



**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA
SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSATÉLITES DA CLASSE
CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA
DO NANOSATC-BR2.**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/INPE - CNPq/MCTIC)**

Alex Müller

(UFSM – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC)

E-mail: alexmuller1997@gmail.com

Dr. Nelson Jorge Schuch

Orientador

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

CRS/COCRE/INPE – MCTIC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE - MCTIC

E-mail: njschuch@gmail.com

Julho de 2018

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título:

**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA
SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSSATÉLITES DA CLASSE
CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA
DO NANOSATC-BR2.**

Processo:115231/2016-1

Aluno Bolsista no período de Agosto/16 a Julho/17

Alex Müller

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/COCRE/INPE – MCTIC

Co-Orientador:

Dr. Eng. Otávio S. C. Durão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC

Colaboradores:

Alan Pitthan Couto

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM

Artur Gustavo Slongo

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial da UFSM

Lorenzo Quevedo Mantovani

Acadêmico do Curso de Engenharia Aeroespacial de UFSM

Eng. Rodrigo Passos Marques

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/COCRE/INPE – MCTIC

Locais de Trabalho/Execução do Projeto:

- Laboratório de Eletrônica - CRS/COCRE/INPE – MCTIC

Trabalho desenvolvido no âmbito da Parceria e Convênio: INPE/MCTIC – UFSM, pelo Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu Mentor e Orientador Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/COCRE/INPE-MCTIC, pela dedicação, ajuda e suporte me auxiliando no crescimento pessoal e profissional. Também agradeço a todos os membros e colaboradores do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats pelo apoio e incentivo sempre presente.

A todos os servidos do CRS/COCRE/INPE – MCTIC deixo meu agradecimento pela atenção e apoio, assim como disponibilização da infraestrutura.

Deixo um agradecimento especial ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/INPE–CNPq/MCTIC, assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq/MCTIC pela oportunidade propiciada.

Aos meus familiares agradeço pelo apoio e motivação que sempre recebi para prosseguir nos estudos e atividades tanto pessoais como profissionais.

Alex Müller

Endereço para acessar este espelho: dgp.cnpq.br/dgp/espelhofv/3285846372955261

Dados Gerais

Nome em citações bibliográficas: MÜLLER, A.

Nível de Treinamento: Graduação

Áreas de atuação:

- Satélites e Outros Dispositivos Aeroespaciais

Bolsista CNPq:

- IC

Última atualização do Currículo Lattes: 05/08/2016

Contato: 

Homepage:

Grupos de pesquisa em que atua

Nome do grupo	Instituição	Ações
Clima Espacial, Interações Sol-Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites	INPE	

Linhas de pesquisa em que atua

Linha de pesquisa	Nome do grupo	Ações
DESENVOLVIMENTO DE NANOSATÉLITES - CubeSats: NANOSATC-BR	Clima Espacial, Interações Sol-Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites	

Orientadores participantes de grupos de pesquisa

Orientador	Grupo de pesquisa	Ações
Nelson Jorge Schuch	Clima Espacial, Interações Sol-Terra, Magnetosferas, Geoespaço, Geomagnetismo: Nanosatélites	

Grupos de pesquisa de que é egresso

Nome do grupo	Instituição	Ações
Nenhum registro adicionado		

Indicadores de produção

Indicadores: [Visualizar](#)

RESUMO

O Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica – PIBIC/INPE-CNPq/MCTIC, apresenta os estudos e atividades realizadas por Alex Müller, desenvolvidas pelo bolsista, no período de Agosto de 2017 até Julho de 2018, referentes ao Projeto “ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSSATÉLITES DA CLASSE CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO NANOSATC-BR2.”.

O trabalho contava com os objetivos de estudar os sistemas elétricos de potência de satélites, com ênfase em nanosatélites da classe CubeSats, estudar a geração de energia elétrica em ambiente espacial, desenvolver o balanço de potência do NANOSATC-BR2

Para as etapas de estudo sobre o sistema elétrico de potência e geração de energia elétrica em ambiente espacial foi realizada uma análise bibliográfica sobre sistemas de potência espaciais, análises de resultados do código desenvolvido em Matlab e estudos sobre as *payloads* do NANOSATC-BR2. Para a etapa do balanço de potência foi realizado um estudo do consumo de potência dos componentes elétricos e eletrônicos que integram o NANOSATC-BR2, juntamente com o estudo da geração de energia elétrica em ambiente espacial.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELA	9
INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1	12
PROGRAMA NANOSATC-BR, DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS	12
1.1. INTRODUÇÃO	12
1.2. NANOSSATÉLITE NANOSATC-BR1	12
1.3. PROJETO NANOSATC-BR2	13
CAPÍTULO 2	15
COMPOSIÇÃO ELÉTRICA E ELETRÔNICA DO NANOSATC-BR2	15
2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2. COMPONENTES DO <i>BUS</i> DO NANOSATC-BR2	15
2.3. CARGAS ÚTEIS QUE COMPÕEM O <i>PAYLOAD</i> DO NANOSATC-BR2	18
CAPÍTULO 3	21
CONDICIONAMENTO DE ENERGIA	21
3.1. CONVERSOR <i>BUCK</i>	21
3.2. CONVERSOR <i>BOOST</i>	24
CAPÍTULO 4	26
FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTE ESPACIAL	26
4.1. ENERGIA FOTOVOLTAICA	26
4.2. CÉLULA FOTOVOLTAICA	27
4.3. GERAÇÃO DE ENERGIA POR SOFTWARE	27
CAPÍTULO 5	30
BALANÇO DE POTENCIA	30
CAPÍTULO 6	33
PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	33
CAPÍTULO 7	34
CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: FOTO DO MODELO DE ENGENHARIA DO CUBESAT NANOSATC-BR1 NO LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES DE NANOSSATÉLITES (LITN/CRS/COCRE/INPE-MCTIC)	13
FIGURA 2: FOTO DO MODELO DE ENGENHARIA DO CUBESAT NANOSATC-BR1 NO LABORATÓRIO DE INTEGRAÇÃO E TESTES (LIT/INPE-MCTIC)	14
FIGURA 3: EPS DO NANOSATC-BR2	16
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS NECESSÁRIOS PARA A O POSICIONAMENTO DE UM SATÉLITE NA ÓRBITA ESPECIAL	19
FIGURA 5: REPRESENTAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS MAGNETÔMETROS XEN 1210 PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES NOS EIXOS X,Y,Z	20
FIGURA 6: CIRCUITO ELÉTRICO DO CONVERSOR BUCK	21
FIGURA 7: REPRESENTAÇÃO DAS ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CIRCUITO CONVERSOR BUCK	22
FIGURA 8: CURVAS CARACTERÍSTICAS DO CONVERSOR BUCK.....	23
FIGURA 9: CIRCUITO ELÉTRICO DO CONVERSOR BOOST.....	24
FIGURA 10: ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR.....	26
FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	27
FIGURA 12: GERAÇÃO DE POTÊNCIA EM CADA FACE.....	28
FIGURA 13: GERAÇÃO DE POTÊNCIA TOTAL EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	28

LISTA DE TABELA

TABELA 1 - GERAÇÃO DE POTÊNCIA POR SIMULAÇÃO.....	29
TABELA 2 - BALANÇO DE POTÊNCIA SEM OS AJUSTES SUGERIDOS.	30
TABELA 3 - BALANÇO DE POTÊNCIA COM AS CORREÇÕES INICIAS.	31
TABELA 4 - BALANÇO DE POTÊNCIA COM AS CORREÇÕES FINAIS.	32

INTRODUÇÃO

As atividades realizadas pelo bolsista no projeto “**ESTUDO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA PARA SATÉLITES COM ÊNFASE EM NANOSATÉLITES DA CLASSE CUBESATS E DESENVOLVIMENTO DO BALANÇO DE POTÊNCIA DO NANOSATC-BR2**” (Processo nº 115231/2016-1) com vigência de Agosto de 2017 até Julho de 2018 estão descritas neste relatório. As atividades foram realizadas pelo bolsista **Alex Müller**, graduando do curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), bolsista do programa PIBIC/INPE – CNPq/MCTIC no CRS/COCRE/INPE-MCTIC.

O Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats possui dois projetos: NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2. Ambos os projetos são constituídos por nanosatélites de padrão CubeSat, adquiridos da empresa ISL/ISIS. O NANOSATC-BR1 está operacional no espaço a mais de quatro anos. O NANOSATC-BR2 ainda não possui data de lançamento definida.

O objetivo do Programa de Pesquisa foi analisar todos os componentes elétricos e eletrônicos do sistema elétrico de potência do NANOSATC-BR2, estudar a geração de energia elétrica em ambiente espacial e comparar com a geração simulado em Matlab, para com os resultados desses estudos desenvolver o balanço de potência do NONASATC-BR2 e validar o código desenvolvido em Matlab.

O Relatório foi dividido em 6 Capítulos:

O Capítulo 1 discute sobre o Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats apresentando os objetivos, assim como a visão geral do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta, detalhadamente, os componentes do sistema elétrico de potência do NANOSATC-BR2.

O Capítulo 3 apresenta o estudo mais detalhado sobre o sistema elétrico de potência no âmbito de condicionamento.

O Capítulo 4 apresenta o estudo realizado sobre as fontes geradoras de energia elétrica em ambiente espacial e geração simulada através de software.

O Capítulo 5 apresenta o balanço de potência desenvolvido para o NANOSATC-BR2 teórico e com os dados de simulação.

O Capítulo 6 relata as principais atividades desenvolvidas.

O Capítulo 7 envolve as considerações finais do bolsista sobre o Projeto realizado e desenvolvido no período da vigência da bolsa.

CAPÍTULO 1

PROGRAMA NANOSATC-BR, DESENVOLVIMENTO DE CUBESATS

1.1. Introdução

O Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats é uma parceria entre o INPE/MCTIC e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O Programa possui dois nanossatélites: NANOSATC-BR1 e NANOSATC-BR2. Ambos são nanossatélites de padrão CubeSat (cada unidade mínima em forma de cubo possui arestas de 10 centímetros).

O programa possui os seguintes objetivos:

- Capacitação tecnológica nas áreas de ciência, tecnologia e engenharia;
- Capacitação de Recursos Humanos, especialmente estudantes de graduação no âmbito de ciências espaciais no que abrange as etapas de uma missão espacial (planejamento, desenvolvimento, testes, lançamento, operação e monitoramento);
- Capacitação Tecnológica das Instituições parceiras do Programa, as quais podem ter um desenvolvimento das áreas de ciências, engenharias e tecnologia;
- Estudo e aquisição de dados da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) além de eletrojatos equatoriais.

1.2. NANOSSATÉLITE NANOSATC-BR1

O primeiro nanossatélite do Programa, o NANOSATC-BR1 (NCBR1) é um nanossatélite de tamanho 1U (uma unidade CubeSat), de massa igual a 0.96825 quilos, Figura 1. É o primeiro Nanossatélite Científico Brasileiro tendo sido lançado em 2014, estando até hoje em operação (mais de quatro anos em operação). O NCBR1 possui como missão científica a coleta de dados da AMAS utilizando um magnetômetro e missão tecnológica o teste e validação de componentes eletrônicos tais como: *FPGA* desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e *Drivers On/Off* desenvolvidos pela Santa Maria Design House (SMDH).

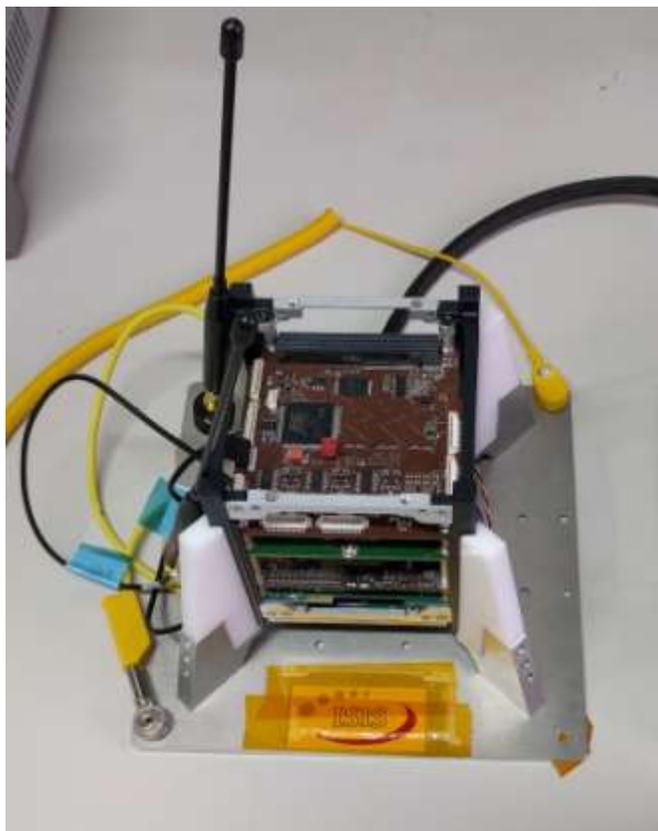


Figura 1: Foto do modelo de engenharia do CubeSat NANOSATC-BR1 no Laboratório de Integração e Testes de Nanossatélites (LITN/CRS/COCRE/INPE-MCTIC)

1.3. Projeto NANOSATC-BR2

O projeto NANOSATC-BR2 (NCBR2) consiste do segundo nanossatélite do programa, possuindo dimensões de duas unidades CubeSat (2U) e massa de aproximadamente 2 quilos, Figura 2. O modelo de engenharia do NCBR2 atualmente se encontra em fase de teste para futuro lançamento (janela de lançamento ainda não determinada).

Assim como o modelo anterior, o NCBR2 conta com missões científicas e tecnológicas. Como missão científica busca coletar dados da Ionosfera através de uma sonda de Langmuir além de dados da AMAS através de dois magnetômetros.

Como missão tecnológica, busca testar e validar os seguintes componentes: Dois FPGAs, um CI (Circuito Integrado) além de um sistema de determinação de atitude (possuindo tripla redundância).



Figura 2: Foto do modelo de engenharia do CubeSat NANOSATC-BR1 no Laboratório de Integração e Testes (LIT/INPE-MCTIC)

CAPÍTULO 2

COMPOSIÇÃO ELÉTRICA E ELETRÔNICA DO NANOSATC-BR2

2.1. Introdução

Um satélite artificial consiste de vários sistemas desenvolvidos para uma determinada missão espacial. Os mais simples aos mais complexos requerem sistemas comuns que são classificados em dois grupos, o *payload*, que é a carga útil a ser embarcada no satélite e o *BUS* que são os sistemas úteis e vitais ao satélite, como o suprimento de energia fornecido pelo *Energy Power Supply (EPS)*, sistema de telecomunicações, o computador de bordo, os sensors e os painéis solares. (PATEL, M. R., 2005)

O *BUS* é responsável por gerar, armazenar e distribuir a energia para os outros subsistemas, receber e processar comandos da estação terrena e enviar dados coletados pelo satélite.

O *Payload* consiste nos componentes eletrônicos que cumprem os objetivos da missão, responsáveis pelo sensoriamento em ambiente espacial, como Magnetômetros, Sonda de Langmuir, FPGA, Chips ASIS e determinação da atitude.

O meio de geração de energia presente no NCBR2 são as células solares que consistem em células fotovoltaicas presas ao corpo do nanossatélite, esse assunto é minuciosamente descrito no Capítulo 4.

2.2. Componentes do *BUS* do NANOSATC-BR2

Os componentes do *BUS* são subsistemas responsáveis pela vitalidade do satélite, descrevem a função de geração, armazenamento e condicionamento de energia, bem como a transmissão de dados do satélite e a recepção de telecomandos da estação terrena.

Energy Power Supply (EPS)

O *EPS* caracteriza-se por ser o sistema responsável pela geração, armazenamento, condicionamento, controle e a distribuição da energia elétrica para todos os sistemas do satélite, Figura 3. (PATEL, 2005)

Os componentes básicos para esse sistema são os acumuladores de energia, como a bateria de Níquel-Cadmio; painéis solares; reguladores de tensão para a carga das baterias; barramento de energia; chaveamento da carga; condutores utilizados para fazer as conexões elétricas dos componentes e proteção com o uso de fusíveis.

A fonte é composta por três conversores *boost* na entrada dos painéis fotovoltaicos e apresenta dois conversores *buck* para o condicionamento das tensões de saída em 5 e 3,3 Volts, esses conversores serão detalhados no Capítulo 3. O *EPS* consome uma potência de 0,249 W para a alimentação de todos os seus subsistemas elétricos.

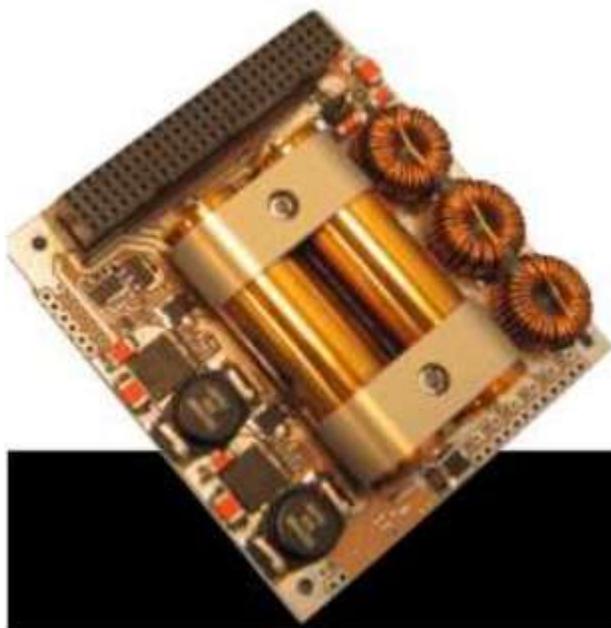


Figura 3: EPS do NANOSATC-BR2

On Board Computer (OBC)

O *OBC*, ou computador de bordo, age como o cérebro de todo o satélite. É nesse subsistema que é realizado todo o controle dos processos, como a transmissão e recepção de dados do satélite para a estação terrena de rastreamento e controle, armazenamento e operação do sistema operacional, armazenamento de todas as informações obtidas pelas cargas úteis, como dados obtidos por sensores, telemetria e o software de *Attitude Determination System (ADS)*. O *OBC* drena uma potência de 0,380 W do barramento.

Sistema de Telecomunicações

O sistema de telecomunicações caracteriza-se como o sistema responsável pelo envio e o recebimento de dados de um satélite para a estação terrena de rastreamento e controle. O NCBR2 utiliza um sistema de telecomunicações adotado em CubeSats, desenvolvido pela empresa ***Innovative Solutions in Space – ISIS BV***, que utiliza as bandas de frequência de VHF e UHF para estabelecer o envio e o recebimento de dados, respectivamente.

Os nanossatélites CubeSats utilizam frequências de radioamadores compreendidas entre 130-160 MHz para a transmissão em VHF e 400-450 MHz para a recepção em UHF. Os dados enviados e recebidos pelo satélite são codificados de modo que apenas os responsáveis pela missão espacial identifiquem o conteúdo contido nas mensagens enviadas e recebidas.

O sistema de telecomunicações do NCBR2 utiliza um receptor (*TRXUV RX*) cuja potência drenada do barramento é de 0,237 W, um transmissor (*TRXUV TX*) cuja potência drenada do barramento é de 0,787 W e um Sistema de Antenas que drena uma potência de 0,040 W.

2.3. Cargas Úteis que Compõem o *Payload* do NANOSATC-BR2

Os componentes do *Payload* são elementos que descrevem em tempo real o comportamento de todos os subsistemas de um satélite e também desempenham o papel fundamental no posicionamento do satélite em sua órbita.

Sistema de Determinação de Atitudes Tolerantes a Falhas (SDATF)

O subsistema de SDATF foi uma carga útil adicionada ao NANOSATC-BR2 e é responsável pela determinação da posição do satélite em relação a sua órbita, de modo a informar a posição de alguns parâmetros do satélite, por exemplo, atitude do satélite em relação ao vetor solar, posição das antenas de comunicação em relação a estação terrena e posição de sensores como os magnetômetros.

Para a determinação do posicionamento de um satélite em sua órbita espacial faz-se necessário o uso dos elementos keplerianos denominados de semi-eixo maior (a), a excentricidade (e) e a anomalia média (M), que definem a elipse e localizam o satélite no plano da elipse. Para definir de forma completa a localização de um satélite em sua órbita deve-se localizar espacialmente a órbita com os chamados ângulos de Euler, que são denominados inclinação (i), ascensão reta de nodo ascendente (Ω) e o argumento do perigeu (ω). A Figura 4 representa todos os parâmetros necessários para o posicionamento de um satélite em órbita espacial em torno ao planeta Terra, Figura 4. (KUGA, 2008)

O sistema de determinação de attitude do NCBR2 conta com uma tripla redundância, o cálculo da potência requerida pelo sistema foi de 0,271 W.

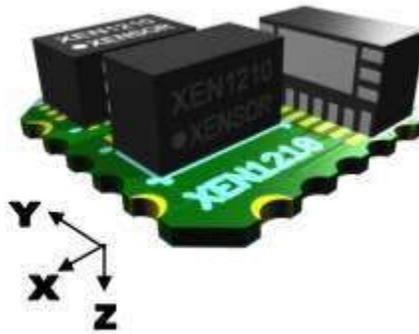


Figura 5: Representação da configuração dos magnetômetros XEN 1210 para a realização de medições nos eixos x,y,z

Sonda de Langmuir (SL)

Responsável por medir características associadas às bolhas de plasma presentes na atmosfera tais como temperatura e densidade. As bolhas de plasma são de grande importância pois derivam da interação da alta atmosfera com a atividade solar, possuindo ligação direta com os sistemas espaciais.

O consumo de potência estimado para a Sonda de Langmuir foi de 0,800 W, algumas medidas, relatadas no capítulo 5, foram tomadas com respeito a SL para assegurar um balanço de potência positivo onde a geração supre a demanda.

FPGA e Chip ANSIS

O NCBR2 contará com um FPGA e dois chips ANSIS desenvolvidos pela Santa Maria Design House – SMDH – ambos com objetivos de testar circuitos tolerantes a radiação.

A FPGA possui um consumo de potência de 0,049 W, enquanto os dois chips ANSIS consomem 0,030 W.

CAPÍTULO 3

CONDICIONAMENTO DE ENERGIA

3.1. Conversor *Buck*

Os conversores DC-DC são circuitos eletrônicos capazes de fazer a regulação de uma fonte de tensão desregulada para um nível de tensão ajustado e regulado requerido pelo projetista. Realiza-se a regulação da tensão de saída segundo a variação do tempo de chaveamento, ou a razão cíclica do elemento semiconductor responsável pelo chaveamento do circuito.

Os conversores DC-DC, ou *choppers* são circuitos eletrônicos responsáveis pela conversão de um nível de tensão fixo em uma fonte de tensão variável. Pode-se fazer a analogia de que os circuitos *chopper* são considerados o equivalente a um transformador em corrente alternada com uma relação de espiras variável. (Rashid, 1999)

O conversor buck, ou *step-down*, regula a tensão de saída de forma que o valor médio da tensão de saída V_{out} seja menor do que o valor médio da tensão de entrada V_{in} . (Rashid, 1999)

O conversor apresenta uma fonte de alimentação DC (V_S), um indutor, um diodo, um capacitor utilizado para filtrar a tensão de saída V_{out} e a resistência da carga R . Nota-se que não há a isolamento galvânica de um transformador entre a entrada e a saída do circuito, Figura 6.

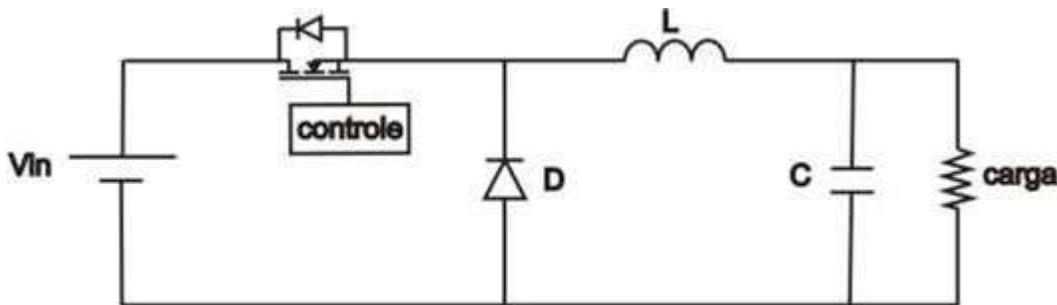


Figura 6: Circuito elétrico do conversor buck

A análise da operação do circuito caracteriza-se de duas etapas: a chave semicondutora está em condução fazendo com que a corrente do indutor I_L aumente; e a

outra etapa onde a chave está desligada e a corrente de saída I_{out} percorre pelo diodo em roda livre, onde a Figura 7 representa as duas etapas de operação. A relação entre o tempo de condução do dispositivo semiconductor (t_{on}) e o período de chaveamento (T_{chav}) do circuito é denominado razão cíclica, dada por (1).

$$d = \frac{t_{on}}{T_{chav}} \quad (1)$$

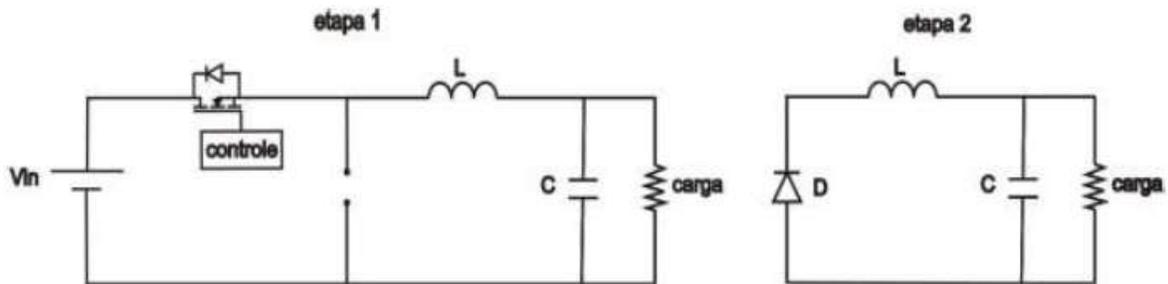


Figura 7: Representação das etapas de operação do circuito conversor buck

A relação entre a tensão de entrada, tensão de saída e a razão cíclica, expressa em (2), demonstra que a tensão de saída do conversor será sempre menor do que a tensão de entrada.

(RASHID, 2001).

$$V_{out} = D \cdot V_{in} \quad (2)$$

O conversor *buck* pode operar em 2 diferentes modos, onde a sua variação está na continuidade da corrente do indutor, o modo *Continuous Conduction Mode (CCM)* e o *Discontinuous Conduction Mode (DCM)*, sendo a corrente contínua e descontínua, respectivamente. Há uma preferência pelo modo de condução CCM por sua alta eficiência e sua boa utilização das chaves semicondutoras e elementos passivos do circuito elétrico. (RASHID, 2001).

O valor da indutância L_{buck} deve ser superior a (3) para que o circuito opere em CCM, caso contrário a energia armazenada no indutor irá ser descarregada e a corrente do indutor atingirá o nível de 0 ampéres antes de o ciclo terminar, operando em DCM. (RASID, 2001)

$$L_{buck} = (1 - D) \cdot \frac{R}{2 \cdot f_{chav}} \quad (3)$$

Para a limitação da tensão de *ripple* (V_r/V_{out}) da tensão de saída do conversor buck utiliza-se um capacitor, definido por (4), onde leva-se em consideração no projeto o valor máximo da tensão de *ripple*, ou a ondulação da tensão de saída. (RASHID, 2001).

$$C_{min} = (1 - D) \cdot \frac{V_{out}}{8 \cdot V_r \cdot L \cdot f_{chav}^2} \quad (4)$$

Desta forma, assumindo-se a corrente inicial I_L com um valor diferente de zero; $I_{L0} = I_L(T) = I_L(2T)$; V_{GS} como a tensão aplicada para o chaveamento do dispositivo semicondutor faz-se a análise da tensão de saída V_{out} , I_L , I_0 , I_C , vistos na Figura 8.

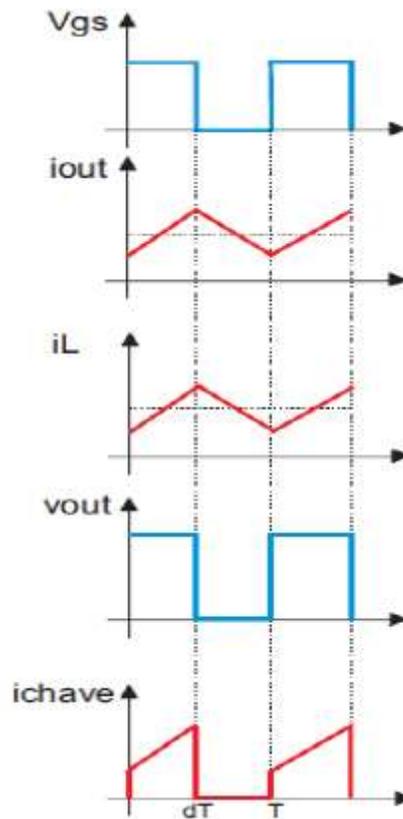


Figura 8: Curvas características do conversor buck

3.2. Conversor *Boost*

Define-se o circuito conversor *boost* como um conversor DC-DC que desempenha o papel de elevar a tensão de entrada de uma fonte DC com o uso de um indutor *boost*, uma chave semicondutora controlada, diodo, um capacitor para filtrar a tensão de saída V_{out} e a resistência da carga. Verifica-se o seu circuito elétrico na Figura 9. (RASHID, 2001).

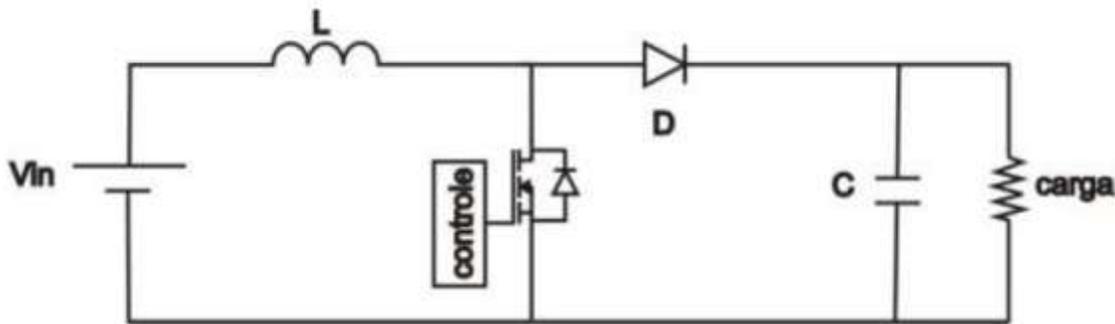


Figura 9: Circuito elétrico do conversor boost

A relação entre a tensão de saída V_{out} e a entrada V_{in} é proporcional à razão cíclica do conversor, sendo definida em (5), demonstrando que sempre a tensão do conversor boost será igual ou superior a V_{in} .

$$V_{out} = \left(\frac{1}{1 - D} \right) \cdot V_{in} \quad (5)$$

O circuito funciona de modo que quando a chave encontra-se ativa, ou em condução, a corrente que percorre o indutor I_L cresce linearmente fazendo com que o diodo permaneça polarizado reversamente nessa etapa. No momento do desligamento da chave a energia armazenada no indutor W_L , que é proporcional à sua indutância, vista em (6), flui através do diodo para a carga, aumentando assim a tensão de saída V_{out} do circuito.

$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \quad (6)$$

O conversor *boost* apresenta dois modos de operação distintos, como no conversor *buck*, o modo CCM e o modo DCM. No modo CCM o valor mínimo da indutância deve ser superior a (7).

$$L_{boost} = (1 - D)^2 \cdot D_{boost} \cdot \frac{R}{f_{chav}} \quad (7)$$

CAPÍTULO 4

FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA EM AMBIENTE ESPACIAL

A única fonte de energia externa no ambiente espacial é a radiação solar, portanto qualquer sistema que não utiliza energia solar deve carregar sua própria fonte de energia, como bateria primária, célula combustível, energia nuclear ou célula química. (PATEL, 2005)

4.1. Energia fotovoltaica

A maior parte dos satélites e aplicações espaciais utiliza como a principal fonte de geração de energia elétrica a conversão de energia fotovoltaica. Os altos custos para a utilização de reatores nucleares, células combustível e a conversão termoeletrica fazem com que essa seja a opção mais utilizada atualmente. (PATEL, 2005)

Define-se a densidade de potência da energia solar, conhecida como a constante solar, sendo igual a 1366 W/m^2 acima da atmosfera terrestre. Essa potência sofre a redução de aproximadamente 30% no momento que os raios solares passam pela atmosfera terrestre, proporcionando a insolação na superfície terrestre de 1000 W/m^2 . O espectro de frequências do sol é similar a de um corpo negro a temperatura de 6000 K , onde a curva característica apresenta o comprimento de onda de $0,2$ e $2 \mu\text{m}$, Figura 10, onde o pico de energia está concentrado em $0,5 \mu\text{m}$. (Lynn, 2010)

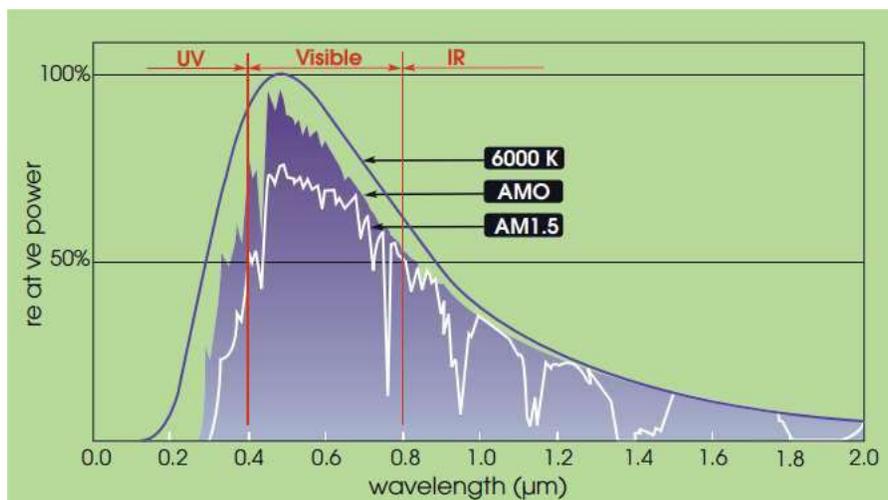


Figura 10: Espectro de Frequência da radiação solar

4.2. Célula Fotovoltaica

Define-se a célula fotovoltaica como um dispositivo semicondutor constituído normalmente de silício, formado por uma junção p-n com a dopagem de elementos químicos com elétrons e lacunas, que quando exposto a luz libera elétrons em torno de um circuito fechado (MOÇAMBIQUE, 2012). As cargas são geradas quando a energia do fóton incidente é suficiente para desprender alguns dos elétrons da camada de valência do material semicondutor e do comprimento de onda da luz incidente, portanto a taxa de elétrons depende do fluxo de luz incidente e da capacidade de absorção do semicondutor (MOÇAMBIQUE, 2012).

O modelo de uma célula fotovoltaica e o seu circuito equivalente, incluindo a sua resistência série e paralela, são apresentados na Figura 11.

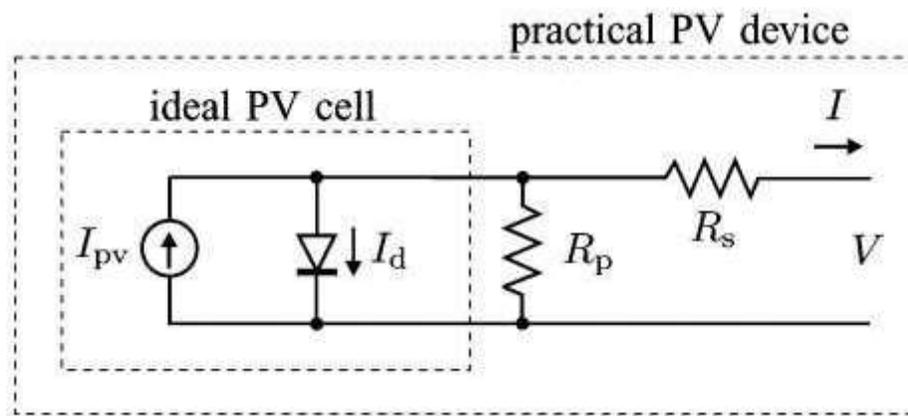


Figura 11: Representação do circuito equivalente da célula fotovoltaica

4.3. Geração de Energia por Software

Através de um código em Matlab, desenvolvido por um colega do grupo de pesquisa, foi simulado a geração de energia elétrica em ambiente espacial considerando a incidência solar, albedo e velocidade angular de rotação do satélite. A geração em cada uma das faces do satélite é apresentada na Figura 12.

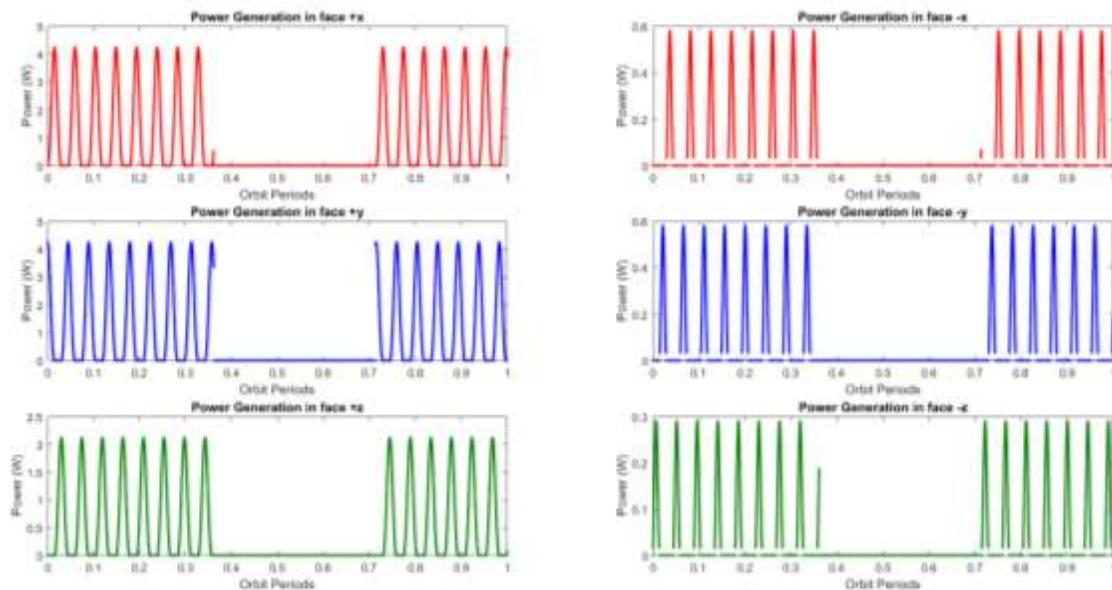


Figura 12: Geração de potência em cada face.

No entanto, o valor de interesse é o da geração de todas as células solares combinadas. Isto é apresentado na Figura 13, onde o aumento notável da geração ocorre enquanto o satélite encontra-se no período de eclipse.

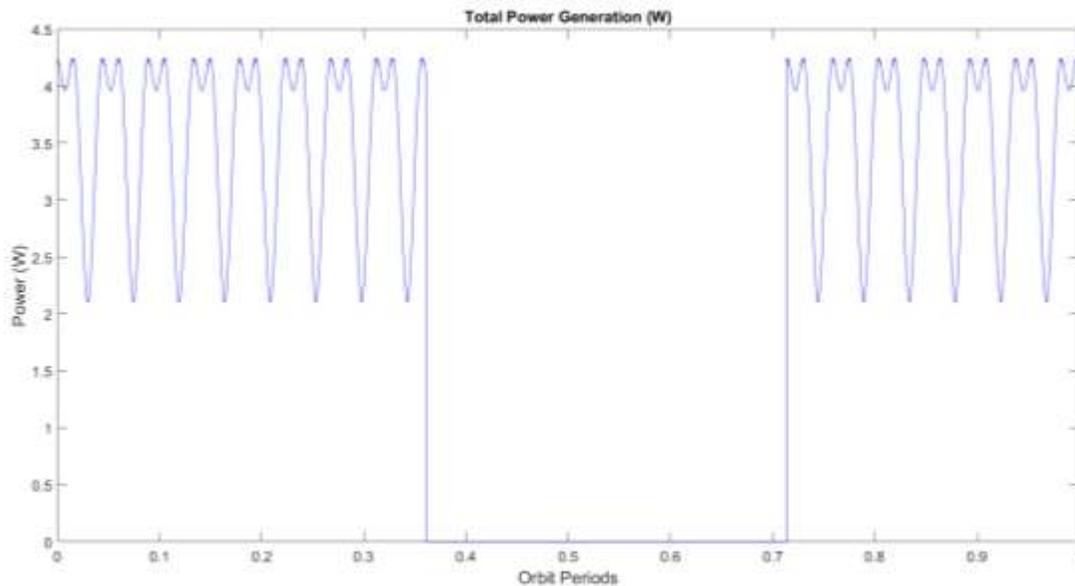


Figura 13: Geração de potência total em função do tempo.

Considerando diferentes velocidades angulares de rotação do satélite, a geração de potencia estimada resulta em alguns valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Geração de potência por simulação.

Velocidade Angular X axis (rad/s)	Velocidade Angular Y axis (rad/s)	Velocidade Angular Z axis (rad/s)	Potência Média Gerada (W)
0	0	0	2.750
0.087	0.087	0.087	2.296
0.1221	0.035	0.070	2.233
0.2618	0.2618	0.2618	2.294
1.047	1.047	1.047	2.294
1.57	1.57	1.57	2.294

Estes valores representam o valor médio de todo o período orbital, considerando a energia total gerada pelas seis faces. O primeiro caso está na linha 1, onde a velocidade angular é zero, e tem uma face voltada para o sol com ângulo de incidência quase zero. Esta é uma das melhores configurações para geração de energia, no entanto, é altamente improvável que isso aconteça.

Portanto o resultado que melhor representa a geração de potência, seria a média dos valores obtidos com velocidade angular diferente de zero, visto que o satélite não apresenta controle de atitude. Sendo assim, a potência média gerada fica em torno de 2,29 W.

CAPÍTULO 5

BALANÇO DE POTENCIA

Essencial para assegurar o sucesso da missão no quesito energético, essa medida relaciona os estudos e os resultados obtidos sobre a geração de energia elétrica em ambiente espacial e os valores de potência requerido por cada subsistema do NANOSATC-BR2.

A Tabela 2 relaciona os componentes elétricos e eletrônicos do NCBR2 com as respectivas potências consumidas.

Tabela 2 - Balanço de Potência sem os ajustes sugeridos.

Componentes	Potência Máxima	Ciclo de trabalho (em porcentagem)	Consumo com o ciclo de trabalho
Sistema Elétrico de Potência	0,249 W	100 %	0,249 W
Computador de Bordo	0,380 W	100 %	0,380 W
Receptor (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmissor (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Sistema de Antena	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetômetros (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 Chips SMDH	0,030 W	100 %	0,030 W
Sonda de Langmuir	0,800 W	100 %	0,800 W
Determinação de Atitude SDATF	0,271 W	100 %	0,271 W
TOTAL			2,12 W

O ciclo de trabalho, tempo em que o sistema ou componente permanecerá ativo dentro do período orbital, foi contabilizado e o resultado de consume total foi de 2,12W. Alguns artigos científicos, o estudo realizado no Capítulo 4 e as tabelas fornecidas pela ISIS nos fazem assumir que a geração média de um CubeSat 2U é de aproximadamente 2Wh. Tendo como ponto de partida os resultados teóricos, é apresentado o balanço de potencia da Tabela 2, onde nota-se um grande consumo demandado pela Sonda de

Langmuir, portanto recomendamos a diminuição do seu ciclo de trabalho, limitando-a ao período de insolação da órbita, que é de aproximadamente 67% da órbita, ou 65 minutos dos 96 minutos de período orbital. Tal ação diminuiria a profundidade de descarga das baterias de Li-ion aumentando a sua vida útil. O balanço de potência com as correções iniciais está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Balanço de Potência com as correções iniciais.

Components	Maximum Consumption	Duty Cycle	Consumption with duty cycle
Electric Power Subsystem	0,249 W	100 %	0,249 W
Board Computer	0,380 W	100 %	0,380 W
Receiver (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmitter (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Antenna system	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetometers (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 SMDH ICs	0,030 W	100 %	0,030 W
Langmuir Probe	0,930 W	100 %	0,930 W
Attitude Determination System	0,271 W	100 %	0,271 W
SDATF			
TOTAL			2,25 W

Utilizando os dados e resultados encontrados através do código em Matlab, seção 4.3, onde a geração média de potência é 2.29 W, é apresentado o balanço de potencia da Tabela 4, onde o ciclo de trabalho da sonda de Langmuir foi aumentado em relação a correção inicial, Tabela 3. No entanto, a sonda de Langmuir ainda não pode operar com o ciclo de trabalho máximo, Tabela 2, pois é importante considerar cerca de 12,5% do valor de geração para carregar as baterias e assegurar os níveis de tensão de segurança nas mesmas. Com isso, a sonda ficará ativa em 73,4% do período orbital, ou seja, 70 minutos e 46 segundos.

Tabela 4 - Balanço de Potência com as correções finais.

Components	Maximum Consumption	Duty Cycle	Consumption with duty cycle
Electric Power Subsystem	0,249 W	100 %	0,249 W
Board Computer	0,380 W	100 %	0,380 W
Receptor (TRXUV RX)	0,237 W	100 %	0,237 W
Transmitter (TRXUV TX)	0,787 W	4,2 %	0,033 W
Antenna System	0,040 W	100 %	0,040 W
2 Magnetometers (XEN 1210)	0,031 W	100 %	0,031 W
FPGA	0,049 W	100 %	0,049 W
2 SMDH ICs	0,030 W	100 %	0,030 W
Langmuir Probe	0,800 W	73,4 %	0,683 W
Attitude Determination System	0,271 W	100 %	0,271 W
SDATF			
TOTAL			2,003 W

CAPÍTULO 6

PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

No período de Agosto de 2017 a Julho de 2018 algumas tarefas foram realizadas, entre elas:

- Estudo e análise dos subsistemas elétricos e eletrônicos que compõem o *BUS* e o *Payload* do NANOSATC-BR2;
- Estudo sobre o condicionamento de energia através de conversores de sistemas elétricos de potência de nanossatélites da classe CubeSat;
- Estudos sobre geração de energia em ambiente espacial através de simulações;
- Desenvolvimento do Balanço de Potência do NANOSATC-BR2 refinado através do código em Matlab, bem como medidas que devem ser adotadas para assegurar o sucesso da missão no quesito energético.
- Apresentação em congresso internacional, “*4th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop*”, de um trabalho referente ao estudo realizado no presente relatório. Trabalho intitulado como: “*NANOSATC-BR2, 2 UNIT CUBESAT, POWER ANALYSIS, SOLAR FLUX PREDICTION, DESIGN AND 3D PRINTING OF THE FLIGHT MODEL FROM THE UFSM & INPE’S NANOSATC-BR, CUBESAT DEVELOPMENT PROGRAM*”.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho desenvolvido pelo bolsista no período de vigência da bolsa (Agosto de 2017 até Julho de 2018) contribui significativamente para a compreensão do funcionamento de sistemas elétricos espaciais e suas formas de operação, especialmente para o nanossatélite NANOSATC-BR2 do Programa NANOSATC-BR, Desenvolvimento de CubeSats. Os estudos sobre condicionamento de energia adiantaram conceitos que o aluno irá utilizar durante toda a sua graduação nas disciplinas do curso de Engenharia Elétrica. Além disso, a relação dos conteúdos estudados foi de suma importância na realização do Balanço de Potência, tendo em vista que os componentes e seus consumos de potência foram estudados e então relacionados com os estudos e análises de geração de energia elétrica em ambiente espacial.

Através do Balanço de Potência refinado pelo código em Matlab, foi possível aumentar o tempo de operação da Sonda de Langmuir, se comparado ao Balanço de Potência com resultados teóricos. As alterações respeitaram as faixas de segurança para funcionalidade do NCBR2 no quesito energético, essa medida proposta pelo aluno foi acatada pelos desenvolvedores da carga útil para que o Balanço de Potência seja positivo e não gere problemas de suprimento de energia nem danos nas baterias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PATEL, M. R. *Spacecraft Power System*. CRC PressINC, New York, 2005.
- [2] MOÇAMBIQUE, N. E. M. *Aplicação de Algoritmos de Busca do ponto de Máxima potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação de Mestrado da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [3] RASHID, M. H. *Eletrônica de Potência, Circuitos, Dispositivos e Aplicações*. MAKRON Books, São Paulo, 1999.
- [4] DURÃO, O. S. C., SCHUCH, N. J., et. al. **Documento Preliminar de Revisão - Status de Engenharias e Tecnologias Espaciais do Projeto NANOSATC-BR – Desenvolvimento De CubeSats**. Documento apresentado à AEB. Maio 2011;
- [5] COSTA, R. L. **GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA O SATÉLITE NANOSATC-BR**. 2009. 48p. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- [6] BROWN , JONATHAN., MUNAKATA, RIKI., **Dnepr 2 Satellite Identification and the Mk.III P-POD**, CubeSat Developers' Workshop, San Luis Obispo, CA, USA, 09 de Abril de 2008;
- [7] GOMSPACE. *NanoPower P-series Datasheet P31 V6.1*. Denmark, 2012.
- [8] LYNN, P. A. *Electricity from Sunlight: An Introduction to Photovoltaics*. John Wiley & Sons Ltd, Imperial College London, 2010.
- [9] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. *Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.