

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE**

Thiago Martins

**DESENVOLVIMENTO DO PAYLOAD DE HARVESTING
DE ENERGIA TERMOELÉTRICA PARA
MICROSSATÉLITES**

Joinville

2019

Thiago Martins

**DESENVOLVIMENTO DO PAYLOAD DE HARVESTING
DE ENERGIA TERMOELÉTRICA PARA
MICROSSATÉLITES**

Qualificação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de
Sistemas Eletrônicos da Universidade
Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Anderson W.
Spengler

Joinville

2019



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS - PPGESE

Avaliação de Exame de Qualificação

No **20/05/2019** a partir das **14h**, sala **U155**, Bloco U do Centro Tecnológico de Joinville da UFSC, reuniu-se a Banca Avaliadora de Exame de Qualificação composta pelos seguintes membros:

Nome	Instituição	Função
Prof. Dr. Anderson W. Spengler	UFSC	Presidente
Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira	UFSC	Membro
Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Moraes	UNESP	Membro

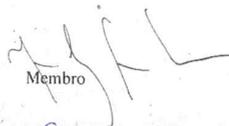
para a avaliação do Projeto de Pesquisa do estudante **Thiago Martins**, orientado pelo **Prof. Anderson Wedderhoff Spengler**, com trabalho intitulado **Desenvolvimento do Payload de Harvesting de Energia Termoelétrica para Microssatélites**.

Da avaliação da Banca, o estudante foi considerado APROVADO () REPROVADO no Exame de Qualificação.

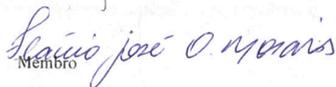
Para o caso de reprovação, a Banca levou em conta os seguintes aspectos, que devem ser considerados pelo estudante para nova submissão de requerimento de Exame de Qualificação, nos termos da resolução específica vigente:

Nestes termos, assinam:


Presidente


Membro

Membro


Membro


Estudante

RESUMO

Este trabalho visa desenvolver um módulo de harvesting termoelétrico para Payload a fim de avaliar a geração de energia elétrica por gradientes térmicos entre faces de um Cubesat 1U. Este módulo é responsável por converter, gerenciar e armazenar parte da energia para o microsatélite. Para avaliar seu potencial energético, algumas topologias diferentes são propostas. As diferenças estão relacionadas à capacidade dos capacitores de armazenamento e ao tipo de conversor DC-DC utilizado para cada caso. O presente trabalho busca validar os resultados numéricos aplicando-os em uma bancada de testes capaz de simular fisicamente a geração de energia térmica das faces do Cubesat. Este método permite a conversão e armazenamento de energia através do módulo de harvesting proposto para ser validado experimentalmente. O Payload deve ser capaz de comunicar-se com o computador de bordo do cubesat. Esta tarefa exige um sistema operacional embarcado no Payload. Como resultado, espera-se determinar o melhor conjunto de capacitores conversores para gerenciar a conversão e o armazenamento de energia gerada pelos TEGs, além de proporcionar um sistema embarcado completo que possa ser parte integrante do projeto Serpens para que as análises sejam realizadas também em órbita.

Palavras-chave: Harvesting Termoelétrico. Cubesat. Payload.

ABSTRACT

This work aims to develop a thermoelectric Payload module to evaluate the generation of electric energy by thermal gradients between faces of a Cubesat 1U. This module is responsible for converting, managing and storing part of the energy to the microsatellite. To evaluate their energy potential, some different topologies are proposed. The differences are related to the capacity of the storage capacitors and the type of DC-DC converter used for each case. The present work seeks to validate the numerical results applying them to a test bench capable of physically simulating the thermal energy generation of the Cubesat faces. This method allows the conversion and storage of energy through the harvesting module proposed to be validated experimentally. The Payload must be able to communicate with the on-board computer of the Cubesat and requires an embedded operating system for this task. As a result, we expect to determine the best set of converter capacitors to manage the conversion and storage of energy generated by the TEGs, as well as providing a complete embedded system that can be included in the Serpens project so that the analyzes are also performed in orbit.

Keywords: Thermoelectric Harvesting. Cubesat. Payload.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Vista esquemática de um TEG	22
Figura 2	Cubesat em Órbita	30
Figura 3	Placa de circuito impresso projetada para aplicação do Payload Harvesting em um Cubesat 1U.....	31
Figura 4	Esquemático do conversor LTC3108	32
Figura 5	Esquemático do conversor LTC3109	33
Figura 6	Esquemático do conversor BQ25570	34
Figura 7	Circuito de armazenamento de energia.....	37
Figura 8	Esquemático parcial do circuito de gerenciamento, Relés de seleção do conversor ativo.....	38
Figura 9	Esquemático parcial do circuito de gerenciamento, Relés de seleção de Polaridade.....	39
Figura 10	Circuito de aquisição de valores de tensão.....	40
Figura 11	Circuito de aquisição de Temperatura, armazenamento de dados e <i>switch</i> de multiplexação.....	40
Figura 12	Diagrama de Caso de Uso	43
Figura 13	Diagrama de Atividades. Requisições por parte do OBC	45
Figura 14	Diagrama de Atividades internas do Payload.....	46
Figura 15	Diagrama de Estados	47
Figura 16	Aparato Experimental.....	49
Figura 17	Aparato Experimental. Controle de Tensão dos TECs .	50
Figura 18	Configuração da Bancada de Teste.....	50
Figura 19	Localização dos Termopares na Bancada de Teste.....	51
Figura 20	Interface do sistema - Labview.....	52
Figura 21	Temperatura - Posição da Célula 1 (TEG).....	53
Figura 22	TGPR-10W-4V-40S - Caracterização.....	55
Figura 23	TGPR-5W-5V-40S - Caracterização.....	57
Figura 24	Cronograma de Atividades.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Principais características dos conversores utilizados. . . .	35
Tabela 2	Relação de Relés para seleção de Conversor e Polaridade	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ampop	Amplificador Operacional
CCS	Code Composer Studio
CI	Circuito Integrado
CMC	Controle de Modo de Corrente
DMA	Direct Memory Access
FM	Frequency Modulation
FRAM	Ferroelectric Random Access Memory
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
IMEC	Interuniversitair Micro-Electronica Centrum
ISR	Interrupt Service Routine
JTAG	Joint Test Action Group
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LDO	Low Dropout Linear Regulator
LPM	Low Power Mode
MCC	Modo de condução contínua
MCD	Modo de condução descontínua
MCL	Modo de condução limite
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OBC	On-Board Computer
PCB	Printed Circuit Board
PMIC	Power Management Integrated Circuit
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RISC	Reduced Instruction Set Computer
ROM	Ready Only Memory
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RTG	Radioisotope Thermoelectric Generator
TEC	Refrigerador Termoeletrico
TEG	Gerador Termoeletrico
ULP	Ultra Low Power
VMC	Controle de Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	EFEITO SEEBECK, PELTIER E THOMSON	19
2.2	TEG E SUAS APLICAÇÕES	21
2.3	CONVERSORES	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	PAYLOAD DE HARVESTING E COMPONENTES	30
3.1.1	Conversores	31
3.1.2	Elementos de Armazenamento	35
3.1.3	Circuito de Medição de Energia e Gerenciamento do Payload	37
3.1.4	Microcontrolador MSP430	41
3.1.4.1	Algoritmo de Gerenciamento do Payload	42
3.2	BANCADA DE TESTE	48
3.2.1	Validação da Bancada	52
4	RESULTADOS ESPERADOS	55
5	CRONOGRAMA	59
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de Temperatura do Cubesat.	67
	APÊNDICE B – Esquemático Completo do Mό- dulo de Harvesting	73

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, o foco da obtenção de energia do meio ambiente apresentou-se por meio de sistemas de macro captação, como moinhos de vento, moinhos d’água e energia solar passiva. Agora, com a tendência em eliminar os cabos, os projetos voltam-se para captação de micro energia, visando assim, o *ultra-low-power* (ULP) (RAJU; GRAZIER, 2008) ou da tradução literal, ultra baixo consumo de energia. A tecnologia ULP está permitindo vastas aplicações na captação de energia em pequenas quantidades e que, com pouca ou nenhuma manutenção, é capaz de operar por longos períodos (FRANTZ; FREEMAN; LINK, 2012)

O termo *energy harvesting*, é utilizado para explicar esse processo de extração de energia a partir do meio ambiente, também podendo apresentar-se como *energy scavenging* ou *power harvesting*. Energia esta que pode ser obtida a partir de diferentes fontes, como vibrações mecânicas, eletromagnéticas, luz, acústica, fluxo de ar, calor ou variações de temperatura, representando uma fonte infinita de energia limpa disponível (YILDIZ, 2009).

O armazenamento de energia em baterias melhorou significativamente nos últimos anos, no entanto, este progresso não tem sido capaz de equiparar-se com o desenvolvimento de microprocessadores, memória de armazenamento e aplicações de tecnologia sem fio (YILDIZ, 2009). Em contrapartida, sistemas de harvesting são excelentes para aplicações em dispositivos que operam em locais remotos. Estas fontes essencialmente livres, quando, projetadas e instaladas corretamente, dispensam manutenção e tornam-se disponíveis em toda a vida útil da aplicação. Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), tais como sistemas ZigBee costumam se beneficiar destes dispositivos de coleta de energia (WHAT..., 2015). A junção destas duas soluções, garante à aplicação energia teoricamente ilimitada, uma vez que, devido condições inapropriadas para coleta de energia, a bateria cumpre o papel de fonte temporária, aumentando assim, a confiabilidade do sistema.

Estes dispositivos remotamente localizados, em geral são os ditos sistemas embarcados. Segundo Slongo et al. (2013), o consumo de energia é um aspecto importante e determinante ao projeto. A longevidade destes sistemas é dependente da potência consumida de sua bateria ou fonte de energia, sendo que em projetos de sistemas embarcados o consumo se torna uma métrica de qualidade.

A disponibilidade de energia e o tipo de captação para estes

sistemas pode ser relacionada ao ambiente ao qual são expostos. Para microssatélites, a que se refere este trabalho, trata-se de um sistema em órbita, no qual a única fonte disponível é a energia solar. Uma das formas mais convencionais de obtenção desta energia é o uso de células fotovoltaicas, as quais necessitam uma área exposta considerável que pode ser prejudicial ao satélite, pois aumenta a massa do objeto e também o arrasto atmosférico (BECKER et al., 2016).

Uma alternativa pode ser o uso de dispositivos termoeletrônicos como geradores de energia. Por causa de seu comportamento de estado sólido, os geradores termoeletrônicos (TEGs) são particularmente adequados para aplicações espaciais. Como eles não são baseados em um processo de conversão dinâmica, não colocam quaisquer vibrações no satélite (LUKOWICZ et al., 2016).

Os TEGs operam gerando energia elétrica através da diferença de temperatura, e nas condições de operação dos microssatélites esta solução é altamente aplicável. Segundo Lukowicz et al. (2016), o calor operacional ou de subsistemas e dos componentes eletrônicos convertem a energia elétrica em calor, de modo que até 98% da potência elétrica produzida é convertida. Todos estes fluxos de calor são concentrados e transportados para radiadores que emitem calor para o espaço, e esta energia poderia ser muito bem aproveitada pelos TEGs.

Este método de harvesting é acompanhado por um circuito que trata, armazena e repassa a energia coletada para o sistema a ser alimentado. Pode-se apresentar de formas diversas, dependendo do tipo de captação realizada. Sendo que o método pode retornar uma corrente contínua (CC, ou DC do inglês *Direct Current*) ou alternada (CA, ou AC do inglês *Alternating Current*). No caso dos dispositivos termoeletrônicos, que fornecem uma quantidade muito baixa de tensão, pode-se aplicar um circuito altamente integrado com conversor DC-DC e gerenciamento de energia *ultra-low-power*.

Os estudos apresentados por Dias et al. (2015) e Dias et al. (2016), mostram justamente a importância de um sistema eficiente no consumo de energia. O uso de circuitos integrados (CIs) diferentes, e um projeto de circuito distinto, é apresentado em cada estudo. Cada circuito proposto busca maximizar o harvesting energético e para isso, em um dos trabalhos, Dias et al. (2015) cria o próprio gerenciamento ULP eliminando o gerenciamento interno do CI.

O presente trabalho tem como premissa os estudos de eficiência de três circuitos conversores DC-DC com diferentes capacitores de armazenamento, visando obter o melhor resultado em autonomia de energia para aplicação em um microssatélite. Identificar a capacidade

máxima de conversão e armazenamento do *payload*, também é necessário. No trabalho de Dias et al. (2017) o autor propõe um circuito para reduzir os erros de medição desta energia obtida através do *harvesting* termoelétrico. Neste, foram utilizados dois supercapacitores com carregamento independente, reduzindo o erro de medição em cerca de 22%. No payload proposto o circuito de medição irá realizar a leitura direta dos conjuntos de armazenamento deixando a proposta do trabalho citado como um adicional possível. O trabalho de Becker et al. (2016) também será usado como base de concepção do módulo que se apresenta como um componente aditivo ao dispositivo termoelétrico automatizado.

A avaliação da eficiência do módulo proposto é realizada mediante aplicação dos resultados obtidos no trabalho de Ostrufka et al. (2017) onde o autor buscou encontrar o melhor posicionamento para um gerador termoelétrico em microssatélites do tipo cubesat. Assim, utilizam-se os dados de variação de temperatura (conforme posição do TEG) aplicados ao gerador automatizado que no que lhe concerne coleta a energia e encaminha para os conversores e capacitores que compõem o módulo de harvesting.

Os valores de tensão obtidos pelo harvesting são armazenados na unidade de memória (*SD card*) do payload. O gerenciamento destes dados é realizado via microcontrolador alocado no módulo proposto. Após verificação, o módulo de harvesting será então exposto à simulação com auxílio do software LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) replicando as condições de *harvesting* quando um microssatélite esta em órbita terrestre conforme o trabalho de Ostrufka et al. (2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar um módulo de payload de harvesting de energia termoelétrico para microssatélites.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, necessita-se concretizar os seguintes objetivos específicos:

- Comparar a eficiência dos 3 conversores acoplados no módulo;
- Identificar, entre os 3 circuitos de armazenamento propostos, qual modelo melhor atende ao critério de autonomia energética;
- Testar o módulo desenvolvido na geração e conversão de energia;
- Avaliar a capacidade de armazenamento de energia e autonomia do modelo;
- Simular o dispositivo de harvesting em órbita com auxílio de ferramentas computacionais e testes em bancada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos utilizados como base no entendimento deste trabalho. Inicialmente são apresentados os efeitos termoeétricos conhecidos como Seebeck, Peltier e Thomson que estão diretamente relacionados com os dispositivos termoeétricos de harvesting apresentados logo em seguida. No próximo t3pico, 3 exposto um estudo das caracter3sticas e principais aplica33es dos TEGs. Por fim, o 3ltimo t3pico deste cap3tulo trata do m3dulo de gerenciamento da energia captada por um dispositivo TEG, apresenta-se ent3o os conversores DC-DC ULP.

2.1 EFEITO SEEBECK, PELTIER E THOMSON

A energia t3rmica 3 prontamente exposta no ambiente e pode ser obtida de diferentes fontes desde pessoas e animais, m3quinas e dispositivos eletr3nicos e principalmente fontes naturais (MATEU; MOLL, 2005). Os efeitos termoeétricos dessa obten33o, ou gera33o de energia s3o descritos principalmente atrav3s de tr3s efeitos que relacionam a f3sica da termoeletricidade: Peltier, Seebeck e Thomson (DUNN, 2013, p. 135).

O pioneirismo no campo de estudos termoeétricos pode ser atribuído ao italiano Alessandro Volta (ANATYCHUK, 2004 apud BECKER et al., 2016, p. 19), que realizou experimentos em torno de 1794, tendo como premissa descobrir a for3a termoeétrica gerada sob a influ3ncia de uma diferen3a de temperatura. Porem, em 1821 Thomas Johann Seebeck atribuiu o fato ao magnetismo induzido pela diferen3a de temperatura e posteriormente concluiu que a corrente induzida era origin3ria da for3a termoeétrica (CALTECH, 2016) este estudo deu origem ao que conhecemos como efeito Seebeck.

A tens3o Seebeck 3 uma grandeza que depende tanto da diferen3a de temperatura quanto da natureza do condutor. Logo se h3 gradiente de temperatura, por exemplo, ao longo de uma barra met3lica onde um lado esta mais frio que outro, os el3trons estar3o concentrados no lado frio que se tornara negativamente carregado com rela33o ao lado mais quente ocasionando um diferen3a de potencial (ROSA, s.d, cap. 15.4).

Esta diferen3a de potencial est3 relacionada com o fato de que el3trons na jun33o mais quente do material tem mais energia t3rmica do que aqueles na jun33o mais fria e com isso tendendo a se deslocar

(drift) para a junção mais fria (CURTIS, 2003).

A força eletromotriz gerada por essa diferença de potencial é proporcional a diferença de temperatura entre as junções. Sendo este o efeito Seebeck, caracterizado por captar energia elétrica através do gradiente de temperatura, pode-se também apresentar o inverso deste. Quando aplicada uma diferença de potencial elétrico no material, é proporcionado mudanças na temperatura das junções do mesmo, resfriando uma e aquecendo a outra. Este é conhecido como efeito Peltier (CURTIS, 2003).

Jean Charles Athanase Peltier descobriu que ao aplicar uma corrente elétrica geraria aquecimento ou arrefecimento na junção de dois metais diferentes. Posteriormente, em 1838, Lenz, um cientista alemão, mostrou que, dependendo da direção do fluxo de corrente, o calor poderia ser removido, e a partir da junção transformar a água em gelo, ou por inversão da corrente, o calor poderia ser gerado para derreter o gelo (CALTECH, 2016). A constante de proporcionalidade é conhecido como o coeficiente de Peltier.

Vinte anos mais tarde, Willian Thomson juntamente com Lord Kelvin, emitiram um estudo abrangente da relação entre os coeficientes dos efeitos Seebeck e Peltier. O coeficiente de Peltier seria simplesmente o Seebeck vezes coeficiente de temperatura absoluta. Isto levou os estudos ao terceiro efeito termoeletrico conhecido como Thomson. No efeito de Thomson, o calor é absorvido ou produzido quando a corrente flui em um material com um gradiente de temperatura (CALTECH, 2016).

Para o efeito Thomson, quando a fonte de calor está parada ocorre um deslocamento aleatório dos elétrons e o fluxo médio de elétrons é nulo. No entanto, ao deslocar a fonte de calor são gerados (no sentido do deslocamento) elétrons livres que se deslocam majoritariamente, gerando a polarização do sistema e um fluxo de corrente (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010 apud BECKER et al., 2016, p. 20).

1. Efeito Seebeck. Estabelece que a tensão produzida em um termopar é proporcional à temperatura entre duas junções.
2. Efeito Peltier. Estabelece que, se uma corrente flui através de um termopar, uma junção é aquecida (liberação de energia), enquanto a outra junção é resfriada (absorção de energia).
3. Efeito Thomson. Estabelece que, quando uma corrente circula ao longo de um condutor no qual existe uma diferença de temperatura, o calor é produzido ou absorvido, dependendo do

sentido da corrente e da variação de temperatura.(DUNN, 2013, p. 135)

Estes efeitos são obtidos através de dispositivos termoelétricos como por exemplo no termopar, constituído por dois metais unidos de forma a construir uma junção. O termopar apresentado a seguir, o qual é utilizado como referencia de dados para captação de energia neste trabalho, é chamado Gerador Termoelétrico (TEG).

2.2 TEG E SUAS APLICAÇÕES

Os TEGs são dispositivos utilizados para converter energia térmica em energia elétrica para uma variedade de aplicações que exigem o uso de baixa potência. Este harvesting de energia termoelétrica que explora as condições do efeito Seebeck, inclui um conjunto de pequenos termopares em uma configuração única que pode captar variações muito baixas de temperatura (YILDIZ, 2009).

Raju e Grazier (2008) afirma que os TEGs caracterizam-se por uma tensão de saída de 0.7V a carga correspondente, e que esta é uma tensão familiar para os engenheiros projetarem aplicações ULP. Afirma ainda que a energia gerada depende do tamanho do TEG, da temperatura ambiente, e/ou (no caso de captação de energia a partir de seres vivos), o nível de atividade metabólica.

Justificando ainda mais a utilização de módulo de gerenciamento de energia gerada a partir de um dispositivo termoelétrico, a corporação IMEC com sede na Bélgica afirma que a 22°C um tipo de relógio de pulso TEG oferece energia útil de 0.2 a 0.3mW, em média. Normalmente um TEG irá carregar uma bateria ou um supercapacitor e requer gerenciamento de energia para otimizar sua eficiência (RAJU; GRAZIER, 2008).

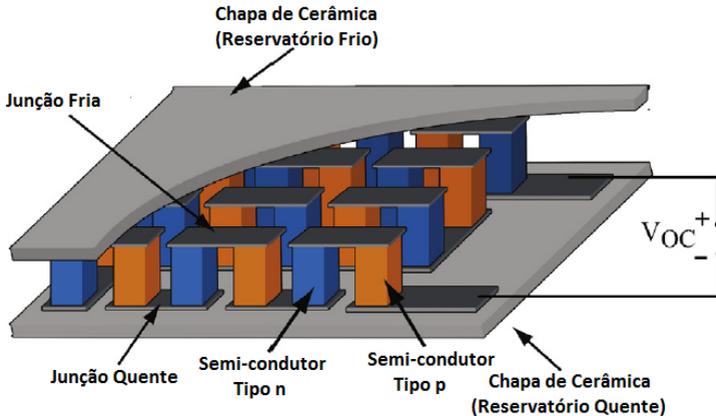
A Figura 1 mostra vista esquemática de um gerador termoelétrico com os semi-condutores n e p ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, entre duas placas de cerâmica.

O material do tipo "n"é dopado positivamente, contendo "buracos livres"enquanto que o do tipo "p"é dopado negativamente, estes são os responsáveis pela geração de energia (efeito Seebeck) ou no caso de efeito Peltier, pelo resfriamento/aquecimento. Basicamente pode-se dizer que a tensão de saída gerada pelo TEG corresponde á equação:

$$V_0 = S(T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

Onde S corresponde ao coeficiente de Seebeck do TEG, T_2 e T_1 à

Figura 1: Vista esquemática de um TEG



Fonte: Dias et al. (2016, tradução nossa).

temperatura do lado quente e do lado frio nas faces do gerador (PRIYA; INMAN, 2009) (BECKER et al., 2016, p. 22) ¹.

Dependendo do intervalo de temperatura ($\Delta T = T_2 - T_1$), a potência elétrica pode ser alterada de alguns microwatts para centenas de miliwatts e muito mais modificando o design (YILDIZ, 2009).

As aplicações de dispositivos termoelétricos são diversas, incluindo monitoramento de desempenho automotivo, vigilância e segurança militar, biomedicina, agricultura, dispositivos remotos, entre outros (YILDIZ, 2009). Devido a sua condição de operação quase que perpétua, este se torna excelente para aplicações em locais remotos ou de difícil acesso. Sendo assim, aplicar geradores termoelétricos para alimentar sensores e dispositivos eletrônicos em diversas condições é uma boa prática no uso de energias limpas. Rowe (1995) enfatiza as condições de pouca ou nenhuma manutenção dos TEGs, que em serviço desde 1960 só passaram por vistoria e atualização do seu sistema eletrônico e de abastecimento em 1990, voltando a operar.

Já a aplicação de geradores termoelétricos em satélites não é uma técnica recente, sendo que desde 1960 são usados geradores termoelétricos radioisótopos (RTG - Radioisotope Thermoelectric Generator). Os RTGs tem como finalidade gerar energia a partir do decaimento radioativo (LUKOWICZ et al., 2016). A diferença encontrada aqui, é a forma construtiva do dispositivo e também os materiais utilizados em

¹(BECKER et al., 2016), trabalho sob base de dados regulamentados

cada um.

Quando a energia é captada através de um TEG a tensão costuma ser muito baixa e para que se possa maximizar sua utilização, ou até mesmo viabilizar usam-se conversores de micro potência que tratam esta energia captada e a armazenam diretamente em capacitores ou baterias. Este conversor é o assunto do próximo tópico.

2.3 CONVERSORES

Devido à muito pequena quantidade da tensão fornecida pelos TEGs, técnicas eficientes de conversão DC-DC e gerenciamento de energia são necessários (BASSI et al., 2012).

Os sistemas eletrônicos de potência são essenciais à sustentabilidade energética. O uso de energia renovável para a geração de eletricidade em pequena ou grande escala, bem como o aumento da eficiência de transmissão e do consumo de eletricidade, são os pilares da sustentabilidade (MOHAN, 2014). A maioria dos equipamentos eletrônicos domésticos, como computadores pessoais (PC) e sistemas de entretenimento, é alimentada pela rede elétrica e usa, internamente, baixas tensões CC. Portanto, estes equipamentos requerem a eletrônica de potência na forma de fontes CC em modo chaveado para converter a tensão de entrada em uma baixa tensão CC regulada.

Muitos dispositivos, como telefones celulares, operam com baixas tensões de bateria, com uma ou duas células de bateria como entradas. Contudo, os circuitos eletrônicos internos requerem tensões mais elevadas, exigindo, portanto, um circuito que eleve (boost) a entrada CC a uma tensão de CC mais alta (MOHAN, 2014, cap. 1).

Conforme proposto acima, conversores de corrente contínua podem apresentar-se como abaixadores e/ou elevadores de tensão. Os abaixadores são conhecidos como conversores *Buck*, os elevadores de tensão como *Boost*, apresentados como principais topologias (ou topologia básica) de conversores não isolados. As demais topologias não isoladas são Buck-Boost, Cúk, Zeta e SEPIC e são derivadas da associação das duas topologias básicas. Tem-se ainda a topologia dos conversores isolados (com o uso de um transformador para alta frequência). As principais topologias isoladas são o Forward (buck isolado), Flyback (Buck-boost isolado), Push-Pull, Half-Bridge (Meia Ponte) e o Full-Bridge (Ponte Completa).

A transformação de uma fonte de tensão CC fixa em uma fonte de tensão CC ajustável é feita por meio de técnicas de chaveamento de dispositivos semicondutores de potência, tais como modulação por frequência (Frequency Modulation, FM), modulação por largura de pulsos (Pulse-Width Modulation, PWM), entre outras. O processo mais utilizado atualmente é a modulação por largura de pulsos (PWM).

A NASA teve um papel extraordinário na produção de fontes de alimentação de tensão DC/DC mais compactas e mais leves, impulsionando o desenvolvimento desses conversores DC-DC para utilização nos programas espaciais. Além disso, com o crescente avanço da microeletrônica e da nanoeletrônica, o uso desses conversores se generalizou em todas as áreas da engenharia. (AR-RABAÇA; GIMENEZ, 2013, p. 18)

Os conversores DC-DC em geral podem apresentar-se em diversas arquiteturas como já descrito antes. E todas elas possuem modos de operação que ficam a critério do projetista. Estes modos são descritos como modo de condução contínua (MCC), modo de condução limite (MCL) e modo de condução descontínua (MCD).

Em comum, nas aplicações de harvesting de baixa energia, são aplicados conversores DC-DC do tipo Boost (elevadores de tensão) e também podem possuir modos de operação. Existem três métodos fundamentais que podem ser aplicados para alcançar a conversão DC-DC (WANG, 2014).

- O primeiro é usando conversão de tensão linear de divisores resistivos. Este tipo de conversor DC-DC também é chamado regulador low-dropout (LDO);
- A segunda abordagem para um conversor DC-DC é utilizando um modo de interruptor de carga comutada para realizar a conversão step-up ou step-down de tensão. Neste tipo de conversor DC-DC, há alguns capacitores que armazenam energia e também possuem chaveamento.
- O terceiro método para alcançar a conversão de tensão DC-DC é por meio de uma combinação de um indutor e um capacitor. Este tipo de conversor DC-DC, também pertence ao comutador do modo de conversores DC-DC (baseado no indutor) cujo princípio de operação é semelhante ao segundo método.

Além das já citadas classificações, podemos ainda distinguir os conversores DC-DC conforme o tipo de controle a ele aplicado que pode ser por modulação de largura de pulso (PWM), controle de tensão (VMC) ou controle do modo de corrente (CMC).

Empresas como a Texas Instruments e a Linear Technology fornecem uma gama desses conversores em variadas topologias para fins de aplicações distintas. Estes conversores são apresentados como circuitos integrados (CIs) de ultra baixa potência (ULP). O controle que pode ser obtido sobre o controlador dependera desta topologia. Suas aplicações variam, alguns exemplo são mostrados abaixo (TEXAS INSTRUMENTS, 2018a):

- Energy Harvesting;
- Baterias solares;
- Wireless Sensor Networks (RSSF);
- Monitoramento industrial;
- Monitoramento ambiental;
- Bridge e Monitorização Estrutural (SHM);
- Dispositivos de Saúde portátil e fácil de usar;
- Controles remotos para sistemas de entretenimento;

Tensões de *step-up* de 5V (desejado para este trabalho) podem ser alcançados por conversores DC-DC comerciais para harvesting, porém, na maioria dos casos, precisa de pelo menos 1V da tensão de entrada ou *feedback* e exigem uma potência mínima, a fim de iniciar o funcionamento. Em geral, a maioria dos transdutores de harvesting fornecem um nível de tensão abaixo de 1V e uma potência abaixo de 1mW (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016). Novas arquiteturas específicas de circuitos são, portanto, necessárias. Para este efeito, várias topologias de baixa tensão e baixa potência têm surgido nos últimos anos, tanto industrial quanto pesquisa acadêmica (ADAMI et al., 2012).

No trabalho de Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016) é apresentado um *review* das topologias estudadas para fins de harvesting ULP. O autor divide os conversores propostos em três categorias:

- Conversores Capacitivos (Charge Pump)

- Conversores Indutivos
- Topologia Híbrida (Indutivo+Capacitivo)

Na revisão os conversores mais eficientes (que possuem maior *range input-output*) são os modelos indutivos. Porém, se faz necessário levar em consideração os princípios de operação assim como as fontes energéticas utilizadas. Para determinar um conversor por exemplo, as características da fonte são fundamentais, além disso, os parâmetros prioritários do conversor podem variar para cada aplicação. A escolha do conversor pode se basear por características como a eficiência geral do conversor, mas também a tensão mínima de partida a frio, a capacidade de fornecer uma tensão regulada, a capacidade de reconfiguração, a capacidade de ser totalmente integrada em um CI, entre outros (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

Os conversores capacitivos (*Charge Pump*) apresentam uma desvantagem quando usados em aplicações de ultra baixa voltagem. Devido ao um grande número de estágios de bombeamento, que são necessários para elevar tensões de alimentação muito baixas, a eficiência geral diminui. Porém, os conversores de capacitores comutados são bem conhecidos e amplamente utilizados em CIs. Neste contexto, diferentes soluções são encontradas. Por exemplo, a densidade, a eficiência, a linearidade, a precisão e o custo dependem dos capacitores disponíveis. Desta forma, as limitações do processo assim como a qualidade dos capacitores utilizados devem ser consideradas (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

O segundo grupo apresentado por Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016) são dos conversores indutivos *step-up*. Estes conversores podem atingir o maior range (*input/output*) entre os três grupos. No entanto, para atingir uma tensão de saída razoavelmente grande, a partir de tensões de entrada muito baixas, esses conversores devem ser acionados por sinais de clock quase ideais, componentes quase sem perdas e correntes elevadas. Suas limitações são provenientes da baixa eficiência ao utilizar tensões de entrada muito baixas e do baixo fator de qualidade (Q) do indutor integrado ao sistema. Entre as geometrias dos indutores utilizadas a espiral planar é amplamente aplicada, pois as ligações levam a indutores com fatores Q de maior qualidade, mas seus valores de indutância são limitados e podem ser mais sensível às flutuações de produção (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

O terceiro grupo consiste nos chamados conversores híbridos (capacitivos e indutivos). O conjunto indutivo é geralmente aplicado para se obter a auto partida do conversor. Já o conjunto capacitivo é usado

para aumentar ainda mais a relação *input/output* sem deteriorar a eficiência de forma excessiva. A integração total deste conjunto em um único CI, o arranque automático e a eficiência energética são os principais problemas dos conversores aqui referidos (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

No trabalho de Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016) é apresentado também uma comparação qualitativa entre os tipos de conversores apresentados. Segundo Richelli, Colalongo e Kovacs-Vajna (2016) se um requisito for integração total do circuito em um CI, os conversores charge pump (capacitivos) e os conversores híbridos podem ser mais adequados. O conversor indutivo mostra uma melhor eficiência e pode começar seu funcionamento a partir de tensões mais baixas de entrada. Além disso, eles geralmente fornecem uma tensão de saída regulada. Os conversores híbridos também podem começar a partir de baixas tensões além de serem totalmente integrados, porque geralmente requerem indutores muito menores. No entanto, os híbridos ainda exibem uma baixa eficiência (RICHELLI; COLALONGO; KOVACS-VAJNA, 2016).

A fim de melhorar a eficiência, atingir níveis mais baixos de tensão de entrada ou obter um range maior, muitos trabalhos vem sendo desenvolvidos em complemento à estes conversores. Um método amplamente aplicado é o controle de ponto de máxima potência (MPPT). No trabalho apresentado por Win, Dasgupta e Panda (2011) uma nova abordagem do método MPPT para TEG é relatado. Aqui o MPPT é obtido usando princípio de impedância correspondente, sem necessitar de sensores ou cálculos de tensão e corrente. A implementação do MPPT é realizada juntamente à um conversor *buck-boost* e um gerador de sinal usando apenas um opamp. Já no trabalho apresentado por Buzilo et al. (2014) nenhum conversor foi utilizado e sua proposta se baseia em um novo TEG capaz de controlar a energia coletada. Com isto foi possível reduzir as perdas de energia devido à não idealidade da eficiência do conversor.

No próximo capítulo, são relacionados os conceitos da aplicação e os materiais e métodos utilizados na concepção do módulo proposto. Isto se faz com propósito maior de enfatizar a importância deste estudo e seus fundamentos para teste de bancada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos relacionados a este trabalho buscam identificar qual conjunto conversor-capacitor possui o melhor desempenho no gerenciamento de energia coletada por um dispositivo termoeétrico que pode vir a ser aplicado a um microssatélite do tipo cubesat 1U. Um microcontrolador do tipo MSP realiza o gerenciamento dos diferentes conjuntos e através de conversores analógicos digitais faz a leitura do potencial energético.

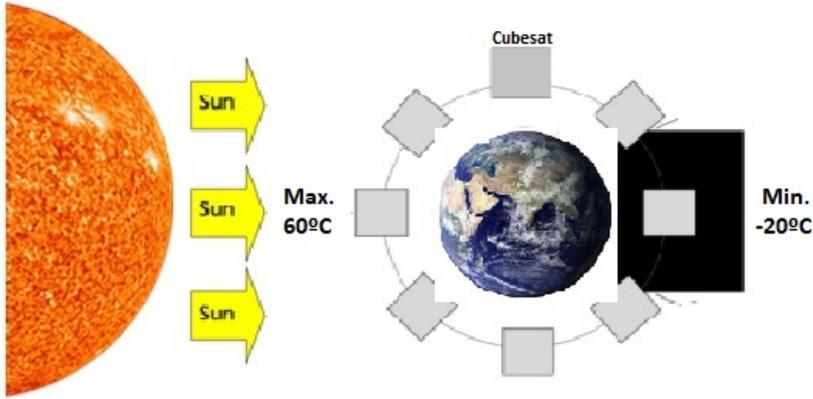
As condições de operação do cubesat, utilizadas como base para este trabalho, foram caracterizadas pelo projeto Floriposat. Floriposat é um projeto que visa preparar alunos, professores e pesquisadores para trabalhar em um desenvolvimento completo de um CubeSat 1U, que possui arestas de 10cm. Para atingir esse objetivo, as equipes de trabalho são divididas em grupos para trabalhar com subsistemas específicos de um microssatélite (VILLA et al., 2014)(SLONGO et al., 2016). Os Payloads, ao que esse trabalho se refere, são geralmente experimentos científicos, que não possuem influencia sobre os demais módulos que compõem um cubesat. Sendo assim, o Payload de harvesting termoeétrico apresentado neste trabalho não possui quaisquer responsabilidades sobre a real necessidade energética do cubesat, sendo apenas um módulo experimental para fins de pesquisa.

Para simular experimentalmente as variações de temperatura através de um TEG nas faces do cubesat FloripaSat (órbita: 400km de altitude e 51.5° de inclinação), são utilizados dados reais de temperatura. Esses dados apresentam seus pontos máximo de $60^\circ C$ e mínimo de $-20^\circ C$. O ponto máximo é obtido quando o cubesat encontra-se entre o sol e a terra, obtendo incidência máxima de radiação solar. O ponto mínimo é obtido quando o cubesat esta sob a sombra da terra. A Figura 2 ilustra essa afirmação.

No trabalho de Ostrufka et al. (2017) as 6 faces do cubesat são avaliadas e comparadas para se obter o melhor posicionamento do TEG. No trabalho atual, as mesmas 6 faces serão utilizadas nos testes para avaliar a eficiência na conversão e armazenamento de energia. Os geradores de energia termoeétrica (TEG) utilizados para realizar o harvesting são os modelos TGPR-10W-4V-40S e TGPR-5W-5V-40S disponíveis no laboratório de testes. Estes modelos são caracterizados a fim de avaliar sua geração de energia.

As seções a seguir apresentam devidamente o Payload de Harvesting Termoeétrico proposto. Neste, os tópicos expõem os compo-

Figura 2: Cubesat em Órbita



Fonte: Autor(2019).

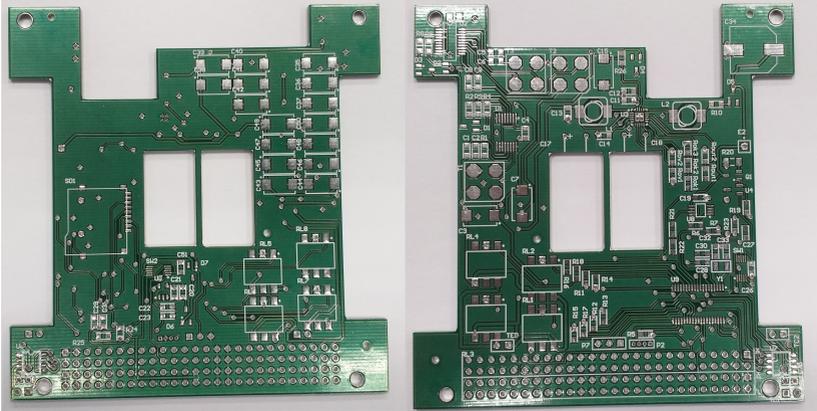
nentes utilizados assim como os circuitos projetados na elaboração da placa de circuito impresso (PCB). Esses tópicos mostram o sistema de aquisição de energia, os dispositivos de conversão, armazenamento de energia, aquisição e armazenamento de dados e gerenciamento do payload. Também em relação ao módulo de harvesting são expostas outras funcionalidades deste circuito bem como suas características de interface projetadas para interação com o computador de bordo do cubesat. Por último, é apresentado o aparato experimental o qual sofreu alterações deste os trabalhos realizados por Ostrufka et al. (2017). Não cabe a este trabalho entrar em detalhes da concepção da bancada de testes, porém, apresenta-se todos os itens envolvidos para melhor compreensão dos testes realizados.

3.1 PAYLOAD DE HARVESTING E COMPONENTES

O módulo de harvesting possui uma série de componentes os quais são responsáveis por gerenciar a energia coletada pelo TEG. Composto por conversores DC-DC ULP, cada um com suas características, três modelos de capacitores, utilizados para armazenamento, e um microcontrolador, responsável por delegar as ações prescritas. Estes são os principais componentes utilizados no payload proposto, além destes, um conjunto de relés, resistores e capacitores são utilizados no projeto,

assim como um módulo SD acoplado para armazenamento de dados do harvesting de energia que são de grande importância para o funcionamento da unidade e será devidamente apresentado nas seções seguintes. A Figura 3 mostra a PCB projetada para a aplicação deste trabalho.

Figura 3: Placa de circuito impresso projetada para aplicação do Payload Harvesting em um Cubesat 1U.



Fonte: Autor (2019).

A placa de circuito impresso é projetada para se adequar as dimensões do cubesat 1U. O esquemático completo do circuito pode ser encontrado no Apêndice B deste trabalho. Os circuitos, e consequentemente os componentes que os compõem, são apresentados com mais detalhes nos tópicos a seguir.

3.1.1 Conversores

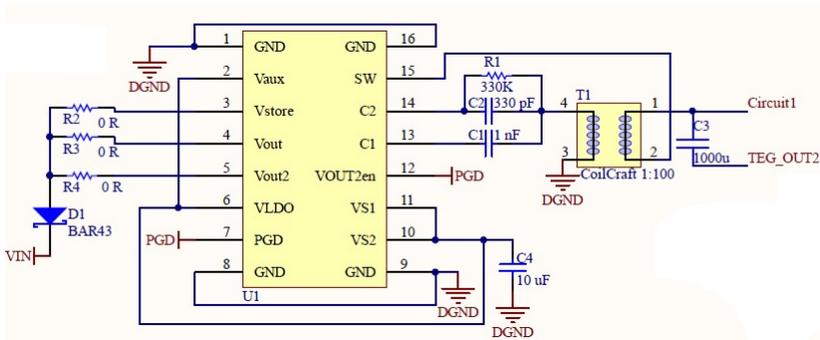
A capacidade de conversão do módulo de harvesting é de extrema importância neste projeto. Nesta etapa da coleta são utilizados conversores DC-DC de micropotência que estabelecem a conexão entre o dispositivo TEG e os componentes de armazenamento de energia.

Foram escolhidos três modelos comerciais, os quais são projetados para aplicações de micropotência. São dois modelos de conversores ULP da fabricante Linear Technology (LTC3108 e LTC3109) e um modelo da Texas Instruments (BQ25570) e suas principais características (relevantes a este trabalho) são apresentadas a seguir.

O conversor LTC3108 da Linear Technology opera com entradas

a partir de 20mV e possui um gerenciamento completo de harvesting usando um pequeno transformador step-up. Possui *output* como o LDO (Low Dropout Linear Regulator) de 2.2V que pode alimentar um microprocessador ULP externo, enquanto a saída principal é programada para uma das quatro tensões fixas (2.35V, 3.3V, 4.1V ou 5V) para alimentar sensores sem fio, transmissores, entre outros. Um indicador de potência indica que a tensão de saída principal está dentro da faixa de operação desejada. Uma segunda saída pode ser ativada pelo *host*. Um capacitor de armazenamento (Cstore) pode ser adicionado para fornecer energia quando a fonte de tensão de entrada não está disponível (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, 2010a). O LTC3108 foi projetado para gerenciar o carregamento e a regulação de saídas múltiplas em um sistema no qual o consumo de energia médio é muito baixo, mas que necessita de pulsos periódicos de maior consumo. Isso é típico das aplicações de sensores sem fio, onde o consumo de energia é extremamente baixo na maioria das vezes, exceto quando os circuitos são alimentados para fazer medições e transmitir dados. Para o payload, optou-se por usar uma configuração simples e sugerida pelo fabricante que pudesse fornecer 5V na saída do conversor. O esquemático relacionado à este conversor é apresentado na Figura 4.

Figura 4: Esquemático do conversor LTC3108

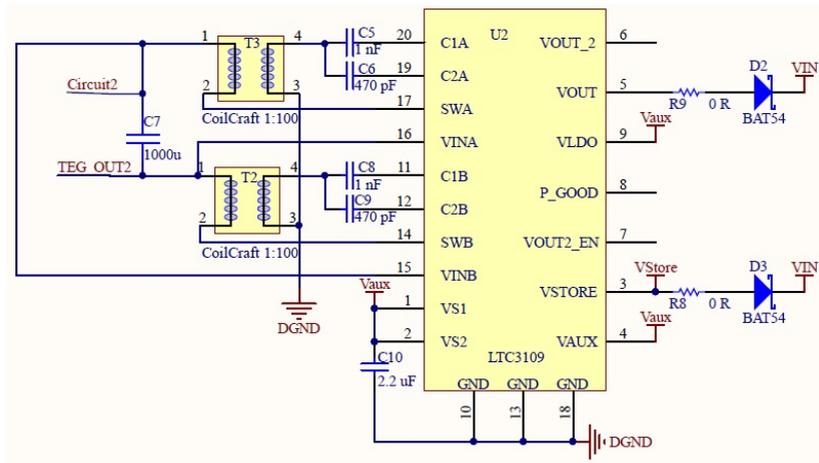


Fonte: Autor (2019).

O LTC3109 é um conversor DC/DC altamente integrado conforme o modelo anteriormente apresentado, porém, apresenta suas próprias características de operação. Este possui uma topologia exclusiva de autopolaridade que permite seu funcionamento a partir de tensões de entrada tão baixas quanto 30mV, independentemente da polaridade. Possui as mesmas saídas que o modelo LTC3108, ou seja, LDO de 2.2V

e a saída principal programada para uma das quatro tensões fixas, assim como as descrições de indicador de potência. Também possui a saída secundária e armazenamento em capacitor para alimentação na ausência de uma externa. Sua capacidade única de polarização permite o harvesting de energia a partir de geradores termoeletricos (TEGs) em aplicações onde o diferencial de temperatura através do TEG pode ser de polaridade desconhecida. É natural identificar uma vantagem deste modelo quando se refere a polaridade, uma vez que o LTC3108 opera apenas com polaridade única e deve ser devidamente alocado durante a etapa de projeto considerando os fatores que levam aos ângulos de atitude e órbita do satélite quando estiver em operação (LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, 2010b). Da mesma forma que o modelo unipolar, optou-se para este, uma configuração simples e sugerida pelo fabricante para se obter 5V na saída conforme mostra a Figura 5.

Figura 5: Esquemático do conversor LTC3109



Fonte: Autor (2019).

O BQ25570 da Texas Instruments segue o mesmo princípio dos outros dois apresentados, ou seja, é projetado especificamente para adquirir e gerenciar eficientemente os microwatts (μW) a miliwatts (mW) de energia gerada a partir de uma variedade de fontes DC, como geradores fotovoltaicos ou térmicos (TEGs). O design deste conversor exige 600 mV para partida a frio (bem mais que os modelos anteriormente apresentados) e posteriormente pode operar com alimentação próxima à 100mV. Uma vez que a tensão de saída está acima do limiar de ope-

Tabela 1: Principais características dos conversores utilizados.

Model	Polarity	Cold Start	Input Min.	Output Max.	Efficiency Máxima
LTC3108	<i>Unipolar</i>	<i>20mV</i>	<i>20mV</i>	<i>5V</i>	<i>39%</i>
LTC3109	<i>Bipolar</i>	<i>30mV</i>	<i>30mV</i>	<i>5V</i>	<i>28%</i>
BQ25570	<i>Unipolar</i>	<i>600mV</i>	<i>100mV</i>	<i>5.5V</i>	<i>91%</i>

Fonte: Autor (2019).

porcionado pelo microcontrolador MSP. Esse gerenciamento é utilizado para promover o funcionamento individual de cada circuito conversor e também inverter a polaridade da tensão de entrada para os modelos unipolares. Adiante neste capítulo esse gerenciamento será abordado com mais detalhes.

A Tabela 1 traz as principais informações descritas nesta seção para cada um dos conversores. Os dados apresentados aqui levam em consideração os esquemáticos anteriormente apresentados. Para se obter *input* mínimo de 20mV e eficiência máxima de 39% no modelo LTC3108 é utilizado um transformador 1:100. Valores maiores de eficiência podem ser obtidos com transformadores com menor *step-up*, porém, os valores mínimos de *input* aumentam. Para os dados do modelo LTC3109 segue o mesmo princípio, e também é utilizado um transformador 1:100 na entrada deste conversor. No caso do modelo BQ25570 a eficiência é caracterizada pela relação *input/output*. Configurando a saída para um valor menor de tensão, uma maior eficiência seria obtida. *Input* menor que a tensão de partida a frio (600mV) geram menor eficiência do conversor (ficando abaixo dos 80%).

Como informação adicional a tabela, é importante ressaltar que enquanto os modelos LTC3108 e LTC3109 são regulados estaticamente em função da saída de tensão desejada, o modelo BQ25505 busca maximizar a coleta em tempo de operação.

3.1.2 Elementos de Armazenamento

As unidades de armazenamento de energia coletada são apresentadas nesta seção. Para este trabalho foram selecionados três modelos de capacitores responsáveis por armazenar a energia convertida pelos conversores apresentados anteriormente. Os conversores escolhidos são projetados para diversas aplicações incluindo o harvesting de energia termoeétrica, e como sugestão os fabricantes indicam a utilização de

capacitores como unidades de armazenamento. Para este trabalho, os modelos escolhidos foram os chamados Supercapacitores e os Capacitores de Tântalo.

São três modelos diferentes de capacitores, sendo dois deles supercapacitores. O supercapacitor é um condensador eletroquímico que tem alta capacidade de armazenamento de energia relativa a seu tamanho quando comparado a capacitores comuns. Estes são de interesse particular em aplicações em dispositivos remotos para armazenamento suplementar.

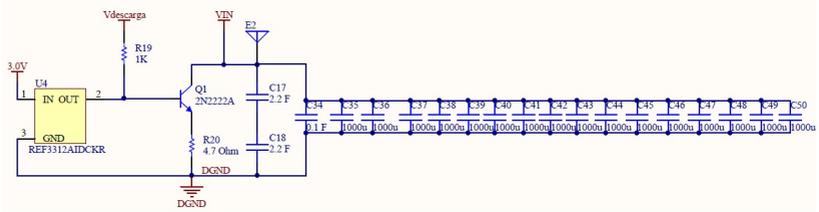
As principais vantagens de se utilizar um supercapacitor para armazenamento de energia é o fato de possuir taxas muito altas de carga e descarga, além de ser muito leve e uma eficiência superior a 95%. Um dos problemas deste modelo, é o fato do nível de tensão variar conforme a energia é sendo armazenada. Para armazenar efetivamente e recuperar energia é necessário um controle eletrônico sofisticado, que resulta em consumo.

Para os testes relacionados ao trabalho, foram alocados 2 supercapacitores modelo BCAP0010P270T01 de 2.2F em série, os quais operam com tensões entre 2.3V e 2.7V. Possuem resistência equivalente de 75 mOhms e trabalham sob temperaturas extremas que vão de -40°C à 85°C . O segundo modelo é um supercapacitor radial FC0H104ZFTBR24 de 100mF posicionado em paralelo com o anterior alocado ao módulo de harvesting e tensão de operação em 5V. Este supercapacitor possui resistência equivalente de 25 Ohms e pode operar entre temperaturas de -25°C à 70°C .

O último modelo é o capacitor de tântalo. Uma das principais características e vantagem deste modelo, é o seu tamanho, pois, eles são capazes de fornecer uma capacitância muito maior por unidade de volume do que um capacitor eletrolítico de alumínio que, ocupa menos espaço que o supercapacitor apresentado anteriormente. Entre suas características, pode-se citar a sua segurança, uma excelente relação entre capacitância e tamanho, a possibilidade de carga e descarga muito rápida, devido a sua resistência em série muito baixa e sua faixa de temperatura de operação ampla. Este capacitor em particular opera com 6.3V e possui capacitância de 1000uF. São alocados 16 capacitores em paralelo entre si e em relação aos outros dois modelos de capacitores anteriormente descritos. O circuito de armazenamento de energia é apresentado na Figura 7.

O circuito apresentado na Figura 7 recebe a energia, coletada pelo TEG e convertida por um dos conversores, através de VIN. Uma parte importante deste circuito é a sua capacidade de descarga. Como é

Figura 7: Circuito de armazenamento de energia



Fonte: Autor (2019).

possível observar na Figura 7 o circuito possui um CI REF3312AIDCKR (PMIC - *Power management integrated circuit*) que após o carregamento total dos capacitores, redireciona VIN para GND além de informar o ocorrido ao MSP através do pino Vdescarga. A descarga pode ser realizada também pelo microcontrolador.

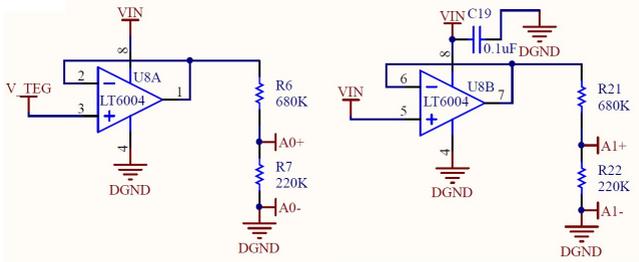
Para aplicações espaciais os capacitores apresentados são recomendados, principalmente, devido a segurança se comparado a modelos do tipo eletrolítico. No tópico a seguir, é apresentado o circuito de medição e o circuito de gerenciamento de harvesting do payload.

3.1.3 Circuito de Medição de Energia e Gerenciamento do Payload

O circuito de medição é integrado ao módulo de gerenciamento uma vez que esta diretamente relacionado ao processamento dos dados pelo microcontrolador. Esses dados processados no MSP são primeiramente recebidos nos conversores analógicos-digitais através da diferença de potencial da saída obtida do conjunto conversor-capacitor que estará em operação.

Para determinar qual conversor entrará em operação e será devidamente observado, relés são utilizados para formular as possíveis opções. Sendo assim, o MSP430FR5949 irá determinar (através da função de interface) quais relés devem ser acionados para que um único conversor opere por vez. Ao todo são 4 relés responsáveis pela escolha dos conversores e 4 para inversão de polaridade na entrada do circuito (inverte a polaridade da tensão fornecida pelo TEG). Estes últimos quatro relés foram adicionados para fins de garantias para testes e operações futuras, uma vez que objetivo do trabalho é avaliar a capacidade de conversão de cada modelo sem interferir em sua forma inicial.

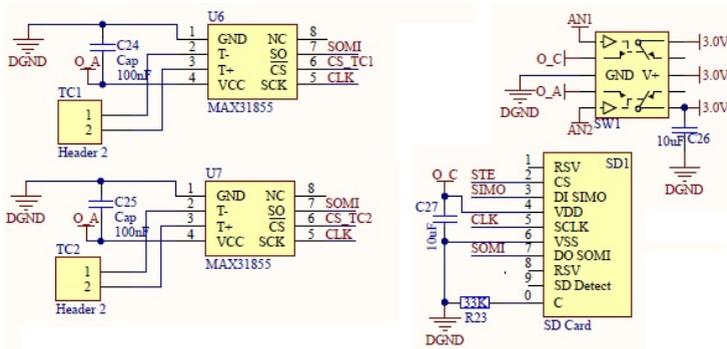
Figura 10: Circuito de aquisição de valores de tensão



Fonte: Autor (2019).

transmitidos via SPI para o microcontrolador MSP. Na Figura 11 é possível observar dois MAX31855 no canto esquerdo do esquemático.

Figura 11: Circuito de aquisição de Temperatura, armazenamento de dados e *switch* de multiplexação.



Fonte: Autor (2019).

O esquemático parcial da Figura 11 ainda mostra as ligações usadas para o cartão SD que também utiliza SPI e um *switch* que gerencia a alimentação dos módulos MAX31855 e *SD card*. Com o SW1 é possível desabilitar os módulos descritos para melhorar o consumo energético além de permitir a multiplexação entre eles.

Na próxima seção, são abordadas as características e implementações do microcontrolador MSP430 responsável por monitorar e gerenciar o módulo de harvesting de energia através dos circuitos apresentados até então. É apresentado também, o monitoramento de temperatura e as características de armazenamento e envio de dados.

3.1.4 Microcontrolador MSP430

O módulo de gerenciamento de energia possui um microcontrolador da família MSP430 que garante a leitura e seleção dos conjuntos conversor-capacitor desejados. Sendo assim, é possível através deste componente determinar e identificar qual conjunto estará em operação facilitando o processo de avaliação dos dados provenientes do harvesting. Também por meio deste, é realizada a leitura dos dados de energia coletada e temperatura atual os quais, na prática, são transmitidos para o computador de bordo (OBC - On-Board Computer) do cubesat para então ser transmitido para a estação base. Nos experimentos estes dados são enviados para o computador e analisados via software.

O modelo MSP430FR5949 é utilizado para estas tarefas. A família MSP430 possui muitas variações, porém, as principais características dos chips MSP430 não mudam e estão listadas abaixo (PEREIRA, 2005):

- Baixo Consumo
- Baixa Tensão de Operação
- Alto Desempenho
- Conjunto de instruções ortogonais
- Número reduzido de instruções
- Grande quantidade de periféricos
- Facilidade de gravação e depuração

Sua arquitetura RISC combina um conjunto reduzido de instruções com barramento clássico *Von Neumann*², permitindo que a CPU possua um espaço único de endereçamento de memória.

Em geral, o microcontrolador MSP430 também segue uma identificação que remete as suas características individuais. Assim é possível escolher por exemplo o tipo de memória que seu MSP irá possuir. Para este projeto foi escolhido um modelo com memória FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) a qual possui características ideais para esta aplicação.

²É uma arquitetura de computador que se caracteriza pela possibilidade de uma máquina digital armazenar seus programas no mesmo espaço de memória que os dados, podendo assim manipular tais programas.

FRAM são dispositivos de armazenagem de dados que integram características das memórias ROM (Ready Only Memory) e RAM (Random Access Memory), representando uma classe única e diferenciada de memória. Denomina-se não-volátil o fato dessas memórias não perderem os dados gravados quando a energia é removida e essa característica que faz com que as FRAMs se assemelhem as memórias ROM (FUJITSU, 2014). Abaixo são listadas algumas vantagens deste tipo de memória (FUJITSU, 2014):

- Acesso de alta velocidade: 30 vezes mais rápida que a EEPROM.
- Alta durabilidade: durabilidade um bilhão de vezes (garantia de 1012 vezes) superior à da EEPROM.
- Baixo consumo de energia: consumo de energia 200 vezes menor do que a EEPROM.
- Excelente resistência anti-violação: os dados gravados na FRAM não podem ser detectados por análise física.
- Resistência à radiação: a FRAM é altamente resistente a campos magnéticos e radiação.
- Faixa de temperatura operacional: -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$.
- Retenção de dados: dez anos sem bateria.

O principal motivo que levou a escolha da FRAM é relacionada a resistência à radiação descrita acima. Esta característica é fundamental em aplicações espaciais.

3.1.4.1 Algoritmo de Gerenciamento do Payload

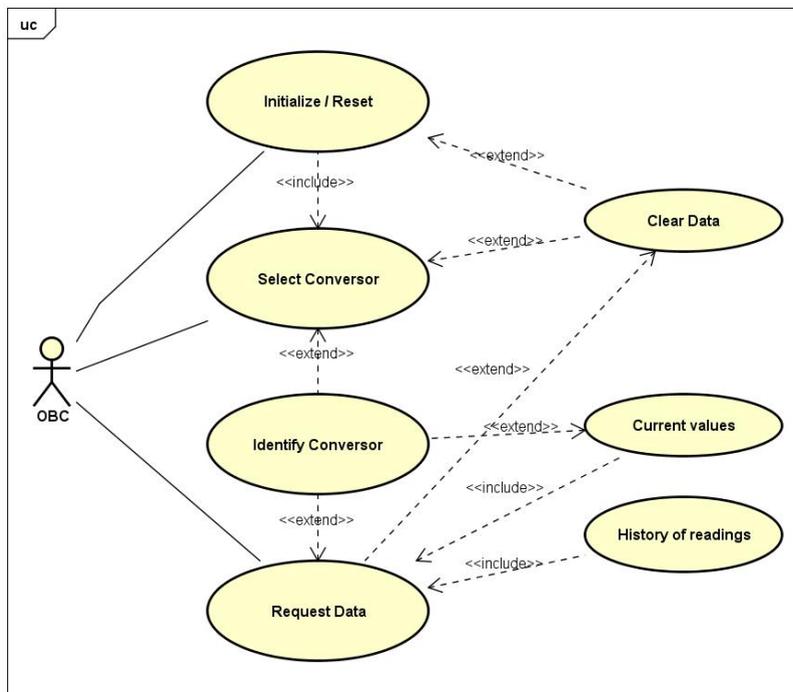
Para o desenvolvimento do sistema embarcado foi utilizado o *Code Composer Studio* (CCS). O CCS é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que suporta o portfólio de microcontroladores e processadores da Texas Instruments. Inclui um conjunto de ferramentas usadas para desenvolver e depurar aplicações embarcadas. Ele inclui um compilador C otimizado, editor de código fonte, ambiente de criação de projeto, depurador, entre outros recursos (TEXAS INSTRUMENTS, 2018b). O microcontrolador MSP430FR5969 utilizado no payload foi programado utilizando CCS com auxílio da biblioteca MSP430Ware que possui uma série de implementações que abstraem o uso de sua

funcionalidade/periféricos. A IDE ainda proporciona vantagens para avaliar sistemas ULP através da ferramenta *EnergyTrace*.

O microcontrolador MSP430FR5969 foi programado para gerenciar o módulo de payload de harvesting através de periféricos conectados a pontos importantes do circuito. O MSP é responsável por determinar qual dos conversores entrará em funcionamento, qual a energia fornecida utilizando-se de conversores analógicos-digitais de 12 bits e por fim, comunicar-se com o dispositivo de armazenamento de dados e o computador de bordo do cubesat. O código proposto para o payload é estruturado conforme apresentado nos diagramas UML a seguir.

As atividades relacionadas ao Payload proposto são compostas pela interação entre o módulo e o computador de bordo. A Figura 12 mostra o Diagrama de Casos de Uso da interação possível entre OBC e Payload.

Figura 12: Diagrama de Caso de Uso



Fonte: Autor(2019).

Os casos de uso são divididos em 3 modos. O primeiro refere-se a inicialização ou reinicialização. Este inclui tarefas como selecionar um novo conversor para operação com a possibilidade de limpar (caso desejado) os dados contidos na memória do cartão SD. O segundo caso de uso refere-se a seleção de um novo conversor para operação. Como no caso anterior, é possível optar pela leitura e limpeza dos dados contidos no cartão SD. Neste, caso não haja interesse em ler os dados durante esta ação, é possível coletar os dados futuramente sem perder as informações de qual conversor esses dados são provenientes. O último caso de uso é utilizado para leitura dos dados e assim como nos casos anteriores é possível limpar o cartão SD após a leitura.

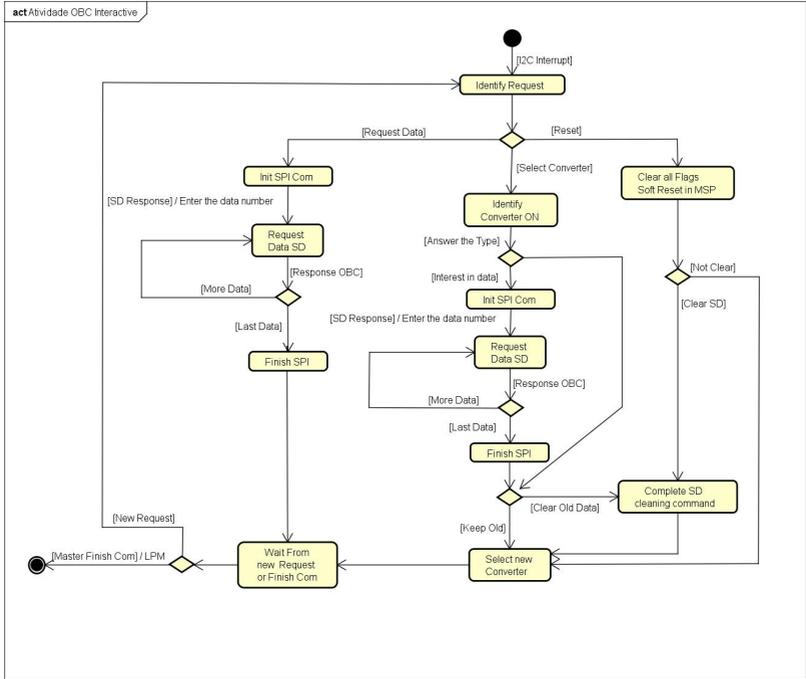
Com base no Diagrama de Casos de Uso, foram elaborados dois Diagramas de Atividades. O primeiro, refere-se a interação entre o OBC e o Payload proposto, conforme descrição dos casos anteriores. O segundo, trata das atividades internas do Payload como a leitura dos sensores e armazenamento dos dados no cartão SD. O Diagrama de Atividade da Figura 13 mostra as atividades provenientes da interação entre os módulos.

O início da atividade ocorre através da inicialização da comunicação I2C por parte do OBC. Uma interrupção é gerada no módulo Payload, em seguida uma requisição deve ser recebida e identificada. Esta requisição deve ser uma das 3 apresentadas nos casos de uso da Figura 12. Se a requisição for do tipo leitura, o Payload inicia a comunicação com o SDCard para obter os dados armazenados no mesmo. O primeiro valor deve informar ao OBC o número de dados armazenados para que o mesmo mantenha a comunicação ativa até que todos os dados sejam transmitidos. Quando o último dado for enviado, o Payload irá aguardar uma nova mensagem, que deverá ser uma nova requisição ou o fim da comunicação I2C. Caso o encerramento seja informado, o Payload retornará para o estado de baixo consumo (*Low Power Mode* - LPM).

Se uma requisição para selecionar um novo conversor for recebida, o Payload deve identificar qual será esse conversor que entrará em operação acionando as flags responsáveis para mudança futura. Para completar a tarefa, o Payload aguarda o comando de leitura por parte do OBC. Caso o comando seja afirmativo, os passos de leitura apresentados na atividade anterior são utilizadas aqui também. Caso contrário, o Payload aguarda o terceiro comando que determina se os dados antigos armazenados no SD devem ou não ser apagados. Após estas etapas, um novo conversor é posto em operação.

A última opção de atividade ocorre na identificação do comando

Figura 13: Diagrama de Atividades. Requisições por parte do OBC



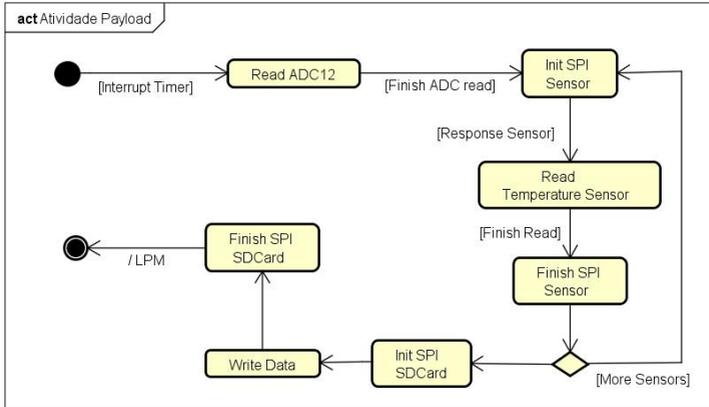
Fonte: Autor(2019).

de inicialização ou reinicialização. Neste caso, ocorre um *soft reset* no MSP, levando-o a um estado inicial com valores de variáveis e *flags* conhecidas. O comando de reinicialização deve ser sucedido por outros dois comandos que indicam se o SD deve ou não ser limpo e qual conversor deve entrar em operação após esta ação. Os comandos só serão realizados após o encerramento da comunicação I2C devido as condições de *soft reset*.

O segundo Diagrama de Atividades trata das operações internas do Payload e é apresentado na Figura 14. Esta atividade tem início através da interrupção gerada por um Timer que opera em uma frequência adequada para realizar 4 interrupções por segundo (este período pode ser alterado a fim de melhorar a eficiência energética do payload). Quando a interrupção é gerada, o módulo ADC12 do MSP realiza a leitura de tensão de entrada e dos capacitores do *payload* de *harvesting*. Em seguida, inicia a comunicação SPI com os sensores de

temperatura. Após ler todos os sensores, a comunicação SPI é ativada entre o MSP e o cartão SD. Os dados são então armazenados, contendo os dados: Conversor ativo, Tensão TEG, Tensão Capacitores, Temperatura 1, Temperatura 2.

Figura 14: Diagrama de Atividades internas do Payload



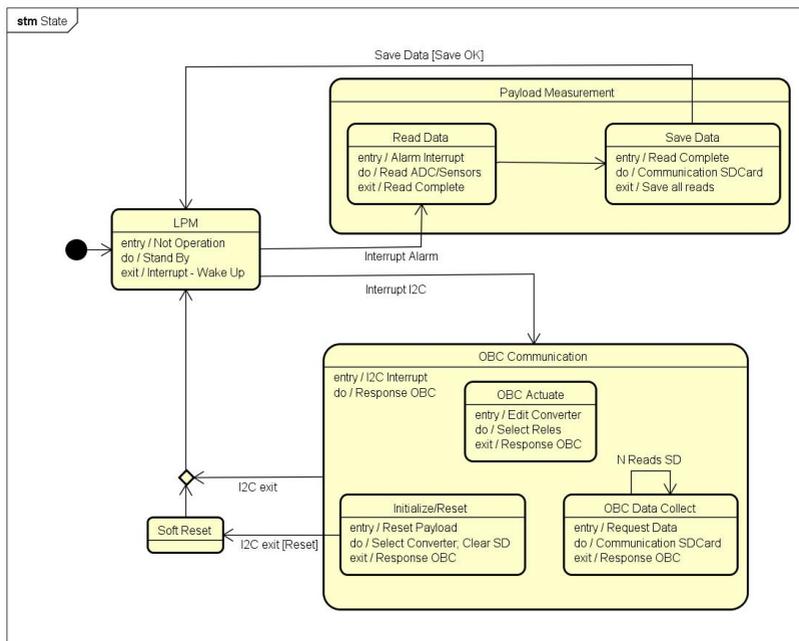
Fonte: Autor(2019).

Completando o conjunto de diagramas elaborados para o sistema operacional do Payload de harvesting esta o Diagrama de Estados. Este diagrama representa 4 estados principais que relacionam as atividades anteriormente descritas. Desta forma, os principais estados são: *Low Power Mode (LPM)*, *Payload Measurement*, *OBC Communication* e *Soft Reset*. A Figura 15 mostra os estados descritos e suas relações.

O microcontrolador MSP430FR5949 possui modos de operação ULP que desabilitam módulos, *timers* e periféricos para reduzir ao máximo o consumo de energia. Utilizando este recurso, o Payload obtém o seu principal estado, o LPM. Existem alguns modos diferentes para LPM que podem ser configurados, no trabalho em questão o LPM 3 foi escolhido pois permite o uso de interrupção externa e por *timer*. Essas interrupções são necessárias para que o microcontrolador saia do modo LPM quando uma nova leitura (periódica) ocorrer ou quando o OBC desejar realizar uma comunicação. Deste modo, a característica de saída do estado LPM é determinada.

No caso da ocorrência de uma interrupção por *timer* o microcontrolador entra no estado de *Payload Measurement*. Este estado é dividido em duas etapas. A primeira etapa ocorre no sub-estado *Read*

Figura 15: Diagrama de Estados



Fonte: Autor(2019).

Data onde as leituras de tensão do TEG e dos capacitores deve ser feita pelo ADC12 do microcontrolador, assim como a leitura de temperatura das faces do TEG. Ao finalizar as leituras o próximo sub-estado é atingido, o sub-estado *Save Data*. Em *Save Data* todos os dados obtidos em *Read Data* são armazenados no cartão SD do *payload* juntamente com informações relevantes ao processo. Após salvar os dados o MSP retorna para o estado de baixo consumo LPM.

Quando o OBC inicia a comunicação com o *payload*, uma interrupção via módulo I2C é gerada. Neste caso, o MSP entra no modo de comunicação através do ISR (*Interrupt Service Routine*) referente ao I2C, representado pelo estado *OBC Communication*. Ao entrar no ISR o algoritmo deve identificar o tipo de requisição realizada pelo OBC e conforme apresentado no Diagrama de Atividades da Figura 13 3 opções são possíveis. Estas opções são descritas como sub-estados do tratador de interrupções do I2C, uma vez que o MSP estará atrelado a este ISR até que a comunicação seja encerrada pelo OBC. Os sub-estados

OBC Actuate e *OBC Data Collect* realizam as atividades relacionadas a seleção de conversor e leitura de dados completa respectivamente, tendo a condição de saída o encerramento da comunicação por parte do OBC. O sub-estado *Initialize/Reset* necessita entrar no estado de *Soft Reset* além do encerramento da comunicação I2C. Após realizar o *reset* o MSP irá atribuir os parâmetros configurados para as respectivas variáveis e retornará ao estado inicial LPM.

O sistema embarcado apresentado neste tópico deverá passar por um processo de teste e validação que independe dos resultados de eficiência do harvesting energético. Esta será a etapa de integração do sistema. Para fins deste trabalho, o *payload* é avaliado com o auxílio de uma bancada de testes que simula o perfil de temperatura da órbita do cubesat. No tópico seguinte, é apresentado o aparato experimental.

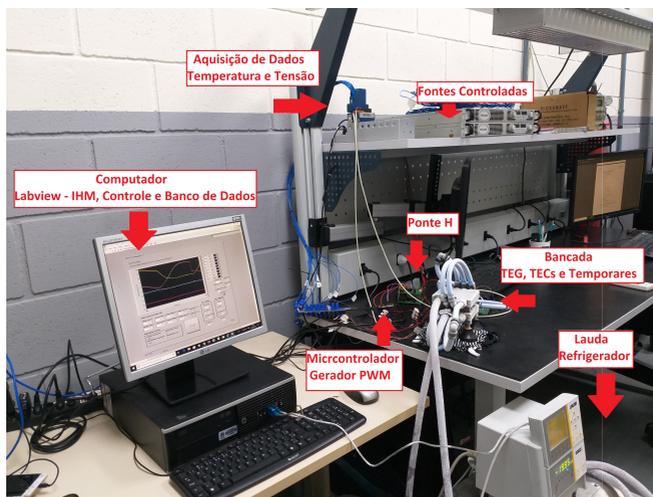
3.2 BANCADA DE TESTE

Para simular experimentalmente as variações de temperatura através de um TEG nas faces do cubesat foi desenvolvido um sistema de testes para controle dinâmico da variação dos gradientes de temperatura. Este sistema é composto por um dispositivo que insere a temperatura desejada em ambas as partes do TEG (chamaremos de Bancada de Teste), sensores e sistema de aquisição de dados de temperatura e tensão, duas ponte H, duas fontes de energia, um microcontrolador e um computador.

Os estudos e experimentos aplicados assim como o desenvolvimento desse conjunto são descritos com mais detalhes nos trabalhos de BECKER et al.(2016) e OSTRUFKA et al.(2017). Desde seus trabalhos a bancada passou por algumas melhorias sendo as principais: os canais de refrigeração nas placas extremas (superior e inferior), a ponte H foi refeita em uma PCB adequada, o controlador PID que teve seus parâmetros atualizados e a troca por um modelo de TEG com melhor isolamento entre as faces. A Figura 16 mostra o aparato experimental completo, incluindo os componentes citados.

Em relação ao funcionamento, o sistema consiste em uma bancada de testes principal, responsável por gerar os gradientes de temperatura no TEG. Todos os dados de temperatura são lidos por um sistema de aquisição de dados e enviados para um computador responsável pelo armazenamento e interfaceamento. Além disso, todos os dados são usados em um controlador PID que determina a variação de temperatura que o sistema deverá atingir de acordo com os

Figura 16: Aparato Experimental

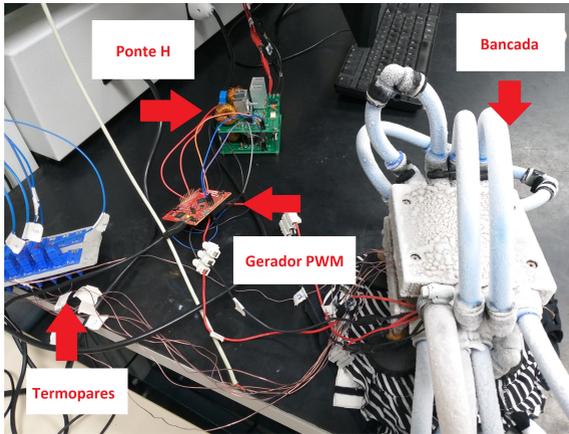


Fonte: Autor(2019).

perfis da órbita selecionada. Através do software LabVIEW, os comandos do controlador PID são enviados para um microcontrolador que gera sinais de controle PWM, que são adquiridos pelas ponte H. Esses circuitos aplicam a tensão ideal (para atingir a temperatura desejada conforme determinado pelo controlador) nos atuadores de temperatura (TEC) na bancada de testes. Essas ponte H são alimentadas por duas fontes externas de tensão que fornecem até 15V. A Figura 17 mostra os componentes mais próximos aos atuadores.

A bancada destina-se a simular fisicamente todas as condições de variação de temperatura encontradas entre as duas superfícies do TEG durante a órbita. Para tornar isso possível, dois TECs são usados para gerar os gradientes de temperatura desejados, um para cada lado do TEG. A função dos TECs na bancada de teste é exclusivamente para gerar a temperatura desejada nos lados em contato com o TEG. Entre cada dispositivo termoeletrico, placas de cobre são colocadas para conduzir calor entre TECs e TEG. Para atingir as temperaturas desejadas é utilizado o controle da tensão de alimentação dos TECs. Cada Ponte H é destinada para um TEC da bancada, cada qual é alimentada com 15V pelas fontes de tensão. O gerador PWM do microcontrolador atua sobre a ponte H através do *duty cycle*, aumentando ou diminuindo (até invertendo) a tensão na saída da mesma.

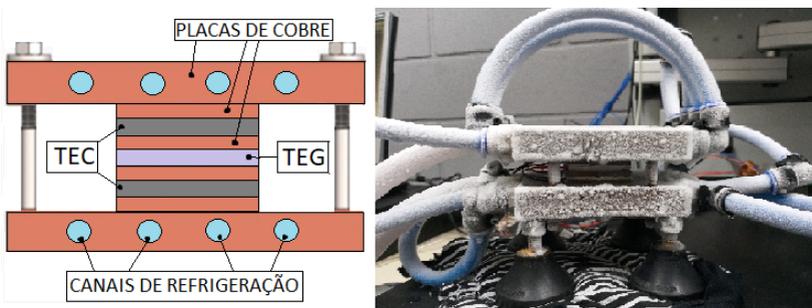
Figura 17: Aparato Experimental. Controle de Tensão dos TECs



Fonte: Autor(2019).

Ainda na Figura 17 é possível observar uma camada de gelo que envolve a bancada de teste. Este gelo é proveniente das baixas temperaturas aplicadas nos canais de refrigeração com auxílio do refrigerador industrial Lauda mostrado na Figura 16. Todo o calor gerado nas extremidades pelos TECs deve ser dissipado. Desta forma, a refrigeração é utilizado álcool em temperaturas inferiores a -15°C . Isto ajuda o conjunto experimental a atingir temperaturas negativas rapidamente agindo como um dissipador de calor. A Figura 18 mostra a configuração da bancada de testes.

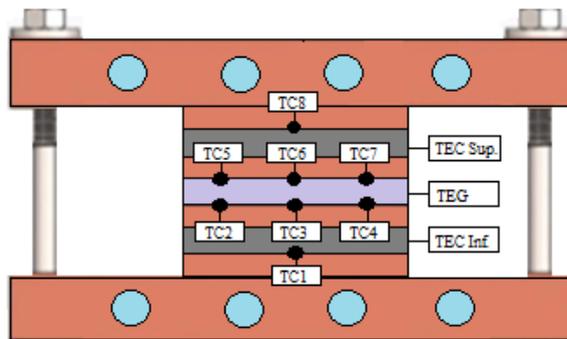
Figura 18: Configuração da Bancada de Teste



Fonte: Autor(2019).

Para avaliar se a bancada de testes é capaz de gerar os gradientes de temperatura esperados, foram utilizados termopares do tipo T para medir a temperatura em algumas posições de interesse. Três termopares foram colocados em cada superfície do TEG para medir as temperaturas das faces e realimentar o controlador PID com esses valores. Da mesma forma, um termopar em cada superfície externa dos TECs foi usado para monitorar os valores de temperatura nas regiões de dissipação de calor. Todos os termopares estão conectados ao sistema de aquisição de dados, que lê cada medição de termopar em determinado intervalo de tempo. Este equipamento é capaz de armazenar e enviar os dados para um computador. O equipamento também adquire os valores de tensão gerados pelo TEG durante o experimento. A Figura 19 mostra a localização dos termopares na bancada de testes.

Figura 19: Localização dos Termopares na Bancada de Teste

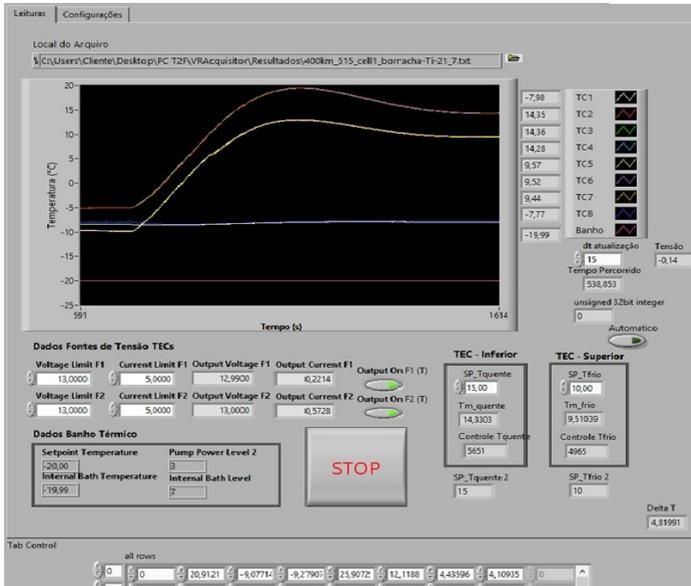


Fonte: Autor(2019).

No computador, são realizados o armazenamento dos dados de temperatura e tensão da bancada, os cálculos de controle, as configurações dos limites (temperatura do Lauda e tensão e corrente máxima das fontes), aplicação do perfil de temperatura desejado, além da integração de todo esse sistema. Para esta tarefa é utilizado o software LabView. O LabView é um software de engenharia de sistemas que utiliza uma linguagem de programação gráfica de nome “G”, originada pela empresa National Instruments. Esta plataforma é usada para projetos que envolvam teste, medição e controle, com rápido acesso ao hardware e as informações obtidas a partir dos dados. O LabVIEW possui um extenso suporte para interface com instrumentos, dispositivos, sensores e câmeras, além de incluir muitas bibliotecas com funções para aquisição de dados, geração de sinais, operações matemáticas e es-

estatísticas, condicionamento e análise de sinais, entre outros, prestando suporte para dispositivos de diferentes fabricantes (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018). A Figura 20 mostra a interface principal da aplicação desenvolvida para a bancada de testes apresentada neste tópico.

Figura 20: Interface do sistema - Labview



Fonte: Autor(2019).

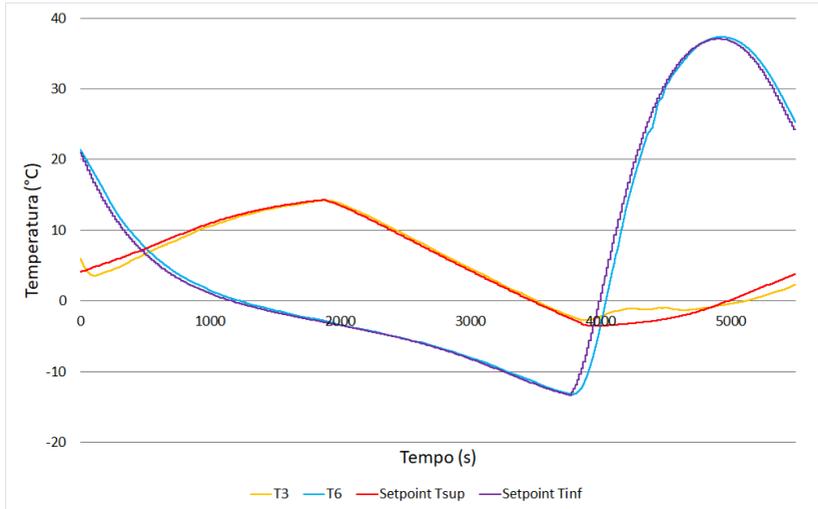
O aparato experimental apresentado passou por testes a fim de validar os experimentos realizados. Para isto, aplicou-se então os perfis de temperatura do Floripasat ao conjunto apresentado.

3.2.1 Validação da Bancada

Sendo o CubeSats em formato cúbico, os testes foram realizados nas seis possíveis configurações de posicionamento do TEG, ou seja, uma em cada face do CubeSat. O controlador PID faz com que os valores de temperatura medidos pelos termopares tendam a coincidir com os valores de referência que variam de acordo com os perfis simulados da órbita do microssatélite. Como possível observar na Figura 21 referindo-se à uma das configurações de posicionamento do TEG

no Cubesat, os valores de temperatura dos termopares tendem a estar muito próximos dos valores de referência.

Figura 21: Temperatura - Posição da Célula 1 (TEG).



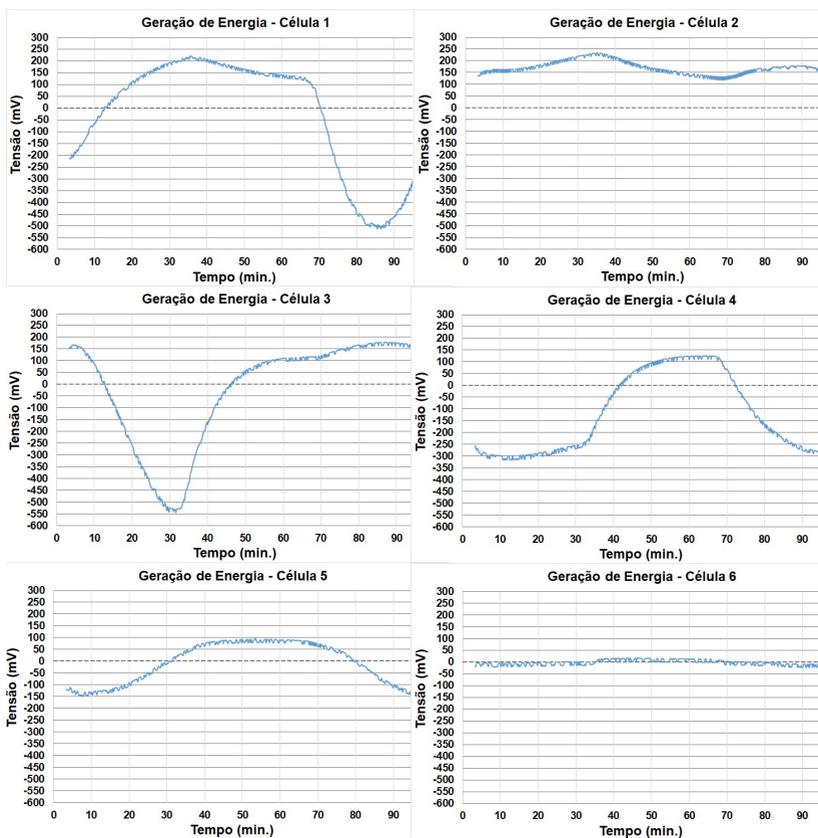
Fonte: Autor(2019).

Todos os perfis de temperatura são encontrados no Apêndice A, cada um deles demonstrando a concordância entre o valor esperado e o valor obtido na validação da bancada. O gradiente de temperatura entre as faces superiores e inferiores do TEG são determinantes para a geração de energia do Payload. Perfis de temperatura como o apresentado na Figura 21 possuem picos de gradiente que demonstram um potencial elevado na geração de energia. Em casos como o da célula 6, apresentado no Apêndice A, quase não há gradiente de temperatura e desta forma não irá gerar energia suficiente. O aparato experimental e a validação dos perfil de temperatura apresentados neste tópico tiveram como premissa os trabalhos apresentados por Audiffred et al. (2016), Becker et al. (2016) e Ostrufka et al. (2017).

4 RESULTADOS ESPERADOS

Os TEGs TGPR-10W-4V-40S e TGPR-5W-5V-40S foram colocados a prova na geração de energia utilizando os perfis de temperatura apresentados. Os resultados da tensão gerada por estes TEGs é a primeira abordagem deste capítulo. Em seguida, são brevemente discutidos os resultados esperados mediante observação da tensão gerada pelos TEGs e características dos conversores escolhidos. Por fim, são apresentadas novas abordagens que serão adicionadas ao projeto.

Figura 22: TGPR-10W-4V-40S - Caracterização.



Fonte: Autor(2019).

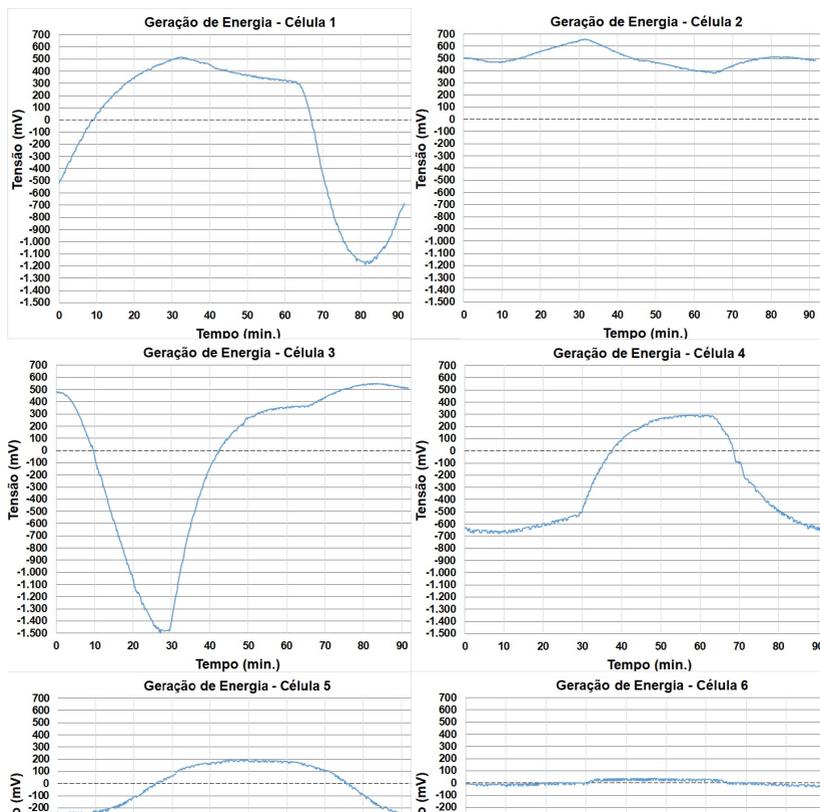
Utilizando os gradientes de temperatura apresentados no Apêndice A, os modelos TGPR-10W-4V-40S e TGPR-5W-5V-40S foram adicionados a bancada de testes para avaliação da sua capacidade de geração de energia. Os primeiros testes foram realizados com o modelo TGPR-10W-4V-40S. A Figura 22 mostra a caracterização do TEG em todos os perfis de temperatura. Nos gráficos de tensão gerados é possível observar que a posição 1 possui o maior pico positivo (aproximadamente 200mV) enquanto a posição 3 apresenta o maior pico negativo (aproximadamente -550mV). Também é observável que na posição 6 o TEG não gera praticamente nenhuma energia, conforme comentado no capítulo anterior. Nas análises de Ostrufka et al. (2017), a posição 1 era responsável por gerar mais energia se comparada as demais. Para o trabalho atual, deve-se levar em conta as características dos conversores empregados. No caso do BQ25570, em nenhum dos casos ele iria entrar em modo de operação, mesmo invertendo a polaridade na entrada do conversor. Isto porque a partida a frio deste modelo exige pelo menos 600mV.

No caso dos modelos LTC3108 e LTC3109 quase todas as posições (menos a posição 6) são passíveis de operação desses conversores. A inversão de polaridade neste caso é o diferencial. O LTC3109 pode operar em ambos os lados, tendo sua partida a frio em 30mV ou -30mV. O LTC3108, sendo unipolar, exige um controle externo de inversão de polaridade mesmo tendo sua partida a frio em uma escala menor de energia. A comparação, entre o gerenciamento interno de polaridade do LTC3109 e o gerenciamento externo proposto pelo Payload para os modelos unipolares, deverá ser realizada. Outro fator é a máxima tensão de entrada desses dois modelos que não passa de 500mV, ou seja, casa perfeitamente com a tensão máxima gerada pelo TEG TGPR-10W-4V-40S. Os picos de eficiência dos modelos LTC ficam próximos à 100mV para as configurações escolhidas para este trabalho (segundo o fabricante). Se levarmos em consideração que a face 2 não possui inversão de polaridade (ou seja, o conversor não deixa de operar em nenhum momento) e que a tensão nunca fica abaixo de 100mV, então é esperado que esta possua o maior potencial para a aplicação. O pico de eficiência é diretamente relacionado ao transformador utilizado na entrada do conversor, que neste caso, esta sendo considerado uma relação de 1:100. Outras relações (1:20 e 1:50) serão futuramente anexadas ao circuito para fins de comparação entre as configurações.

A mesma caracterização e análise foi realizada com o modelo TEG TGPR-5W-5V-40S. A Figura 23 mostra a caracterização do TEG em todos os perfis de temperatura. Neste caso, os modelos LTC3108

e LTC3109 não são adequados. Nos gráficos, é possível observar que os picos de tensão superior (aproximadamente 600mV) e inferior (aproximadamente 1.5V) extrapolam os limites de tensão de entrada desses conversores. Isto acaba inviabilizando o uso dos modelos LTC em 4 das 6 faces apresentadas.

Figura 23: TGPR-5W-5V-40S - Caracterização.



Fonte: Autor(2019).

No caso do modelo BQ25570, sua partida a frio de 600mV pode prejudicar o início de sua operação. Tomando a posição 2 como exemplo, é possível observar que a tensão varia levemente entre 450mV e 650mV. Se acaso o conversor consiga entrar em operação, dificilmente saíra. Isto porque após iniciar a operação, o conversor aceita entradas mínimas de até 100mV. O principal problema para este conversor

é encontrado nos perfis com inversão de polaridade. Devido a tensão de partida a frio, o conversor ficaria muito tempo inoperante. O BQ25570 será colocado em teste assim como os demais, porém, um modelo BQ25505 será introduzido nas análises. Este modelo possui uma partida a frio de 330mV e se mantém operando com tensões mínimas de 100mV.

O projeto do *Payload* apresentado neste trabalho, propõe 3 conjuntos iniciais para o harvesting termoeletrico. Em adicional aos conjuntos apresentados, serão incorporados aos testes, variações dos componentes e circuitos apresentados. Este é o caso da substituição do transformadores com diferentes relações (1:20, 1:50 e 1:100) para os modelos LTC, onde a mudança do ponto de máxima eficiência é esperado. A regulagem da tensão de saída também pode ser alterada de 5V para 3.3V, ou até mesmo 1.8V, a fim de comparar a energia total obtida em cada perfil de temperatura. Como mencionado anteriormente, outro modelo com MPPT será incluso. O BQ25505 possui o mesmo *footprint* do BQ25570 facilitando sua inclusão nos testes. Para ampliar as possibilidades, mais dois modelos de conversores são incluídos na análise do *Payload*. São os modelos MCP1642 (partida a frio em torno de 650mV e *input* mínimo em operação de 350mV) e o MP3414B (partida a frio 800mV e mínimo input de 600mV). Além destas mudanças, outros modelos de TEG podem ser adquiridos para atingir níveis maiores de tensão.

O último capítulo, apresenta o cronograma de atividades, mostrando o que foi feito até o momento e o que deve ser feito até a conclusão deste trabalho.

5 CRONOGRAMA

Neste capítulo são apresentados os trabalhos realizados até o presente momento no que diz respeito ao desenvolvimento do projeto de mestrado, assim como as atividades previstas até a conclusão do trabalho.

Figura 24: Cronograma de Atividades

Atividades	1º Tri. 2018	2º Tri. 2018	3º Tri. 2018	4º Tri. 2018	1º Tri. 2019	2º Tri. 2019	3º Tri. 2019	4º Tri. 2019
Teoria								
Revisão Bibliográfica - Conceitos, Harvesting Termoeletrico e Conversores ULP	■	■						
Revisão Bibliográfica - Artigos relacionados as tecnologias envolvidas		■	■	■				
Definições do Projeto - Metodologia	■	■	■	■				
Hardware								
Projeto e Fabricação PCB Payload			■	■	■	■	■	
Aquisição dos Componentes do Payload				■	■	■	■	
Teste Funcionamento Conversores					■	■	■	
Teste Circuito de Aquisição, Gerenciamento e Armazenamento							■	■
Versão Final - Teste, Validação e Integração Hardware Payload								■
Software								
Modelagem do Sistema - UML			■	■	■			
Teste de Aplicação - LPM, Interrupções, Aquisição, Rotina, Interrupções e Comunicação				■	■	■		
Firmware Aquisição e Armazenamento de dados					■	■	■	
Teste Validação do Software para embarque no Cubesat								■
Análise Harvesting								
Caracterização dos TEGs				■	■	■		
Análise dos Conversores					■	■	■	■
Análise dos Capacitores					■	■	■	■

Fonte: Autor(2019).

O cronograma apresentado na Figura 24 mostra em azul as atividades já realizadas, em vermelho as atividade à serem realizadas e em laranja as atividades em andamento. Um caso especial ocorre com a PCB projetada. A primeira versão proposta neste trabalho irá passar por modificações para se adequar aos novos componentes escolhidos para a análise de harvesting termoeletrico. Este fato é representado por um seta que transita entre os testes de conversores e o projeto de PCB. Uma vez que a PCB esteja pronta, o período de análise dos conversores e capacitores dependera apenas do próprio tempo de execução das simulações. O software pode se tornar um ponto critico na integração final, uma vez que o projeto depende da validação perante a

equipe do projeto Serpens. Toda a parte de rotina (incluindo mudanças dos estados através de interrupções, comunicação e *low power mode*) já esta implementada e alguns testes já foram realizados, faltando aplicar técnicas de validação de software propriamente ditas. O software para circuito de medição e armazenamento de dados esta parcialmente implementado e deverá ser retomado antes do termino da análise de harvesting

REFERÊNCIAS

ADAMI, S.-E. et al. Self-powered ultra-low power dc-dc converter for rf energy harvesting. In: IEEE. **Faible Tension Faible Consommation (FTFC), 2012 IEEE**. [S.l.], 2012. p. 1–4.

ARRABAÇA, D. A.; GIMENEZ, S. P. **Eletrônica de potência - conceitos, metodologia de análise e simulação**. [S.l.]: Érica, 2013.

AUDIFFRED, D. et al. Experimental analysis of thermoelectric energy generation for nanosatellites. In: **2st IAA Latin American Cubesat Workshop**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 658–678.

BASSI, G. et al. A 150mv-1.2 v fully-integrated dc-dc converter for thermal energy harvesting. In: IEEE. **Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on**. [S.l.], 2012. p. 331–334.

BECKER, M. P. et al. Automatização de um sistema caracterizador de dispositivos termoelétricos. 2016.

BUZILLO, R. et al. Approach to integrated energy harvesting voltage source based on novel active teg array system. In: IEEE. **2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation**. [S.l.], 2014. p. 1–4.

CALTECH. **Brief history of thermoelectrics**. 2016.
<http://thermoelectrics.caltech.edu>. Acesso em: 16 out. 2018.

CURTIS, D. J. Process control instrumentation technology. **Prentice-Hall of India, New Delhi**, 2003.

DIAS, P. C. et al. Autonomous soil moisture sensor based on nanostructured thermosensitive resistors powered by an integrated thermoelectric generator. **Sensors and Actuators A: Physical**, Elsevier, v. 239, p. 1–7, 2016.

DIAS, P. C. et al. Measurement of the electric energy storage capacity in solar thermoelectric generators' energy harvesting modules. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 13, n. 3, p. 1550147716685423, 2017.

DIAS, P. C. et al. Autonomous multisensor system powered by a solar thermoelectric energy harvester with ultralow-power management circuit. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 64, n. 11, p. 2918–2925, 2015.

DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 135 p.

FRANTZ, G.; FREEMAN, D.; LINK, C. Approaching the horizon of energy harvesting. **Tex Instrum**, 2012.

FUJITSU. **FRAM - Memória Ferroelétrica de Acesso Aleatório não volátil**. [S.l.]: Fujitsu Semiconductor America, 2014. [Http://www.fujitsu.com](http://www.fujitsu.com). Acesso em: 23 mar. 2018.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **Datasheet: LTC3108**. [S.l.]: Linear Technology Corporation, 2010. <http://cds.linear.com>.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **Datasheet: LTC3109**. [S.l.]: Linear Technology Corporation, 2010. <http://www.linear.com>.

LUKOWICZ, M. von et al. Thermoelectric generators on satellites—an approach for waste heat recovery in space. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 7, p. 541, 2016.

MATEU, L.; MOLL, F. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics (keynote address). In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. **Microtechnologies for the New Millennium 2005**. [S.l.], 2005. p. 359–373.

MOHAN, N. **Eletrônica de potência - curso introdutório**. [S.l.]: LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabVIEW**. 2018. <Http://www.ni.com>. Acesso em: 02 jul. 2018.

OSTRUFKA, A. L. A. et al. Avaliação experimental do posicionamento de um gerador termoelétrico em cubesats. Joinville, SC, 2017.

PEREIRA, F. **Microcontroladores MSP430: teoria e prática**. [S.l.]: Érica, 2005.

PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy harvesting technologies**. [S.l.]: Springer, 2009.

RAJU, M.; GRAZIER, M. Energy harvesting. **ULP meets energy harvesting: A gamechanging combination for design engineers Texas Instruments Inc., White paper**, 2008.

RICHELLI, A.; COLALONGO, L.; KOVACS-VAJNA, Z. A review of dc/dc converters for ultra low voltage energy harvesting. **Journal of Low Power Electronics**, American Scientific Publishers, v. 12, n. 2, p. 138–149, 2016.

ROSA, A. **Processos de energias renováveis, tradução da 3ª edição: fundamentos**. [S.l.]: Elsevier Brasil, s.d.

ROWE, D. M. **CRC handbook of thermoelectrics**. [S.l.]: CRC press, 1995.

SLONGO, L. et al. The floripa-sat experience: mission progress and satellite's development. In: **2st IAA Latin American Cubesat Workshop**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 1, p. 48–69.

SLONGO, L. K. et al. Circuitos coletores de energia solar para sistemas embarcados de baixo consumo. 2013.

TEXAS INSTRUMENTS. **bq25570 Nano Power Boost Charger and Buck Converter for Energy Harvester Powered Applications**. [S.l.]: Texas Instruments, 2018. <http://www.ti.com>. Datasheet.

TEXAS INSTRUMENTS. **Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE)**. 2018. [Http://www.ti.com](http://www.ti.com). Acesso em: 15 mar. 2018.

VILLA, P. et al. A complete cubesat mission: the floripa-sat experience. In: **1st IAA Latin American Cubesat Workshop**. [S.l.: s.n.], 2014. v. 2, p. 307–314.

WANG, J. **Design of a boost DC-DC converter for energy harvesting applications in 40nm CMOS process**. Tese (Doutorado) — TU Delft, Delft University of Technology, 2014.

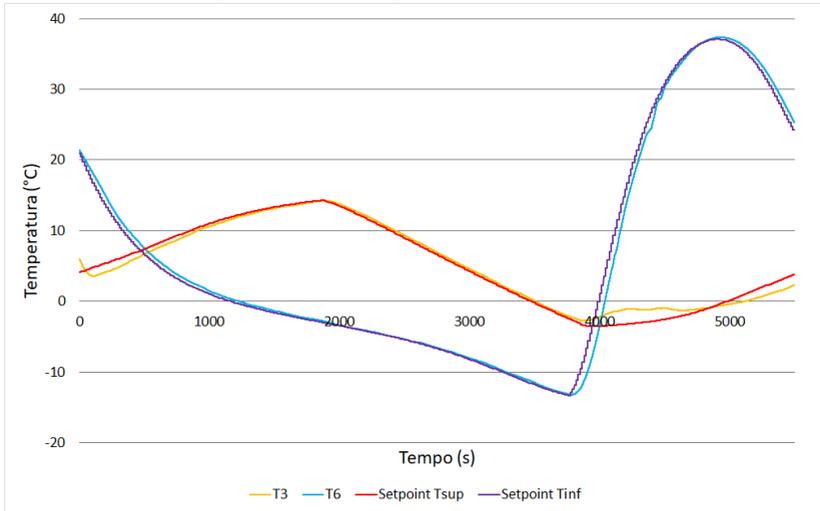
WHAT is energy harvesting. 2015. <http://www.energyharvesting.net>. Acesso em: 15 set. 2018.

WIN, K. K.; DASGUPTA, S.; PANDA, S. An optimized mppt circuit for thermoelectric energy harvester for low power applications. In: **IEEE. 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia**. [S.l.], 2011. p. 1579–1584.

YILDIZ, F. **Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques**. 2009. <https://scholar.lib.vt.edu>. Acesso em: 15 set. 2018.

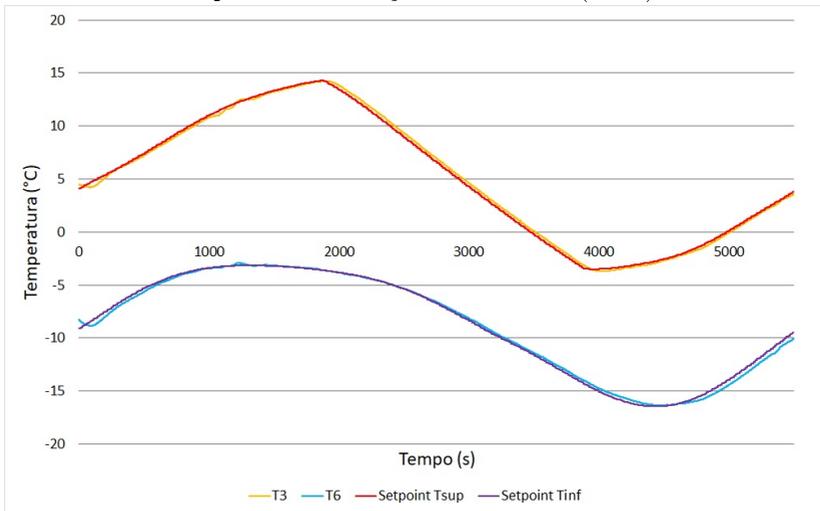
**APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de
Temperatura do Cubesat.**

Temperatura - Posição da Célula 1 (TEG)



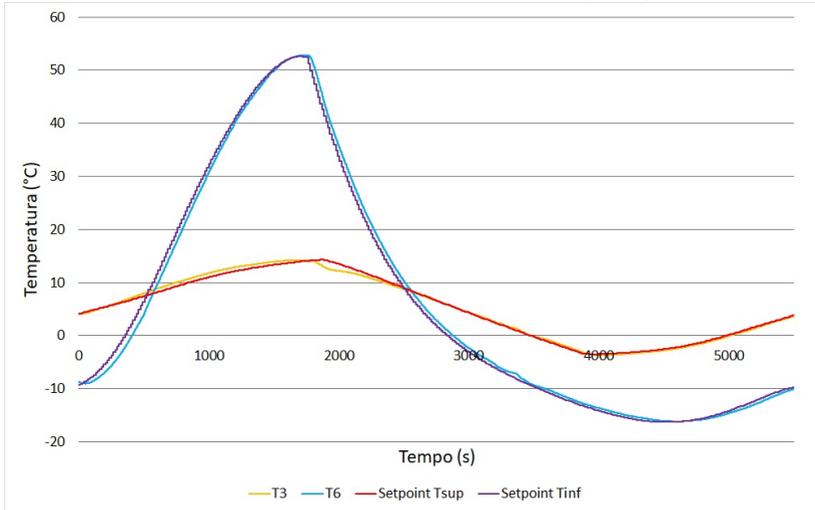
Fonte: Autor(2019).

Temperatura - Posição da Célula 2 (TEG).



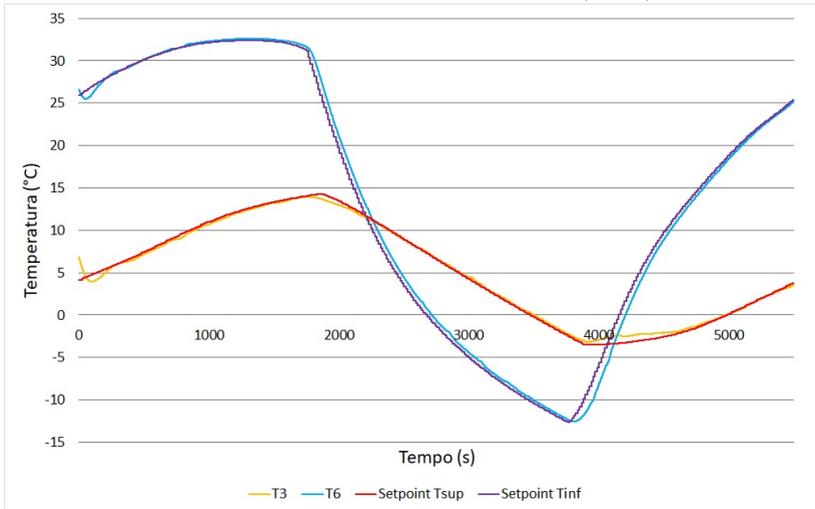
Fonte: Autor(2019).

Temperatura - Posição da Célula 3 (TEG).



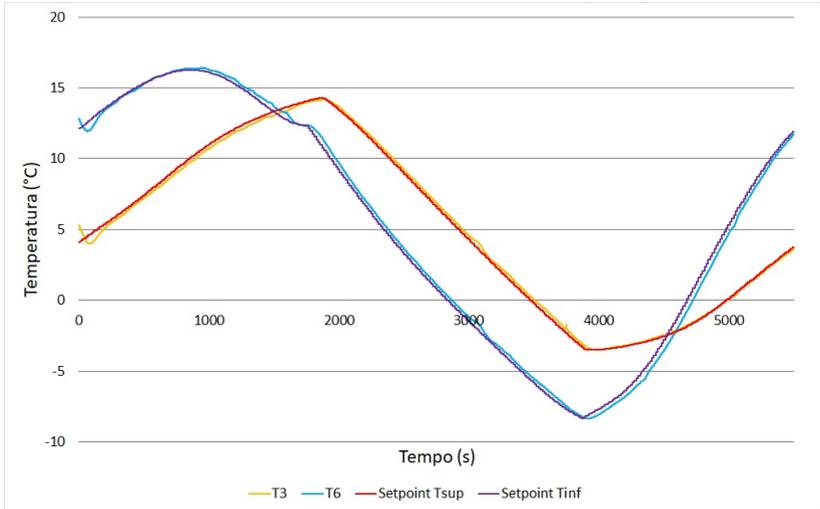
Fonte: Autor(2019).

Temperatura - Posição da Célula 4 (TEG).



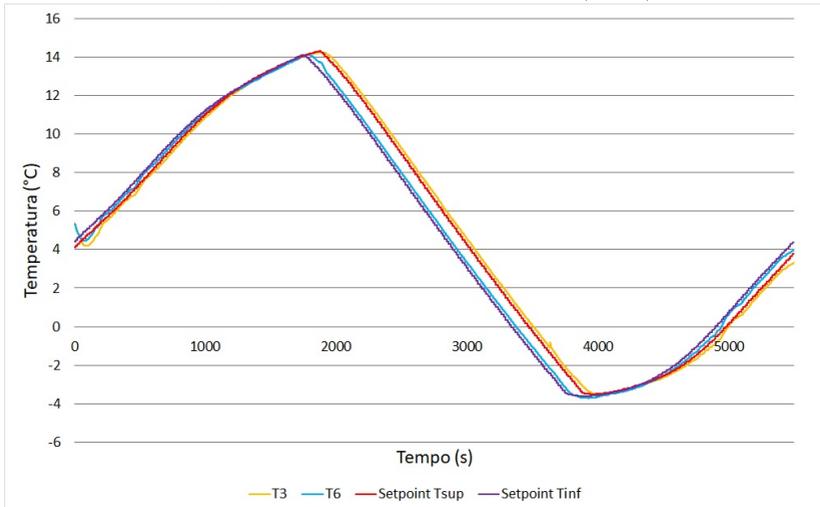
Fonte: Autor(2019).

Temperatura - Posição da Célula 5 (TEG).



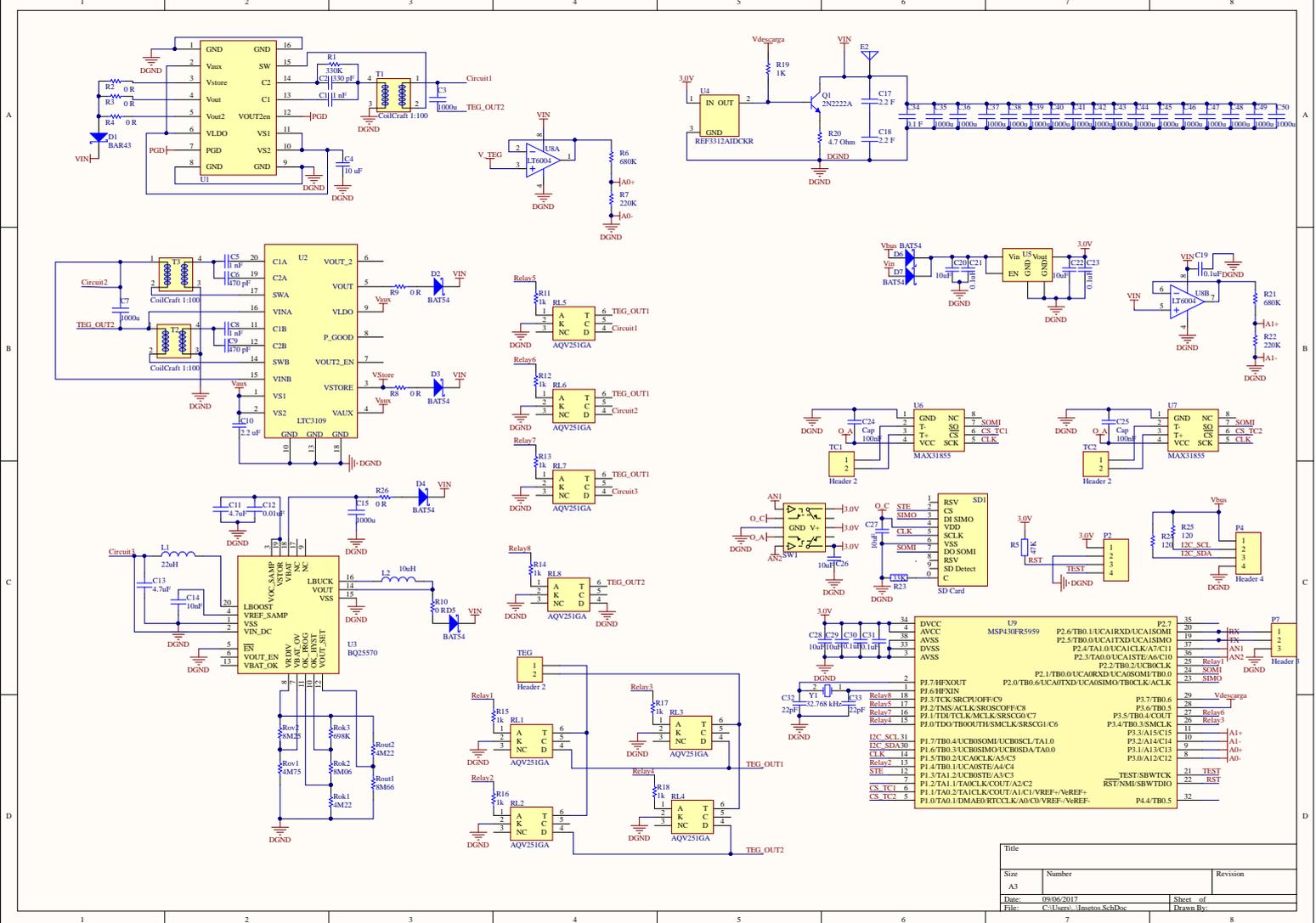
Fonte: Autor(2019).

Temperatura - Posição da Célula 6 (TEG).



Fonte: Autor(2019).

**APÊNDICE B – Esquemático Completo do Módulo de
Harvesting**



Title			
Size	Number		Revision
A3			
Date:	09/06/2017		Sheet of
File:	C:\Users\jlnstos\SchDoc		Drawn By: