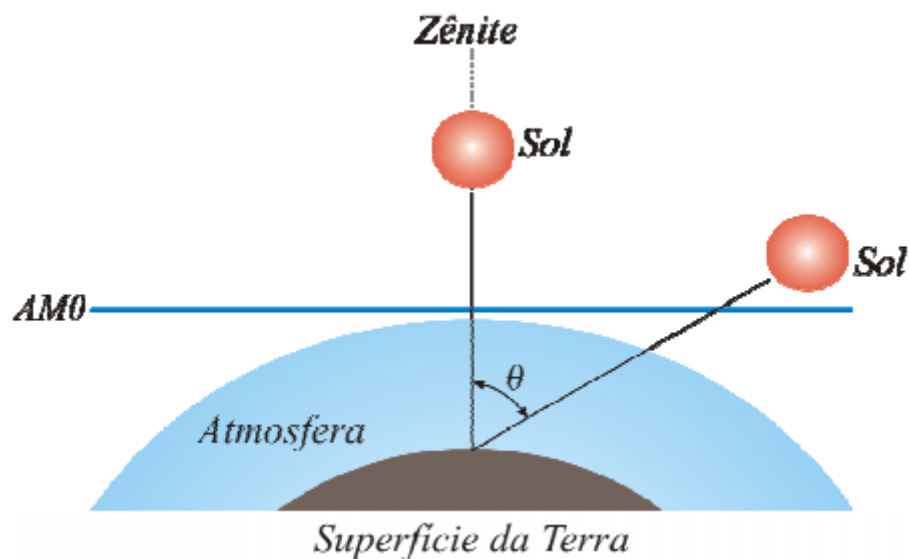
A espessura da camada de ar do percurso que a radiação eletromagnética atravessa até alcançar a superfície da Terra se modifica diante da inclinação do sol.

Sendo assim, foi desenvolvido o índice de Massa de Ar (Air Mass), em que se normaliza o menor caminho possível do percurso atravessado pela luz solar na atmosfera, estando correlacionado à formação espectral dos raios provenientes do Sol que alcançam a Terra. Pode-se obter um valor aproximado do índice de AM,

conforme a equação (2.1). A Figura 4 elucida o esclarecimento geométrico (COELHO, 2008).

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.1)$$

Figura 4 – Determinação do Índice de Massa de Ar em função do ângulo zenital entre a Terra e o raio solar incidente.



Fonte: (COELHO, 2008).

## 2.4 Condições Padronizadas de Teste

As condições padrões de teste (ou STC – Standart Test Conditions) representam as medidas padronizadas de irradiância, temperatura e massa de ar que serão utilizadas pelos fabricantes de células e módulos fotovoltaicos, para que os ensaios de caracterização sejam uniformes. No STC, tem-se:  $S=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$   $AM=1,5$  (PINHO; GALDINO, 2014).

## 2.5 Diferença entre Célula, Módulo e Arranjo Fotovoltaico

As células, módulos e arranjos fotovoltaicos são semelhantes quando se trata de desempenho, entretanto, distinguem-se quando são analisados níveis de tensão, corrente e potência. No que se refere a construção, as células fotovoltaicas são itens

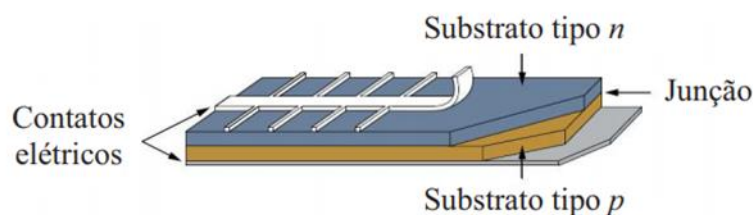


fundamentais na construção de módulos e os módulos são indispensáveis na composição dos arranjos fotovoltaicos.

### 2.5.1 Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas caracterizam-se como semicondutores com aptidão para realizar a conversão da energia solar incidente em energia elétrica. Tipicamente uma célula fotovoltaica apresenta dimensões entre 100 cm<sup>2</sup> e 200 cm<sup>2</sup>, em que se é possível produzir por volta de 0,6V de tensão para potências entre 1W e 3W. No que se refere a forma construtiva, a célula fotovoltaica divide-se em diversas camadas, com funções próprias, como mostra a Figura 5 (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 5 – Célula fotovoltaica.



Fonte: (KNABBEN, 2017).

Na figura 5, pode-se observar que os substratos tipo n e p simbolizam o Silício dopado, encontrando-se os dois unidos a um contato metálico para ligação das cargas e fluxo da corrente elétrica. A base traseira da célula é protegida por uma estrutura rígida, normalmente feita de fibra e, a parte frontal tem um adesivo antirreflexivo, um adesivo transparente e uma cobertura de vidro.

### 2.5.2 Módulo Fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são formados por ligações série e/ou paralelas de células fotovoltaicas, na busca de se elevar a potência de saída. Pelo fato de os módulos serem vendidos de forma fechada, após as ligações serem feitas pelos fabricantes não há chance de mudanças por parte do usuário. Quanto aos tamanhos, há um vínculo entre a dimensão do módulo e a potência de pico que pode ser

fornecida, sem exceder  $160 \text{ W/m}^2$  para os módulos policristalinos comerciais de Silício (COELHO, 2008).

A Figura 6 mostra os dois principais tipos de módulos fotovoltaicos comercializados. Na parte esquerda da figura o módulo é policristalino e na parte direita monocristalino.

Figura 6 - Módulos Fotovoltaicos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.5.2.1 Silício Monocristalino

Historicamente, as células de silício monocristalino são as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em elétrica. As células são formadas em fatias de um único grande cristal, que podem ser criadas por diversos processos (BRAGA, 2008).

As células monocristalinas apresentam as maiores eficiências dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base. A eficiência de até 15% é encontrada nestas fotocélulas comerciais, podendo atingir até 18% em células desenvolvidas em laboratórios (BRAGA, 2008).

A grande dificuldade para a redução de custos, está na quantidade de material utilizado e energia envolvida na sua fabricação, inclusive nas grandes escalas de produção (FADIGAS, 2011).

### 2.5.2.2 Silício Policristalino

As células de silício policristalino são mais acessíveis economicamente do que as células de silício monocristalino, pelo fato do seu modo de fabricação ser menos complexo e por alcançarem uma eficiência próxima a das monocristalinas, sendo mais atrativas economicamente. Contudo, a eficiência diminui em comparação as células de silício monocristalino (BRAGA, 2008).

As células são fabricadas a partir do mesmo material das monocristalinas, porém, ele é solidificado em forma de um bloco composto por um número elevado de pequenos cristais, o que provoca descontinuidade na estrutura molecular. Retiram-se fatias deste bloco e fabricam as células. Na prática, apresentam uma eficiência de aproximadamente 12,5% (FADIGAS, 2011).

### 2.5.3 Arranjo Fotovoltaico

Buscando-se atingir elevações consideráveis de geração, pode-se associar os módulos fotovoltaicos em série e/ou paralelo, formando os denominados arranjos fotovoltaicos que são capazes de produzir desde alguns kW até potências mais elevadas, da ordem de MW. A forma de conexão entre os módulos determinará o nível de tensão, corrente e potência de saída do arranjo, a partir da correlação entre a potência gerada e a área que a radiação solar atinge. A Figura 7 mostra um arranjo fotovoltaico situado na cidade de Alegrete-RS (COELHO, 2008).

Figura 7 – Arranjo fotovoltaico em Alegrete-RS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

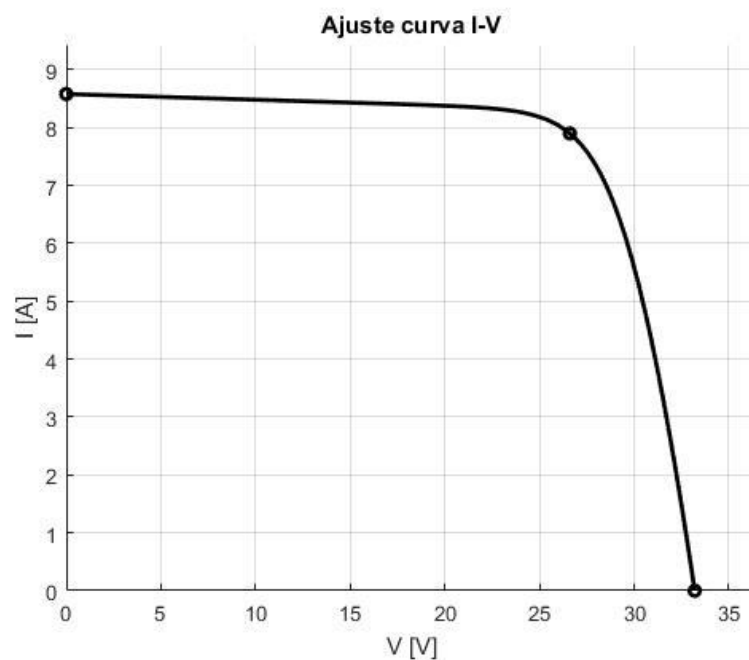
## 2.6 Curvas Características dos Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos não atuam como fontes elétricas convencionais, pelo fato de não apresentarem tensão de saída constante em seus terminais.

O ponto de operação depende da potência drenada na saída do módulo FV, seja alimentando uma carga elétrica isolada ou conectado à rede através de um conversor CC-CA. Quando se conecta uma carga que solicita grande quantidade de corrente, a tensão do módulo reduzirá. Caso se conectar uma carga que solicite pouca corrente, a tensão tenderá a aumentar, aproximando-se da tensão de circuito aberto (máxima tensão do módulo).

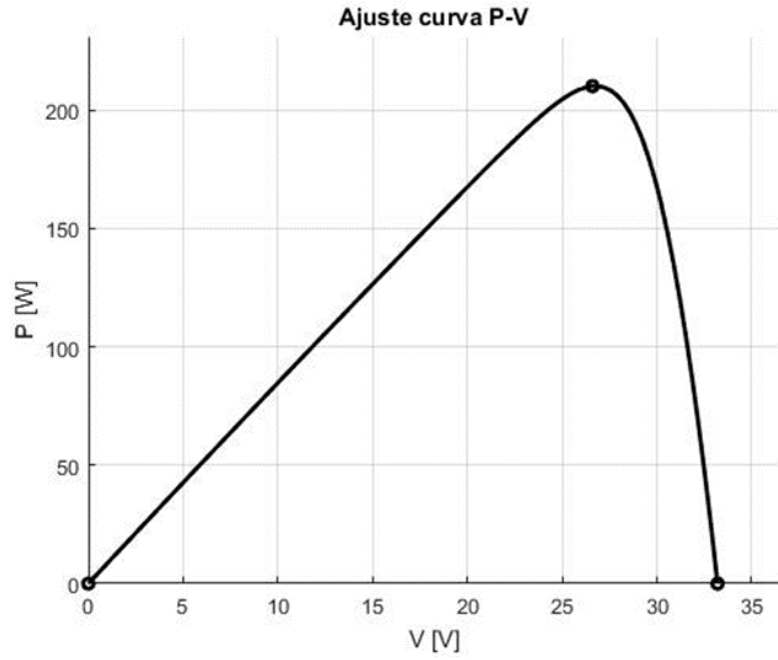
A Figura 8 exibe a relação entre a corrente e a tensão (curva I-V) de saída do módulo KD210GX-LP da *Kyocera*, que será alvo do estudo deste trabalho, e a Figura 9 mostra a relação entre a potência diante da variação de tensão (curva P-V) do mesmo módulo. A Figura 9 evidencia o ponto de máxima potência do módulo e foram obtidas no MATLAB a partir do algoritmo presente no APÊNDICE A.

Figura 8 – Curva típica corrente x tensão (curva I-V) do módulo KD210GX-LP gerada no MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Curva típica potência x tensão (curva P-V) do módulo KD210GX-LP gerada no MATLAB.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### **3. REVISÃO SOBRE EMULADORES FOTOVOLTAICOS**

#### **3.1 Introdução**

Existe uma grande variedade de estudos na literatura que abordam as mais diversas topologias e estruturas de controle referentes à emuladores fotovoltaicos. Neste capítulo são abordadas as principais topologias presentes na literatura, bem como a topologia proposta neste trabalho.

#### **3.2 Emulador Fotovoltaico Fundamentado no Circuito de Thévenin**

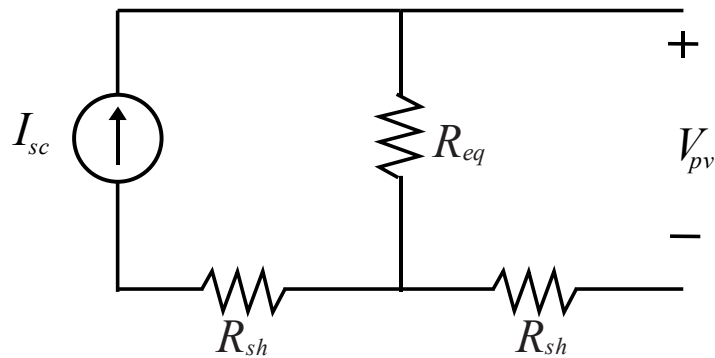
A topologia baseada no circuito de Thévenin se caracteriza por ser a mais simplória. Esta topologia está vinculada na associação série de resistências com uma fonte de tensão ajustável em corrente contínua (VILLALVA; DE SIQUEIRA; RUPPERT, 2010).

Lopes e Lienhardt (2003) lançaram a aplicação de uma fonte não linear fundamentada no chaveamento de dois resistores. Protótipos capazes de emular módulos de até 70 W foram propostos, no entanto, devido à baixa eficiência do emulador e oscilação das curvas obtidas em função da temperatura dos resistores a topologia se mostrou limitada.

Villalva, Siqueira e Ruppert (2010) apresentaram um modelo linear de arranjo fotovoltaico, onde a estrutura se baseia na associação série de resistências com uma fonte de tensão ajustável em corrente contínua.

O circuito equivalente da Figura 10 é apropriado no ponto de linearização ( $V$ ,  $I$ ) e é uma boa estimativa de um arranjo fotovoltaico. Na figura 10, estão representados  $R_{eq}$  que se trata de um resistor equivalente variável em paralelo com uma fonte de corrente representada por  $I_{sc}$ , a qual é controlada a partir da tensão de saída  $V_{pv}$ , que é detectada a partir de um resistor paralelo  $R_{sh}$  (VILLALVA; DE SIQUEIRA; RUPPERT, 2010).

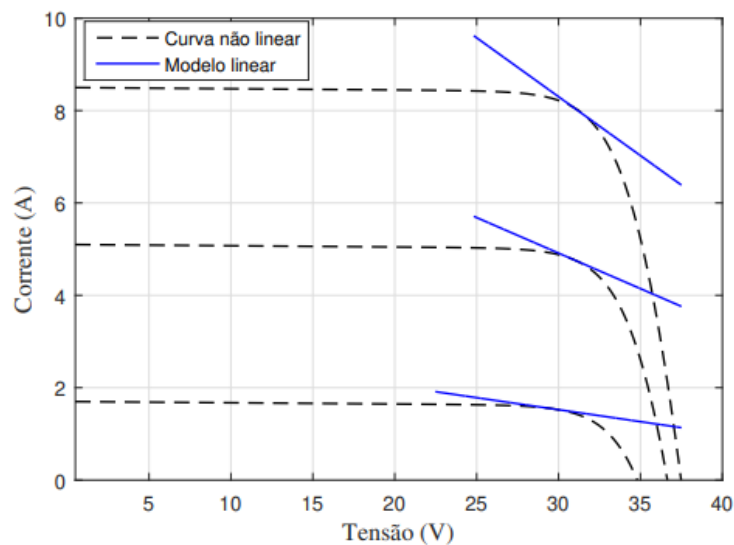
Figura 10 - Estrutura de emulador fotovoltaico com cargas resistivas.



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; DE SIQUEIRA; RUPPERT, 2010).

A característica das curvas  $I \times V$  dos módulos fotovoltaicos é não-linear. A Figura 11 apresenta a curva característica  $I \times V$  de um módulo fotovoltaico e seu modelo equivalente linear no ponto de máxima potência, ao qual possibilita a que o modelo derivado seja validado.

Figura 11 - Curva característica não-linear  $I \times V$  de um painel solar e o modelo linear equivalente no ponto de máxima potência.



Fonte: (FREITAS, 2018).

### 3.3 Emuladores Fotovoltaicos Baseados em Conversor *Buck* com Tensão de Entrada Constante

A topologia de emulador fotovoltaico que será abordada nessa sessão está representada na Figura 12.

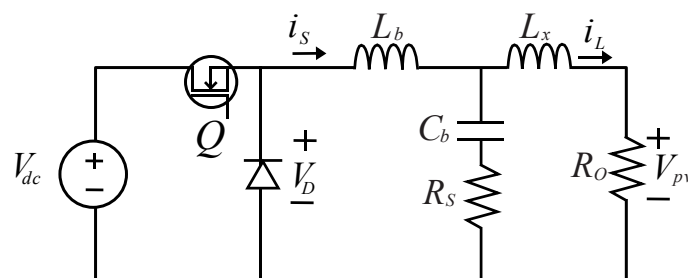
A tensão do barramento cc é assumida constante, e a topologia baseada em um conversor *buck*, sendo que para todo valor de tensão imposta nos terminais do emulador, a referência de corrente precisa ser recalculada buscando acompanhar o comportamento do painel fotovoltaico.

Gadelovits et al. (2014) apresentou um método de prototipagem rápida de um emulador fotovoltaico, formado por uma fonte de alimentação de saída constante e de baixo custo para o estágio de potência. Revelou a possibilidade de controlar a tensão de saída do dispositivo injetando tensão analógica variável no circuito de realimentação de fonte de tensão.

Algaddafi et al. (2015) propôs um emulador de matriz fotovoltaica baseado em um conversor CC/CC controlado por *feedback*, constituído de um conversor *buck* com uma malha de controle externa, para controlar a tensão de saída e outra malha interna responsável por controlar a corrente. A saída do gerador da curva  $I \times V$  do emulador é usada como uma tensão de referência desejada.

Rachid et al. (2016) propôs um trabalho baseado na comparação entre os resultados de um painel fotovoltaico real e o emulador de gerador fotovoltaico usando um conversor *buck* baseado em uma fonte de alimentação cc e um interruptor controlado por um processador dSPACE 1104.

Figura 12 - Topologia de emulador fotovoltaico baseado em conversor *buck*, com indutância na saída.



Fonte: Elaborado pelo autor.



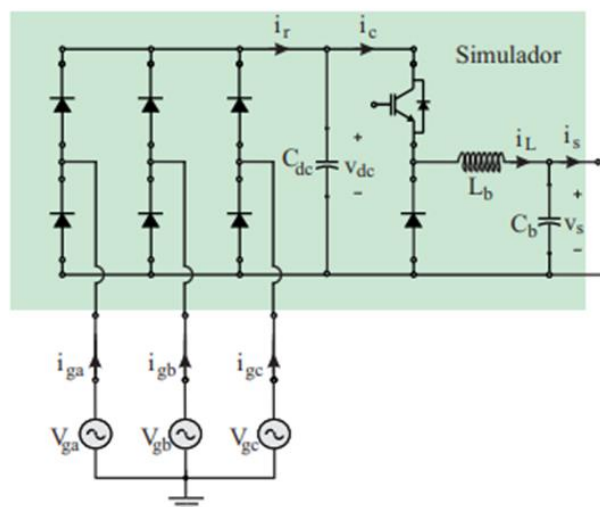
### 3.4 Emuladores Fotovoltaicos Baseados em Conversor CC/CC com Estágio de Retificação

A maior parte das propostas de emuladores disponíveis na literatura fundamentam-se em um estágio de retificação seguido de um conversor CC/CC controlado em corrente. Isto permite uma maior exatidão já que uma estratégia de controle em malha fechada é utilizada. Jike e Shengtie (2012) propuseram um emulador formado por um conversor CC/CC de topologia push-pull com estágio de retificação, no entanto, a dificuldade de projeto e controle é a maior desvantagem da proposta.

A Figura 13 ilustra um retificador a diodos em cascata com um conversor CC/CC buck. No entanto devido a limitações da topologia da Figura 13 como a utilização de retificadores a diodo o que ocasiona a geração de harmônicos devido a forma de onda de corrente distorcida e a utilização do conversor *buck* com uma única chave, que não é capaz de regular a tensão de saída se estiver sem carga, uma nova topologia foi proposta por Cupertino (2015), a qual está ilustrada na Figura 14.

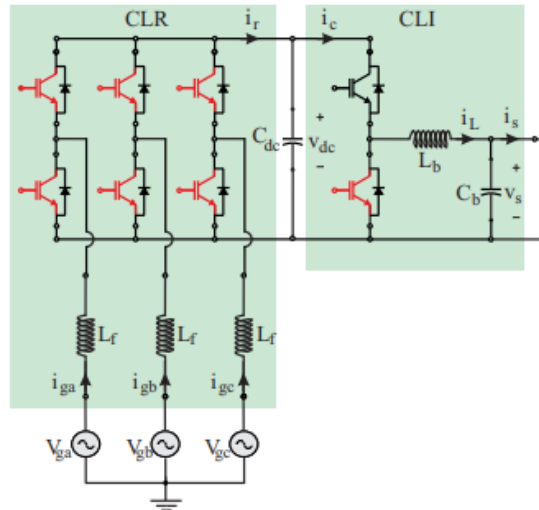
Esta topologia é formada por um retificador PWM trifásico, que tem por objetivo gerar um barramento cc controlado e um conversor bidirecional em corrente, o qual possibilita controlar a tensão de saída mesmo com o emulador estando a vazio.

Figura 13 - Topologia de emuladores fotovoltaicos com retificador não-controlado na entrada.



Fonte: Adaptado de (CUPERTINO, 2015).

Figura 14 – Emulador Fotovoltaico Baseado em Estágio de retificação PWM e conversor bidirecional.

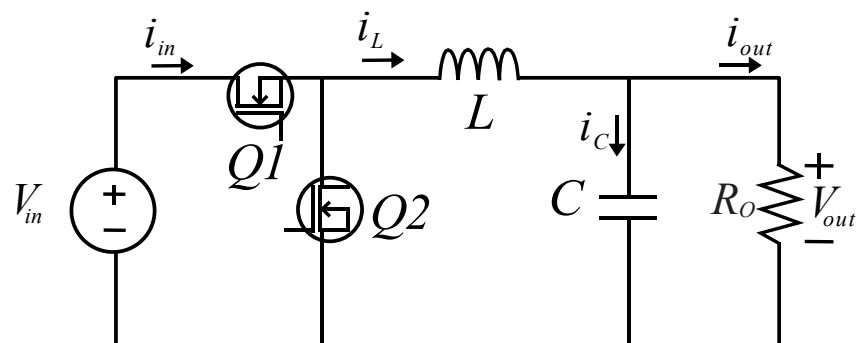


Fonte: Adaptado de (CUPERTINO, 2015).

### 3.5 Emulador Fotovoltaico Baseado na Topologia *Buck* Síncrono com Tensão de Entrada Constante

A topologia de conversor escolhida para este trabalho foi baseada na utilização de entrada de barramento cc constante seguida pelo conversor *buck* síncrono, o qual utiliza uma chave semicondutora a mais que o conversor *buck* e está representado na Figura 15.

Figura 15 – Conversor *buck* síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta topologia tem alta eficiência em uma ampla faixa de operação, uma característica fundamental dada a necessidade de atingir condições de curto-circuito e circuito aberto (ZHAO, 2012). A topologia permite que a tensão de saída funcione em uma gama mais ampla em comparação ao *buck* tradicional, sendo adequada para aplicações em que o ponto de operação varia em uma ampla gama de tensões e correntes.

O conversor *buck* tradicional não é capaz de controlar a tensão de saída se estiver operando a vazio. Como muitos inversores fotovoltaicos entram em operação quando a tensão de circuito aberto do sistema fotovoltaico ultrapassa um determinado valor, a regulação de tensão de circuito aberto do simulador é pertinente e isto acaba limitando a utilização do conversor *buck* tradicional (CUPERTINO, 2015).

## 4. MODELAGEM MATEMÁTICA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

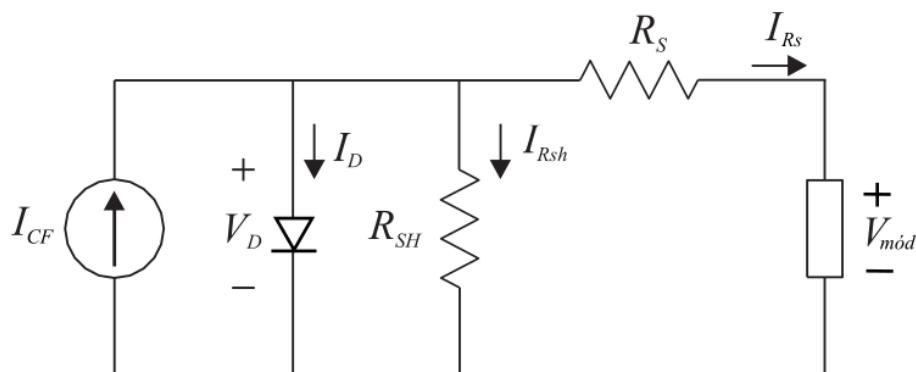
### 4.1 Introdução

Este capítulo será destinado a modelagem dos módulos fotovoltaicos, com o propósito de se determinar as equações não-lineares que ditam seu comportamento elétrico.

### 4.2 Modelo Elétrico de uma Célula Fotovoltaica

A saída de uma célula fotovoltaica é altamente não-linear e sua modelagem matemática simplificada como fonte de tensão constante ou fonte de tensão controlada por corrente geralmente não é viável (KISHOR et al., 2010). O circuito mais elementar que pode ser empregado para o estudo de células fotovoltaicas é caracterizado por uma fonte de corrente  $I_{CF}$ , conectada em paralelo com um diodo  $D$  e com um resistor paralelo  $R_{SH}$ , o qual leva em conta a corrente de fuga para o solo. Todos elementos são, então, conectados com um resistor série  $R_S$ , como evidenciado na Figura 16. O mesmo circuito pode ser utilizado para a representação elétrica de um módulo fotovoltaico e será o circuito utilizado neste trabalho (KNABBEN, 2017).

Figura 16 - Modelo elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 apresenta as especificações das grandezas presentes na Figura 16, bem como suas unidades.

Tabela 1 - Especificação das grandezas presentes na Figura 16.

<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidade</b>
Fotocorrente	$I_{CF}$	A
Corrente no diodo	$I_D$	A
Tensão no diodo	$V_D$	V
Resistência série	$R_S$	$\Omega$
Resistência paralela	$R_{SH}$	$\Omega$
Corrente no resistor paralelo	$I_{Rsh}$	A
Corrente de saída	$I_{Rs}$	A
Tensão de saída	$V_{mód}$	V

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Análise do Circuito

Após a definição do circuito elétrico que descreve o comportamento físico da célula e do módulo fotovoltaico, inicia-se o seu estudo, buscando determinar os parâmetros que o descrevem e, conseqüentemente, a curva característica I-V. Aplicando-se as leis de *Kirchhoff* ao circuito da Figura 16, obtêm-se as seguintes equações:

$$I_{Rs} = I_{CF} - I_D - I_{Rsh} \quad (4.1)$$

$$V_D = R_S I_{Rs} + V_{mód} \quad (4.2)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_D}{R_{SH}} \quad (4.3)$$

Substituindo-se (4.2) em (4.3) e o resultado encontrado em (4.1), chega-se a (4.4).

$$I_{RS} = I_{CF} - I_D - \frac{R_S I_{RS} + V_{mód}}{R_{SH}} \quad (4.4)$$

A corrente no diodo pode ser aproximada pela equação de *Schockley*, mostrada em (4.5). As constantes  $q$  e  $k$  correspondem, respectivamente, à carga do elétron e à constante de *Boltzmann*.  $T_K$  é a temperatura de junção do diodo, dada em Kelvin, e  $I_0$  é a corrente de saturação, equacionada segundo a equação (4.6).

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{AkT_K}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

$$I_0 = I_0^{ref} \left( \frac{T_K}{T_K^{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_K^{ref}} - \frac{1}{T_K} \right)} \quad (4.6)$$

Na equação (4.6),  $E_g$  é conhecida como energia de banda proibida, com a respectiva unidade dada em elétron-volts (eV). Já o  $I_0^{ref}$  representa a corrente de saturação de referência, alcançada a uma dada temperatura conhecida  $T_K^{ref}$ .

Substituindo-se (4.6) em (4.5), e o resultado em (4.4), obtém-se:

$$I_{RS} = I_{CF} - I_0^{ref} \left( \frac{T_K}{T_K^{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_K^{ref}} - \frac{1}{T_K} \right)} \left( e^{\frac{qV_D}{AkT_K}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{RS} + V_{mód}}{R_{SH}} \quad (4.7)$$

Como já foi citado, a fotocorrente  $I_{CF}$  depende da irradiância solar e da temperatura às quais o módulo está submetido. Tal efeito encontra-se nas curvas de *datasheet* do módulo KD210GX-LP da Kyocera, módulo referência para este trabalho.

Em (4.8),  $I_{CF}^{ref}$  representa a fotocorrente obtida para valores de irradiância  $S_{ref}$  (dada em  $W/m^2$ ) e de temperatura  $T^{ref}$  (dada em °C ou K) de referência. A grandeza  $\mu_{ICC}$  corresponde ao coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito (dado em  $A/°C$  ou  $A/K$ ), fornecido pelo fabricante. A partir da equação (4.8), é possível corrigir a fotocorrente para quaisquer outros valores de  $S$  e  $T$ , dados nas mesmas unidades que seus respectivos valores de referência.

$$I_{CF} = \frac{S}{S_{ref}} I_{CF}^{ref} + K_I (T - T^{ref}) \quad (4.8)$$

É fundamental salientar que a fotocorrente de referência e o coeficiente de temperatura dependem do número de células associadas. Ou seja, se a modelagem estiver sendo feita para uma célula fotovoltaica a partir dos parâmetros obtidos a partir do *datasheet* de um módulo fotovoltaico, torna-se necessário adequar os valores de  $K_I$  e  $I_{CF}^{ref}$  antes de proceder o cálculo dos demais parâmetros, conforme (4.9) e (4.10), haja vista que correntes são relacionadas com o número de células associadas em paralelo e tensões com o número de células associadas em série.

$$I_{CFmod}^{ref} = n_p I_{CFcel}^{ref} \quad (4.9)$$

$$K_{Imod} = n_p K_{Icel} \quad (4.10)$$

Substituindo-se (4.8) em (4.7), determina-se a equação final (4.11), a qual modela matematicamente células e módulos fotovoltaicos.

$$I_{RS} = \frac{S}{S_{ref}} I_{CF}^{ref} + K_I(T - T^{ref}) - \frac{R_S I_{RS} + V_{mód}}{R_{SH}} + \dots \quad (4.11)$$

$$\dots - I_O^{ref} \left( \frac{T_K}{T_K^{ref}} \right)^3 e^{\frac{qE_g}{Ak} \left( \frac{1}{T_K^{ref}} - \frac{1}{T_K} \right)} \left( e^{\frac{q(R_S I_{RS} + V_{mód})}{AkT_K}} - 1 \right)$$

Pode-se observar que a corrente de saída não pode ser isolada na expressão (4.11), pelo fato de ser uma equação transcendental. Sendo assim, a corrente é matematicamente descrita como uma função da própria corrente e da tensão ( $I=f(I, V)$ ) e somente pode ser resolvida por meio do emprego de método numérico. Além disso, para determiná-la alguns parâmetros que não foram previamente especificados devem ser descritos. A Tabela 2 tem por função especificar tais grandezas:

Tabela 2 - Parâmetros da equação (4.11) que não haviam sido descritos.

Grandeza	Símbolo	Unidade
Irradiância	$S$	W/m <sup>2</sup>
Irradiância de Referência	$S_{ref}$	W/m <sup>2</sup>
Temperatura	$T$	°C ou K
Temperatura de referência	$T^{ref}$	°C ou K
Temperatura (Kelvin)	$T_K$	K

Temperatura de referência (Kelvin)	$T_K^{ref}$	K
Carga elementar	q	C
Constante de <i>Boltzmann</i>	k	J/K
Energia de banda proibida	$E_g$	eV
Coefficiente de temperatura da corrente de curto-circuito	$K_I$	A/°C ou A/K
Fotocorrente de referência	$I_{CF}^{ref}$	A
Corrente de saturação	$I_O$	A
Corrente de saturação de referência	$I_O^{ref}$	A
Fator de idealidade	A	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se supor a operação do módulo no *STC*, ou seja,  $S_{ref} = S$ ,  $T = T^{ref}$  e  $T_K = T_K^{ref}$  e dessa forma a equação (4.11) se reduz a (4.12):

$$I_{Rs} = I_{CF}^{ref} - I_O^{ref} \left[ e^{\frac{q(R_S I_{Rs} + V_{mód})}{AkT_K}} - 1 \right] - \frac{R_S I_{Rs} + V_{mód}}{R_{SH}} \quad (4.12)$$

Sendo assim, a equação (4.12) só pode ser solucionada empregando métodos numéricos. Também é necessário definir-se alguns parâmetros da equação que são dependentes do módulo fotovoltaico, contudo não são disponibilizados pelos *datasheets* dos fabricantes. São eles os parâmetros:

- $I_O^{ref}$ ;
- $I_{CF}^{ref}$ ;
- A;
- $R_S$ ;
- $R_{SH}$ .



#### 4.4 Validação do modelo

A partir do algoritmo apresentado no Apêndice A, adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009), foi possível determinar  $R_s$ ,  $R_{SH}$ ,  $A$ ,  $I_o^{ref}$  e  $I_{CF}^{ref}$  e, dessa forma, determinar  $I_{Rs}$ , o que possibilitou gerar as curvas V-I e P-V do módulo KD210GX-LP no MATLAB, o módulo KD210GX-LP será estudado neste trabalho, sendo suas especificações expostas na Tabela 3.

Para utilização do modelo apresentado na seção anterior faz-se necessário a validação do modelo apresentado, ou seja, foram comparadas as curvas dadas pela fabricante com as curvas geradas a partir do algoritmo proposto por (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009) e a resposta se mostrou consistente.

Tabela 3 – Especificações elétricas do módulo KD210GX-LP no STC.

Parâmetro	Valor
Potência máxima ( $P_{max, e}$ )	210 W +5/-5%
Corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ )	7,90 A
Tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ )	26,6 V
Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ )	8,58 A
Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ )	33,2 V
Coeficiente de temperatura de corrente ( $K_i$ )	0,00515 %/°C
Coeficiente de temperatura de tensão ( $K_v$ )	-0,120 %/°C
Número de células em série ( $N_s$ )	54

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.5 Método iterativo proposto por (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009)

Levando-se em consideração a equação (4.12), busca-se determinar inicialmente  $R_s$  e  $R_{SH}$ . Desta forma, Villalva et al. (2009) propõem um método para ajustar  $R_s$  e  $R_{SH}$  com base no fato de que existe um único par  $R_s$  e  $R_{SH}$  que garante que  $P_{max,m} = P_{max,e} = V_{mp} \cdot I_{mp}$  no ponto  $(V_{mp}, I_{mp})$  da curva  $I \times V$ , ou seja, a potência máxima calculada pelo modelo  $I \times V$  de (4.12),  $P_{max,m}$ , é igual a potência experimental

máxima do *datasheet*,  $P_{max,e}$ , no ponto de máxima potência (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

A fotocorrente de referência  $I_{CF}^{ref}$  pode ser dada por:

$$I_{CF}^{ref} = \frac{R_{SH} + R_S}{R_{SH}} I_{SC} \quad (4.13)$$

A Equação (4.13) usa as resistências  $R_S$  e  $R_{SH}$  para determinar  $I_{CF}^{ref}$ . Os valores de  $R_S$  e  $R_{SH}$  são inicialmente desconhecidos, mas como a solução do algoritmo é refinada ao longo de iterações sucessivas, os valores de  $R_S$  e  $R_{SH}$  tendem para a melhor solução e (4.13) torna-se válida e efetivamente determina a fotocorrente gerada levando em consideração a influência das resistências em série e paralela do circuito. As suposições iniciais para  $R_S$  e  $R_{SH}$  são necessárias antes do início do processo iterativo. O valor inicial de  $R_S$  pode ser zero. O valor inicial de  $R_{SH}$  pode ser dado por:

$$R_{SH, min} = \frac{V_{mp}}{I_{SC} - I_{mp}} - \frac{V_{OC} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (4.14)$$

A relação entre  $R_S$  e  $R_{SH}$  pode ser determinada resolvendo-se a equação resultante para  $R_S$ , como mostram (4.13) e (4.14):

$$P_{max,m} = V_{mp} \left\{ I_{RS} - I_O^{ref} \left[ \exp\left(\frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{AV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{R_{SH}} \right\} \quad (4.15)$$

$$= P_{max,e}$$

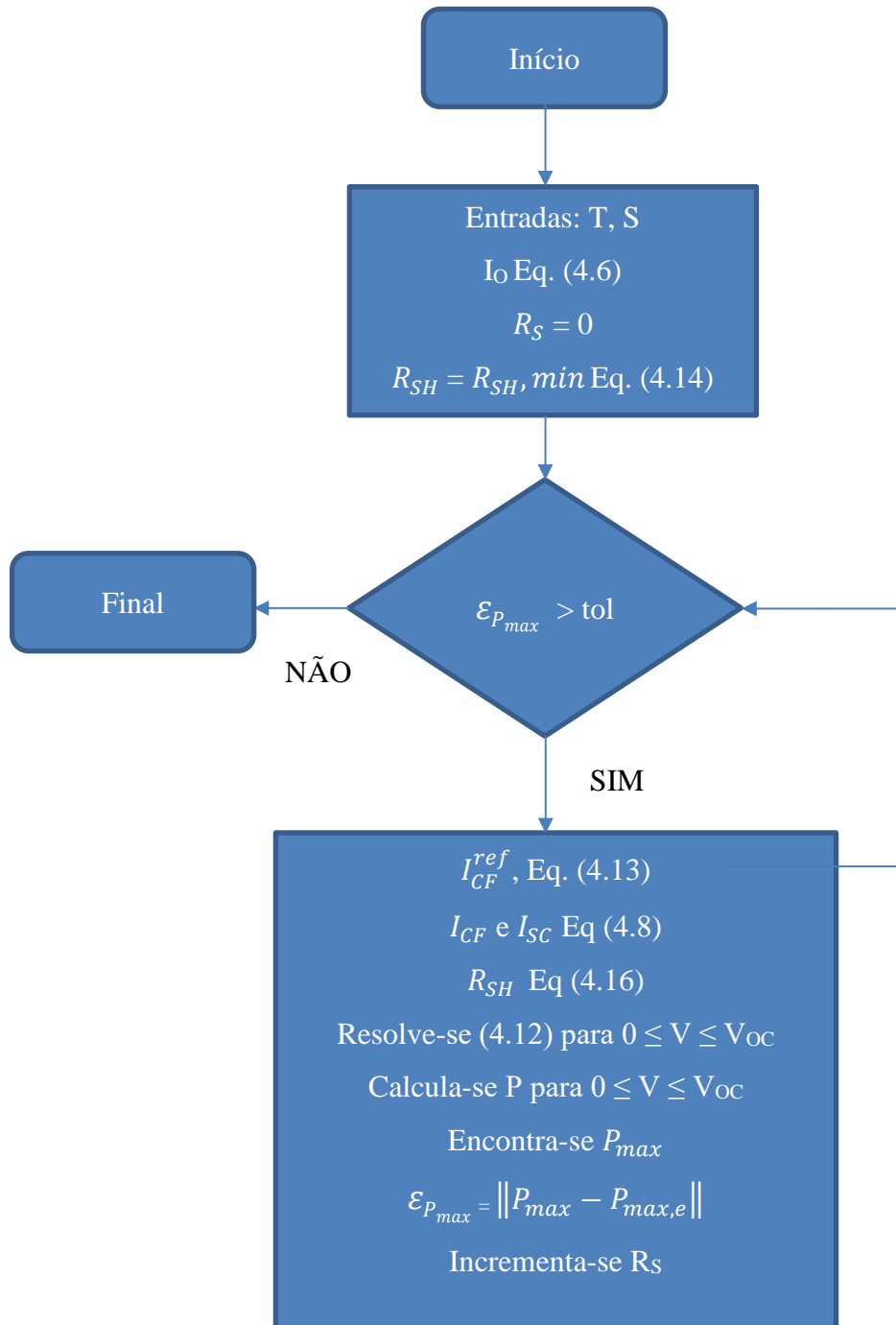
$$R_{SH} = \frac{V_{mp}(V_{mp} + R_S I_{mp})}{V_{mp} I_{RS} - V_{mp} I_O^{ref} \left[ \exp\left(\frac{V_{mp} + R_S I_{mp}}{AV_T}\right) - 1 \right] + V_{mp} I_O^{ref} - P_{max,e}} \quad (4.16)$$

O propósito é determinar  $R_S$ , e  $R_{SH}$ , por consequência, que faz com que o pico da curva matemática  $P \times V$  coincida com a potência de pico experimental no ponto ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ). Isso necessita de várias iterações até que  $P_{max,m} = P_{max,e}$ . No processo iterativo

valores de  $R_s$  vão sendo incrementados lentamente partindo de  $R_s=0$  (FREITAS, 2018; VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

A seguir é mostrado um fluxograma do procedimento utilizado para o ajuste da curva I-V do módulo de referência.

Figura 17 – Fluxograma ilustrando o algoritmo de ajuste da curva I-V.



Fonte: Adaptado de (VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

## 5. MODELAGEM E CONTROLE DO EMULADOR FOTOVOLTAICO

### 5.1 Introdução

Diante do que foi explanado nos capítulos anteriores, consegue-se partir para a análise e dimensionamento do sistema emulador fotovoltaico. Pelo fato da tensão de saída ser sempre menor que a tensão de entrada e pela simplicidade e robustez optou-se por utilizar o conversor *buck* síncrono. Após, aborda-se o controle do emulador fotovoltaico.

### 5.2 Dimensionamento

Neste trabalho optou-se por desenvolver o emulador fotovoltaico a partir do módulo KD210GX-LP com potência nominal de 210 W do fabricante *Kyocera*, sendo suas especificações apresentadas na Tabela 3. Já os dados gerais para o projeto dos elementos do conversor *buck* síncrono são baseados no ponto de máxima potência do módulo estudado nas condições padronizadas de teste:

- Tensão de alimentação:  $V_{in} = 50V$ ;
- Frequência de chaveamento:  $f_s = 50 \text{ kHz}$ ;
- Potência de saída:  $P_o = 210W$ ;
- Tensão de saída:  $V_o = 26,6V$ ;
- Corrente de saída:  $I_o = 7,9A$ ;
- Ondulação da corrente no indutor  $\Delta I_L = 10\%$  da corrente de saída;
- Ondulação da tensão no capacitor  $\Delta V_C = 1\%$  da tensão de saída;
- Amplitude da onda portadora triangular do PWM:  $V_m = 1 \text{ V}$ .

### 5.3 Etapas de operação do conversor

Com a intenção de emular um módulo fotovoltaico com correntes variando de 0 a  $I_{sc}$ , deseja-se operar o conversor no modo de condução contínua (MCC). O ganho estático do conversor é a própria razão cíclica de operação (BARBI; MARTINS, 2011).

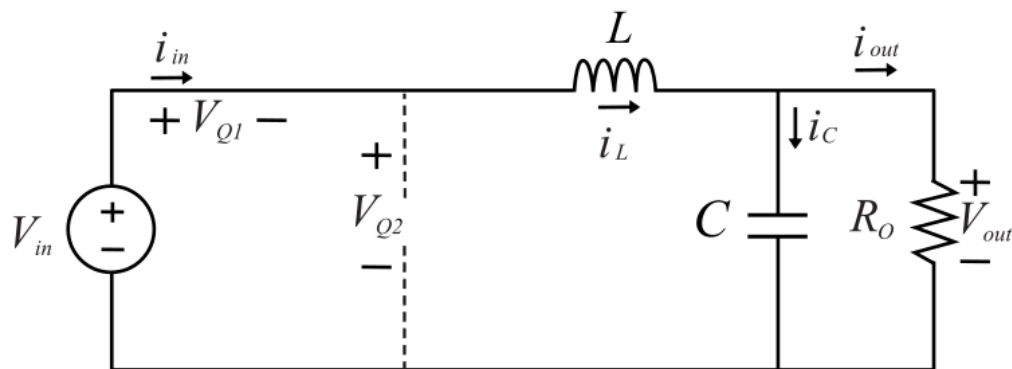
$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5.1)$$

Quando atuando no MCC, o conversor apresenta duas etapas de operação, representadas abaixo. Considera-se  $t$  a variável referente ao tempo e  $T_s$  o período de comutação das chaves Q1 e Q2.

**1ª Etapa ( $0 \leq t \leq DT_s$ ):**

Durante a primeira etapa de operação, a chave Q2 está bloqueada e a chave Q1 em condução, transmitindo energia da fonte de entrada para a magnetização do indutor e para o resistor e também para o capacitor, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Primeira etapa de operação do conversor buck síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$V_{Q1} = 0 \quad (5.2)$$

$$V_{Q2} = V_{in} \quad (5.3)$$

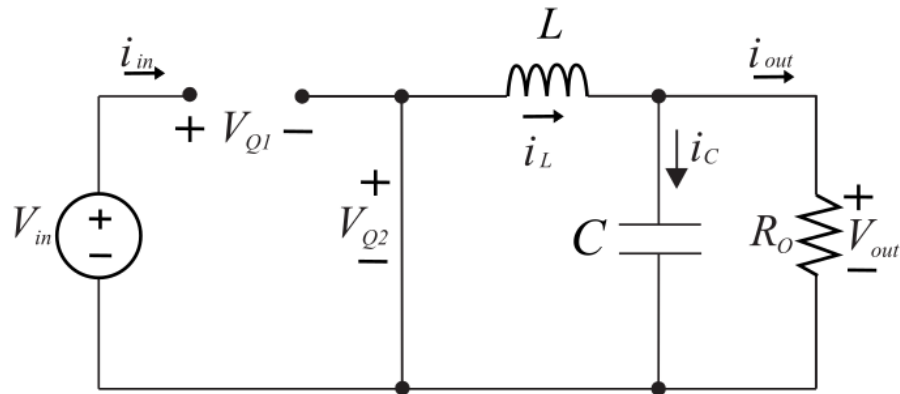
$$V_L = V_{in} - V_{out} \quad (5.4)$$

$$i_{in} = i_L = i_C + i_{out} \quad (5.5)$$

**2ª Etapa ( $DT_s \leq t \leq T_s$ ):**

Na segunda etapa de operação, a chave Q1 é bloqueada, e a chave Q2 passa a conduzir, o que permite que o indutor continue recebendo corrente. Durante essa etapa, a fonte de entrada deixa de fornecer energia para o circuito e o indutor L e o capacitor C passam a transferir energia para a carga, como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Segunda etapa de operação do conversor *buck* síncrono



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$V_{Q1} = V_{in} \quad (5.6)$$

$$V_{Q2} = 0 \quad (5.7)$$

$$V_L = -V_{out} \quad (5.8)$$

$$i_{in} = 0 \quad (5.9)$$

$$i_{out} = i_L - i_C \quad (5.10)$$

Para determinar a ondulação de corrente no indutor, considera-se a primeira etapa de operação descrita e analisa-se a relação volt-ampere no respectivo elemento, conforme (5.11):

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (5.11)$$

Assumindo-se que a derivada pode ser expressa como uma variação em um pequeno intervalo de tempo, têm-se:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{DT_s} \quad (5.12)$$

Onde  $\Delta I_L$  representa a ondulação de corrente no indutor. Substituindo as equações da primeira etapa de operação e (5.12) em (5.11), chega-se a:

$$\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_{out})D}{f_s L} \quad (5.13)$$

Onde  $f_s$  é a frequência de comutação do conversor. Manipulando-se (5.13), obtém-se:

$$\Delta I_L = \frac{V_{in}(1 - D)D}{f_s L} \quad (5.14)$$

A ondulação descrita por (5.14) é máxima quando  $D = 0,5$ . Dessa forma, a indutância pode ser determinada em função da ondulação de corrente, dada por:

$$L = \frac{V_{in}(1 - D)D}{\Delta I_L f_s} \quad (5.15)$$

A ondulação da tensão do capacitor de saída pode ser encontrada com base na equação (5.16), considerando  $\Delta V_C$  como metade do valor da tensão de pico a pico e  $\Delta q$  a variação de carga do capacitor.

$$\Delta q = C \cdot 2\Delta V_C \quad (5.16)$$

Levando-se em consideração que o valor médio da corrente no capacitor é nulo, fazendo com que o valor médio da tensão permaneça constante. Dessa forma, as ondulações de corrente e tensão oriundas do capacitor podem ser dadas por (5.17) (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8Cf_s} \quad (5.17)$$

Isolando C em (5.17), determina-se a expressão do capacitor de saída em função da ondulação de tensão desejada, de acordo com (5.18).

$$C = \frac{\Delta I_L}{8\Delta V_C f_s} \quad (5.18)$$

Obteve-se os seguintes valores para os elementos do conversor *buck* síncrono:

$$L = 316,45 \mu H \quad (5.19)$$

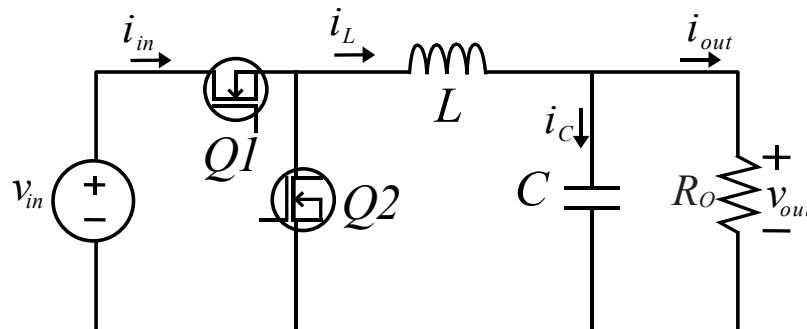
$$C = 7,42 \mu F \quad (5.20)$$

$$R_o = 3,36 \Omega \quad (5.21)$$

#### 5.4 Determinação da Função de Transferência

A função de transferência  $Fi(s)$  obtida deverá correlacionar a variável a ser controlada, que neste caso é corrente no indutor  $i_L$ , com a variável de atuação que é a razão cíclica  $d$ . Considera-se o sistema da Figura 20. Diante da forma de onda da tensão em Q2 e da corrente em Q1, e desconsiderando a ondulação de corrente, encontra-se o valor médio quase instantâneo de tais grandezas, como se pode observar na Figura 21 (ERICKSON; MAKSIMOVIĆ, 2001).

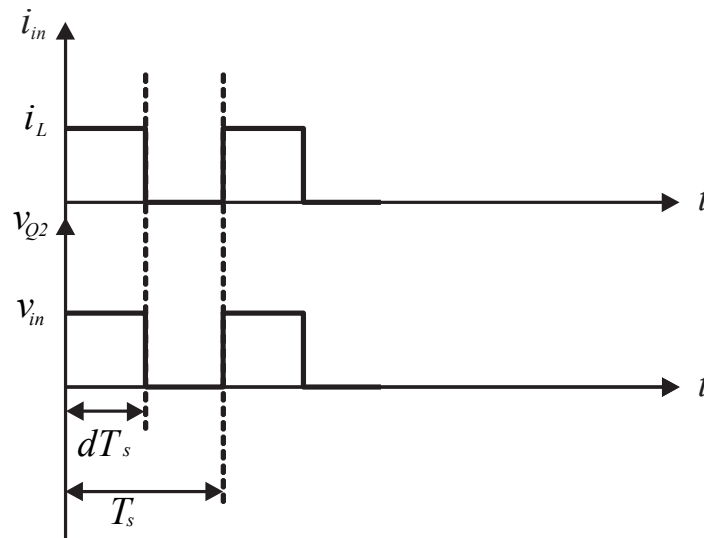
Figura 20 – Modelo comutado do conversor Buck síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 21 - Formas de onda da tensão em Q2 e corrente em Q1 do conversor *Buck* síncrono.

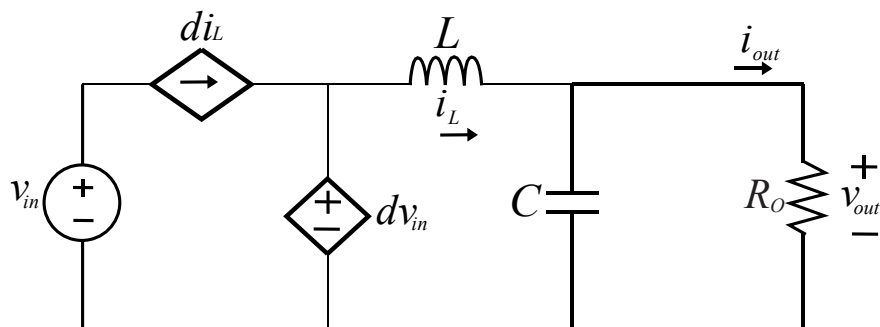


Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\begin{cases} \langle v_{Q2} \rangle T_s = dV_{in} \\ \langle i_{in} \rangle T_s = di_L \end{cases} \quad (5.22)$$

A partir da equação (5.22) pode-se representar o modelo médio de grandes sinais do conversor trocando as chaves Q1 e Q2 por uma fonte de corrente e outra fonte de tensão, respectivamente, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Modelo médio de grandes sinais do conversor *Buck* síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 representa o modelo do conversor, onde os efeitos referentes à comutação são desconsiderados.

De acordo com a teoria de sistemas lineares, para utilizar a transformada de Laplace e analisar o circuito de modo a obter a função de transferência do sistema,

deve-se linearizar o sistema em torno de um ponto de operação. Sendo assim, utilizando-se o conceito de pequenas perturbações, as variáveis podem ser redefinidas como um valor constante mais uma pequena perturbação, como mostram (5.23) e (5.24) (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001):

$$\begin{cases} v_{in} = V_{in} + \widehat{v}_{in} \\ i_L = I_L + \widehat{i}_L \\ d = D + \widehat{d} \end{cases} \quad (5.23)$$

$$\begin{cases} v_{out} = V_{out} + \widehat{v}_{out} \\ i_{in} = I_{in} + \widehat{i}_{in} \\ v_{Q2} = V_{Q2} + \widehat{v}_{Q2} \end{cases} \quad (5.24)$$

Considerando que as grandezas  $\hat{x}$  são bem menores que  $x$ . A partir dos conceitos apresentados, obtém-se:

$$i_{in} = i_L \cdot d \quad (5.25)$$

$$I_{in} + \widehat{i}_{in} = (I_L + \widehat{i}_L)(D + \widehat{d}) \quad (5.26)$$

$$I_{in} + \widehat{i}_{in} = I_L D + I_L \widehat{d} + \widehat{i}_L D + \underbrace{\widehat{i}_L \widehat{d}}_{\cong 0} \quad (5.27)$$

Realizando-se o mesmo procedimento para a tensão em Q2, obtém-se:

$$v_{Q2} = v_{in} \cdot d \quad (5.28)$$

$$V_{Q2} + \widehat{v}_{Q2} = (V_{in} + \widehat{v}_{in})(D + \widehat{d}) \quad (5.29)$$

$$V_{Q2} + \widehat{v}_{Q2} = V_{in} D + V_{in} \widehat{d} + \widehat{v}_{in} D + \underbrace{\widehat{v}_{in} \widehat{d}}_{\cong 0} \quad (5.30)$$

Diante das equações (5.25) a (5.30) pode-se eliminar as componentes constantes e de segunda ordem ou mais.

$$\begin{cases} I_{in} = I_L D \\ V_{Q2} = V_{in} D \end{cases} \quad (5.31)$$

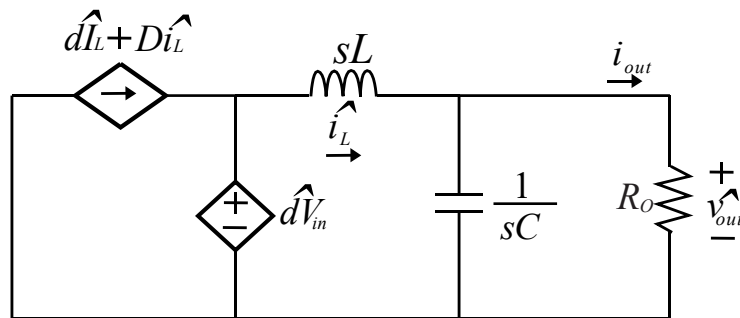
$$\begin{cases} \widehat{i}_{in} = I_L \widehat{d} + \widehat{i}_L D \\ \widehat{v}_{Q2} = V_{in} \widehat{d} + \widehat{v}_{in} D \end{cases} \quad (5.32)$$

Como há interesse na resposta dinâmica do sistema, as componentes de corrente contínua não acrescentam informações pertinentes para tal, logo as pequenas modunções de tensão na chave Q2 podem ser redefinidas como:

$$\widehat{v}_{in} = 0 \rightarrow \widehat{v}_{Q2} = V_{in} \widehat{d} \quad (5.33)$$

Sendo assim, obtém-se a partir de (5.32) e (5.33) o modelo médio de pequenos sinais, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Modelo médio de pequenos sinais do conversor *Buck* síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Partindo-se para a análise de pequenos sinais, consideraremos uma impedância equivalente  $Z_{eq}$ , referente a associação do indutor com o paralelo entre o capacitor e a carga, como mostra a equação (5.34):

$$Z_{eq} = sL + \left( \frac{\frac{1}{sC} R_o}{\frac{1}{sC} + R_o} \right) \quad (5.34)$$

Sendo assim, pode-se descrever o valor da corrente perturbada no indutor como mostra a equação (5.35):

$$\widehat{i}_L = \frac{V_{in} \widehat{d}}{Z_{eq}} \quad (5.35)$$

Levando-se em consideração as equações (5.34) e (5.35), obtém-se, finalmente a função de transferência requerida para o sistema.

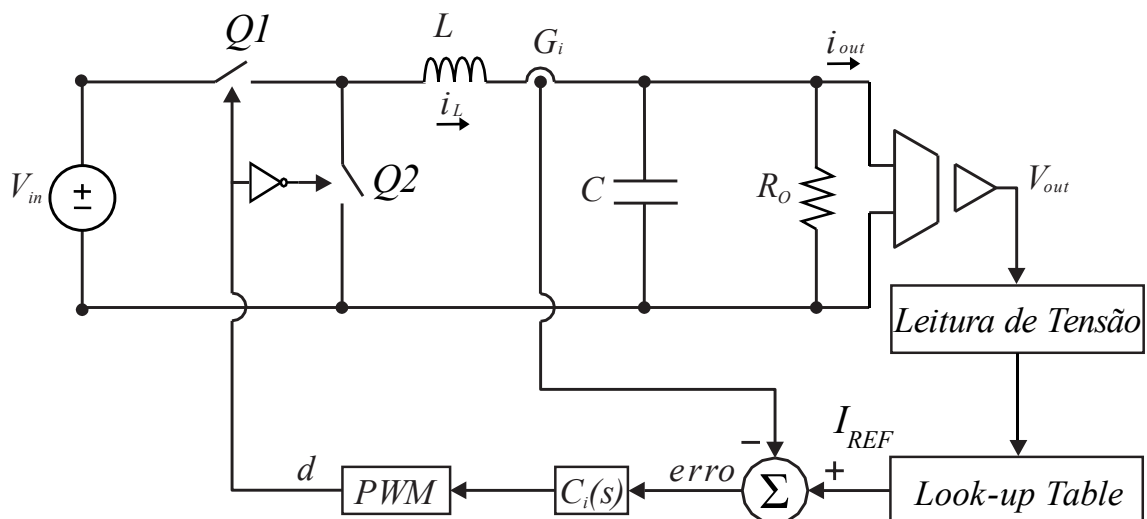
$$F_i(s) = \frac{\hat{i}_L}{\hat{d}} = V_{in} \frac{\left(\frac{s}{L} + \frac{1}{R_o LC}\right)}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (5.36)$$

Após o dimensionamento dos elementos do conversor, inicia-se a definição da estratégia de controle do conversor *buck* síncrono.

## 5.5 Estratégia de Controle

A Figura 24 ilustra o circuito proposto para o controle do conversor.

Figura 24 – Circuito proposto para controle da corrente no conversor *buck* síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- $G_i$  é o ganho referente ao sensor de corrente;
- $I_{REF}$  é a corrente de referência advinda da Look-up Table, que tem por função armazenar diversos valores de corrente e tensão do módulo KD210GX-LP, onde entra-se com uma tensão medida na saída do emulador;
- *erro* é a diferença entre a corrente de referência  $I_{REF}$  e a corrente medida no indutor;
- $C_i(s)$  representa o compensador de corrente;

- *PWM* representa o modulador por largura de pulso, que gera o comando para as chaves *Q1* e *Q2*.

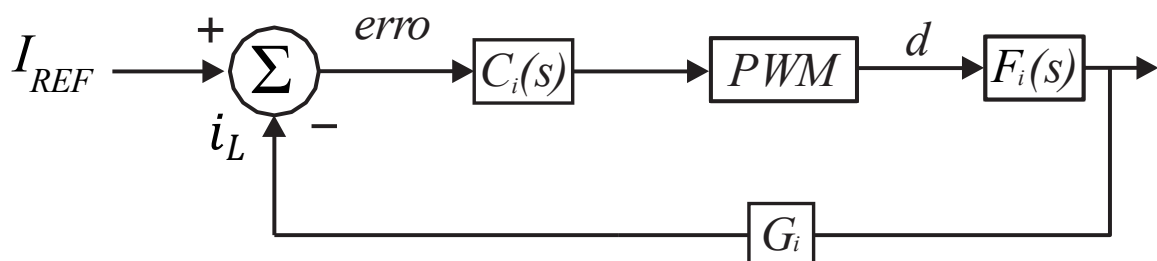
Para possibilitar a representação da curva I-V do módulo fotovoltaico a partir da equação geral de  $I_{RS}$  descrita por (4.12), é fundamental a obtenção dos valores de  $i_{out}$  e  $V_{out}$ . Dessa forma, a variável  $V_{out}$  é medida e, para este valor, através da Look-upTable existe um único ponto de  $I_{REF}$  que corresponde a curva I-V. Assim, pode-se comparar  $I_{REF}$  com o valor  $i_L$ , lido, gerando um sinal de erro. Tal erro é compensado por um controlador, que forma um sinal de controle, o qual é comparado com a portadora triangular da PWM. Finalmente, o modulador gera o pulso de comando para o controle das chaves *Q1* e *Q2*.

## 5.6 Obtenção da função de transferência

A função de transferência  $F_i(s)$  relaciona a variável a ser controlada  $i_L$  (corrente no indutor com a variável de controle  $d$  (razão cíclica). Manipulando-se a equação encontrada em (5.36), chega-se a (5.37).

$$F_i(s) = \frac{V_{in} \cdot (Cs + \frac{1}{R})}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (5.37)$$

Figura 25 – Diagrama de blocos para controle da corrente de saída  $i_{out}$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo do diagrama de blocos é determinar o compensador de corrente  $C_i(s)$  que leve o sistema a zerar o sistema em regime permanente, bem como ter uma

resposta dinâmica desejada. Entretanto, é essencial conhecer o modelo da planta  $F_i(s)$ , determinado por (5.37), o ganho do modulador PWM e o ganho do sensor de corrente.

Levando-se em consideração que o ganho do controlador  $K_{PWM}$ , pode ser dado por:

$$K_{PWM} = \frac{1}{V_p} \quad (5.38)$$

Onde  $V_p$  é o valor de pico da portadora. Consideraremos  $V_p$  unitário.

Logo:

$$K_{PWM} = 1$$

Já para o ganho do sensor de corrente  $G_i$ , considera-se:

$$G_i = \frac{1}{I_B} \quad (5.39)$$

Onde  $I_B$  representa o valor base da corrente. Como a corrente nominal vale 7,9 A e considerando uma folga de 50% devido a possíveis transitórios conclui-se que:

$$G_i = \frac{1}{11,85} = 0,08438$$

## 5.7 Projeto do Compensador

O projeto do compensador será dimensionado a partir do método de resposta em frequência. Esse método consiste em determinar a frequência de cruzamento e a margem de fase para garantir a estabilidade do sistema. No primeiro momento, analisa-se a função de transferência de malha fechada obtida a partir da Figura 25 determinada por (6.4) (DORF; BISHOP, 2008).

$$FTMF(s) = \frac{i_L}{i_{ref}} = \frac{G_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot C_i(s)}{1 + C_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(s) \cdot G_i} \quad (5.40)$$

Os polos de malha fechada são dados por:

$$1 + C_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(s) \cdot G_i = 0 \quad (5.41)$$

$$C_i(s) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(s) \cdot G_i = -1 \quad (5.42)$$

Definindo a função de transferência de malha aberta não compensada  $FTMA_{NC}(s)$  como sendo o produto dos termos da malha aberta sem considerar o compensador (5.43) e a função de transferência de laço aberto compensada  $FTMA_C(s)$  considerando o compensador (5.44), pode-se reescrever (5.42) como a expressão (5.45). Adicionalmente, para análise pelo método da resposta em frequência, considera-se o sistema operando em regime permanente senoidal ( $s = j\omega$ ).

$$FTMA_{NC}(\omega) = K_{PWM} \cdot G_i(\omega) \cdot G_i \quad (5.43)$$

$$FTMA_C(\omega) = C_i(\omega) \cdot K_{PWM} \cdot G_i(\omega) \cdot G_i \quad (5.44)$$

$$FTMA_C(\omega) = C_i(\omega) \cdot FTMA_{NC}(\omega) = -1 \quad (5.45)$$

Pelo fato de  $FTMA_{NC}(s)$  não apresentar polos na origem, o compensador deve integralizar o sinal de erro para que se obtenha erro nulo para entrada em degrau. Logo, definiu-se pelo um compensador proporcional-integral (PI), descrito por (5.46), para que haja como determinar a margem de fase do sistema após a compensação, garantindo dois graus de liberdade ( $k_p$  e  $k_i$ ).

$$C_i(s) = \frac{k_p(s + k_i)}{s} \quad (5.46)$$

Partindo-se de (5.45), obtém-se:

$$FTMA_C(\omega) = \frac{k_c(s + k_i)}{s} \cdot FTMA_{NC}(\omega) \quad (5.47)$$

Após as devidas manipulações matemáticas, obtém-se:

$$k_p = \frac{\omega_c}{\left(\sqrt{k_i^2 + \omega_c^2}\right) \cdot |\text{FTMA}_{NC}(\omega_c)|} \quad (5.48)$$

$$k_i = \frac{\omega_c}{\text{tg}[M_\Phi - 90^\circ - \angle \text{FTMA}_{NC}(\omega_c)]} \quad (5.49)$$

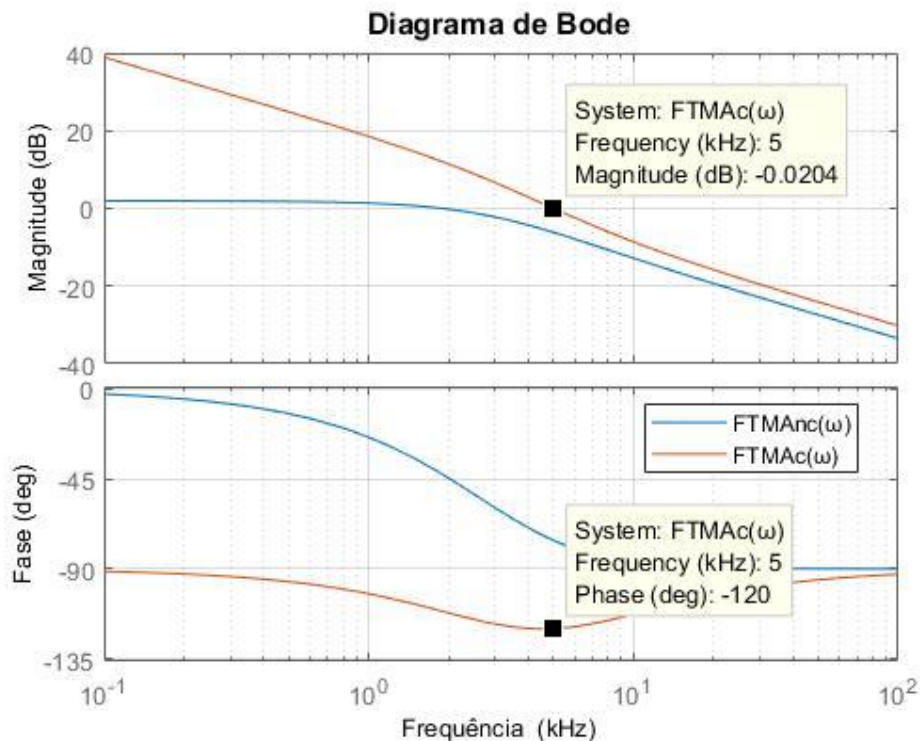
A determinação dos parâmetros do compensador foi feita alocando-se a frequência de cruzamento em  $f_c = 5$  kHz e margem de fase  $M_\Phi = 60^\circ$ .

Obteve-se:

$$k_p = 1,459 \quad (5.50)$$

$$k_i = 3,041 \cdot 10^4 \text{ rad/s} \quad (5.51)$$

Figura 26 – Diagrama de Bode do Sistema em Malha Aberta Compensado em Comparação com o Sistema em Malha Aberta Não Compensado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 26 apresenta o diagrama de bode do sistema compensado  $\text{FTMA}_{C}(\omega)$  em comparação com o sistema não compensado  $\text{FTMA}_{NC}(\omega)$  e comprova a frequência



de cruzamento em  $f_c = 5\text{kHz}$  e a margem de fase de  $M_\phi = 60^\circ$  para o sistema compensado.

## 6. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

### 6.1 Introdução

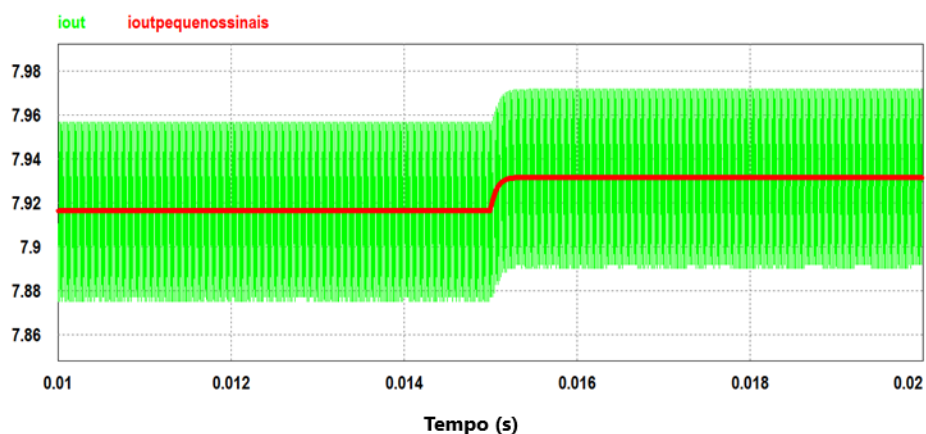
Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas nos softwares PSIM e MATLAB.

Como já mencionado, relaciona-se a corrente de referência com a corrente de saída do emulador fotovoltaico. O controlador PI é o encarregado de garantir que a corrente do emulador reproduza a corrente de referência advinda da Look-up Table. Em um primeiro momento foram validados o modelo em malha aberta e a estratégia de controle em malha fechada. Em seguida, a resposta em malha fechada com ênfase no regime permanente foi analisada. Foram executadas duas simulações com referências de correntes diferentes para simular o funcionamento do emulador com dois níveis de irradiações distintos, sendo eles  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $800 \text{ W/m}^2$ .

### 6.2 Validação do modelo

Com o objetivo de se validar o modelo do conversor encontrado, comparou-se a corrente de saída do modelo comutado em malha aberta com a corrente de saída do modelo de pequenos sinais dada pela equação (5.37), levando-se em consideração a carga nominal de  $3,36 \Omega$  e o resultado foi o obtido na Figura 27. Aplicou-se um *step* igual a razão cíclica no circuito e em 15 ms um *step* de amplitude igual a  $0,001 \text{ V}$ .

Figura 27- Comparação entre a corrente de saída do sistema em malha aberta e a corrente de saída do modelo de pequenos sinais utilizando-se a carga nominal de  $3,36 \Omega$ .



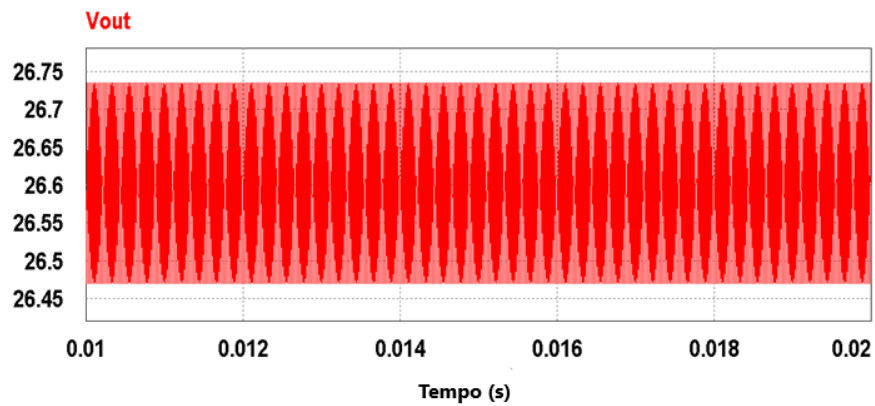
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 27 é possível inferir que existe uma correspondência entre as respostas dinâmicas do modelo e do próprio conversor simulado em ambiente PSIM, comprovando os métodos utilizados.

### 6.3 Simulações em malha aberta

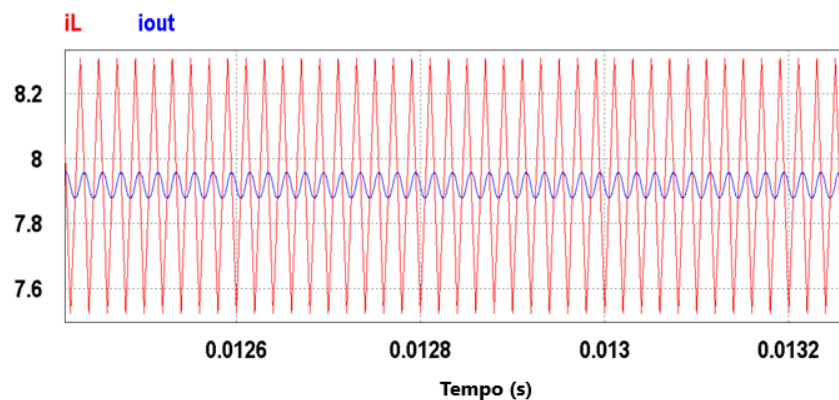
Em um segundo momento obteve-se a resposta em malha aberta e regime permanente do modelo comutado do conversor *buck* síncrono levando-se em consideração a carga nominal de  $R_o = 3,36 \Omega$  para se observar os *ripples* de corrente e tensão.

Figura 28 - Tensão de saída em malha aberta do conversor *buck* síncrono.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Corrente de saída e corrente no indutor em malha aberta do conversor *buck* síncrono.



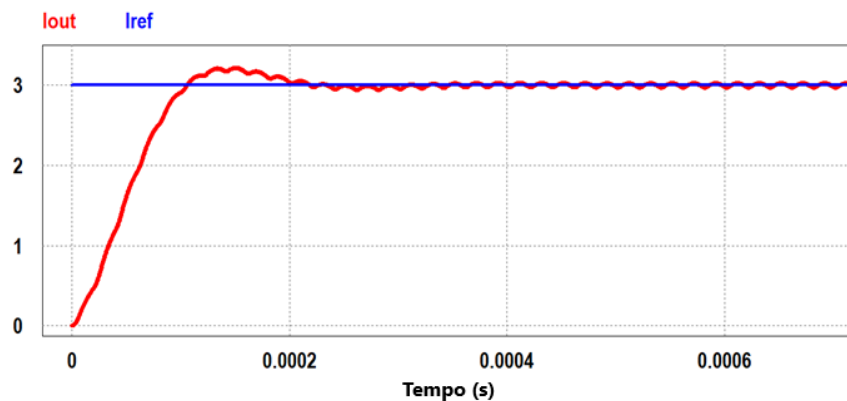
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar, a partir das Figuras 28 e 29, que ambos os *ripples*, tanto o de corrente como o de tensão, atingiram níveis muito próximos diante das especificações previamente definidas.

#### 6.4 Validação da estratégia de controle em malha fechada exibindo o regime transitório

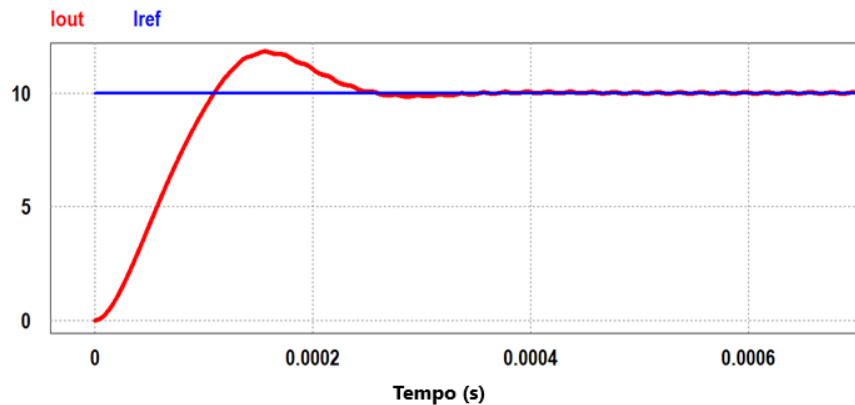
Buscando-se validar a estratégia de controle proposta, o sistema foi alimentado com dois valores de corrente de referência constantes e de valores iguais a 3 A e 10 A. Os valores foram escolhidos buscando-se correntes de entradas superiores e inferiores a corrente nominal proposta. Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Corrente de saída do emulador fotovoltaico utilizando uma corrente de referência constante de 3 A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Corrente de saída do emulador fotovoltaico utilizando uma corrente de referência constante de 10 A.



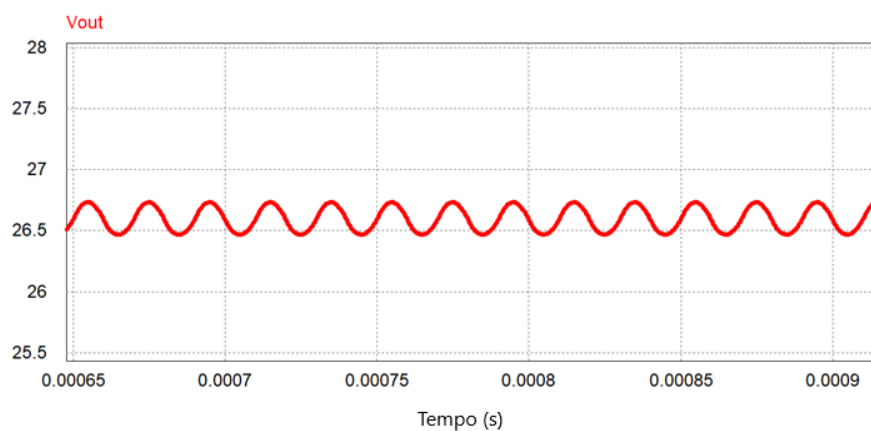
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das Figuras 30 e 31, pode-se observar que o conversor se comporta dinamicamente de acordo com as especificações de controle e, como consequência, a corrente de referência está sendo obtida na saída do emulador.

### 6.5 Simulações em malha fechada exibindo o regime permanente

Após a validação da estratégia de controle, partiu-se para as simulações em malha fechada com ênfase no regime permanente, considerando a carga nominal de  $3,36 \Omega$  e utilizando a corrente de referência provinda da Look-up Table.

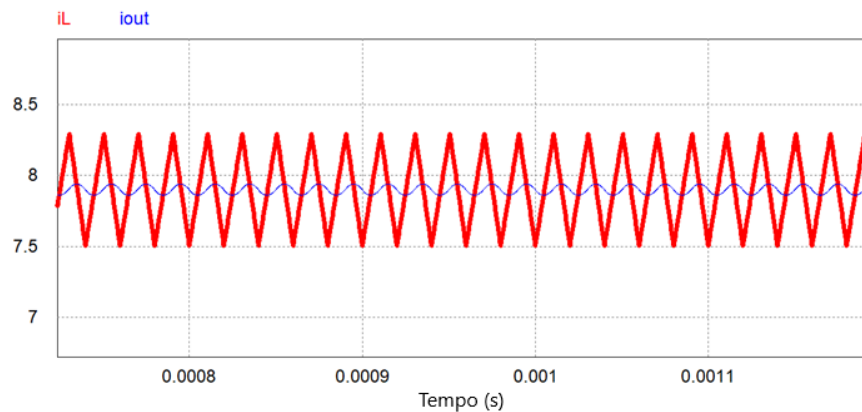
Figura 32 - Tensão no capacitor e tensão de carga do emulador em malha fechada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que a tensão média de carga do emulador para o nível de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  foi igual a  $26,59 \text{ V}$ , valor muito próximo do valor especificado pelo *datasheet* do módulo KD210GX-LP, sendo este igual a  $26,6 \text{ V}$ .

Figura 33 – Corrente no indutor e corrente de saída do emulador em malha fechada.

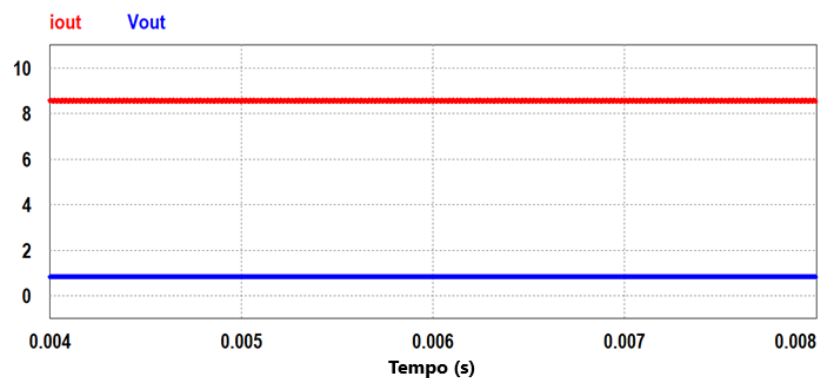


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que a corrente média de carga do emulador para o nível de irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$  foi igual a  $7,89 \text{ A}$ , valor muito próximo do valor especificado no *datasheet*, sendo este igual a  $7,9 \text{ A}$ .

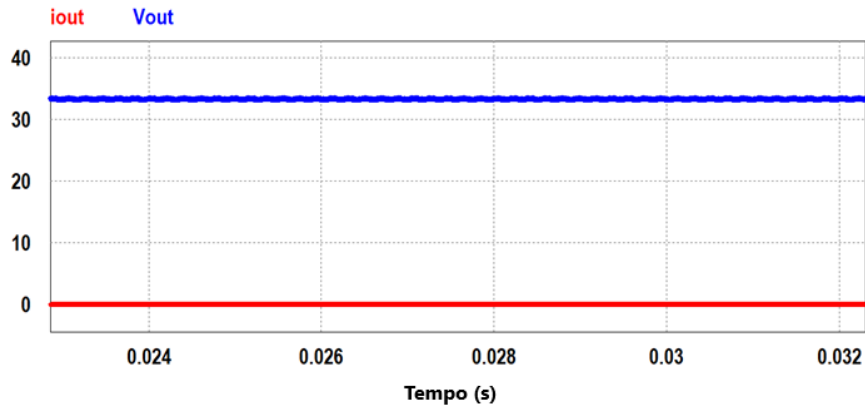
A seguir o emulador foi testado para as condições críticas de curto-circuito e circuito aberto, utilizando-se resistências iguais a  $0,1 \Omega$  e  $2000 \Omega$ , respectivamente.

Figura 34 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de curto- circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de circuito aberto.

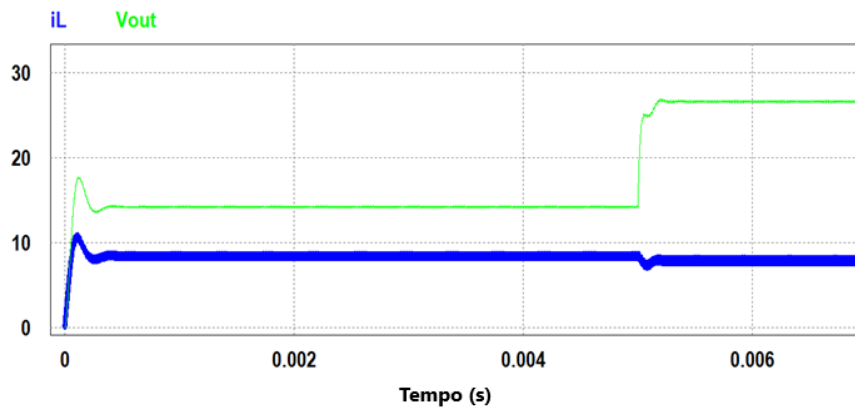


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que para a condição de curto-circuito, a corrente média de saída do emulador foi igual a 8,57 A e a tensão média de saída do emulador foi igual a  $8,57 \times 10^{-1}$  V, sendo que a corrente de curto-circuito especificada pelo *datasheet* é igual 8,58 A, assim, os valores foram próximos aos esperados. Já para a condição de circuito aberto, a tensão média de saída do emulador foi igual a 33,3 V e a corrente média de do emulador foi igual a  $1,66 \times 10^{-2}$  A, sendo que a tensão de circuito aberto especificada pelo *datasheet* é igual a 33,2V, dessa forma, os valores também foram próximos ao previsto.

Após estes testes, o sistema foi testado para variações na carga de 50% para 100% em  $t=5$  ms.

Figura 36 – Variações na carga de 50% para 100%.

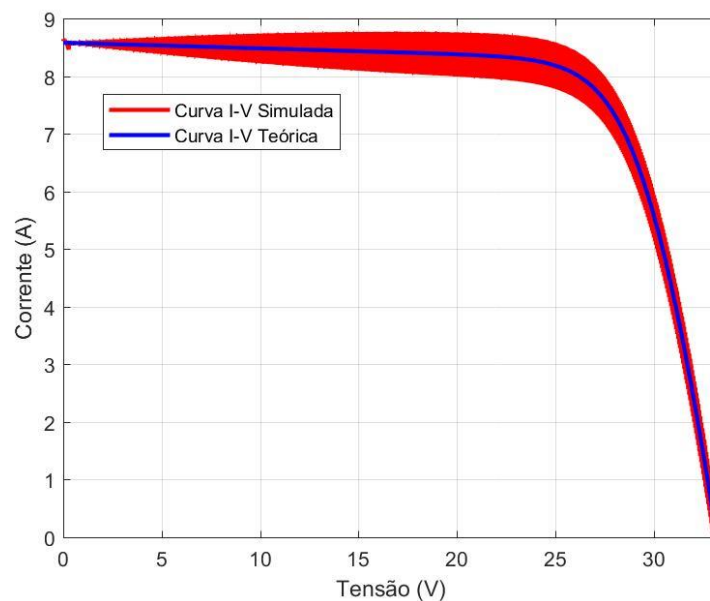


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se, a partir da Figura 36, que mesmo diante de diferentes distúrbios no sistema o projeto do controlador é válido, pois a corrente média de saída do sistema estabilizou novamente nos 7,89 A e a tensão de saída estabilizou em 26,59 V, após os 20 ms.

Após, buscou-se comparar as curvas I-V gerada pelo emulador e a curva I-V teórica, como mostra a Figura 37.

Figura 37 – Curvas I-V Teórica e Simulada para o nível de irradiação igual a 1000 W/m<sup>2</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor.

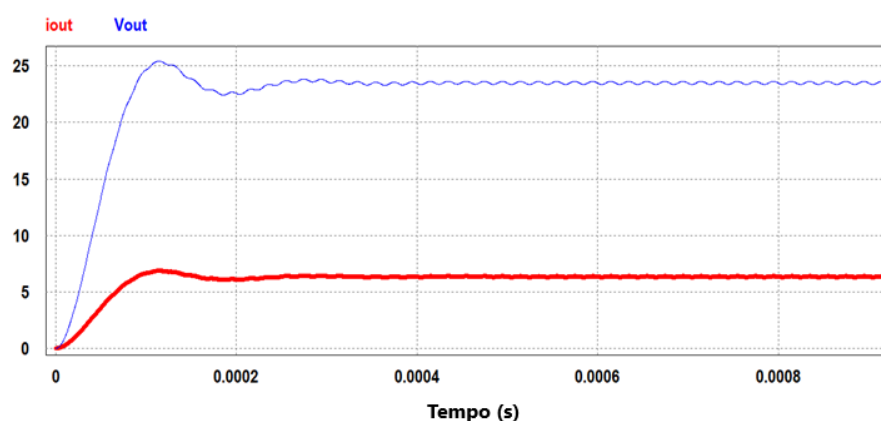


Para descrever a curva I-V em todos os pontos, desde o curto-circuito até o circuito aberto, foi necessário realizar um ajuste de carga buscando possibilitar a variação de zero até infinito ohms. Diante disso, variou-se a resistência para poder se aproximar das situações de curto-circuito e circuito aberto com valores na faixa de  $0,1 \Omega$  a  $2000 \Omega$  para servirem como cargas no sistema, sendo que se conseguiu, dessa forma, obter curva I-V gerada pelo emulador fotovoltaico. Posteriormente as curvas I-V teórica e gerada pelo emulador foram comparadas. Pôde-se observar na Figura 37 que as curvas se sobrepuseram e as pequenas divergências verificadas surgiram pelo fato de os valores amostrados da curva I-V simulada não serem os valores médios, mas sim as componentes médias com o *ripple* adicionado.

## 6.6 Resultados para irradiação de $800 \text{ W/m}^2$

Com o objetivo de se verificar o funcionamento do emulador para um nível de irradiação igual a  $800 \text{ W/m}^2$ , a carga do sistema foi alterada para  $R_o = 3,718 \Omega$ , cuja qual corresponde a carga nominal para este nível de irradiação. Os valores da Look-up Table foram redefinidos a partir das novas especificações de entrada, as quais foram inseridas no algoritmo do Apêndice A.

Figura 38 – Corrente e tensão de saída do emulador para o nível de irradiação de  $800 \text{ W/m}^2$ .



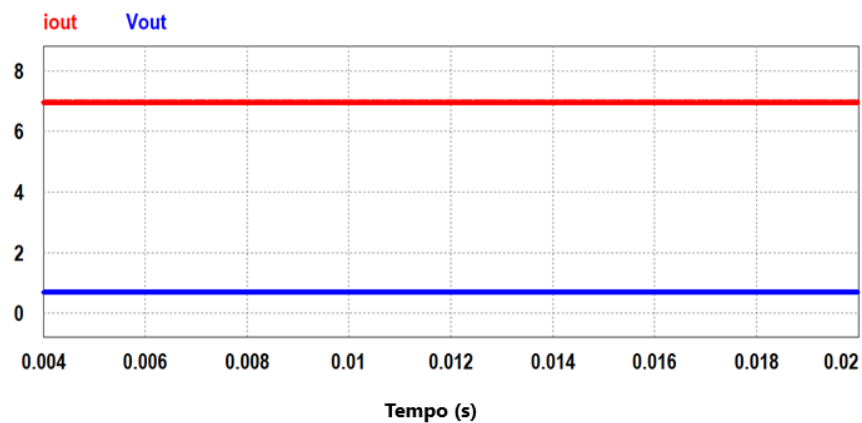
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que a corrente de carga do emulador para o nível de irradiação de  $800 \text{ W/m}^2$  foi igual a 6,32 A, valor idêntico ao valor especificado no

*datasheet*, sendo este igual a 6,32 A. Já a tensão de saída obtida foi de 23,49 V, valor próximo ao especificado no *datasheet*, sendo este igual a 23,5 V.

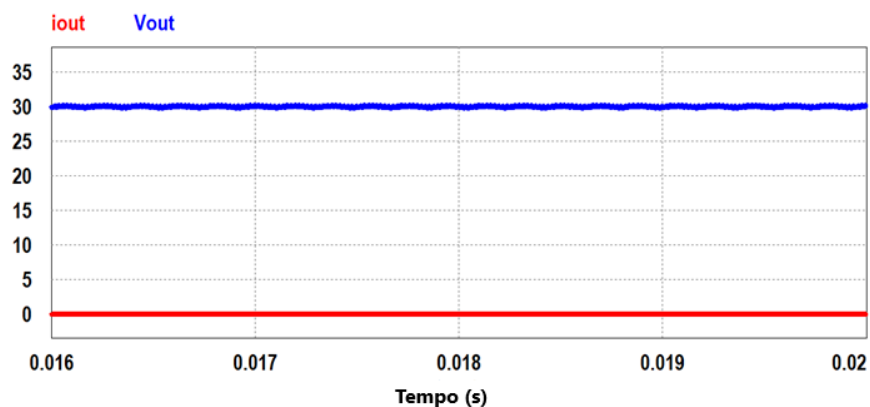
A seguir o emulador foi testado para as condições críticas de curto-circuito e circuito aberto, utilizando-se resistências iguais a  $0,1\Omega$  e  $2000\Omega$ , respectivamente.

Figura 39 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para condição de curto-circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Corrente de saída e tensão de saída do emulador para a condição de circuito aberto.



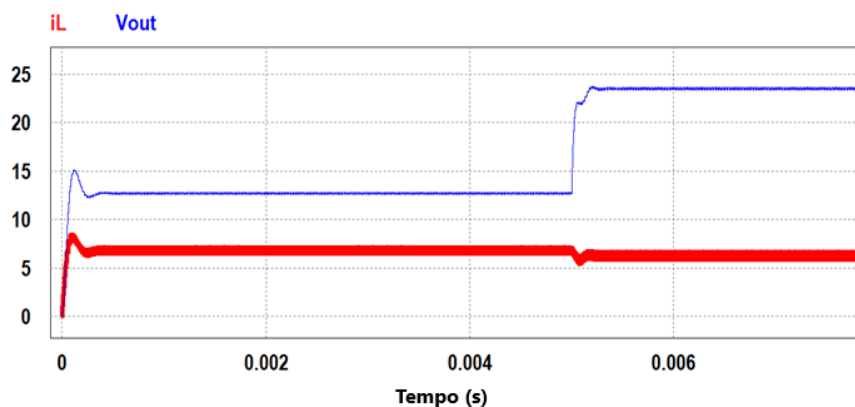
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde-se observar que para a condição de curto-circuito, a corrente média de saída do emulador foi igual a 6,97 A e a tensão média de saída do emulador foi igual a  $6,97 \times 10^{-1}$  V, sendo que a corrente de curto-circuito especificada pelo *datasheet* é igual 6,98 A, assim, os valores foram próximos aos esperados. Já para a condição de

circuito aberto, a tensão média de saída do emulador foi igual a 30 V e a corrente média de do emulador foi igual a  $1,5 \times 10^{-2}$  A, sendo que a tensão de circuito aberto especificada pelo *datasheet* é igual a 29,9 V, dessa forma, os valores obtidos também foram próximos ao previsto.

Após estes testes, o sistema foi testado para variações na carga de 50% para 100% em  $t=5$  ms.

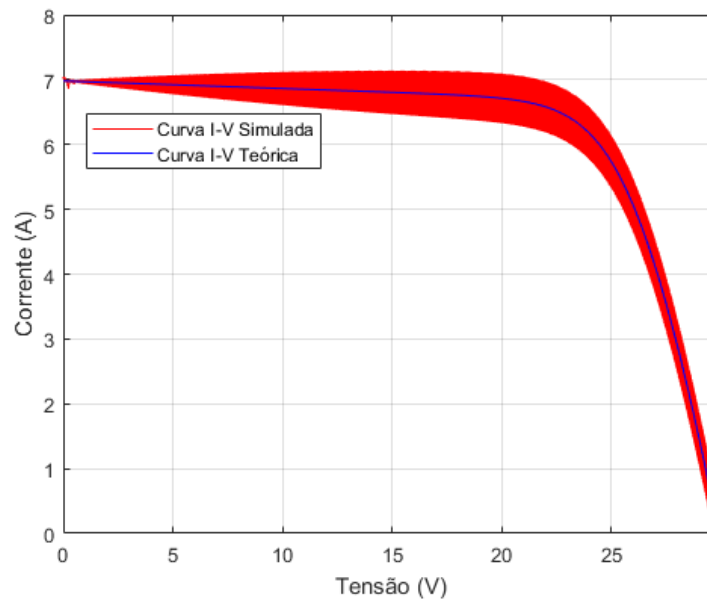
Figura 41 - Variações na carga de 50% para 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se, a partir da Figura 41, que mesmo diante de diferentes distúrbios no sistema o projeto do controlador é válido, pois a corrente média de saída do sistema estabilizou novamente nos 6,32 A e a tensão de saída estabilizou em 23,49 V, após os 5 ms.

Figura 42 – Curvas I-V Teórica e Simulada para o nível de irradiação igual a 800 W/m<sup>2</sup>.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Alteraram-se as resistências novamente para poder se aproximar das situações de curto-circuito e circuito aberto no emulador, utilizando-se valores de resistências na faixa de  $0,1\Omega$  a  $2000\Omega$  para servirem como cargas no sistema, sendo que se conseguiu, dessa forma, obter curva I-V gerada pelo emulador fotovoltaico. Posteriormente as curvas I-V teórica e gerada pelo emulador foram comparadas, como mostra a Figura 42.

Pôde-se observar na Figura 42 que as curvas se sobrepuseram e as pequenas divergências analisadas surgiram pelo fato de os valores amostrados não serem os valores médios, mas sim as componentes médias com o *ripple* adicionado. No entanto, foi possível observar o comportamento da curva I-V com poucas divergências da curva do *datasheet*.

É importante salientar que para diminuir os *ripples* de corrente e tensão e, dessa forma, melhorar a sobreposição das curvas I-V teórica e simulada seria interessante analisar possíveis modificações dos parâmetros L e C do sistema.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram expostas as estratégias empregues para a análise, dimensionamento e projeto de um emulador fotovoltaico utilizando um conversor *buck* síncrono. Através da modelagem matemática dos módulos fotovoltaicos, pôde-se determinar os parâmetros necessários fundamentais para emular as principais características elétricas do módulo fotovoltaico KD210GX-LP da *Kyocera*.

A utilização do conversor *buck* síncrono como emulador mostrou-se pertinente e vantajosa em relação ao *buck* tradicional, pelo fato de responder de forma mais eficaz a condições críticas de curto-circuito e circuito aberto, sendo que a tensão de circuito aberto é uma característica fundamental para análise de sistemas fotovoltaicos, dessa forma, tal característica torna os emuladores fotovoltaicos que utilizam a topologia referente ao *buck* tradicional limitada.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema se comportou convenientemente, embora sejam necessárias melhorias no que se refere à obtenção de resultados em um maior número de faixas de irradiações e para variações de temperatura.

Diante da análise dos resultados com as simulações, pôde-se comprovar a operação do emulador fotovoltaico, sendo possível obter as curvas I-V muito próximas às fornecidas pelo *datasheet* do fabricante, para diferentes valores de irradiância.

Finalmente, a experiência obtida ao longo do trabalho foi de suma importância para a ampliação do conhecimento na área de sistemas fotovoltaicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALGADDAFI, A.; BROWN, N.; GAMMON, R.; ALTUWAYJIRI, S. A. **Effect of PV Array Emulator on Power Quality of PV Inverter Compared to a Real PV Array**. IEEE 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), p. 1-6, 2015.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa nº482: Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**. Brasília, 2012.

BARBI, I. **Projeto de fontes chaveadas**: 3ª ed., Florianópolis, Edição do Autor, 2001.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**: 2ª ed., Florianópolis, Edição do Autor, 2011.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

COELHO, R. F. **Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

COLAFERRO, L.. **Energia Solar no Brasil: Um panorama para [Você] entender tudo**. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-no-brasil-panorama/>. Acesso em: 22 mar. 2020.

CUPERTINO, A. F. **Desenvolvimento de um Simulador de Módulos Fotovoltaicos para Testes de Conversores Estáticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DATASHEET. **Painel solar KD210GX-LP da Kyocera**. Disponível em: [http://www.eciwas.com/Products/Solar\\_Panels/Kyocera/KD210GXLP.pdf](http://www.eciwas.com/Products/Solar_Panels/Kyocera/KD210GXLP.pdf). Acesso em: 20 abr. 2020.

DEMPSTER, W.; HENDERSON, E. **Energy and the Environment**. Disponível em: <<http://www.esru.strath.ac.uk/Courseware/Class-16110/>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

DORF R. C., BISHOP R. H.; **Sistemas de Controle Moderno**, 8ª ed. LTC, 2008.

DOLAN, D.; DURAGO, J.; CROWFOOT, J.; TAUFIK. **Simulation of a photovoltaic emulator**, *IEEE North American Power Symposium* 2010, p. 1-7, 2010.

ERICKSON R.W.; MAKSIMOVIĆ, D. **Fundamentals of power electronics**. 2ª Ed., Colorado, Kluwer Academics Publishers, 2001.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos Conversão e Viabilidade Técnico-econômica**. Grupo de Energias PEA - Escola Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREITAS, S. P. **Comparação entre topologias de um emulador fotovoltaico para teste de inversores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de São João Del Rei, Belo Horizonte, 2018.

GADELOVITS, S.; SITBON, M.; KUPERMAN, A. **Rapid Prototyping of a Low-Cost Solar Array Simulator Using an Off-the-Shelf DC Power Supply**. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 10, p. 5278-5284, out. 2014. ISSN 0885-8993.

JIKE, Z.; SHENGTIE, W. **Design and simulation of digital pv simulator based on push-pull forward converter**. *IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, p. 1-5, 2012. ISSN 2157-4839.

KISHOR, N. et al. **Modeling of PV module with consideration of environmental factors**. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, p.1-5, 2010.

KNABBEN, G. C. **Microinversor fotovoltaico não-isolado de dois estágios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

LOPES, L. A. C.; LIENHARDT, A.-M. **A simplified nonlinear power source for simulating pv panels**. *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*.

v. 4, p. 1729–1734, jun. 2003. ISSN 0275-9306.

MATOS, F. B.; CAMACHO, J. R. **Simulação da Influência dos Diferentes Tipos de Dopantes no Comportamento da Homojunção de Células Fotovoltaicas de Silício**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

OKA, M. M. **História da Eletricidade**. Disponível em: <<http://www.lsi.usp.br/~dmi/manuais/HistoriaDaEletricidade.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência - Introdução ao curso**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/%25hist.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

RACHID, A.; KERROUR, F.; CHENNI, R.; DJEGHLOUD, H. **PV Emulator Based Buck Converter using dSPACE Controller**, *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, p. 1-6, jun. 2016.

SOUZA, V. F. **Emulador de um arranjo fotovoltaico baseado no conversor buck**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. **Meio século de história fotovoltaica**. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

VILLALVA, M. G.; DE SIQUEIRA, T. G.; RUPPERT, E. **Voltage regulation of photovoltaic arrays: Small-signal analysis and control design**. *IEEE IET Power Electronics*, v. 3, n. 6, p. 869–880, 2010.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. **Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays**. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, v. 24, n. 9, p. 1198–1208, 2009.

WALTER, O. L. **História da Eletricidade**. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/iee/1HistoriaEletricidade.pdf>>.



Acesso em: 24 mar. 2020.

ZHAO, J. A. **A digitally implemented practical photovoltaic simulator with a double current mode controller**. Dissertation (Master of Science in Electrical Engineering), Missouri University of Science and technology, 2012.

## APÊNDICE A – CÓDIGO EM MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS PARA DETERMINAR A CORRENTE DE SAÍDA DO MÓDULO KD210GX-LP DA KYOCERA

```
% função [] = ajuste_modelo_fotovoltaico ()

clear all

clc
```

### Informações da folha de dados do painel solar KD210GX-LP

```
Isc = 8.58;           % Corrente nominal de curto-circuito [A]

Voc = 33.2;          % Tensão nominal de circuito aberto[V]

Imp = 7.90;          % Corrente na máxima potência [A]

Vmp = 26.6;          % Tensão na máxima potência [V]

Pmax_e = Vmp*Imp;    % Potência máxima experimental [W]

Kv = -0.120;         % Coeficiente tensão/temperatura [V/K]

Ki = 0.00515;        % Coeficiente corrente/temperatura[A/K]

Nc = 54;             % Número de células fotovoltaicas
```

### Cálculos do modelo

```
In = 1000;           % Irradiância nominal[W/m^2] 25oC

Tn = 25 + 273.15;    % Temperatura nominal de operação [K]

%Incremento de Rs

Rsinc = 0.001;

%Maior erro de potência tolerável

tol = 0.0001; %Definição da precisão do modelo

nc = 100; %Definição do número de pontos usados para obter a curva I-V

%Número máximo de iterações para cada valor de "a"

nimax = 500000;

plott = 1; %1 = Permite a plotagem durante a execução do algoritmo

           %0 = Plotagem não ativada
```

```

% Valores de Referência para Rs e Rsh

Rs_max = (Voc - Vmp) / Imp;

Rsh_min = Vmp / (Isc - Imp) - Rs_max;

% Hipóteses iniciais para Rsh e Rs

Rs = 0;

Rsh = Rsh_min;

%O modelo é ajustado na condição nominal

T = Tn;

G = In;

k = 1.3806503e-23; %Boltzmann [J/K]

q = 1.60217646e-19; %Carga do elétron [C]

Vjt = k * Tn / q; % Tensão da junção térmica (nominal)

Vt = k * T / q; % Tensão da junção em função da temperatura
(corrente e temperatura)

perro = Inf; %Valor modelo

ni = 0; %Contador

a = 1; %Valor inicial de a

% Loop iterativo executado até que Pmax,model = Pmax,experimental

while (perro > tol) && (Rsh > 0) && (ni < nimax)

ni = ni + 1;

% Efeito da temperatura e da irradiância na corrente

dT = T - Tn;

Irsn = (Rs + Rsh) / Rsh * Isc; % Corrente fotovoltaica

Irs = (Irsn + Ki * dT) * G / In; % Corrente fotovoltaica real

Icfref = (Isc + Ki * dT) * G / In; % Corrente de curto-circuito

Ion = (Irs - Voc / Rsh) / (exp(Voc / Vt / a / Nc) - 1);

Io = Ion;

```

```

% Increments Rs

Rs = Rs + Rsinc;

Rsh_ = Rsh;

Bpro = 1.8e-19;          % Banda proibida do silício cristalino em J (=1.124 eV)

a = (Kv - Voc/Tn) / ( Nc * Vjt * ( Ki/Irsn - 3/Tn - Bpro/(k*Tn^2) ) );

Rsh = Vmp*(Vmp+Imp*Rs) / (Vmp*Irs-Vmp*Io*exp((Vmp+Imp*Rs)/Vt/Nc/a)+Vmp*Io-Pmax_e);

% Resolvendo a equação I-V para vários valores (V,I)

clear V

clear I

V = 0:Voc/nc:Voc;      % Vetor de tensão

I = zeros(1,size(V,2)); % Vetor de corrente

for j = 1 : size(V,2) %Calcula para vários os valores de tensão

% Resolve  $g = I - f(I,V) = 0$  com Newton-Raphson

g(j) = Irs-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Nc/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rsh-I(j);

while (abs(g(j)) > 0.001)

g(j) = Irs-Io*(exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Nc/a)-1)-(V(j)+I(j)*Rs)/Rsh-I(j);

glin(j) = -Io*Rs/Vt/Nc/a*exp((V(j)+I(j)*Rs)/Vt/Nc/a)-Rs/Rsh-1;

I_(j) = I(j) - g(j)/glin(j);

I(j) = I_(j);

end

end % for j = 1 : size(V,2)

if (plott)

% Plota as curvas I-V e P-V

%Corrente x Tensão

figure(1)

grid on

hold on

title('Curva I-V - Ajustando Rs e Rsh');

```

```

xlabel('V [V]');

ylabel('I [A]');

xlim([0 Voc]);

ylim([0 Isc]);

%Plota a curva I x V

plot(V,I,'LineWidth',2,'Color','k')

%Traça os "pontos notáveis" na curva I x V

plot([0 Vmp Voc],[Isc Imp 0],'o','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','k')

%Potência x Tensão

figure(2)

grid on

hold on

title('Curva P-V - Ajuste da potência máxima');

xlabel('V [V]');

ylabel('P [W]');

xlim([0 Voc])

ylim([0 Vmp*Imp]);

end % if(plott)

% Calcula a potência usando a equação I-V

P = (Irs-Io*(exp((V+I.*Rs)/Vt/Nc/a)-1)-(V+I.*Rs)/Rsh).*V;

Pmax_m = max(P);

perro = (Pmax_m-Pmax_e);

if (plott)

%Plota a curva P x V

plot(V,P,'LineWidth',2,'Color','k')

%Traça os "pontos notáveis" na curva de potência

plot([0 Vmp Voc],[0 Vmp*Imp 0],'o','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','k')

end % if (plott)

```

```

end % while (erro>tol)

if (Rsh<0) Rsh = Rsh_
end

```

## Saídas

```

%Curva I-V

figure(3)

grid on

hold on

title('Ajuste curva I-V');

xlabel('V [V]');

ylabel('I [A]');

xlim([0 max(V)*1.1]);

ylim([0 max(I)*1.1]);

plot(V,I,'LineWidth',2,'Color','k') %

plot([0 Vmp Voc ],[Isc Imp 0 ],'o','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','k')

% Curva P-V

figure(4)

grid on

hold on

title('Ajuste curva P-V');

xlabel('V [V]');

ylabel('P [W]');

xlim([0 Voc*1.1]);

ylim([0 Vmp*Imp*1.1]);

plot(V,P,'LineWidth',2,'Color','k')

plot([0 Vmp Voc ],[0 Pmax_e 0 ],'o','LineWidth',2,'MarkerSize',5,'Color','k')

disp(sprintf('Método 1 - Modelo Completo \n'));

```

```

disp(sprintf(' Rsh_min = %f',Rsh_min));

disp(sprintf('      Rsh = %f',Rsh));

disp(sprintf(' Rs_max = %f',Rs_max));

disp(sprintf('      Rs = %f',Rs));

disp(sprintf('      a = %f',a));

disp(sprintf('      T = %f',T-273.15));

disp(sprintf('      G = %f',G));

disp(sprintf(' Pmax,m = %f (modelo)',Pmax_m));

disp(sprintf(' Pmax,e = %f (experimental)',Pmax_e));

disp(sprintf('      tol = %f',tol));

disp(sprintf('P_erro = %f',perro));

disp(sprintf('      Irs = %f',Irs));

disp(sprintf('      Icfref = %f',Icfref));

disp(sprintf('      Ion = %g',Ion));

disp(sprintf('\n\n'));

```

Método 1 - Modelo Completo

```

Rsh_min = 38.282204

      Rsh = 101.197250

Rs_max = 0.835443

      Rs = 0.276000

      a = 1.068067

      T = 25.000000

      G = 1000.000000

Pmax,m = 210.138267 (modelo)

Pmax,e = 210.140000 (experimental)

      tol = 0.000100

```

P\_erro = -0.001733

Irs = 8.603527

Icfref = 8.580000

Ion = 1.53969e-09