

Bruno Vale Barbosa Eiterer

**Modelagem, Simulação e Testes de um Sistema de
Energia Aplicado a Nanossatélites**

Florianópolis

2017

Bruno Vale Barbosa Eiterer

Modelagem, Simulação e Testes de um Sistema de Energia
Aplicado a Nanossatélites

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Universidade Federal de
Santa Catarina, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Leonardo Kessler Slongo,
Ms.E.
Coorientador: Eduardo Augusto Bezerra,
Ph.D.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Eiterer, Bruno

Modelagem, Simulação e Testes de um Sistema de
Energia Aplicado a Nanossatélites / Bruno Eiterer ;
orientador, Leonardo Kessler Slongo, coorientador,
Eduardo Augusto Bezerra, 2017.
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Nanossatélites. 3.
Sistemas de Energia. 4. Modelagem. 5. Simulação. I.
Kessler Slongo, Leonardo. II. Augusto Bezerra,
Eduardo. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV.
Título.

Bruno Vale Barbosa Eiterer

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E TESTES DE UM SISTEMA DE ENERGIA APLICADO A NANOSSATÉLITES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica, e aprovado em sua forma plena final pela Universidade Federal de Santa Catarina.

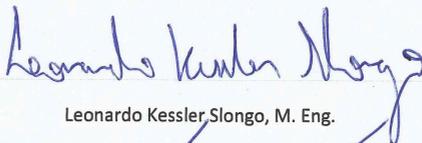
Florianópolis, 01 de dezembro de 2017



Prof. Dr. Renato Lucas Pacheco

Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Leonardo Kessler Slongo, M. Eng.

Presidente



Prof. Samir Ahmad Mussa, Dr.



Sara Vega Martínez, M. Eng.

AGRADECIMENTOS

À equipe do EPS do FloripaSat, Leonardo Slongo, Sara Vega e Túlio Gomes, por todos as discussões, testes e por todos os momentos passados juntos nesses quatro anos. Aos demais membros do FloripaSat, por todo o companheirismo. Aos meu pais, Berenice e Antonio Carlos, por todo seu apoio. Ao meu irmão, Caio, por toda a ajuda durante o curso. À minha irmã, Letícia, por todas as risadas, séries e músicas compartilhadas. Ao professor e coorientador Eduardo Bezerra, pela orientação em todos os anos de trabalho.

RESUMO

Atualmente satélites fazem parte do cotidiano das pessoas, ainda que de forma invisível. Apesar disso, o custo de desenvolvimento torna inacessível o projeto realizado por grande parte das empresas e universidades. Por isso, foi criado o padrão *Cubesat*, que introduziu o conceito de satélites em forma de cubo de 10 cm de aresta. Este padrão apresenta novos desafios, principalmente na captação de energia, devido a pequena área disponível para painéis solares. Além disso, apesar do custo reduzido, os baixos orçamentos também são um desafio. Portanto, é necessário realizar modelagens e simulações antes de se iniciar o projeto do satélite em si, de forma a reduzir os custos. Este trabalho busca modelar, simular e validar o sistema de energia de um nanossatélite, para facilitar projetos futuros.

Palavras-Chave: Nanossatélites. Sistemas de Energia. Modelagem. Simulação.

ABSTRACT

Nowadays satellites are a daily part of people life, even if they are invisible. In spite of that, the development costs make projects inaccessible for the majority of companies and universities. Because of that it was created the Cubesat standard, which introduced the concept of 10 cm edge cube satellites. This standard has new challenges, specially on energy harvesting, due to the small area available for solar panels. Besides that, in spite of the reduced cost, the tight budgets are also a challenge. Because of that it is necessary to model and perform simulations before starting the real project, to reduce the costs. This work presents modelling, simulation and validation of a nanosatellite energy system, to make future projects easier.

Keywords: Nanosatellites. Energy Systems. Modelling. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Referência de Tamanho de um Cubesat	16
Figura 2 – Diagrama de Blocos do Sistema	17
Figura 3 – Circuito equivalente de uma célula solar	20
Figura 4 – Curva IxV (temperatura)	21
Figura 5 – Curva PxV (temperatura)	21
Figura 6 – Curva IxV (irradiância)	22
Figura 7 – Curva PxV (irradiância)	22
Figura 8 – Interface Gráfica Para Ajuste da Curva	24
Figura 9 – Curvas para 500 W/m ²	25
Figura 10 – Curvas para 600 W/m ²	25
Figura 11 – Curvas para 700 W/m ²	25
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo P&O	26
Figura 13 – Circuito com conversor <i>Buck</i> para casamento de impedância	30
Figura 14 – Circuito com conversor <i>Boost</i> para controle da tensão	31
Figura 15 – Circuito da Primeira Etapa	31
Figura 16 – Circuito da Segunda Etapa	32
Figura 17 – Corrente de Carga	38
Figura 18 – Irradiância	39
Figura 19 – Bloco do Painel Solar	40
Figura 20 – Conversor <i>Boost</i>	40
Figura 21 – Função do MPPT	40
Figura 22 – Fonte de Corrente da Carga	41
Figura 23 – Conversor da Carga	41
Figura 24 – Bloco de Simulação de uma Bateria	41
Figura 25 – Tensão do Painel Solar	42
Figura 26 – Corrente do Painel Solar	42
Figura 27 – Potência do Painel Solar	43
Figura 28 – Tensão da Bateria 1	43
Figura 29 – Tensão da Bateria 2	44
Figura 30 – Bancada de Testes	46
Figura 31 – Corrente do Painel 1	46
Figura 32 – Corrente do Painel 2	47

Figura 33 – Corrente do Painel 3	47
Figura 34 – Potência do Painel 1	48
Figura 35 – Potência do Painel 2	48
Figura 36 – Potência do Painel 3	49
Figura 37 – Comparação das Potências	49
Figura 38 – Tensão do Painel 1	50
Figura 39 – Tensão do Painel 2	50
Figura 40 – Tensão do Painel 3	51
Figura 41 – Tensão da Bateria 1	52
Figura 42 – Tensão da Bateria 2	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo do Pannel Solar	23
Tabela 2 – Consumo do Computador de Bordo	35
Tabela 3 – Consumo dos Rádios	36
Tabela 4 – Consumo do Sistema de Energia	37

LISTA DE SÍMBOLOS

D Razão Cíclica

ΔI_{sc} Coeficiente de Variação da Corrente de Curto-Circuito com a temperatura

E Irradiância Incidente

E_0 Irradiância de Referência

I Corrente da Célula Solar

I_D Corrente do Diodo

I_0 Corrente de Saturação na Sombra do Diodo

I_{ph} Corrente Fotogerada do Painel

I_{pv} Corrente do Painel Solar

I_{rp} Corrente do Resistor Paralelo

I_{sc} Corrente de Curto-Circuito do Painel

k Constant de Boltzmann

n Fator de idealidade do Diodo

q Carga de um Elétron

R_p Resistência Paralela

R_s Resistência Série

T_0 Temperatura de Referência

T_c Temperatura da Célula Solar

V Tensão da Célula Solar

V_{pv} Tensão do Painel Solar

SUMÁRIO

	Lista de Figuras	7
	Lista de Tabelas	9
	Lista de Símbolos	11
	Sumário	12
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Organização do trabalho	18
2	PAINEL SOLAR	19
2.1	Introdução	19
2.2	Como Funcionam as Células Solares	19
2.3	Circuito Equivalente de um Painel Solar	19
2.4	Modelo do Painel Real	22
2.5	MPPT	23
2.5.1	Perturba e Observa	23
2.5.2	Condutância Incremental	26
2.5.3	Otimização por Colônia de Formigas	27
2.5.4	Outros Algoritmos	28
2.6	Conclusões	28
3	FUNCIONAMENTO E MODELAGEM DOS CONVER- SORES CC-CC	29
3.1	Introdução	29
3.2	Casamento de Impedância	29
3.3	Controle Direto da Tensão	30
3.4	Conclusões	32
4	DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS	35
4.1	Introdução	35

4.2	Computador de Bordo	35
4.3	Rádios e Amplificadores de Potência	36
4.4	Sistema de Energia	36
4.5	<i>Payloads</i>	38
4.6	Conclusões	38
5	SIMULAÇÃO DO SISTEMA	39
5.1	Introdução	39
5.2	Entrada e Blocos Principais	39
5.3	Resultados	41
5.4	Conclusões	44
6	TESTE NA BANCADA DO SISTEMA REAL	45
6.1	Introdução	45
6.2	Descrição da Bancada	45
6.3	Resultados	45
6.4	Análise dos Resultados	51
6.5	Conclusões	53
7	CONCLUSÕES	55
	Bibliografia	57

1 INTRODUÇÃO

A primeira ideia da criação de satélites artificiais surgiu em 1728, de Isaac Newton, no terceiro volume da obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural), chamado de *De Mundi Systemate* (Sobre o Sistema do Mundo), no qual Newton propôs que um tiro de canhão poderia entrar em órbita da terra caso fosse disparado de uma montanha bastante elevada a uma velocidade específica, chamada de velocidade orbital [1].

Em 1903, Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky publicou o trabalho *Exploração Espacial Usando Propulsão a Jato*, no qual apareceram os cálculos da velocidade orbital e como um foguete multiestágio poderia atingir esta velocidade [2]. Outro trabalho teórico que surgiu em seguida é *O problema da Viagem Espacial (Das Problem der Befahrung des Weltraums - der Raketen-Motor*, em alemão), escrito por Herman Potočnik, que trazia as ideias de utilizar satélites para observação terrestre, experimentos científicos, satélites geoestacionários, comunicações através de rádios e até uma ideia preliminar de uma estação espacial [3]. Em 1945, Arthur C. Clarke publicou o artigo *Transmissores extra-terrestres - Estações em Foguetes podem Proporcionar Cobertura de Rádio Mundial? (Extra-Terrestrial Relays – Can Rocket Stations Give Worldwide Radio Coverage?)*, no qual foi apresentada a ideia de se utilizar satélites geoestacionários para comunicação [4].

Em 1957 foi lançado pela União Soviética o primeiro satélite artificial, chamado de Sputnik 1, o qual foi utilizado para medir a densidade das camadas superiores da atmosfera através do empuxo aplicado sobre ele. O seu sucesso levou os Estados Unidos da América a aumentarem significativamente seus investimentos no setor aeroespacial, dando início a chamada corrida espacial [5]. Com isso, em 1961 já existiam mais de 100 satélites em órbita da terra [6].

Atualmente existem mais de 4000 satélites operacionais em órbita. Eles são utilizados em várias aplicações muito comuns na vida moderna, como comunicação (internet, celulares, transmissões de TV), observação da terra, defesa e *Global Positioning Systems (GPS)*[7].

Apesar disso, apenas alguns países e empresas conseguem desenvol-

ver e lançar satélites, devido a sua complexidade e principalmente devido ao elevadíssimo custo. Por conta disso, estão sendo desenvolvidos novos padrões para desenvolvimento de satélites, de forma a propiciar a oportunidade para pequenas empresas e até universidades de participarem do desenvolvimento espacial [8]. Dentre estes novos padrões foi criado em 1999, por Jordi Puig-Suari e Bob Twiggs o *Cubesat* [9], que é um satélite em forma de cubo com arestas de 10 cm e massa menor ou igual a 1,33 kg [10]. A Figura 1 pode ser usada para se ter uma ideia do tamanho de um *Cubesat*.



Figura 1 – Referência de Tamanho de um Cubesat

Um dos novos desafios de desenvolvimento para *Cubesats* é a limitação no orçamento, a qual torna necessária a realização de modelagens e simulações antes do desenvolvimento do produto, de forma a reduzir os custos. Outro desafio é a limitação na área disponível para captação e armazenamento de energia devido ao tamanho dos satélites[11]. Tendo em vista esta limitação no aspecto energético, é necessário projetar o sistema cuidadosamente de forma que a energia fornecida pelos painéis solares e armazenadas nas baterias seja suficiente para alimentar as cargas do sistema.

Os *Cubesats* são, em geral, compostos por um Computador de Bordo, responsável por gerenciar os dados do satélite, um *Electrical Power System* (EPS), responsável por captar, armazenar e distribuir energia para os outros módulos, um Sistema de Comunicação, capaz de enviar e receber dados e comandos para a Terra e, por fim, os *payloads*, que são a carga útil do sistema, ou seja, realizam a função principal do satélite.

Os EPS usam como principal entrada de energia painéis solares, que são a fonte mais abundante no espaço. Outra maneira de se captar energia é

através de termogeradores. Para armazenar a energia são usadas geralmente baterias Li-Ion, porém alguns projetos utilizam supercapacitores ou baterias de composição diferente.

Neste trabalho será apresentado o EPS do *Cubesat* FloripaSat, atualmente em desenvolvimento na UFSC, com foco no gerenciamento da energia, desde a entrada até o consumo dos outros módulos. Este EPS tem como entrada de energia painéis solares, que são conectados através de um conversor *boost* a duas baterias Li-Ion conectadas em série. Um algoritmo *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) é utilizado para operar os painéis com máxima eficiência. O sistema distribui a energia para os outros módulos do satélite (computador de bordo, sistema de comunicação e *payloads*) em diferentes tensões através de conversores CC-CC integrados. Um diagrama de blocos deste sistema pode ser visto na figura 2.

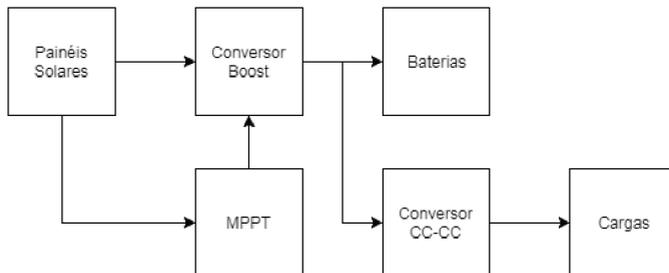


Figura 2 – Diagrama de Blocos do Sistema

Será realizada a modelagem do sistema, simulações e, por fim, testes com o sistema real, de forma que será possível validar a simulação para trabalhos futuros assim como verificar se o sistema projetado está de acordo com o necessário.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos gerais do trabalho são: modelar, simular e testar o funcionamento do módulo de energia do nanossatélite Floripa-Sat.

Como objetivos específicos podemos citar:

- Modelar os painéis solares
- Modelar o conversor *Boost* da entrada
- Modelar o consumo do *Cubesat*
- Simular o sistema completo
- Realizar testes com o sistema real
- Comparar os resultados reais com os simulados

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta brevemente o funcionamento dos painéis solares, um circuito equivalente com componentes representando a conversão de energia solar em energia elétrica e as perdas, um modelo do painel real a ser utilizado no trabalho e por fim algoritmos para operação do painel com máxima eficiência.

No capítulo 3 são apresentadas duas maneiras de se utilizar conversores CC-CC no controle da operação de painéis solares e uma modelagem simplificada a ser utilizada na simulação do sistema.

O próximo passo é o dimensionamento das cargas do sistema (capítulo 4), para possibilitar a verificação do funcionamento do sistema na simulação. Para tal foram utilizadas informações fornecidas nos *datasheets* dos principais componentes de cada módulo do satélite (comunicação, computador de bordo, sistema de energia e *payloads*).

Nos capítulos 5 e 6, respectivamente, são apresentados as simulações e testes realizados na bancada para verificar se o sistema projetado atende os requisitos de carga e também validar a simulação realizada em comparação com o sistema real.

Ao final do trabalho são apresentadas as conclusões sobre o que foi proposto e desenvolvido (capítulo 7).

2 PAINEL SOLAR

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresentará uma breve introdução sobre o funcionamento de células solares, explicando o efeito fotovoltaico, seguido de um circuito equivalente utilizado para modelar um painel real, e, por fim, algoritmos utilizados para operar os painéis sempre com máxima eficiência.

2.2 COMO FUNCIONAM AS CÉLULAS SOLARES

O funcionamento de células solares é baseado no efeito fotovoltaico, ou seja, a geração de tensão ou corrente elétrica a partir da incidência de luz. O efeito fotovoltaico ocorre da seguinte maneira: em um semicondutor ideal existem dois níveis de energia que elétrons podem ser excitados, representados pela camada de valência, com energia baixa, e a camada de condução, com energia mais alta. Entre estas duas camadas existe o chamado *band-gap*, uma região com níveis de energia que os elétrons não podem assumir. Quando um fóton entra em contato com o semicondutor os elétrons na camada de valência absorvem sua energia e passam para a camada de condução, gerando uma corrente elétrica. Como não é possível que os elétrons possuam níveis intermediários de energia, fótons que não possuam energia superior ao *bandgap* não são absorvidos e passam sem interagir com a célula[12].

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM PAINEL SOLAR

Em uma célula real existem perdas causadas por aquecimento no movimento dos elétrons, por impurezas no material que geram novos níveis de energia dentro do *bandgap* e também por recombinação na junção p-n [13]. Portanto para representar as células solares através de um circuito equivalente é necessário uma fonte de corrente associada com alguns componentes que representam as perdas.

O modelo para uma célula aqui utilizado é apresentado em [14]. O circuito equivalente é composto por uma fonte de corrente I_{ph} , um diodo D , uma resistência paralela R_p e uma resistência série R_s . Este circuito pode ser

visto na Figura 3, onde I_{ph} é a corrente fotogerada do painel, I_D é a corrente do diodo, I_{Rp} é a corrente na resistência paralela, I é a corrente da célula e V é a tensão da célula.

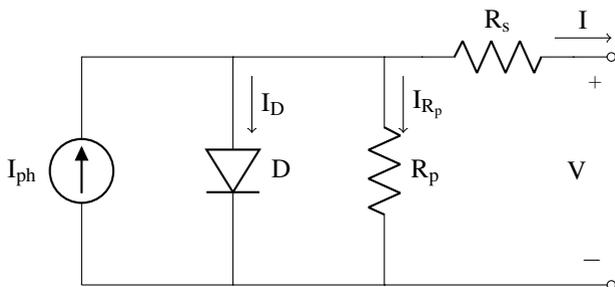


Figura 3 – Circuito equivalente de uma célula solar

A partir da análise do circuito equivalente, temos a seguinte relação entre a corrente e a tensão da célula:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (2.1)$$

Por simplicidade e sem perda de precisão I_{ph} pode ser determinada diretamente pela corrente de curto-circuito I_{sc} do painel, respeitando-se a dependência com a irradiância E e a temperatura da célula T_c (equação 2.2), assim pode-se obtê-la diretamente dos *datasheets* fornecidos pelos fabricantes.

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot [1 + \Delta I_{sc} (T_c - T_0)] \quad (2.2)$$

A corrente no diodo é dada pela equação 2.3, onde I_0 é a corrente de saturação quando não há iluminação sobre a célula, q é a carga de um elétron, n é o fator de idealidade, k é a constante de Boltzmann e T_c é a temperatura da célula [15].

$$I_D = I_0 \left(e^{-\frac{q(V+I R_s)}{n k T_c}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

A corrente no resistor R_p pode ser obtida através da equação 2.4, conhecida como Lei de Ohm.

$$I_{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

Combinando as equações apresentadas, obtém-se a equação 2.5, que mostra a relação entre a corrente e a tensão da célula solar a partir dos parâmetros do circuito equivalente.

$$I = I_{ph} - I_o \left(e^{-\frac{q(V+I \cdot R_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.5)$$

Quando várias células são conectadas em série e/ou em paralelo é formado um painel solar. As curvas características de corrente por tensão e potência por tensão de um painel podem ser vistas nas figuras 4, 5, 6 e 7, nas quais é evidenciada a dependência com a temperatura e a irradiância.

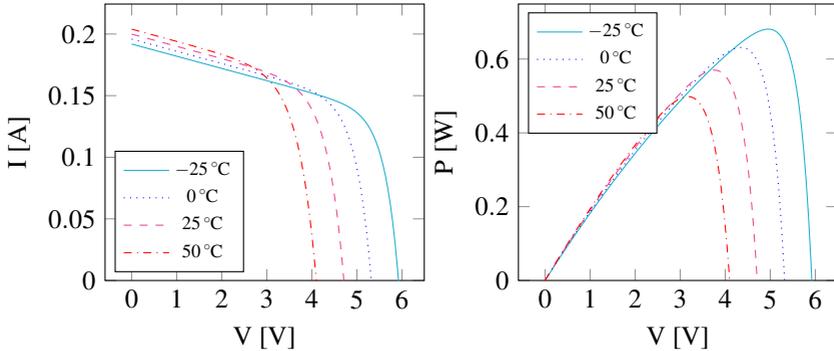


Figura 4 – Curva $I \times V$ (temperatura)

Figura 5 – Curva $P \times V$ (temperatura)

Como podemos ver nas curvas de potência, existe um ponto de máximo, conhecido como *Maximum Power Point* (MPP), e que a tensão correspondente a este ponto varia mais com a variação da temperatura do painel do que com a variação da irradiância incidente. Devido a estas variações, para operar o painel sempre com a maior eficiência é necessário aplicar uma técnica de controle conhecida como MPPT [16].

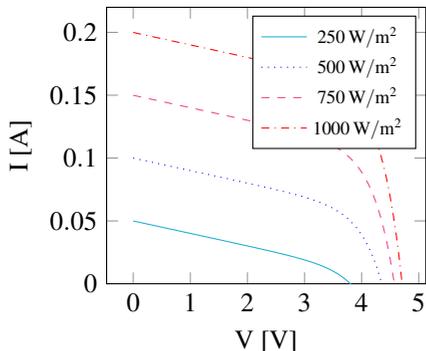


Figura 6 – Curva IxV (irradiância)

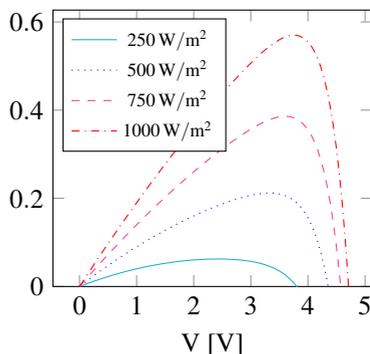


Figura 7 – Curva PxV (irradiância)

2.4 MODELO DO PAINEL REAL

Os painéis aqui utilizados são compostos por 4 ramos em paralelo formados por 10 células KXOB22-12X1F em série, totalizando 40 células solares em um painel. Este é o número máximo de células em um painel das dimensões de um *cubesat*.

O primeiro passo para a obtenção do modelo do painel foi levantar curvas experimentais do painel utilizado. Para tal, foi utilizado o canal quatro do analisador de potência N6705B, o qual pode funcionar como carga eletrônica, de forma que é possível aplicar uma tensão positiva nos terminais do painel e drenar a corrente resultante. Uma rampa de tensão foi aplicada ao painel e os valores de corrente correspondentes foram medidos. Para melhorar a precisão do modelo foram determinadas três regiões de operação, baseadas em três regiões de irradiância, nas quais os testes de bancada serão realizados. Assim três curvas experimentais foram obtidas.

Para encontrar os parâmetros do circuito equivalente foi usada uma técnica de ajuste manual da curva, de forma que os parâmetros foram determinados de forma iterativa, visando minimizar o erro entre a curva do modelo e uma curva medida. Para tal, foi criada uma interface gráfica no Matlab (Figura 8). Esta interface utiliza o módulo *uicontrol*, que gera quatro *sliders* para controlar os parâmetros R_s , I_o , R_p e n (identificados como R_s , I_r , R_{sh} e A , devido à nomenclatura em inglês). Para modificar o valor de um parâme-

tro, pode-se deslizar o *slider* ou clicar nas setas nas extremidades dos *sliders*. A cada mudança de um parâmetro a curva do modelo e a curva de erro são atualizadas, de modo que é possível verificar se houve uma melhora com a modificação realizada.

Os resultados estão na tabela 1 e nas figuras 9, 10 e 11. Foi possível manter o erro abaixo de 5 % em toda a curva, exceto em regiões próximas à tensão de circuito aberto, as quais não são relevantes para este trabalho.

Irradiância [W m^{-2}]	R_s [Ω]	R_p [Ω]	I_o [nA]	n
500	0,15	599,602	154	2
600	0,15	229,601	154	2
700	0,15	140,801	154	2

Tabela 1 – Parâmetros do Modelo do Painel Solar

2.5 MPPT

Em geral, é muito custoso determinar pontos de operação possíveis em quantidade suficiente para controlar o sistema MPPT de forma satisfatória, portanto é necessário o emprego de algoritmos para determinar qual deve ser o ponto de operação em tempo real [17]. Nas seguintes subseções serão descritos alguns destes algoritmos.

2.5.1 Perturba e Observa

O algoritmo Perturba e Observa (P&O) funciona de acordo com o fluxograma da Figura 12, no qual n é a iteração atual e P é a potência do painel. Primeiramente é gerada uma perturbação em sentido arbitrário no ponto de operação do painel. Em seguida, verifica-se se a potência entregue aumentou ou diminuiu em relação a iteração anterior. Caso tenha aumentado, mantém-se o sentido da perturbação aplicada, caso contrário o sentido é invertido. Desta forma o sistema irá caminhar na curva de potência até atingir o MPP, sobre o qual ficará oscilando. Com isto evidencia-se um importante *trade-off*: aumentar o passo da perturbação aumenta a velocidade com que o sistema atinge o MPP, mas ao mesmo tempo faz com que a oscilação fique mais

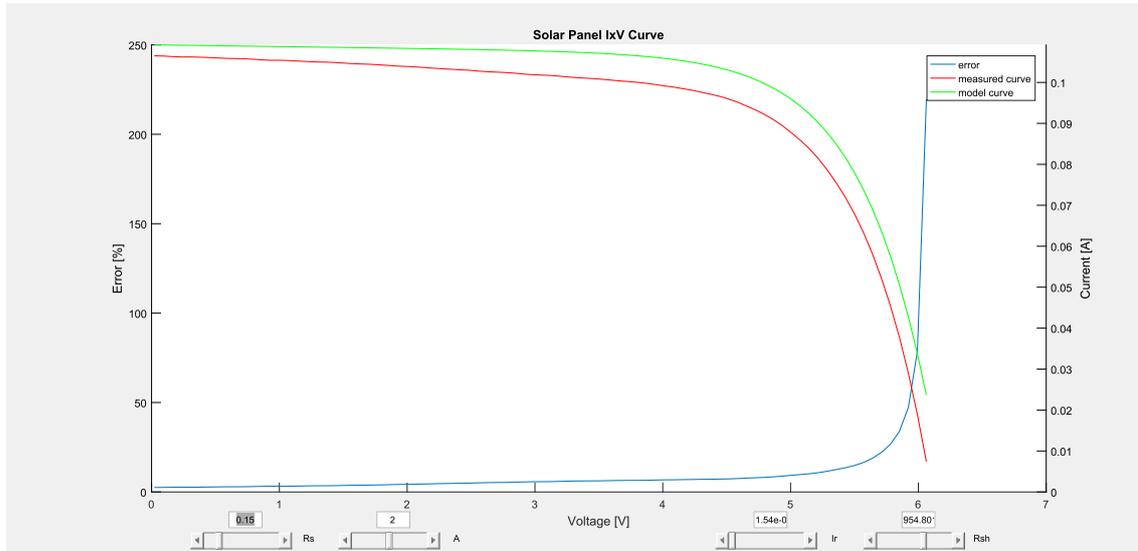
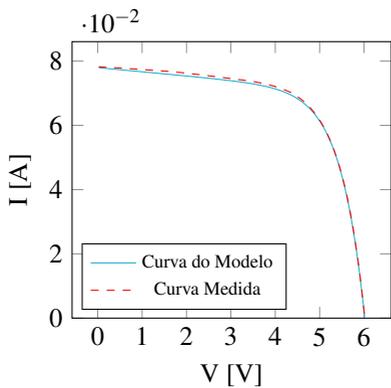
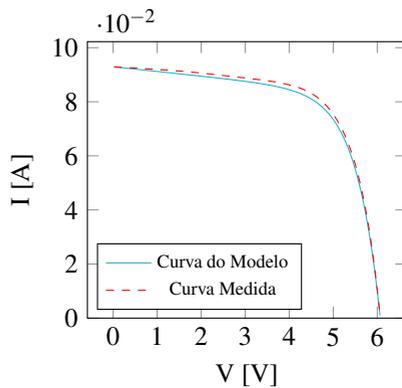
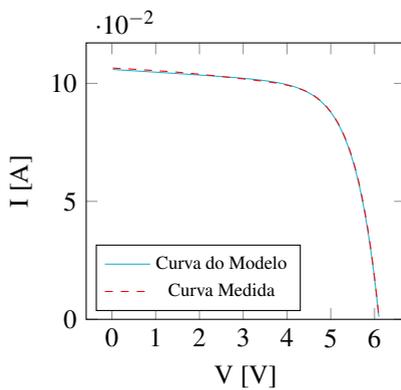


Figura 8 – Interface Gráfica Para Ajuste da Curva

Figura 9 – Curvas para 500 W/m^2 Figura 10 – Curvas para 600 W/m^2 Figura 11 – Curvas para 700 W/m^2

longe do MPP, portanto é necessário encontrar um passo que satisfaça todos os requisitos de projeto.

A grande vantagem deste algoritmo é a sua simplicidade na implementação, que aliado com a sua alta eficiência quando implementado corretamente torna-o um dos algoritmos mais utilizados. A principal desvantagem é que este algoritmo demora a responder a variações grandes no ambiente. [18].

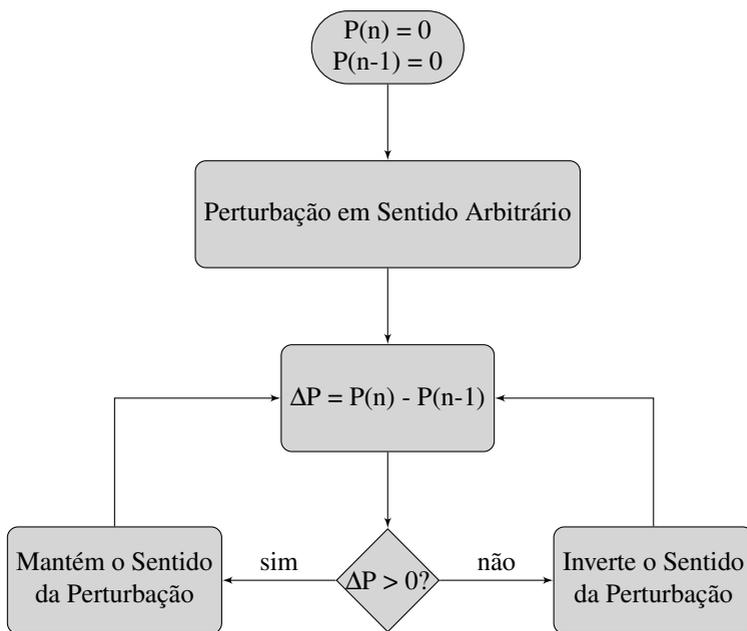


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo P&O

2.5.2 Condutância Incremental

O método da condutância incremental busca encontrar o MPP utilizando-se do fato que a derivada da potência em relação à tensão no MPP é nula, sendo este um ponto de máximo. Para fazer o rastreamento do MPP é realizada a comparação da condutância incremental com a condutância instantâ-

nea [18]. Para verificar como isto é possível vamos fazer a seguinte derivação, partindo da derivada da potência em relação a tensão:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} \quad (2.6)$$

Aplicando a regra do produto no lado direito equação 2.6 obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{dI}{dV} \cdot V + \frac{dV}{dV} \cdot I \\ &= \frac{dI}{dV} \cdot V + I \end{aligned} \quad (2.7)$$

Pela curva PxV do painel podemos obter as seguintes afirmações:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} & \text{operando no MPP} \\ \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} & \text{operando à esquerda do MPP} \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} & \text{operando à direita do MPP} \end{array} \right.$$

Assim, comparando a condutância incremental e a condutância instantânea é possível saber em qual posição da curva o painel está operando e tomar a atitude adequada. Este método apresenta resultados melhores que o P&O na maioria dos casos, principalmente quando as condições ambientais variam rapidamente, porém a complexidade dos cálculos realizados reduz um pouco seu uso [19].

2.5.3 Otimização por Colônia de Formigas

O algoritmo Otimização por Colônia de Formigas (ACO) é um algoritmo probabilístico usado para encontrar soluções globais para problemas não-lineares. Ele tenta imitar o comportamento de formigas em busca de comida para encontrar o melhor caminho em um grafo.

Quando formigas saem em busca de comida, inicialmente seu movimento é em direções aleatórias, até que seja encontrada comida. Quando isto acontece elas retornam à colônia, deixando feromônios no caminho, de forma que as próximas formigas irão seguir o mesmo caminho. Em caminhos mais longos os feromônios evaporam mais rápido, de forma que as formigas irão cada vez mais seguir os caminhos de menor distância [20].

Para realizar MPPT com o algoritmo ACO primeiramente cada formiga do algoritmo é inicializada em um ponto aleatório de operação. Em seguida, o ferômonio é aumentado nos pontos de maior potência. A cada próxima iteração as formigas são inicializada em pontos distribuídos de forma aleatória em torno dos pontos com maior ferômonio. Assim é possível chegar ao MPP [21].

Este algoritmo apresenta uma melhora em relação aos outros quando os painéis são operados parcialmente sob sombras, no qual a curva de potência apresenta vários máximos locais [21].

2.5.4 Outros Algoritmos

Em sistemas mais modernos outros tipos de algoritmos também são utilizados. Dentre eles podemos citar redes neurais [22], algoritmos genéticos [23], entre outros.

Para este trabalho foi escolhido o algoritmo P&O, devido a sua eficiência aliada a sua grande simplicidade. O algoritmo foi implementado em um processador MSP430F6659. Devido a limitação no *clock* deste processador, apenas trinta e dois passos de razão cíclica são possíveis.

2.6 CONCLUSÕES

Com o que foi desenvolvido e exposto neste capítulo foi possível entender o princípio básico de funcionamento das células solares. Além disso, foi apresentada uma interface gráfica para obter valores otimizados para os parâmetros do circuito equivalente das células. Também foi apresentada uma discussão sobre algoritmos MPPT, cada um com suas vantagens e desvantagens. Com isso os modelos necessários para uma simulação de painéis solares foram obtidos.

3 FUNCIONAMENTO E MODELAGEM DOS CONVERSORES CC-CC

3.1 INTRODUÇÃO

Para possibilitar o controle do ponto de operação do painel são empregados conversores CC-CC com diferentes técnicas de controle. As mais comuns são o casamento de impedância entre a carga e a impedância vista pelos terminais do painel [24], [25] e o controle direto da tensão nos terminais do painel, quando a carga é um barramento com tensão constante [26], [27], [28]. Este capítulo apresenta uma modelagem para cada caso, primeiramente com um conversor *Buck* e depois com um conversor *Boost*.

3.2 CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

A impedância vista pelos terminais do painel determina o ponto de operação, de acordo com a equação 3.1. Por conta deste fator, dificilmente um painel opera no MPP quando conectado a uma carga arbitrária em um ambiente arbitrário.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

Para exemplificar o funcionamento dos conversores CC-CC no controle da impedância vista pelos terminais do painel solar vamos considerar o caso de ser necessária tensão mais baixa na carga do que no painel, no qual é utilizado um conversor *Buck*. O circuito deste sistema pode ser visto na Figura 13.

As equações 3.2 e 3.3 representam o ganho estático de tensão e corrente do conversor *Buck*.

$$\frac{V_L}{V_{pv}} = D \quad (3.2)$$

$$\frac{I_{pv}}{I_L} = D \quad (3.3)$$

Combinando estas duas equações na equação 3.4 obtemos a relação entre a impedância de entrada e saída do conversor. Como a impedância de

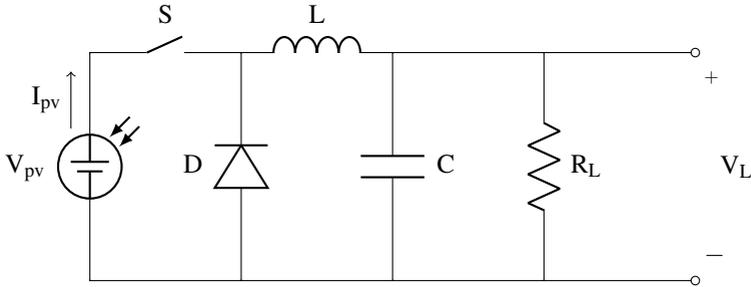


Figura 13 – Circuito com conversor *Buck* para casamento de impedância

entrada é a impedância de saída do painel (carga do painel), podemos variar a razão cíclica D e conseqüentemente variar o ponto de operação do painel, de forma a sempre operar no ponto de máxima potência.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{V_{pv}}{I_{pv}} \\
 &= \frac{V_L}{D} \cdot \frac{1}{I_L \cdot D} \\
 &= \frac{1}{D^2} \cdot \frac{V_L}{I_L} \\
 &= \frac{1}{D^2} \cdot R_L
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

3.3 CONTROLE DIRETO DA TENSÃO

Para exemplificar o controle da tensão do painel solar vamos considerar o caso em que a tensão na saída é maior do que na entrada, no qual é utilizado um conversor *Boost*. O circuito completo pode ser visto na Figura 14.

Considerando todos os componentes ideais pode-se fazer a análise do circuito com o objetivo de se obter a relação entre a tensão da bateria e a tensão do painel a partir do fato de que a tensão média no indutor é nula.

Na primeira etapa, com a chave fechada, temos o circuito da Figura 15. A tensão no indutor nesta etapa é dada na equação 3.5

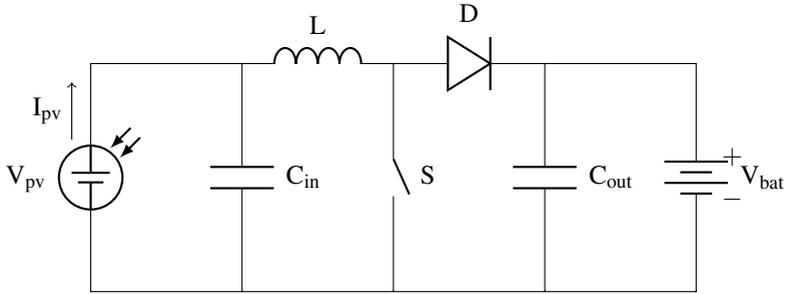


Figura 14 – Circuito com conversor *Boost* para controle da tensão

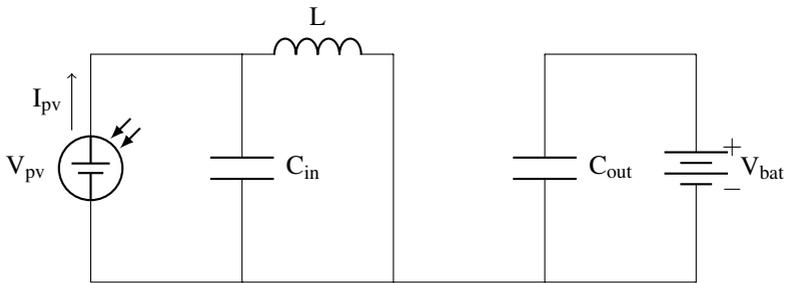


Figura 15 – Circuito da Primeira Etapa

$$V_L = V_{pv} \quad (3.5)$$

Na segunda etapa a chave é aberta, com isto a corrente no indutor é reduzida, causando uma inversão na polaridade da tensão no indutor, de forma que o diodo é polarizado e passa a conduzir. O circuito desta etapa está na Figura 16. A tensão no indutor é dada pela equação 3.6.

$$V_L = V_{pv} - V_{bat} \quad (3.6)$$

Considerando que a chave fica fechada pelo tempo DT e aberta pelo tempo $(1-D)T$, onde D é a razão cíclica e T o período, a tensão média no

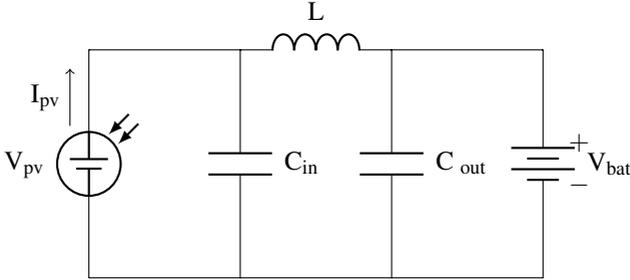


Figura 16 – Circuito da Segunda Etapa

indutor é dada pela equação 3.7.

$$\begin{aligned}
 V_L &= \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} V_{pv} dt + \int_{DT}^T V_{pv} - V_{bat} dt \right) \\
 &= \frac{1}{T} [V_{pv} \cdot DT + (V_{pv} - V_{bat})(T - DT)] \\
 &= V_{pv} \cdot D + V_{pv} - V_{pv} \cdot D - V_{bat} + V_{bat} \cdot D \\
 &= V_{pv} + V_{bat}(D - 1)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Como a tensão média no indutor é nula temos:

$$\begin{aligned}
 V_{pv} + V_{bat}(D - 1) &= 0 \\
 V_{pv} &= V_{bat}(1 - D)
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Com isso vemos que é possível controlar a tensão do painel diretamente pelo controle da razão cíclica do conversor.

Esta estratégia de controle direto com conversor *Boost* será a implementada neste trabalho, devido ao fato de que os painéis trabalham em torno de 5 V e as duas baterias em série apresentam uma tensão de 5,4 V quando estão descarregadas ao limite inferior.

3.4 CONCLUSÕES

Como apresentado, obteve-se uma equação que representa a interface entre os painéis solares e a carga do sistema para dois casos, um com a carga

representada por um resistor, na qual a tensão é fixada pelo conversor, e um com a carga representada por um barramento de tensão constante, no qual a tensão do painel é fixada diretamente pelo conversor. Com estas equações em mãos é possível implementar os modelos dos conversores em uma simulação.

Outro aspecto interessante é que, assim como no caso deste trabalho, na eventualidade de se haver um problema com o barramento de tensão constante, por exemplo a bateria ser desconectada do sistema, a carga poderia voltar a ser representada por um resistor, retornando ao primeiro caso. Assim o que foi exposto cobre os dois casos possíveis de operação do sistema.

4 DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS

4.1 INTRODUÇÃO

Para que seja possível simular e validar o sistema é necessário saber qual o seu consumo, de forma que é possível saber se o sistema atende os requisitos. Além disso, o dimensionamento das cargas possibilita o projeto dos conversores que as alimentam. Este capítulo apresenta o dimensionamento das cargas de todo o sistema, incluindo o computador de bordo, os rádios, o sistema de energia e os *payloads*.

4.2 COMPUTADOR DE BORDO

O computador de bordo tem funções como armazenamento dos dados em memória não-volátil, leitura de sensores e aquisição dos dados dos demais módulos do satélite.

Alguns contribuintes para o consumo estão listados na tabela 2. Como é possível observar, poucos componentes contribuem para a maior parte do consumo. O cálculo da potência consumida é realizado multiplicando a corrente consumida pela tensão de alimentação, de 3,3 V, exceto em casos especiais onde a equação é fornecida pelo *datasheet* do componente.

Componente	Quantia	Corrente [mA]	Potência [mW]
IMU (MPU-9250)	1	3,7 [29]	12,21
IMU (BMX055)	1	5,7 [30]	18,81
Gerador de Referência	1	0,026 [31], [32]	0,0008 [31]
Amplificador Operacional	4	0,2 [33]	2,64
<i>Watchdog</i> Externo	1	0,025 [34]	0,0825
microSD	1	0,25 [35]	0,825
Memória não-volátil	3	0,05 [36]	0,495
Microcontrolador	1	8,39 [32]	57,1134 [32]
Sensor de Corrente	1	0,23 [37]	2,277
Resistor Shunt (0,05 Ω)	1	19,271	0,01857
Total	-	19,271	94,47

Tabela 2 – Consumo do Computador de Bordo

Aqui foram considerados apenas os consumos constantes, ou seja, o aumento no consumo durante comunicações do processador com outros dispositivos não foi considerado por apresentar um valor muito pequeno quando comparado com o constante (0,05 mW de média).

4.3 RÁDIOS E AMPLIFICADORES DE POTÊNCIA

Os dois rádios do satélite têm como função enviar os dados coletados para a terra, através de telemetria. Durante a transmissão o consumo de potência é muito maior do que em outros momentos, devido ao fato de que o Amplificador de Potência (PA) de cada rádio fica ativo somente durante transmissões. Portanto para modelar o consumo deste sistema será considerado apenas o comportamento dinâmico, de acordo com a tabela 3. Cada rádio envia periodicamente dados para a Terra, com períodos de transmissão e o tempo ativo diferentes. Além disso, existe a possibilidade de a estação terrestre solicitar o envio de dados através de telecomandos. Neste caso, a transmissão fica ativa até que todos os dados solicitados sejam enviados. Para modelar este comportamento será considerada uma janela de 10 minutos por órbita, o que simula um hipotético pior caso (em termos de energia consumida). Cada PA é alimentado com 5 V.

Componente	Período/ Tempo Ativo [s]	Corrente [A]	Potência [W]
PA (Transceiver)	60/2	0,396 [38]	1,98
PA (Beacon)	10/0,6	0,396 [38]	1,98
Total	-	-	-

Tabela 3 – Consumo dos Rádios

4.4 SISTEMA DE ENERGIA

O EPS tem como função captar a energia dos painéis solares, armazenar em baterias e distribuir para os outros módulos. Estas funções geram o consumo detalhado na tabela 4.

Componente	Quantia	Corrente [mA]	Potência [mW]
Gerador de Referência	1	0,026 [31], [32]	0,0008 [31]
Amplificador Operacional	5	0,2 [33]	0,66
Sensor de Corrente	7	0,23 [37]	0,759
Resistor Shunt (0,075 Ω)	1	0,2	3
Resistor Shunt (0,05 Ω)	6	508	12,903
Timer 555	1	0,250 [39]	0,825
ADC externo	1	0,59 [40]	1,947
Microcontrolador	1	8,39 [32]	57,1134 [32]
Kill-Switches	4	350	3,063 [41]
Monitor de Bateria	1	0,135 [42]	1,134 [42]
Proteção das Baterias	1	700	10,29 [43]
Aquecedor das Baterias	2	-	3180
Conversor CC-CC (5420)	1	49,456	206,588 [44]
Conversor CC-CC (5410)	1	21,281	210,322 [45]
Conversor CC-CC (54540)	2	600	149,032 [46]
Total	-	-	-

Tabela 4 – Consumo do Sistema de Energia

O Conversor CC-CC 5420 tem como função alimentar a parte digital dos rádios e o Sistema de Energia, portanto seu consumo é constante. Da mesma forma, o Conversor CC-CC 5410 tem como função alimentar o Computador de Bordo, portanto seu consumo também é constante. Por fim, o Conversor CC-CC 54540 tem como função alimentar o PA de cada rádio, de forma que o seu consumo é dinâmico, com comportamento igual ao dos rádios. O aquecedor das baterias só é necessário nos momentos da órbita onde há eclipse (um terço da órbita), portanto assim será considerado para a modelagem.

Quando comparado com os outros módulos, este apresenta o maior consumo, porém isso acontece devido quase que somente aos aquecedores, que são componentes essenciais para o satélite.

4.5 PAYLOADS

Os *Payloads* são os módulos do satélite que realizam o objetivo principal do satélite. Por exemplo, no caso de um satélite que tira fotos da terra os *payloads* são as câmeras. No caso deste trabalho o *payload* é um *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) usado para testar os efeitos da radiação nos componentes no espaço, com consumo de 288 mA em 5 V (1,44 W), devido a presença do FPGA Xilinx Artix 7 XC7A200T.

4.6 CONCLUSÕES

Para melhor visualização das cargas do sistema, a curva de corrente de carga para três órbitas pode ser vista na figura 17. Estes valores de corrente correspondem a potência apresentada nas seções anteriores para um tensão de 5 V, que é a tensão de saída do regulador utilizado na simulação.

O valor máximo de potência da carga é de 5,785 W, quando há uma transmissão ocorrendo e os aquecedores estão ligados.

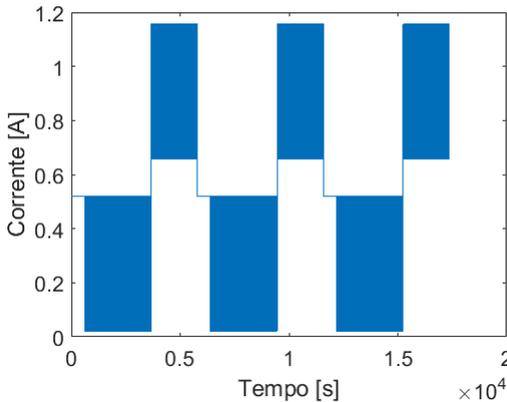


Figura 17 – Corrente de Carga

Com isto é possível realizar a simulação do sistema.

5 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a simulação do sistema, realizada no ambiente Simulink em conjunto com o Simscape, de forma a facilitar a implementação de circuitos elétricos. Primeiramente será apresentada a curva de irradiância utilizada como entrada para a simulação, depois serão apresentados os blocos principais que compõem sistema e como foram implementados. Por fim são apresentados os resultados da simulação.

5.2 ENTRADA E BLOCOS PRINCIPAIS

Para simular o sistema é necessário ter como entrada uma curva de irradiância. A curva aqui utilizada é baseada em um modelo de órbita desenvolvido no LCS/UFSC [47], o qual considera uma órbita equatorial, que apresenta regiões de eclipse, nas quais a Terra fica entre o satélite e o Sol (pior caso em termos de entrada de energia). A curva é apresentada na Figura 18.

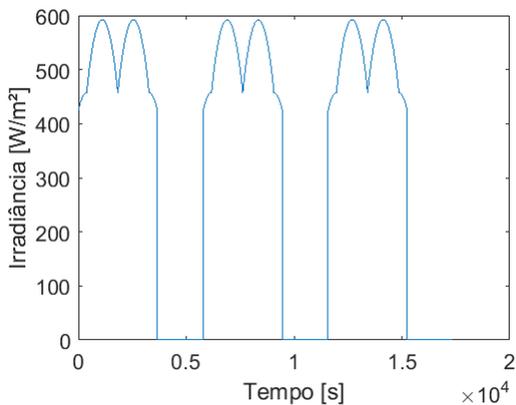


Figura 18 – Irradiância

O modelo do painel solar apresentado no capítulo 2 foi implementado utilizando a linguagem Simscape, dentro do ambiente Simulink. Esta lingua-

gem permite a definição dos terminais positivo e negativo, dos parâmetros R_s , R_p , I_0 e n e também da relação entre a tensão nos terminais e a corrente do painel. O bloco resultante está na Figura 19.

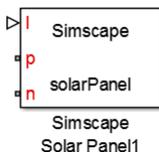


Figura 19 – Bloco do Painel Solar

Devido ao fato de que, pela geometria do *cubesat*, apenas três faces recebem iluminação ao mesmo tempo, foram considerados três painéis conectados ao sistema.

O conversor *Boost* foi simulado de forma bastante simples através de uma fonte de tensão controlada, de forma que a amplitude da fonte representa o ganho de tensão do conversor (Figura 20). O controle da amplitude foi realizado pelo algoritmo P&O implementado através do bloco *MATLAB Function* (Figura 21). A saída deste bloco foi conectada ao controle da fonte de tensão, de forma a se realizar o controle da tensão do painel solar.

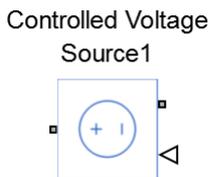


Figura 20 – Conversor *Boost*

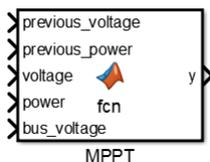


Figura 21 – Função do MPPT

A potência consumida pelas cargas foi simulada através de uma fonte de corrente controlada pelo modelo do capítulo 4 e alimentada por um conversor CC-CC ideal (figuras 22 e 23).

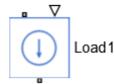


Figura 22 – Fonte de Corrente da Carga

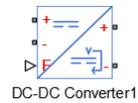


Figura 23 – Conversor da Carga

Por fim as baterias foram simuladas utilizando o bloco *Generic Battery* do Simscape. Como as baterias reais cortam a corrente caso a bateria chegue a 2,4 V, para sua proteção, este comportamento também foi simulado utilizando uma chave e um diodo (Figura 24).

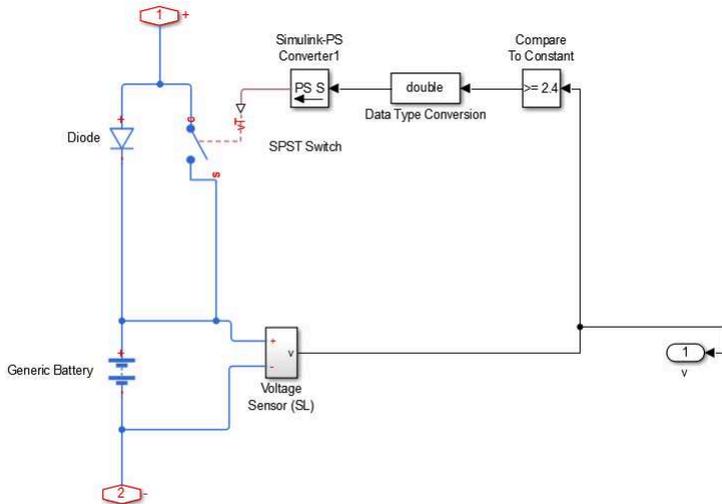


Figura 24 – Bloco de Simulação de uma Bateria

5.3 RESULTADOS

Pode-se visualizar a atuação do algoritmo P&O na Figura 25, sendo que nos momentos onde existe luz no painel solar a tensão é variada de forma a manter o painel operando no MPP.

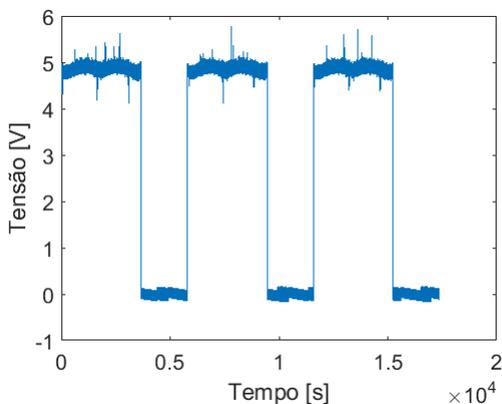


Figura 25 – Tensão do Painel Solar

A corrente fornecida pelos painéis está na Figura 26. Pode-se ver que, assim como a potência entregue (Figura 27), ela acompanha a curva de irradiância, porém a tensão não, o que mostra o funcionamento do MPPT.

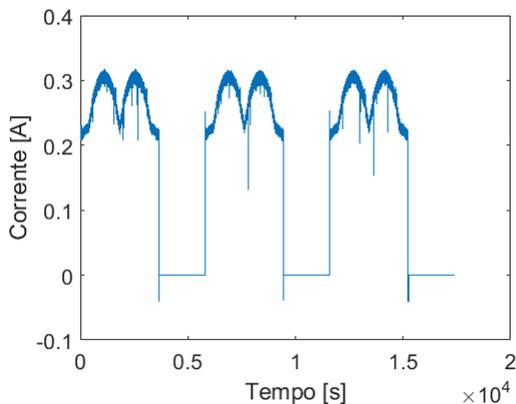


Figura 26 – Corrente do Painel Solar

As tensões das baterias podem ser vistas nas figuras 28 e 29. Como podemos ver pela pequena diminuição na tensão, as cargas estão praticamente

equilibradas com a entrada de energia.

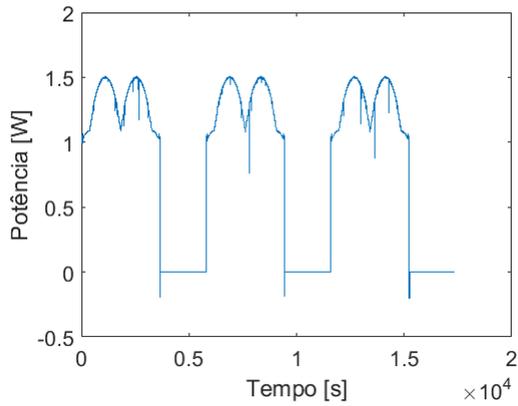


Figura 27 – Potência do Painel Solar

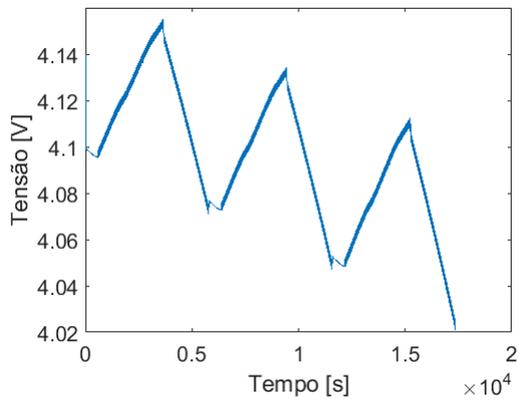


Figura 28 – Tensão da Bateria 1

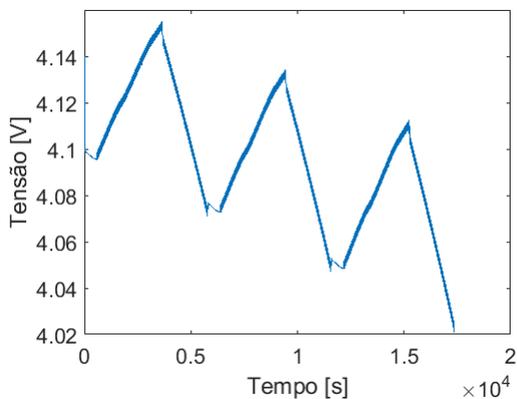


Figura 29 – Tensão da Bateria 2

5.4 CONCLUSÕES

Aqui foi apresentado como foi realizada a simulação do sistema, mostrando os blocos principais implementados no Simulink e no Simscape. Além disso, foi feita uma breve análise dos resultados, mostrando que a princípio estão coerentes.

6 TESTE NA BANCADA DO SISTEMA REAL

6.1 INTRODUÇÃO

Primeiramente será apresentada a bancada do sistema, principalmente como é gerada a iluminação dos painéis solares, junto com uma explicação de como as cargas foram distribuídas. Também serão apresentadas as baterias e os painéis utilizados. Depois serão apresentados os resultados dos testes e uma comparação entre a simulação e o teste, assim como uma análise se o sistema atende os requisitos.

6.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA

Para emular a iluminação solar foram utilizados quatro LEDs de alta potência (100 W cada), sendo que a potência fornecida para os LEDs foi controlada de forma a seguir a curva obtida com o modelo citado no capítulo 5.

A carga do sistema foi dividida em duas partes: o aquecimento das baterias foi emulado com resistores conectados na saída de um conversor CC-CC. Foram usados três resistores de $10\ \Omega$ e um de $47\ \Omega$ em paralelo para se obter uma potência próxima a calculada. O resto da curva foi emulado através de uma fonte de quatro quadrantes operando com tensão positiva e corrente negativa.

Dois baterias li-ion ICR18650-30A foram usadas para armazenar energia e 3 painéis solares com 4 conjuntos em paralelo de 10 células KXOB22-12X1F em série foram usados para fornecer a energia.

A bancada utilizada pode ser vista na Figura 30.

6.3 RESULTADOS

As correntes dos painéis estão nas figuras 31, 32 e 33. Ao analisar a soma de todas as correntes vemos que o resultado é próximo à simulação realizada. Pode-se ver também que há uma pequena diferença entre as correntes dos painéis, que ocorreu devido a não uniformidade da disposição dos painéis.

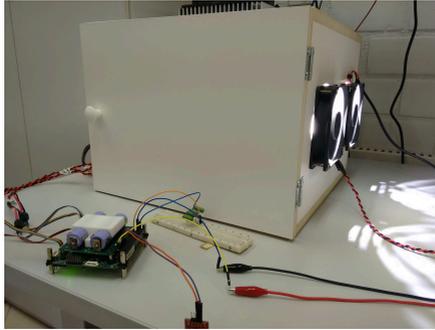


Figura 30 – Bancada de Testes

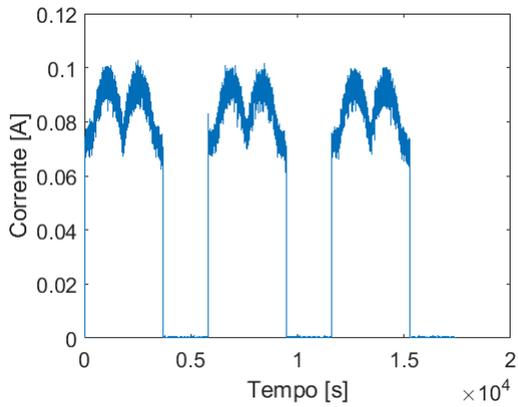


Figura 31 – Corrente do Pannel 1

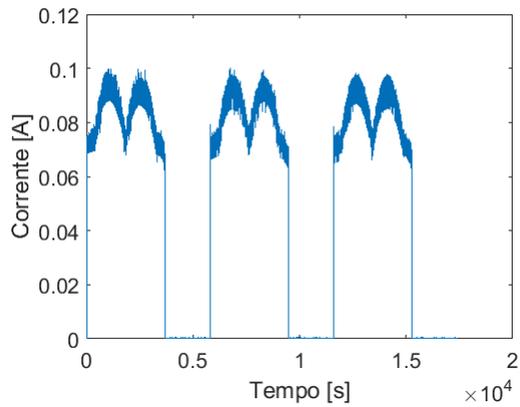


Figura 32 – Corrente do Painel 2

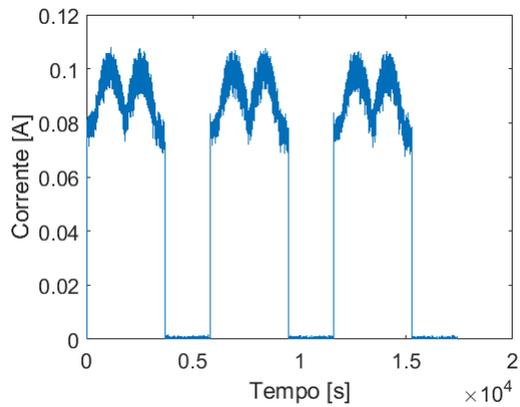


Figura 33 – Corrente do Painel 3

Da mesma forma, vemos nas figuras 34, 35 e 36 que a soma das potências ficou próxima ao valor simulado. Inclusive, a figura 37 apresenta a soma das potências do teste no mesmo gráfico que a potência simulada, e vemos que o resultado está relativamente próximo, com aproximadamente 15 % de erro.

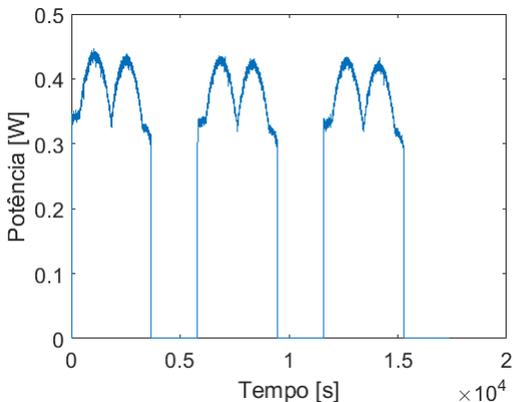


Figura 34 – Potência do Pannel 1

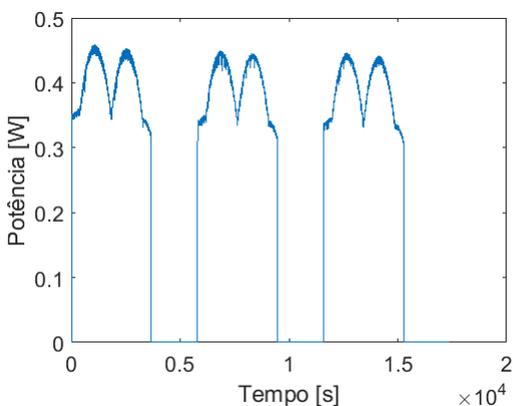


Figura 35 – Potência do Pannel 2

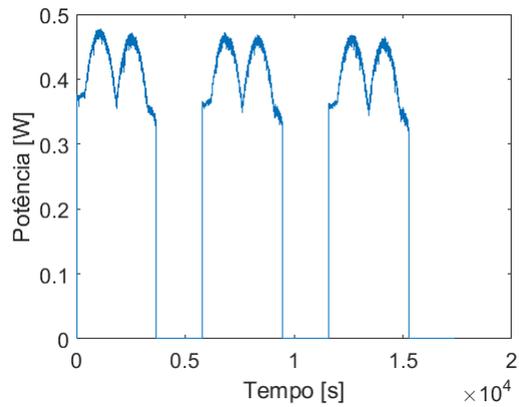


Figura 36 – Potência do Painel 3

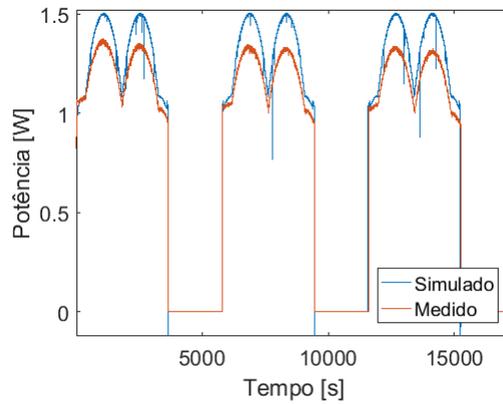


Figura 37 – Comparação das Potências

Nas figuras 38, 39 e 40 podemos ver o MPPT em ação realizando o controle da tensão.

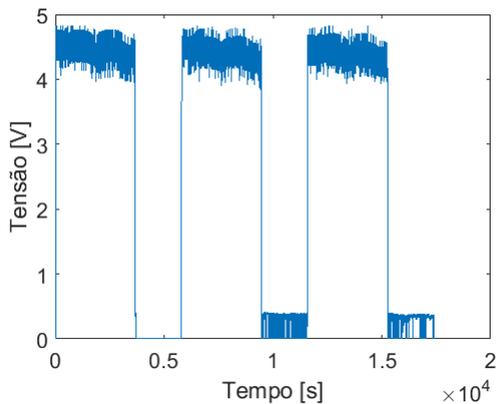


Figura 38 – Tensão do Painel 1

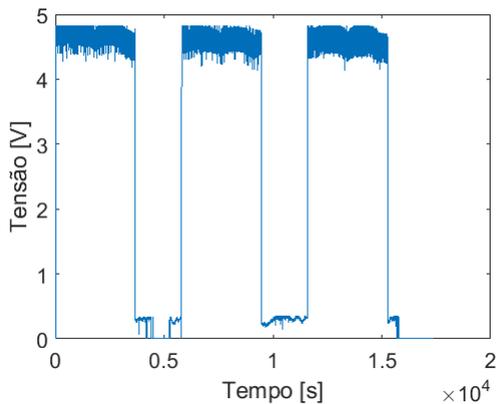


Figura 39 – Tensão do Painel 2

Por fim, temos as tensões das baterias 1 e 2 (figuras 41 e 42). Vemos que este resultado teve uma mudança significativa em relação a simulação, sendo que a tensão diminuiu mais no teste real. Isso se deu por causa da

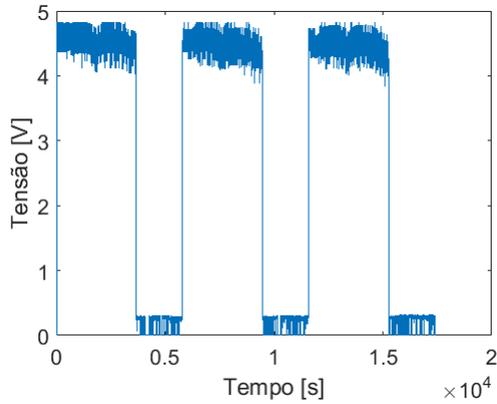


Figura 40 – Tensão do Painel 3

ausência de perdas na simulação, principalmente no conversor *Boost* que conecta os painéis solares às baterias e também pela diferença nas potências de entrada da simulação e a entrada real. Desta forma, a quantidade de energia que entra no sistema durante a região iluminada da curva de irradiância é menor e, conseqüentemente, a energia disponível durante o período de eclipse é menor.

6.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para quantificar a diferença de energia entre as cargas e a entrada vamos integrar a potência dos painéis e a potência nas baterias, onde o sinal negativo indica que a potência está saindo das baterias.

$$\int_0^{17390} P_{pv}(t) dt = 13,77 \text{ kJ} \quad (6.1)$$

$$\int_0^{17390} P_{bat}(t) dt = -22,86 \text{ kJ} \quad (6.2)$$

Em primeira análise a energia consumida pelas cargas é maior do que a entregue pelos painéis, porém a irradiância utilizada nos testes não corresponde a irradiância incidente do sol no espaço. Na verdade, o valor utilizado

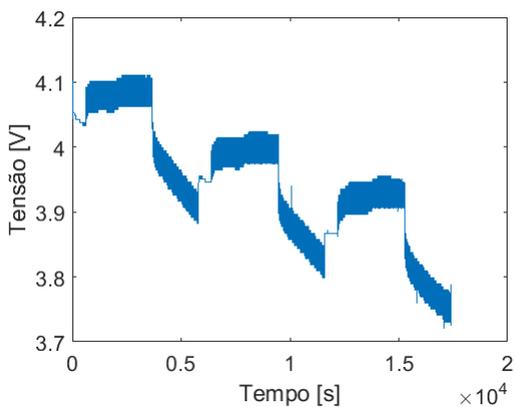


Figura 41 – Tensão da Bateria 1

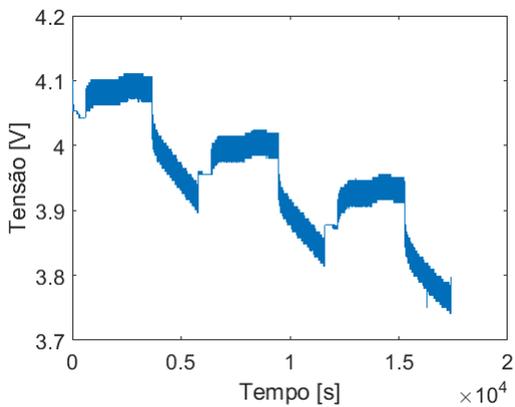


Figura 42 – Tensão da Bateria 2

foi o máximo possível obtido com a bancada disponível, porém representa apenas aproximadamente metade do valor real (1367 W m^{-2} de pico), o que já tornaria a entrada de energia maior do que o consumo. Portanto, pode-se concluir que o sistema está projetado de forma adequada para atender as cargas solicitadas.

6.5 CONCLUSÕES

Com o que foi exposto neste capítulo foi possível ver como foram realizados os testes, assim como os resultados e que o sistema atende os requisitos. Além disso, foi visto que a simulação difere um pouco dos resultados reais.

7 CONCLUSÕES

Em relação a modelagem e simulação realizada, podemos considerar que os painéis estão próximos o suficiente do real, como demonstrado primeiramente no capítulo 2 e depois nos capítulos 5 e 6. Uma possível melhoria futura seria separar cada painel na simulação, de forma que cada um teria seu controle MPPT próprio, aproximando assim a simulação da realidade. Isto ainda não foi realizado pelo motivo de que cada MPPT introduz um *Loop Algébrico (Algebraic Loop)* na simulação, e sua solução requer métodos mais robustos e melhor controle da ferramenta.

Outro ponto em relação a simulação é considerar a irradiância diferente para cada painel, devido ao posicionamento dos painéis na bancada e a distribuição da irradiância pelos leds, que não é uniforme.

O modelo das cargas foi utilizado tanto na simulação quanto no teste real. Esta decisão foi tomada baseada no fato de que a simulação ainda não havia sido validada. Portanto não seria possível verificar quais são as falhas na simulação caso o sistema completo fosse utilizado. A validação deste modelo será realizada em trabalhos futuros.

Outro ponto interessante é utilizar um modelo físico do conversor *Boost* no lugar da fonte de tensão controlada para facilitar a simulação de não-idealidades. Apesar de que o modelo representou bem o controle da tensão do painel na simulação, as perdas introduzidas pelo conversor no teste real não apareceram na simulação, o que gerou uma discrepância nos resultados. Esta melhoria também será realizada em trabalhos futuros.

De modo geral, pode-se considerar que os objetivos do trabalho foram alcançados, sendo que o sistema foi validado e agora existem um modelo e uma simulação que podem ser utilizados para se ter uma idéia geral do funcionamento do sistema, assim como podem ser utilizados para projetos de novos sistemas no futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Newton, Isaac. *De mundi systemate*. 1728.
- [2] Maul, George A. *Introduction to satellite oceanography*. Vol. 3. Springer Science & Business Media, 2012.
- [3] Potočník, Herman. *The Problem of Space Travel - The Rocket Motor*. Richard Carl Schmidt & Co, 1929.
- [4] Clarke, Arthur C. “EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS - Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage”. Em: *Wireless World* (1945).
- [5] McQuaid, Kim. “Sputnik Reconsidered: Image and Reality in the Early Space Age”. Em: *Canadian Review of American Studies* 37.3 (2007), pp. 371–401.
- [6] Portree, David S. F. e Jr, Joseph P. Loftus. *Orbital Debris: A Chronology*. Acessado em: 08/09/2017. URL: https://web.archive.org/web/20000901071135/http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/_techrep/TP-1999-208856.pdf.
- [7] United Nations. *Online Index of Objects Launched into Outer Space*. Acessado em: 14/10/2017. URL: http://www.unoosa.org/oosa/osoindex/search-ng.jsp?lf_id=#?c=%7B%22filters%22:%5B%7B%22fieldName%22:%22en%23object.status.inOrbit_s1%22,%22value%22:%22Yes%22%7D%5D,%22sortings%22:%5B%7B%22fieldName%22:%22object.launch.dateOfLaunch_s1%22,%22dir%22:%22desc%22%7D%5D%7D.
- [8] Baker, Daniel N. e Worden, Simon Peter. “The Large Benefits of Small-Satellite Missions”. Em: *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 89.33 (Agosto de 2008), pp. 301–312.
- [9] Messier, Douglas. *Tiny 'Cubesats' Gaining Bigger Role in Space*. Acessado em: 08/09/2017. URL: <https://www.space.com/29464-cubesats-space-science-missions.html>.
- [10] Lee, Simon et al. *Cubesat Design Specification*. Acessado em: 08/09/2017. 2014. URL: <http://www.cubesat.org/>.

- [11] Kalman, Andrew E. *Nanosatellite Development from a CubeSat Designer's Perspective*. Acessado em: 08/09/2017. URL: http://www.cubesatkit.com/docs/press/Pumpkin_CSDWLU_2011-1.pdf.
- [12] Jäger, Klaus et al. *Solar Energy. Fundamentals, Technology and Systems*. 2014.
- [13] Blakers, Andrew et al. "High efficiency silicon solar cells". Em: *Energy Procedia* 33 (2013), pp. 1–10.
- [14] Erdem, Zekiye e Erdem, M Bilgehan. "A Proposed Model of Photovoltaic Module in Matlab/Simulink™ for Distance Education". Em: *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 103 (2013), pp. 55–62.
- [15] Bellia, Habbati, Youcef, Ramdani e Fatima, Moulay. "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB". Em: *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* 3.1 (2014), pp. 53–61.
- [16] Ahmed, Ahmed Saeed, Abdullah, Bassem A e Abdelaal, Wahied Ghariieb Ali. "MPPT algorithms: Performance and evaluation". Em: *Computer Engineering & Systems (ICCES), 2016 11th International Conference on*. IEEE. 2016, pp. 461–467.
- [17] Al-Gizi, Ammar Ghalib. "Comparative study of MPPT algorithms under variable resistive load". Em: *Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2016 International Conference on*. IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [18] Ngan, Mei Shan e Tan, Chee Wei. "A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems". Em: *Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011 IEEE*. IEEE. 2011, pp. 22–27.
- [19] Tofoli, Fernando Lessa, Castro Pereira, Dênis de e Paula, Wesley Josias de. "Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems". Em: *International Journal of Photoenergy* 2015 (2015).
- [20] Dorigo, Marco, Birattari, Mauro e Stutzle, Thomas. "Ant colony optimization". Em: *IEEE computational intelligence magazine* 1.4 (2006), pp. 28–39.

- [21] Jiang, Lian Lian, Maskell, Douglas L e Patra, Jagdish C. “A novel ant colony optimization-based maximum power point tracking for photovoltaic systems under partially shaded conditions”. Em: *Energy and Buildings* 58 (2013), pp. 227–236.
- [22] Elobaid, LM, Abdelsalam, Ahmed K e Zakzouk, E Eldin. “Artificial neural network based maximum power point tracking technique for PV systems”. Em: *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2012, pp. 937–942.
- [23] Daraban, Stefan, Petreus, Dorin e Morel, Cristina. “A novel global MPPT based on genetic algorithms for photovoltaic systems under the influence of partial shading”. Em: *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE. 2013, pp. 1490–1495.
- [24] Haroun, Reham et al. “Impedance matching in photovoltaic systems using cascaded boost converters and sliding-mode control”. Em: *IEEE Transactions on Power Electronics* 30.6 (2015), pp. 3185–3199.
- [25] Ramasamy, Arulmurugan e Vanitha, N Suthanthira. “Maximum power tracking for PV generating system using novel optimized fractional order open circuit voltage-FOINC method”. Em: *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2014 International Conference on*. IEEE. 2014, pp. 1–6.
- [26] Xiao, Weidong, Ozog, Nathan e Dunford, William G. “Topology study of photovoltaic interface for maximum power point tracking”. Em: *IEEE Transactions on industrial electronics* 54.3 (2007), pp. 1696–1704.
- [27] Xiao, Weidong et al. “Regulation of photovoltaic voltage”. Em: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54.3 (2007), pp. 1365–1374.
- [28] Coelho, Roberto Francisco e Martins, Denizar Cruz. “An optimized maximum power point tracking method based on pv surface temperature measurement”. Em: *Sustainable Energy-Recent Studies*. InTech, 2012.

- [29] *Nine-Axis (Gyro + Accelerometer + Compass) MEMS MotionTracking™ Device*. MPU-9250. Rev 1.1. InvenSense. Jun. de 2016.
- [30] *Small, versatile 9-axis sensor module*. MBX055. Rev 1.1. Bosch Sensortec. Nov. de 2014.
- [31] *Low-Noise, Very Low Drift, Precision Voltage Reference*. REF5030A-Q1. Texas Instruments. Fev. de 2015.
- [32] *Mixed Signal Microcontrollers*. MSP430F6659IPZR. Texas Instruments. Out. de 2013.
- [33] *Low-Voltage Rail-to-Rail Output CMOS Operational Amplifiers With Shutdown*. TLV341AIDBVR. Texas Instruments. Abr. de 2016.
- [34] *Voltage Monitor With Watchdog Timer*. TPS3823-33QDBVRQ1. Texas Instruments. Dez. de 2015.
- [35] *microSD 3.0 Memory Card Specification*. microSD 3.0. Rev. 1.6. Envoy Data Memory.
- [36] *3V Serial Flash Memory With 133 MHz Multi I/O SPI & QUAD I/O QPI DTR Interface*. IS25LP128-JBLE. Rev. D. ISSI. Mar. de 2014.
- [37] *High-Precision, Low-Voltage, Current-Sense Amplifier with Current Output and Chip Select for Multiplexing*. MAX9934TAUA+. Rev. 3. Maxim Integrated. Nov. de 2012.
- [38] *3,6 V, 100 MHz to 1000 MHz Linear Power Amplifier*. RF6886. rfmd.
- [39] *LMC555 CMOS Timer*. LMC555CMM/NOPB. Texas Instruments. Jul. de 2016.
- [40] *ADS124x 24-Bit, 2-kSPS, Analog-To-Digital Converters With Programmable Gain Amplifier (PGA) For Sensor Measurement*. ADS1248IPWR. Texas Instruments. Mar. de 2016.
- [41] *P-Channel 1.8 V (G-S) MOSFET*. Si4403CDY. Rev. A. Vishay. Fev. de 2011.
- [42] *2-Cell, Stand-Alone, Li+ Fuel-Gauge IC with Protector and Optional SHA-1 Authentication*. DS2775G+. Rev. 4. Maxim Integrated. Jun. de 2011.

-
- [43] *Dual N-Channel Logic Level PWM Optimized PowerTrench™ MOSFET*. FDS6898AZ. Rev. C. Fairchild Semiconductor. Out. de 2001.
 - [44] *2 A Wide-Input-Range Step-Down Swift™ Converter*. TPS5420-Q1. Texas Instruments. Jun. de 2008.
 - [45] *TPS5410 1 A, Wide Input Range, Step-Down Converter*. TPS5410. Texas Instruments. Dez. de 2014.
 - [46] *TPS54540 4,5 V to 42 V Input, 5 A, Step-Down DC-DC Converter with Eco-mode™*. TPS54540. Texas Instruments. Mar. de 2017.
 - [47] Slongo, Leonardo et al. "Nanosatellite energy harvesting maximization through an energy aware scheduling algorithm". Em: *II Latin American IAA CubeSat Workshop*. IAA. 2016.