



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS

Thiago Martins

Avaliação da colheita de energia termoeétrica para microssatélites

DM - PPGESE - 007

Joinville
2019

Thiago Martins

Avaliação da colheita de energia termoelétrica para microssatélites

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.
Orientador: Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler.

Joinville

2019

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

Martins, Thiago

Avaliação da colheita de energia termoelétrica para
microsatélites / Thiago Martins ; orientador, Anderson
Wedderhoff Spengler, 2019.

97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2.
Termoeletricidade. 3. Conversores de baixo consumo. 4.
Carga útil para CubeSats. I. Spengler, Anderson
Wedderhoff. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas
Eletrônicos. III. Título.

Thiago Martins

Avaliação da colheita de energia termoeétrica para microsatélites

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Kleber Vieira de Paiva, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Flávio José de Oliveira Morais, Dr.(a)
Faculdade de Ciências e Engenharia/UNESP

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Prof.(a) Alexandro Garro Brito, Dr.
Coordenador(a) do Programa

Prof.(a) Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.
Orientador(a)

Joinville, 2019.

Este trabalho é dedicado à minha esposa e aos meus queridos pais, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por todas as superações nos últimos anos.

Aos meus pais, Corsino Martins e Odete Andrade Martins pelos ensinamentos, e a educação que tive. Agradeço a eles pelo incentivo nos momentos difíceis e amparo que possibilitaram a realização deste trabalho.

À minha esposa Priscila Gomes, por sua paciência, apoio e compreensão durante todo o período deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de pelo apoio e incentivo.

Ao professor Anderson Wedderhoff Spengler por sua orientação, pela oportunidade que me concedeu em realizar uma pós graduação de qualidade e pelo amparo necessário para realização dos trabalhos envolvidos em diversos projetos desde a época da graduação.

Ao professor Flávio José de Oliveira Moraes que auxiliou o desenvolvimento deste trabalho, compartilhando o seu conhecimento e experiência na área.

Aos professores Kleber Vieira de Paiva e Jorge Luiz Goes Oliveira pelas dicas e sugestões neste trabalho que foram de grande relevância para sua conclusão.

A todos os professores do mestrado que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Para todos os colegas de mestrado que tive o prazer de conhecer. Aos amigos que tive a oportunidade de compartilhar o mesmo espaço nos laboratórios LISHA e T2F que acompanharam de perto o desenvolvimento do trabalho.

À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos (PPGESE), pelo suporte indispensável para a execução deste trabalho.

Enfim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”
(Albert Einstein, 1879-1955)

RESUMO

A disponibilidade de energia e o método de captação é diretamente relacionada ao ambiente ao qual os sistemas estão expostos. Para microssatélites, a única fonte disponível é a energia solar. A forma utilizada para obtenção desta energia é o uso de células fotovoltaicas. A energia armazenada é utilizada para manter o funcionamento do microssatélite mas também é utilizada para aquecer a bateria nos períodos onde a temperatura da órbita atinge valores negativos. Juntamente com o calor operacional, gerado pelo componentes eletrônicos, esta energia é dissipada para o espaço. Este calor gera um gradiente de temperatura juntamente com a radiação solar (ou a falta dela) nas faces do *cubesat*. Esta energia pode ser aproveitada pelo gerador termoelétrico (TEG) obtendo uma fonte adicional para o microssatélite. Neste trabalho foi desenvolvido um módulo de aproveitamento de energia termoelétrica que age como uma carga útil para microssatélites 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 uso do microssatélite. São utilizados três modelos de conversores comerciais neste experimento (LTC3108, LTC3109 e BQ25570). Para avaliar o tempo de carga e energia disponível, três capacitores com diferentes características também são testados. Os experimentos foram aplicados em uma bancada de testes capaz de simular fisicamente a geração de energia térmica das faces do microssatélite. Como resultado principal, o *Payload* foi capaz de gerar e armazenar 12,3 Joules em menos de um ciclo de órbita (aprox. 66 min.). A máxima energia armazenada foi obtida durante os testes realizados com gradientes fixos de temperatura. Esta energia foi de 31,25 Joules e o módulo demorou 8 horas para atingir este valor. Os experimentos mostraram também que a escolha do TEG influencia diretamente na qualidade e na capacidade de geração para os mesmos gradientes de temperatura e mesmas dimensões. Uma solução híbrida entre os modelos LTC3109 e BQ25570 é sugerida ao final do trabalho. Esta solução busca um equilíbrio entre conversões realizadas com gradientes de temperatura extremamente baixos (mínimo aprox. 2 °C) e alta eficiência em gradientes mais elevados (aprox. 90% de eficiência). O presente trabalho obteve êxito em seu objetivo proporcionando uma boa base para futuros estudos voltados ao aproveitamento de energia termoelétrica para microssatélites. O trabalho resultou em um protótipo de carga útil (*Payload*) completo que pode ser aplicado em missões reais de microssatélites.

Palavras-chave: Geração de energia termoelétrica. Colheita termoelétrica. Carga útil para microssatélites. Nanosatélites.

ABSTRACT

The availability of energy and the harvesting method is related to the environment to which the systems are exposed. For microsatellites, the only source available is solar energy. The most conventional way of obtaining this energy is the use of photovoltaic cells. The stored energy is used to maintain microsatellite operation but is also used to heat the battery itself during periods when the orbit temperature reaches negative values. This energy along with the operating heat generated by the electronics is dissipated and lost to space. This heat generates a temperature gradient along with solar radiation (or lack thereof) on the cubesat faces. This energy can be harnessed by the thermoelectric generator (TEG) obtaining an additional source for microsatellite. Power capture on remote devices is essential for their functionality. Obtaining additional energy can reduce the time between radio transmissions between microsatellite and base station, for example. In this work, a thermoelectric harvesting module was developed as a payload for microsatellites in order to evaluate the electric energy generation by thermal gradients between faces of a 1U cubesat. This module is responsible for converting, managing and storing part of the energy for microsatellite use. Three models of commercial converters are used in this experiment (LTC3108, LTC3109 and BQ25570). In order to evaluate the available charge time and energy, three capacitors with different characteristics are also tested. The experiments were applied to a test bench capable of physically simulating the thermal energy generation of microsatellite faces. Payload is designed to monitor thermal harvesting, manage choice and variation of topologies, and communicate with the onboard computer (OBC). Payload was able to generate and store 12,3 Joules (max. load – supercapacitor 1 F) in less than one orbit cycle (approx. 65 min.). The maximum stored energy was obtained during the tests performed with fixed temperature gradients. This energy was 31,25 Joules and the module took 8 hours to reach this value. Experiments show that the choice of TEG directly influences the quality and generating capacity for the same temperature gradients, same dimensions and with different temperature offset. A hybrid solution between model LTC3109 and BQ25570 is suggested at the end of the paper. This solution strikes a balance between conversions performed with extremely low temperature gradients (minimum approx. 2 °C) and high efficiency at higher gradients (approx. 90% efficiency). The present work was successful in its objective providing a good basis for future studies aimed at the collection of thermoelectric energy for microsatellites. In addition, the work resulted in a complete Payload prototype that can be applied to real microsatellite missions.

Keywords: Thermoelectric Generation. Thermoelectric Harvesting. Payload for Cubesat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista esquemática de um TEG.....	21
Figura 2 – <i>Cubesat</i> em órbita	30
Figura 3 – Projeto do protótipo para testes da PCB Payload.....	32
Figura 4 – Diagrama de Blocos representando os componentes do Payload	32
Figura 5 – Esquemático para o conversor LTC3108.....	34
Figura 6 - Esquemático para o conversor LTC3109.....	35
Figura 7 - Esquemático para o conversor BQ25570.....	36
Figura 8 - Circuito de armazenamento de energia.....	38
Figura 9 - Esquemático do circuito de seleção de conversores e polaridade.	40
Figura 10 – Circuito de medição de energia de entrada e saída dos conversores.....	41
Figura 11 – Circuito de aquisição de temperatura.	42
Figura 12 - Diagrama de Caso de Uso.....	45
Figura 13 - Diagrama de Atividades. Requisições por parte do OBC.....	46
Figura 14 - Diagrama de Atividades internas do <i>Payload</i>	48
Figura 15 - Diagrama de Estados.	48
Figura 16 - Aparato Experimental	50
Figura 17 - Aparato Experimental. Controle de tensão dos TECs.	51
Figura 18 - Configuração da Bancada de Teste.....	52
Figura 19 - Localização dos Termopares na Bancada de Teste.	53
Figura 20 - Interface do sistema (LabView).....	54
Figura 21 - Temperatura, posição da Célula 1 (TEG).	55
Figura 22 - TGPR-10W-4V-40S Caracterização da tensão gerada em circuito aberto nas seis faces do <i>cubesat</i>	58
Figura 23 - TGPR-5W-5V-40S Caracterização da tensão gerada em circuito aberto nas seis faces do <i>cubesat</i>	60
Figura 24 - Curva de Potência do perfil 1 para o modelo TGPR-5W-5V-40S.	64
Figura 25 - Geração de energia utilizando o conversor LTC3108.	66
Figura 26 - Geração de energia do Perfil 1 utilizando LTC3108 em polaridades invertida.....	69
Figura 27 - Geração de energia do Perfil 4 utilizando LTC3108 em polaridades diferentes. ..	69
Figura 28 - Geração de energia do Perfil 1 para o conversor LTC3108 utilizando o circuito de gerenciamento do <i>Payload</i> para aplicação da auto polaridade na entrada do circuito.	70

Figura 29 - Geração de energia utilizando o conversor LTC3109.	71
Figura 30 - Geração de energia utilizando o conversor BQ25570.	73
Figura 31 - Geração de energia para o conversor BQ25570 utilizando o circuito de gerenciamento do <i>Payload</i> para aplicação da inversão de polaridade na entrada do circuito..	75
Figura 32 – Armazenamento de energia utilizando o supercapacitor de 1F.	77
Figura 33 – Carregamento do capacitor de 1F utilizando os 3 modelos de conversores, circuito de auto polaridade, gradiente de temperatura do perfil 1 e TEG TGPR-5W-5V-40S.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos conversores utilizados	37
Tabela 2 - Principais características dos elementos de armazenamento.	39
Tabela 3 - Energia gerada pelos TEGs em circuito aberto.	65
Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens qualitativas dos modelos de conversores propostos, segundo o fabricante e observações dos testes em bancada.	76
Tabela 5 - Energia obtida para o perfil 1 utilizando o supercapacitor de 1F.....	81
Tabela 6 - Energia obtida com gradientes fixos de temperatura durante 1 hora utilizando o supercapacitor de 1F e os 2 supercapacitores de 5F em série.	82
Tabela 7 - Consumo médio quando o circuito não está convertendo energia.	83

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
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RTG	Radioisotope Thermoelectric Generator
TEC	Refrigerador Termoelétrico
TEG	Gerador Termoelétrico
ULP	Ultra Low Power
VMC	Controle de Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

V_o	Tensão de geração do TEG	[V]
S	Coefficiente de Seebeck	[V/K]
T	Temperatura	[°C]
P_{int}	Potência instantânea	[W]
P_{total}	Potência total em um período de tempo	[J]
V_{inst}	Tensão do TEG em circuito aberto	[V]
R_L	Resistência de carga	[Ω]
R_{in}	Resistência interna do TEG	[Ω]
R_{eq}	Resistência equivalente	[Ω]
V_{cap}	Tensão no Supercapacitor	[V]
C_{nom}	Capacitância nominal	[F]
E_{max}	Energia máxima armazenada	[J]
Δ	Varição de quantidade finita associada a incertezas e tolerâncias	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS	19
2.2	GERADOR TERMOELÉTRICO.....	21
2.2.1	Aplicações de geradores termoeletricos.....	22
2.3	CONVERSORES DC-DC	23
2.3.1	Conversores ULP para <i>harvesting</i>.....	26
2.3.2	Métodos empregados na melhoria da eficiência do processo de <i>harvesting</i> ...	27
2.4	MICROSSATÉLITES – PADRÃO CUBESAT	28
2.4.1	Floriposat.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	MÓDULO E COMPONENTES.....	31
3.1.1	Conversores	33
3.1.2	Elementos de Armazenamento	37
3.1.3	Circuito de Medição de Energia e Gerenciamento do <i>Payload</i>	39
3.1.4	Microcontrolador MSP430	42
3.1.4.1	<i>Algoritmo de Gerenciamento do Payload</i>	<i>44</i>
3.2	BANCADA DE TESTE	50
3.2.1	Validação da Bancada	54
3.3	ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS.....	55
4	RESULTADOS	57
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS TEGs UTILIZADOS.....	57
4.2	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS TOPOLOGIAS	66

4.3	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DAS TOPOLOGIAS	77
4.3.1	Consumo médio dos circuitos conversores	83
5	CONCLUSÃO.....	85
5.1	TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS.....	89
	APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de Temperatura do <i>Cubesat</i>	92
	APÊNDICE B – Esquemático Completo do Módulo de <i>Harvesting</i>	97

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 aplicações de dispositivos remotamente localizados, os projetos voltam-se para captação de micro energia, visando assim, a tecnologia *ultra-low-power* (ULP) (RAJU; GRAZIER, 2008). A tecnologia ULP permite 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 captação de energia a partir do meio ambiente, também podendo apresentar-se como *energy scavenging* ou *power harvesting*. Ela pode ser obtida a partir de diferentes fontes, como vibrações mecânicas, eletromagnéticas, luz, ondas acústicas, fluxo de ar, fluxo de 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. A junção destas duas soluções, sistemas de *harvesting* e baterias, garantem 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.

A disponibilidade energética e o tipo de captação estão relacionados ao ambiente ao qual são expostos. Para microssatélites, por exemplo, a única fonte disponível é a energia solar, que é convertida em energia elétrica através de células fotovoltaicas (BECKER et al., 2016). Esses satélites miniaturizados possuem descrições que caracterizam sua forma, tamanho e peso. Essa padrão é conhecido como o padrão *CubeSat*.

Existem algumas desvantagens quando a fonte de energia é fornecida exclusivamente pela conversão de energia solar em elétrica. A eficiência para um painel solar possui um

limite teórico em torno de 31%. Nas aplicações reais, as células solares apresentam eficiência ainda mais baixas. Esta queda na eficiência pode ser causada por perdas de reflexão, perda de tensão nas junções ou contatos, sendo a maior parte desta energia convertida em calor. As características da órbita e o formato do microssatélite também podem criar barreiras para se obter a captação ideal da energia solar. Períodos onde não ocorre a incidência de radiação solar nos quais o satélite passa pela região de eclipse também diminuem o potencial de conversão de energia. Desta forma, durante esse período a energia deve ser fornecida pelas baterias e/ou por uma fonte alternativa (OSTRUFKA et al., 2019).

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.

Uma alternativa para os problemas apresentados pode ser o uso de dispositivos termoelétricos como geradores de energia. Devido às suas características estruturais, os geradores termoelétricos (TEGs) são particularmente adequados para aplicações espaciais. Como não há um processo de conversão dinâmica da energia, não existem quaisquer tipos de vibrações introduzidas ao satélite (LUKOWICZ et al., 2016). Esses dispositivos são feitos de materiais semicondutores e são capazes de converter calor em eletricidade quando um gradiente de temperatura é aplicado sobre suas faces, de acordo com o efeito Seebeck, descoberto por Thomas Seebeck em 1821. Desta forma, o gerador termoelétrico pode gerar energia durante os períodos de eclipse assim como aproveitar o calor operacional que é dissipado.

O 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. No caso dos dispositivos termoelétricos, que fornecem tensões com amplitude muito baixas, pode-se aplicar um circuito altamente integrado com conversor DC-DC e o gerenciamento de energia através de um sistema *ultra-low-power*.

Os estudos apresentados por Dias et al. (2015) e Dias et al. (2016), evidenciam 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 a avaliação da eficiência de modelos de 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 módulo desenvolvido, 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 trabalho, foram utilizados dois supercapacitores com carregamento independente, reduzindo o erro de medição em cerca de 22 %.

Sendo o dispositivo de geração termoelétrica um conjunto experimental para microssatélites, o mesmo foi projetado como uma carga útil (*Payload*) para futuras missões espaciais. A avaliação de sua eficiência é realizada mediante aplicação dos resultados obtidos no trabalho de Ostrufka et al. (2017) e que 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*.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar experimentalmente um módulo de aproveitamento energético (*energy harvesting*) de energia termoelétrica para microssatélites.

1.1.2 Objetivos Específicos

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

- Comparar o desempenho dos conversores acoplados no módulo;
- Identificar, entre os circuitos de armazenamento propostos, qual modelo melhor atende ao critério de autonomia energética;

- Testar o módulo desenvolvido na geração e conversão de energia;
- Avaliar o consumo médio de energia dos circuitos conversores;
- Adaptar a bancada de testes disponível no laboratório;
- Simular o dispositivo de *harvesting* em órbita com auxílio de ferramentas computacionais e testes em bancada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos utilizados como base desse trabalho. Inicialmente são apresentados os efeitos termoelétricos conhecidos como Seebeck, Peltier e Thomson que estão diretamente relacionados com os dispositivos termoelétricos de *harvesting* apresentados logo em seguida. No próximo tópico, é exposto um estudo das características e principais aplicações dos TEGs. Por fim, o último tópico deste capítulo trata do módulo de gerenciamento da energia captada por um dispositivo TEG, apresenta-se então os conversores DC-DC ULP.

2.1 FENÔMENOS TERMOELÉTRICOS

A energia térmica é prontamente exposta no ambiente e pode ser obtida de diferentes fontes, desde pessoas e animais, máquinas e dispositivos eletrônicos e principalmente fontes naturais (MATEU; MOLL, 2005). Os efeitos termoelétricos dessa obtenção, ou geração de energia são descritos principalmente através de três efeitos que relacionam a física da termoeletricidade: Peltier, Seebeck e Thomson (DUNN, 2013, p. 135).

O pioneirismo no campo de estudos termoelétricos 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 força termoelétrica gerada sob a influência de uma diferença de temperatura. Porém, em 1821 Thomas Johann Seebeck atribuiu o fato ao magnetismo induzido pela diferença de temperatura e posteriormente concluiu que a corrente induzida era originária da força termoelétrica (CALTECH, 2016). Este estudo deu origem ao que conhecemos como efeito Seebeck.

A tensão Seebeck é uma grandeza que depende tanto da diferença de temperatura quanto da natureza do condutor. Logo se há gradiente de temperatura, por exemplo, ao longo de uma barra metálica onde um lado está mais frio que outro, os elétrons estarão concentrados no lado frio que se tornara negativamente carregado com relação ao lado mais quente ocasionando um diferença de potencial (ROSA, 2016, seq. 15.4)

Esta diferença de potencial está relacionada com o fato de que elétrons na junção mais quente do material tem mais energia térmica do que aqueles na junção mais fria e com isso tendendo a se deslocar (*drift*) para a junção mais fria (JOHNSON, 2014).

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. Quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada a um material semiconductor ocorre mudanças na temperatura das junções do mesmo, resfriando uma e aquecendo a outra. Esse efeito é conhecido como efeito Peltier (JOHNSON, 2014).

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 (Lord Kelvin), publicou 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. Assim, o terceiro efeito termoeletrico conhecido como Thomson foi definido. 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). Sendo assim, os principais fenômenos termoeletricos são definidos como (DUNN, 2013, p. 135):

- Efeito Seebeck - Estabelece que a tensão produzida em um termopar é proporcional à temperatura entre duas junções.
- 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).
- 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.

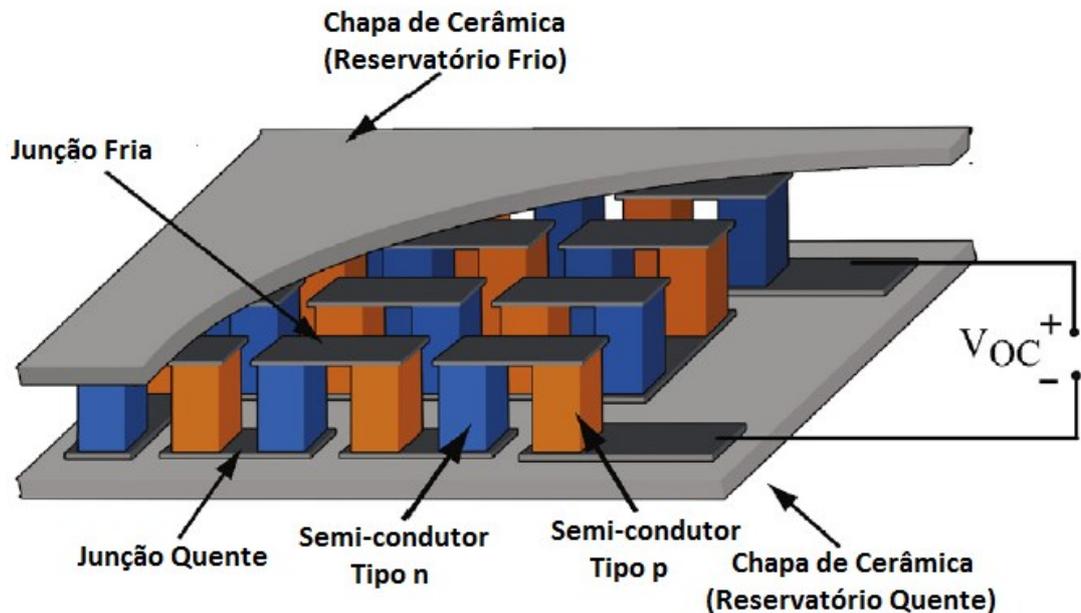
Estes efeitos são obtidos através de dispositivos termoelétricos como por exemplo no termopar, constituído por dois metais unidos de forma a construir uma junção. O termopar apresentado a seguir, o qual é utilizado como referência de dados para captação de energia neste trabalho, é chamado Gerador Termoelétrico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

2.2 GERADOR TERMOELÉTRICO

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).

A Figura 1 mostra a vista esquemática de um gerador termoelétrico com os semicondutores “n” e “p” ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, entre duas placas de cerâmica.

Figura 1 – Vista esquemática de um TEG.



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

O material do tipo “n” é dopado positivamente, contendo lacunas 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 (TEC – *Thermoelectric Cooler*), pelo

resfriamento/aquecimento. Basicamente pode-se dizer que a tensão de saída gerada pelo TEG corresponde a equação:

$$V_0 = S(T_2 - T_1) \quad (1)$$

onde S corresponde ao coeficiente de Seebeck do TEG, T₂ e T₁ à temperatura do lado quente e dos lado frio nas faces do gerador (PRIYA; INMAN, 2008) (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 as dimensões e materiais empregados (YILDIZ, 2009).

2.2.1 Aplicações de geradores termoelétricos

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 pratica 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.

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

Outra aplicação é a utilização do 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 com um 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).

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

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). Uma das primeiras missões que utilizou um RTG foi a *Voyager 1* e após mais de 35 anos, os geradores termoelétricos continuam operando. A NASA (*National Aeronautics and Space Agency*) também usou essa tecnologia em outras missões, como *Pioneer 10 e 11*, *Galileu*, *Cassini*, *Ulyssis*, *New Horizons*, *Viking I e II Mars*, no satélite meteorológico *Nimbus III* e nas missões *Apollo 12, 14, 15, 16 e 17* (CAILLAT et al., 2006; ROWE, 1991). Esses dispositivos costumam ser grandes em relação as dimensões de um *cubesat*. No presente trabalho, o TEG é avaliado experimentalmente como uma alternativa para geração de energia em microssatélites. Devido à limitação geométrica, a área útil para sua aplicação é restrita no *cubesat* 1U. Desta forma a utilização de um RTG é inviável devida a sua geometria.

O TEG possui eficiência baixa quando comparada as células fotovoltaicas. No trabalho de Ostrufka et al. (2019) seus resultados apontaram que o TEG consegue obter apenas 9,62% em relação a energia gerada pelos painéis solares em um mesmo ciclo de órbita. Enquanto as 6 células fotovoltaicas anexadas nas faces do *cubesat* geram 3,122 Wh de energia, os TEGs conseguem obter apenas 0,312 Wh.

Sendo a energia captada através de um TEG, a tensão será muito baixa. Para que se possa maximizar sua utilização, ou até mesmo viabilizar, usam-se conversores de micropotência que convertem esta energia captada e a armazenam diretamente em supercapacitores ou baterias. Este conversor é o assunto do próximo tópico.

2.3 CONVERSORES DC-DC

Devido à baixa amplitude de 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 ao *harvesting*. 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; SOUZA, 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 CA em modo chaveado para converter a tensão de entrada em uma baixa tensão CC regulada.

Segundo Mohan e Souza (2014) 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 (conversor *boost*) a entrada CC a uma tensão mais alta.

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 conversores 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: *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).

Segundo Arrabaça e Gimenez (2013), 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.

Os conversores DC-DC em geral podem apresentar-se em diversas arquiteturas como descrito anteriormente. Todas elas possuem modos de operação que são 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 todos os modos de operação descritos. Existem três métodos fundamentais que podem ser aplicados para alcançar a conversão DC-DC (WANG, 2014).

- O primeiro utiliza-se da 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 classificações já citadas, pode-se 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 potência ultra baixa (ULP). O controle que pode ser obtido sobre o controlador dependerá desta topologia. Suas aplicações variam, alguns exemplo são apresentados 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 alcançadas por conversores DC-DC comerciais para *harvesting*. Contudo, na maioria dos casos, precisa-se de pelo menos 1V da tensão de entrada ou *feedback* e 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).

2.3.1 Conversores ULP para *harvesting*

No trabalho de Richelli, Colalong e Kovacs-Vajna (2016) é apresentada uma revisão 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 faixa de tensão de entrada e saída) são os modelos indutivos. Porém, deve-se atentar para 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 é realizada por características como a eficiência geral do conversor, mas também a tensão mínima de partida a frio, a capacidade de fornecimento de 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 tensão. Devido ao um grande número de estágios 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, Colalong e Kovacs-Vajna (2016) são dos conversores indutivos *step-up*. Estes conversores podem atingir uma maior faixa

(entrada/saída) entre os três grupos. No entanto, para atingir uma tensão de saída razoavelmente elevada, 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. As ligações levam a indutores com fatores Q de maior qualidade. Porém, 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 partida automática 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, Colalong e Kovacs-Vajna (2016) é apresentado também uma comparação qualitativa entre os tipos de conversores apresentados. Segundo Richelli, Colalong 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).

2.3.2 Métodos empregados na melhoria da eficiência do processo de *harvesting*

A fim de melhorar a eficiência, atingir níveis mais baixos de tensão de entrada ou obter uma faixa maior de tensão, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos em complemento ao conversores apresentados. 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 Amplificador Operacional (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 sem a necessidade de utilizar conversores. Com isso, foi possível reduzir as perdas de energia devido à não idealidade da eficiência do conversor.

2.4 MICROSSATÉLITES – PADRÃO CUBESAT

Idealizado em 1999 pelos professores Jorgi Puigsuari e Bob Triggs, o padrão *cubesat* consiste em um satélite miniaturizado voltado para pesquisas espaciais específicas (GONZALES, 2014). Esses satélites miniaturizados possuem descrições que caracterizam sua forma, tamanho e peso. O padrão *cubesat* se diferencia de outros modelos de satélites miniaturizados justamente pela especificação. Os aspectos padronizados do *cubesat* possibilitam que as empresas produzam componentes em massa e ofereçam peças prontas para uso. Como resultado, o desenvolvimento do *cubesat* se torna menos dispendioso do que outros satélites miniaturizados altamente personalizados. A forma e o tamanho padronizados também reduzem os custos associados ao transporte e implantação no espaço (CHIN et al., 2017).

Segundo o documento elaborado por Chin et al. (2017) e disponibilizado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) o padrão *cubesat* fornece vários tamanhos baseados na unidade padrão do *cubesat*, referida como 1U. Um *cubesat* 1U é um cubo de 10 cm com uma massa de aproximadamente 1 kg a 1,33 kg. Ao longo dos anos outros tamanhos se popularizaram, como 1,5U, 2U, 3U e 6U, mas novas configurações estão sempre em desenvolvimento. Para o trabalho apresentado aqui é considerado o modelo 1U.

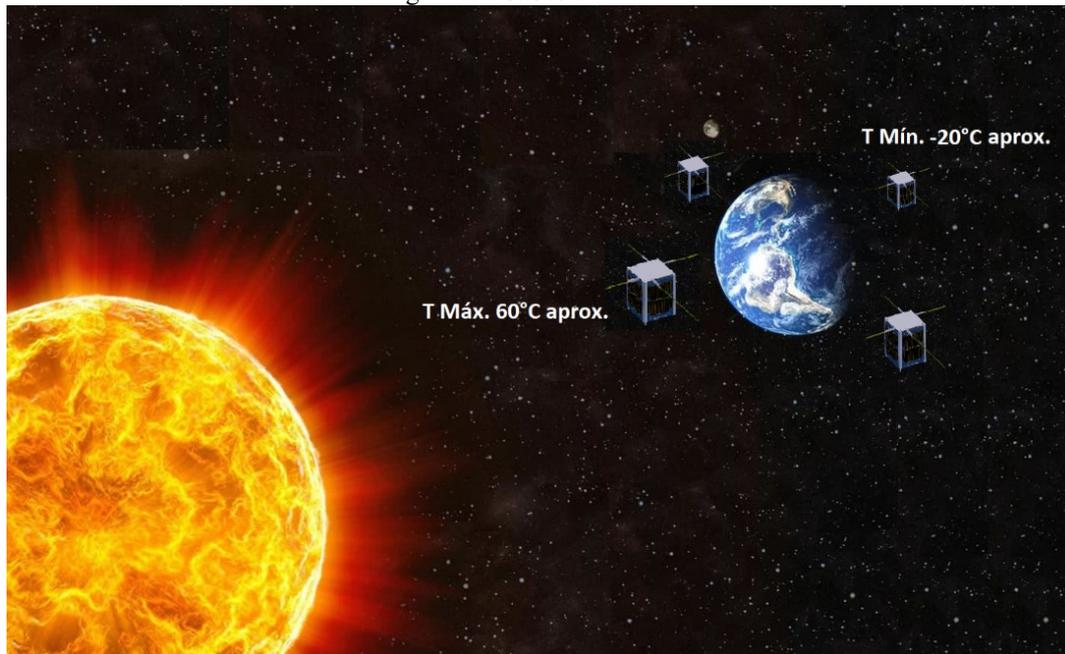
2.4.1 Floripasat

As condições de operação do *cubesat*, utilizadas como base para este trabalho, foram caracterizadas pelo projeto Floripasat. Floripasat é um projeto que visa preparar alunos, professores e pesquisadores para trabalhar em um desenvolvimento completo de um *cubesat* 1U. Para atingir esse objetivo, as equipes de trabalho são divididas em grupos para trabalhar

com subsistemas específicos de um microsatélite (SLONGO et al., 2016; VILLA et al., 2014). Os *Payloads*, ao que esse trabalho se refere, são geralmente experimentos científicos, que não possuem influência sobre os demais módulos que compõem um *cubesat*. Sendo assim, o *Payload* de *harvesting* termoelétrico 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: 400 km de altitude e 51,5° de inclinação), são utilizados dados de temperatura obtidos utilizando métodos numéricos. Esses dados apresentam seus pontos máximo de 60 °C e mínimo de -20 °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* está 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 termoelétrica (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.

Figura 2 – *Cubesat* em órbita

Fonte: Autor(2019).

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 termoelétrico que pode vir a ser aplicado a um microsatélite do tipo *cubesat* 1U.

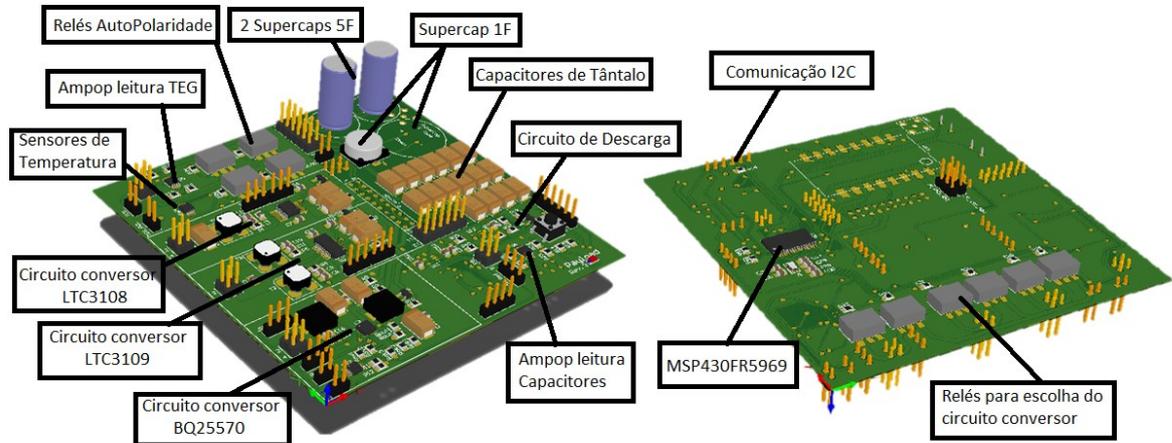
As seções a seguir apresentam devidamente o *Payload* de *harvesting* termoelétrico proposto. Neste, os tópicos expõem os componentes utilizados assim como os circuitos projetados na elaboração da placa de circuito impresso (PCB). Esses tópicos mostram o sistema de aquisição de energia, os dispositivos de conversão, armazenamento de energia, aquisição 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 desde os trabalhos realizados por (BORBA et al., 2019). 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 experimentos realizados.

3.1 MÓDULO E COMPONENTES

O módulo de *harvesting* possui uma série de componentes os quais são responsáveis por gerenciar a energia coletada pelo TEG. Composto por três modelos de conversores DC-DC ULP, cada um com suas características, três modelos de capacitores utilizados para armazenamento de energia, e um microcontrolador, responsável por delegar as ações prescritas. Estes são os principais componentes utilizados no *Payload* proposto. Além destes, um conjunto de relés ópticos são utilizados no projeto que são de grande importância para o funcionamento da unidade e será devidamente apresentado nas seções seguintes. O *Payload* ainda conta com um sistema de leitura de temperaturas, amplificadores operacionais para realizar leitura dos níveis de tensão e um circuito de descarga dos supercapacitores. Algumas ligações são realizadas através de conectores. Entre a saída principal dos conversores e os supercapacitores é preciso realizar a conexão manualmente. A PCB também dispõe de conectores para realizar a gravação do microcontrolador, conectores para utilização da energia

armazenada e conectores para comunicação I2C. A Figura 3 mostra a PCB do protótipo de *Payload* projetada para a aplicação deste trabalho.

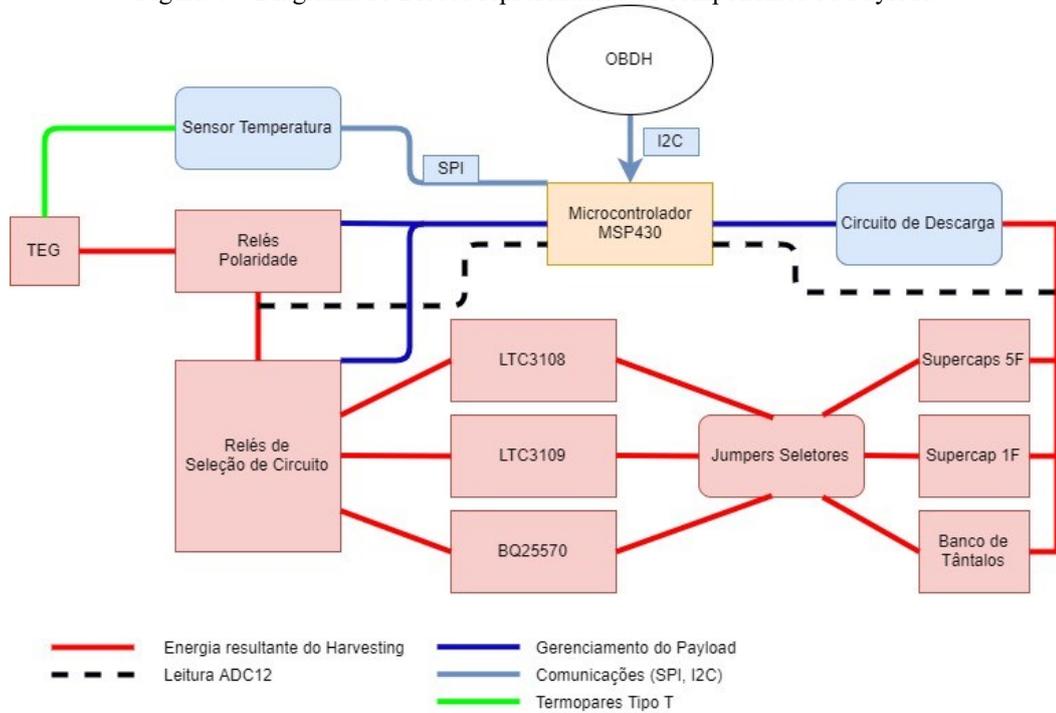
Figura 3 – Projeto do protótipo para testes da PCB *Payload*.



Fonte: Autor(2019).

A placa apresentada foi projetada para garantias de testes em bancada. Por este motivo algumas ligações devem ser realizadas manualmente através dos relés ópticos e conectores. Isto pode ser observado principalmente na entrada e na saída dos conversores que não podem compartilhar seus sinais. A Figura 4 apresenta como os componentes estão conectados no *Payload*.

Figura 4 – Diagrama de Blocos representando os componentes do *Payload*



Fonte: Autor (2019).

Na Figura 4 é apresentado os componentes responsáveis pelo harvesting em cor vermelha, assim como suas ligações. A energia é gerada pelo TEG e posteriormente passa por dois conjuntos de relés ópticos. Esses relés fazem o papel de isolamento entre as topologias de conversores e realizam a tarefa de inversão de polaridade. Os detalhes deste processo são abordados mais adiante neste trabalho. Após a conversão a energia é transmitida para os capacitores de armazenamento. Gerenciando o módulo está o microcontrolador MSP430. As conexões em azul escuro mostram que o dispositivo pode atuar sobre os relés e sobre o circuito de descarga dos capacitores. Para atuar sobre os dispositivos o microcontrolador monitora os níveis de tensão no pontos conectados pela linha tracejada em preto. Além disso, em azul claro é mostrada a comunicação SPI com o sensor de temperatura que retorna os valores nas faces do TEG. Por fim, o *Payload* dispõe de um canal de comunicação I2C (escravo) para transmissão dos dados para o OBDH. A placa de circuito impresso é um protótipo e apesar de suas arestas possuírem 10 cm este modelo não representa o perfil necessário para integração final em um *cubesat*. O esquemático completo do circuito pode ser encontrado no APÊNDICE B – Esquemático Completo do Módulo de *Harvesting* deste trabalho. Os circuitos, e conseqüentemente os componentes que os compõem, são apresentados com mais detalhes nos tópicos a seguir.

3.1.1 Conversores

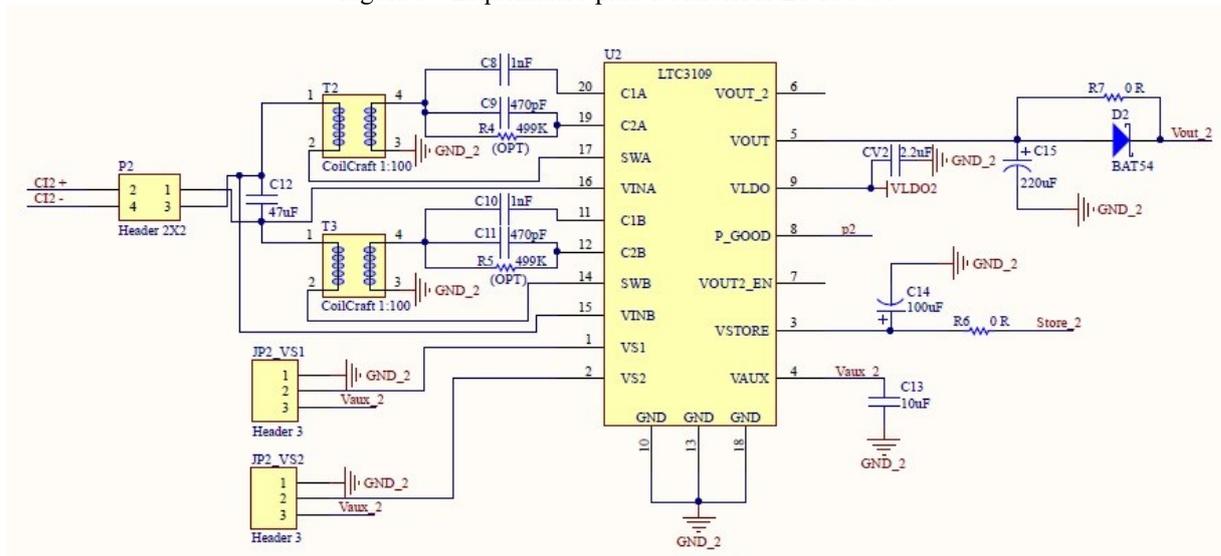
A capacidade de conversão do módulo de *harvesting* é de extrema importância neste projeto. Nesta etapa da coleta são utilizados conversores DC-DC de micropotência que estabelecem a conexão entre o dispositivo TEG e os componentes de armazenamento de energia.

Foram escolhidos três modelos comerciais, os quais são projetados para aplicações de ULP. São dois modelos de conversores 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. Os modelos foram escolhidos com base em suas características e também devido a sua disponibilidade no laboratório. Outros modelo poderiam ser utilizados, porém não havia recursos suficientes e nem tempo para sua inclusão no projeto.

O conversor LTC3108 da *Linear Technology* opera com entradas a partir de 20m V e possui um gerenciamento completo de *harvesting* usando um pequeno transformador *step-up*.

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 termoeletrônicos (TEGs) em aplicações onde o diferencial de temperatura 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 conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 - Esquemático para o conversor LTC3109.

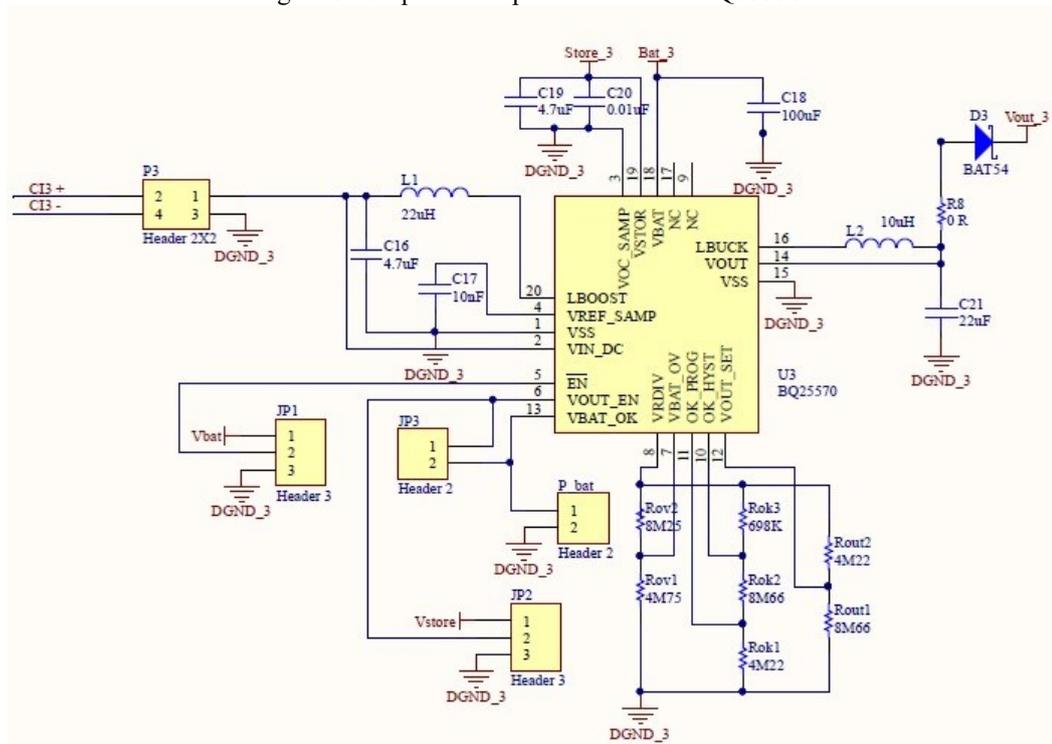


Fonte: Autor (2019).

O BQ25570 da *Texas Instruments* segue o mesmo princípio dos outros dois apresentados. Ele é projetado especificamente para adquirir e gerenciar eficientemente faixas de potência de microwatts (μW) a miliwatts (mW) da energia gerada a partir de uma variedade de fontes DC, como geradores fotovoltaicos ou térmicos (TEGs). O projeto deste conversor exige 600 mV para partida a frio (bem mais que os modelos anteriormente apresentados) e posteriormente pode operar com alimentação próxima a 100 mV. Uma vez que a tensão de saída está acima do limiar de operação ULP (tipicamente 1,8V é o limite entre os modos normal e partida a frio), o carregador pode efetivamente extrair energia do *harvesting* (TEXAS INSTRUMENTS, 2018a). A diferença do BQ25570 em relação aos

outros modelos é que este implementa uma sequência de amostragem de rastreamento de ponto de potência máxima programável (MPPT) para otimizar o *harvesting*. A amostragem do circuito aberto na entrada é programada usando resistências externas e essa tensão de amostra é mantida com um capacitor externo conectado ao pino de referência². Este MPPT faz com que a eficiência geral deste conversor seja maior que os modelos LTC apresentados. A Figura 6 mostra o esquemático escolhido para obter 5,5 V na saída de carga V_{store} e 2,5 V na saída regulada V_{out} .

Figura 7 - Esquemático para o conversor BQ25570.



Fonte: Autor (2019).

Nos esquemáticos apresentados, pode-se observar V_{out_3} como sendo o barramento de saída dos conversores. Na entrada, nomes como “C13 +” e “C13 -” são provenientes do gerenciamento do *Payload* proporcionado 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

² Para mais detalhes sobre o gerenciamento interno do modelo bq25570, ver *datasheet*.

anteriormente apresentados. Para se obter entrada mínima de 20 mV 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 tensão na entrada aumentam. Para os dados do modelo LTC3109 utiliza-se o mesmo procedimento. Também é utilizado um transformador 1:100 na entrada deste conversor. No caso do modelo BQ25570 a eficiência é caracterizada pela relação entrada/saída. Configurando a saída para um valor menor de tensão, uma maior eficiência seria obtida. Valores de tensão de entrada menores que a tensão de partida a frio (600 mV) geram menor eficiência do conversor (ficando abaixo dos 80%).

Tabela 1 - Principais características dos conversores utilizados

<i>Modelo</i>	<i>Polaridade</i>	<i>Partida a frio</i>	<i>Entrada Mín.</i>	<i>Saída Máx.</i>	<i>Eficiência Máx.</i>
LTC3108	Unipolar	20 mV	20 mV	5 V	39%
LTC3109	Bipolar	30 mV	30 mV	5 V	28%
BQ25570	Unipolar	600 mV	100 mV	5,5 V	91%

Fonte: Autor (2019).

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 coletadas 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 termoelétrica, e como sugestão os fabricantes indicam a utilização de supercapacitores 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

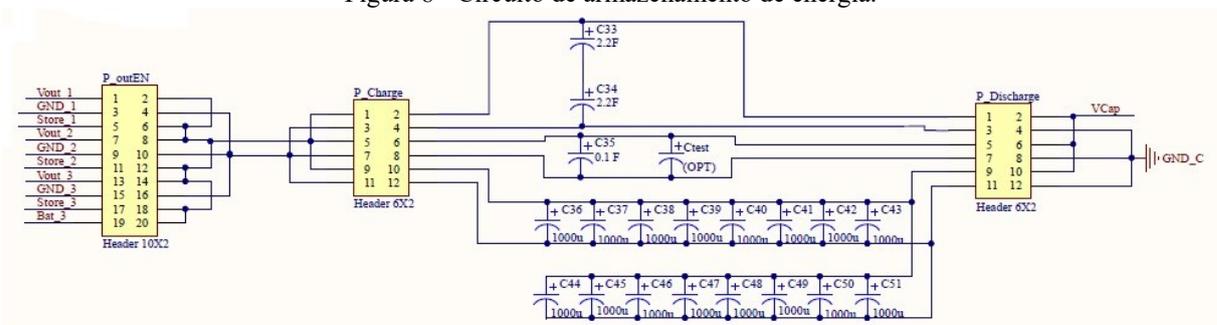
de energia relativa a seu tamanho quando comparado a capacitores comuns. Estes são de interesse particular em aplicações em dispositivos remotos para armazenamento suplementar.

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 dois supercapacitores modelo BCAP0010P270T01 de 5 F em série, os quais operam com tensão de 2,5 V. Possuem resistência equivalente de 170 mOhms e trabalham sob temperaturas extremas que vão de -40°C à 85°C . O segundo modelo é um supercapacitor radial EECF5R5H105 de 1F posicionado em paralelo com o anterior alocado ao módulo de *harvesting* e tensão de operação em 5,5 V. Este supercapacitor possui resistência inicial inferior à 50 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. Eles são capazes de fornecer uma capacitância maior por unidade de volume do que um capacitor eletrolítico de alumínio. 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 6,3 V e possui capacitância de 1000 μF . 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 8.

Figura 8 - Circuito de armazenamento de energia.



Fonte: Autor (2019).

O circuito apresentado na Figura 8 recebe a energia coletada pelo TEG e convertida por um dos conversores através de VIN. Na Tabela 2 são sintetizadas as principais características de cada capacitor.

Tabela 2 - Principais características dos elementos de armazenamento.

Código do Capacitor	Tipo	Qtd.	Capacitância	Tensão	Corrente de Fuga	Tipo de Ligação
TPSE108M006R0100	Tântalo	16	1mF $\pm 20\%$	6.3V	¹	Paralela
BCAP0005P270T01	SuperCap.	2	5F ²	2.7V	0.015 mA	Série
EECF5R5H105	SuperCap.	1	1F $\frac{+80\%}{-20\%}$	5.5V	¹	-

¹ Corrente de fuga não informada.

² Tolerância de capacitância não informada.

Fonte: Autor (2019).

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*.

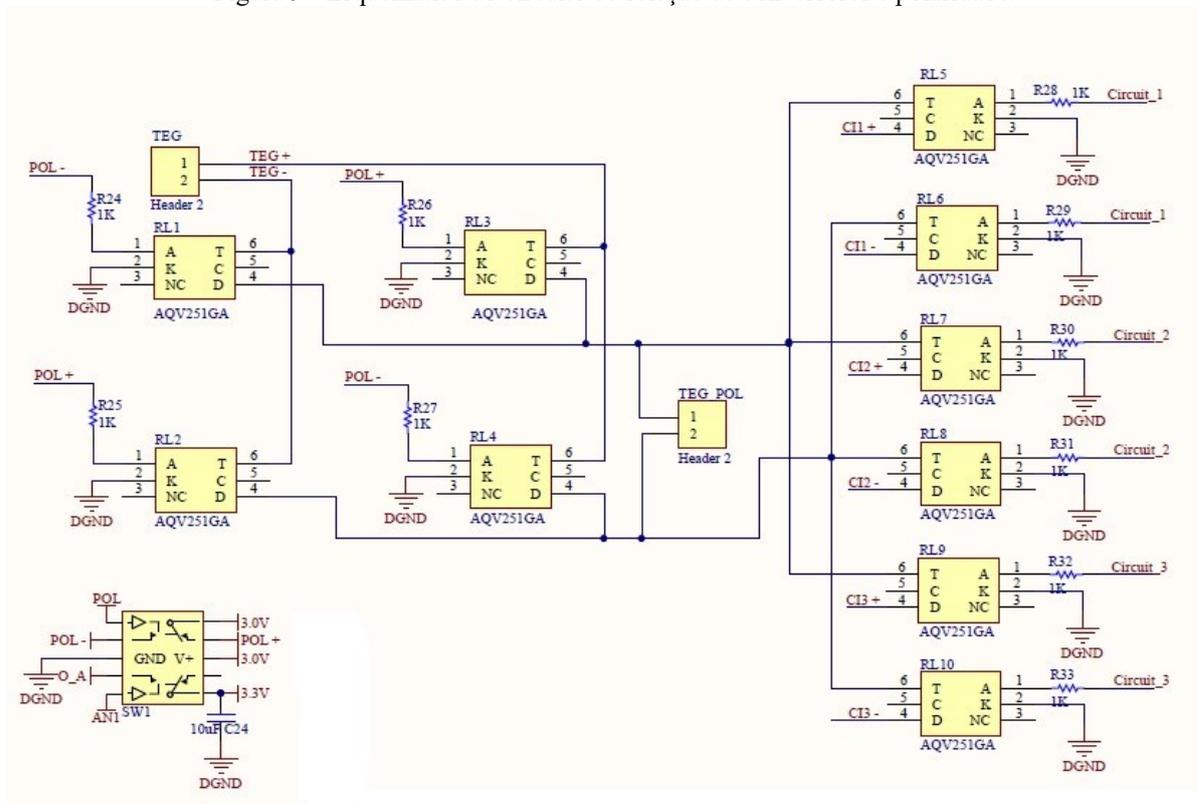
3.1.3 Circuito de Medição de Energia e Gerenciamento do *Payload*

O circuito de medição é integrado ao módulo de gerenciamento uma vez que está 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 ópticos (resistência mínima entre entrada e saída) 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 6 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. O objetivo do trabalho é avaliar a capacidade de conversão de cada modelo sem interferir em sua forma inicial e compara-lo com o desempenho utilizando a inversão de polaridade. Este circuito adicional é de extrema importância para modelos de conversores que não possuem inversão de polaridade

interna ao CI. Os perfis de temperatura durante a órbita podem apresentar picos elevados gradientes invertidos. Deve-se considerar que durante o período de maior incidência de radiação a face externa esteja em uma temperatura elevada. Durante o período onde a *cubesat* estará sob a sombra da terra, a temperatura externa será negativa. Internamente o calor operacional se manterá com incidência baixa de temperatura. Desta forma, para aproveitar a energia em todos os períodos é ideal que se possa inverter a polaridade do sinal de energia que é obtido pelo TEGs. Além disso, não se sabe com exatidão como será o perfil de temperatura uma vez que o controle de atitude do microsatélite ocorre de forma passiva.

Figura 9 - Esquemático do circuito de seleção de conversores e polaridade.

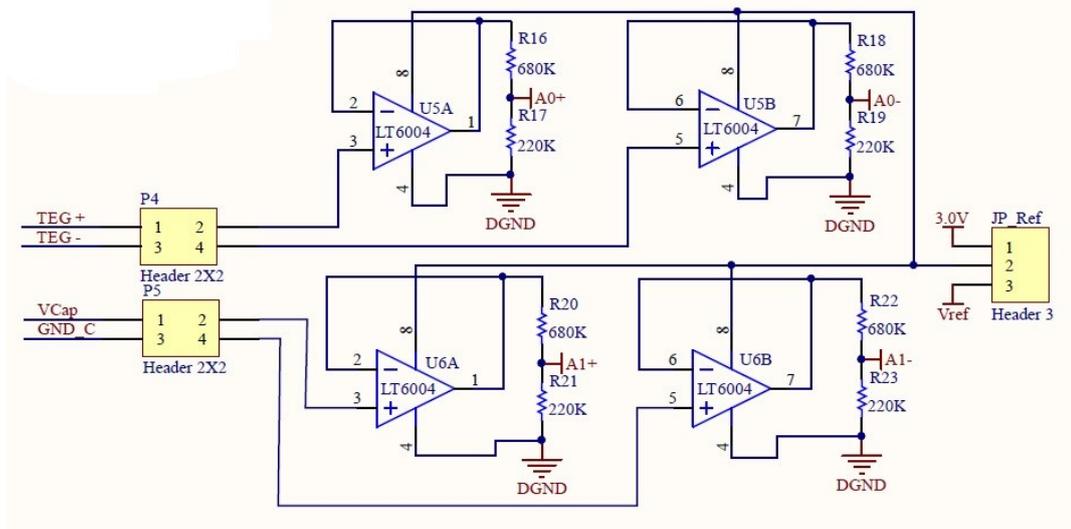


Fonte: Autor (2019).

A Figura 9 mostra o conjunto de relés responsáveis pela tarefa descrita. Os relés de 1 a 4 são responsáveis pela seleção de polaridade. Um *switch* é utilizado para reduzir o número de portas utilizadas no microcontrolador. Quando SW1 está inativo, o sinal é transmitido pelas conexões em POL +, habilitando os relés RL2 e RL3. Quando SW1 é ativado, a polaridade é invertida habilitando os relés RL1 e RL4. Os relés de 5 a 10 são utilizados para habilitar e desabilitar os conversores. Para o funcionamento correto dos conversores, os mesmos não podem compartilhar entradas e saídas. Desta forma, desabilitar o GND de cada

conversor inativo também é importante. A conexão TEG_POL é conectada a dois amplificadores operacionais (AmpOps) os quais relacionam as tensões de entrada. Outros dois amplificadores são conectados na saída dos conversores conforme apresentado na Figura 10. As saídas A0+, A0-, A1+ e A1- são conectadas aos pinos do MSP430 onde passam por uma conversão de 12 bits (ADC12). Estes valores são utilizados para leitura diferencial dos valores de tensão. Esses valores de tensão (adequados pelos divisores resistivos) são coletados pelo ADC12 do MSP.

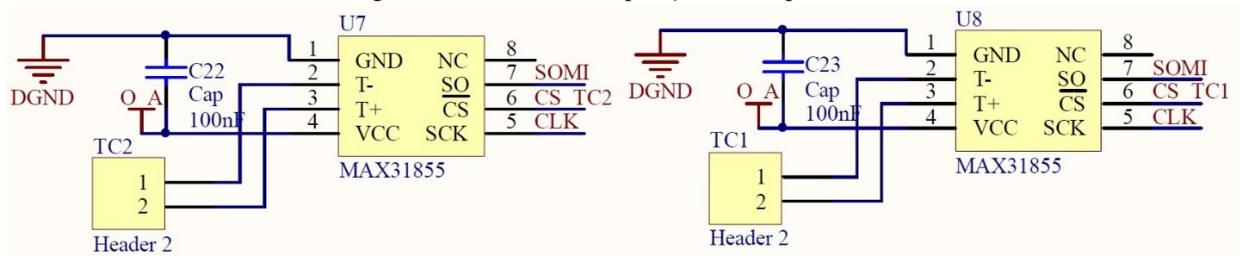
Figura 10 – Circuito de medição de energia de entrada e saída dos conversores.



Fonte: Autor (2019).

Além do valor de tensão, as temperaturas nas faces do TEG também são coletadas. Para esta tarefa, são utilizados termopares do Tipo T juntamente com um compensador de junção fria MAX31855 que converte a informação de temperatura em dados digitais que são transmitidos via SPI para o microcontrolador MSP. Na Figura 11 é possível observar dois MAX31855 no canto esquerdo do esquemático. O SW1, apresentado na Figura 9, também é utilizado para habilitar os sensores de temperatura.

Figura 11 – Circuito de aquisição de temperatura.



Fonte: Autor (2019).

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. Também por meio deste, é realizada a leitura dos dados de energia coletada e temperatura atual. Esses dados, na prática, são transmitidos para o computador de bordo (OBC - *On-Board Computer*) do *cubesat*. Somente após esta comunicação os dados são transmitidos 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 depuração e gravação.

Sua arquitetura RISC combina um conjunto reduzido de instruções com barramento clássico *Von Neumann*³, permitindo que o MCU 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.

Memórias 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. A memória FRAM é denominada não-volátil pelo fato dessa memória não perder os dados gravados quando a energia é removida. 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 °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 É 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.

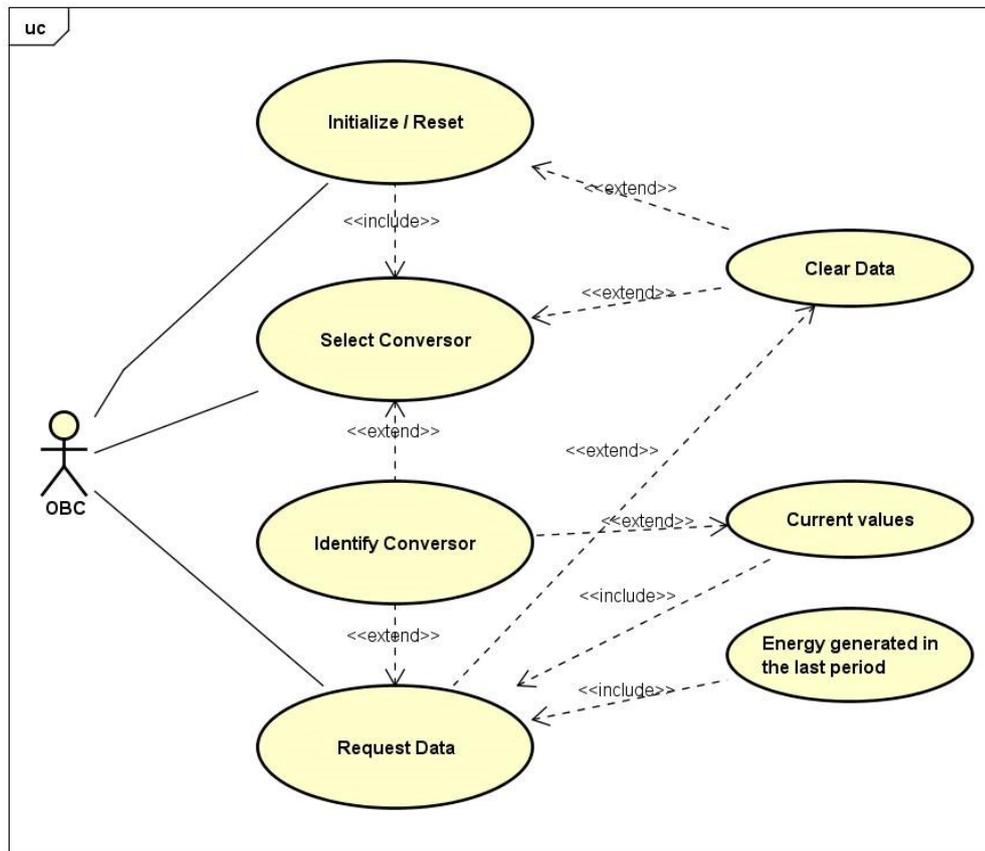
3.1.4.1 Algoritmo de Gerenciamento do Payload

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 empregadas 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 MSP430FR5949 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 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

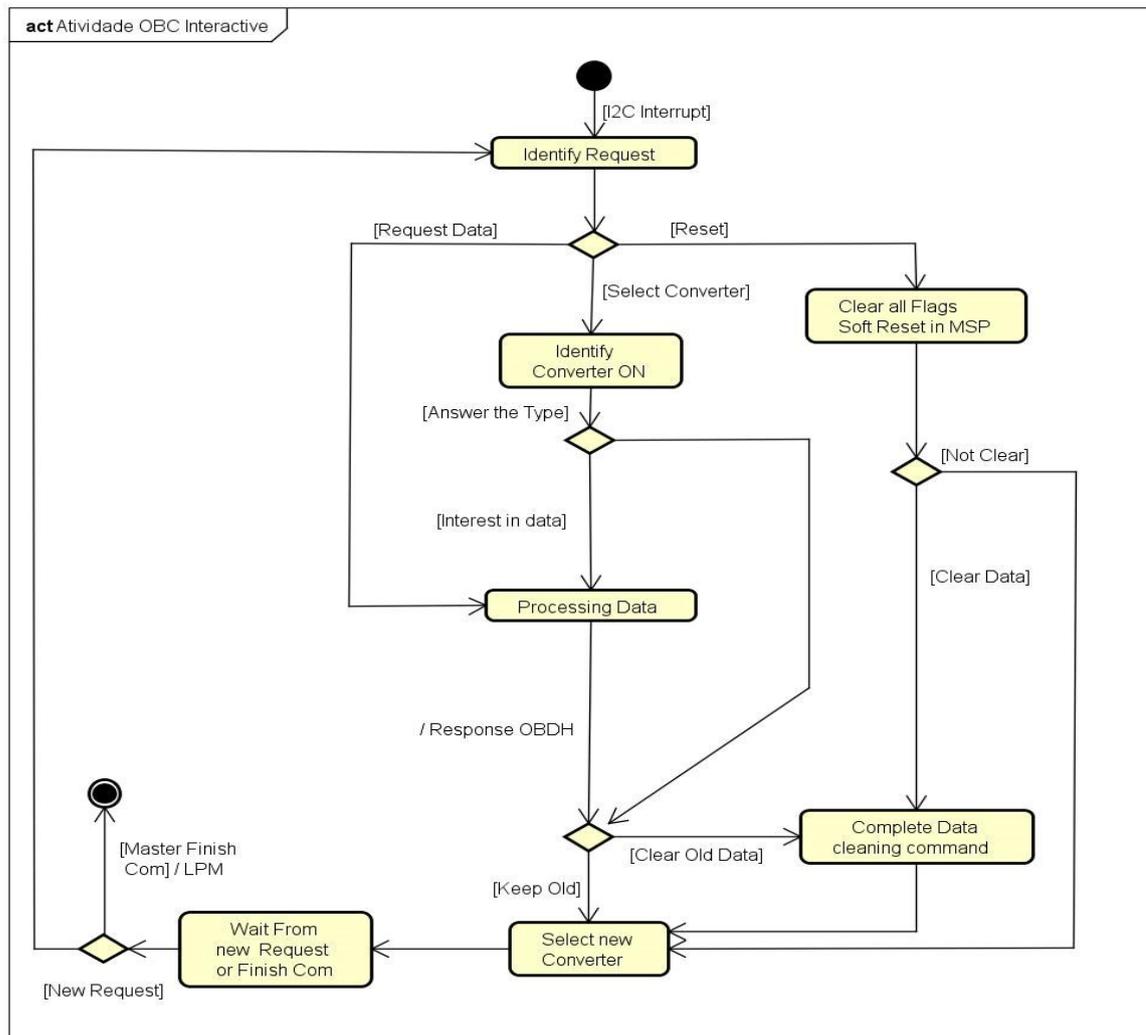


Fonte: Autor (2019).

Os casos de uso são divididos em três modos. O primeiro refere-se à inicialização ou reinicialização. Este inclui tarefas como selecionar um novo conversor para operação com a possibilidade de limpar (caso desejado) os dados anteriormente obtidos. O segundo caso de uso refere-se à seleção de um novo conversor para operação. Como no caso anterior, é possível optar pela leitura e limpeza dos dados. 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 os dados, ou seja, reiniciar os parâmetros de cálculo para energia total gerada em um determinado período de tempo.

Com base no Diagrama de Casos de Uso foram elaborados dois Diagramas de Atividades. O primeiro, refere-se à 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, por exemplo. O Diagrama de Atividade da Figura 13 mostra as atividades provenientes da interação entre os módulos.

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



Fonte: Autor (2019).

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 três apresentadas nos casos de uso da Figura 12. Se a requisição for do tipo leitura, o *Payload* inicia o processamento da informação requerida. O primeiro valor deve informar ao OBC a origem dos dados (de qual conversor se originou a leitura). 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*).

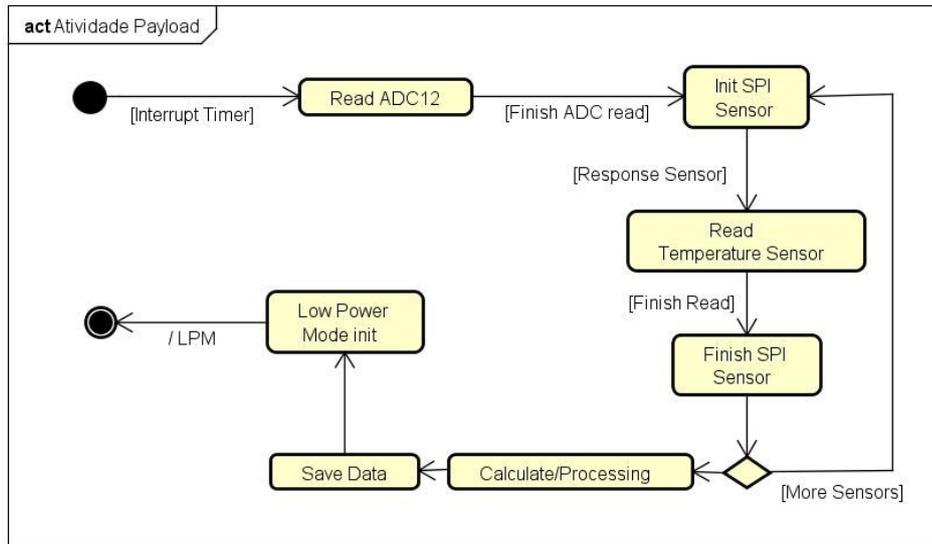
Se uma requisição para selecionar um novo conversor for recebida, o *Payload* deve identificar qual será esse conversor que entrará em operação acionando os avisos (*flags*)

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 utilizados também. Caso contrário, o *Payload* aguarda o terceiro comando que determina se os dados antigos 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 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 outro comando que indica se os dados devem ou não serem excluídos 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 temporizador (*Timer*) que opera em uma frequência adequada para realizar quatro 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 do supercapacitor de armazenamento do *payload* de *harvesting*. Em seguida, inicia a comunicação SPI com os sensores de temperatura. Após ler todos os sensores, a comunicação SPI desabilitada. Os dados são então processados e armazenados, contendo os valores de: Conversor ativo, Tensão instantânea TEG, Energia gerada desde a última transmissão (refere-se a comunicação com o OBC), Tensão Capacitor, Temperatura 1, Temperatura 2.

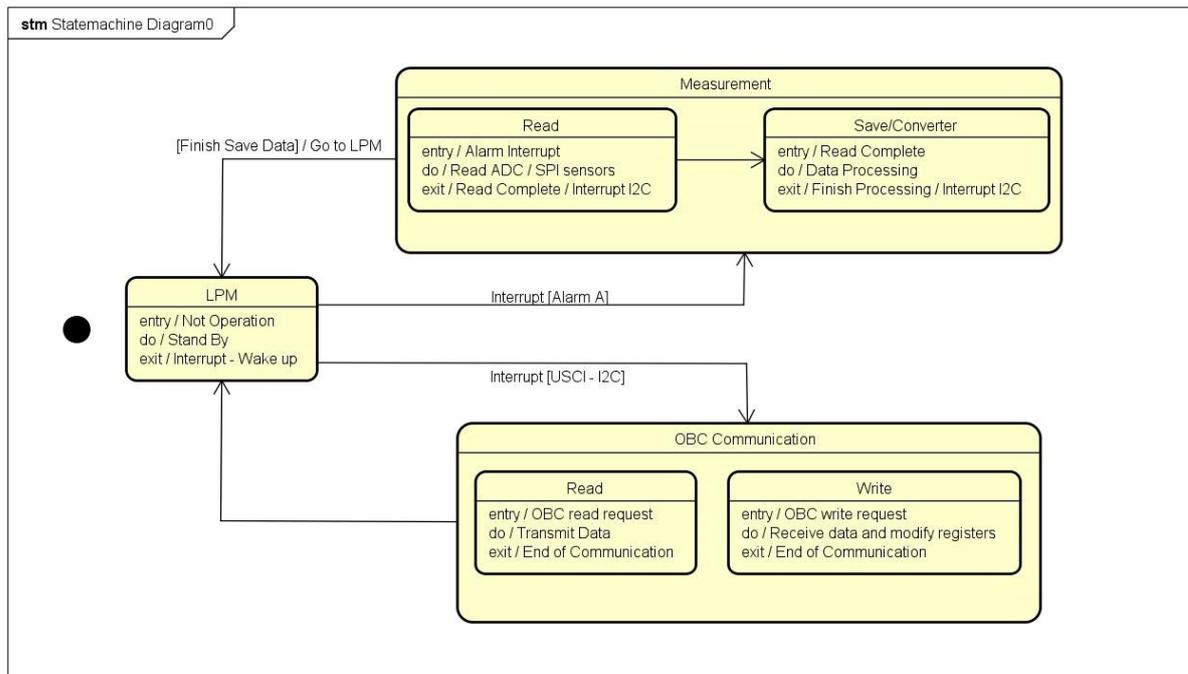
Figura 14 - Diagrama de Atividades internas do *Payload*.



Fonte: Autor (2019).

Completando o conjunto de diagramas elaborados para o sistema operacional do *Payload* de *harvesting* está o Diagrama de Estados. Este diagrama representa quatro 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.

Figura 15 - Diagrama de Estados.



Fonte: Autor (2019).

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 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 processados e armazenados no *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 14 existem três possibilidades de escolha. Estas opções são descritas como sub-estados do tratador de interrupções 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 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 deve ser a etapa de integração do sistema final ao *cubesat*. Para fins deste trabalho, o *payload*

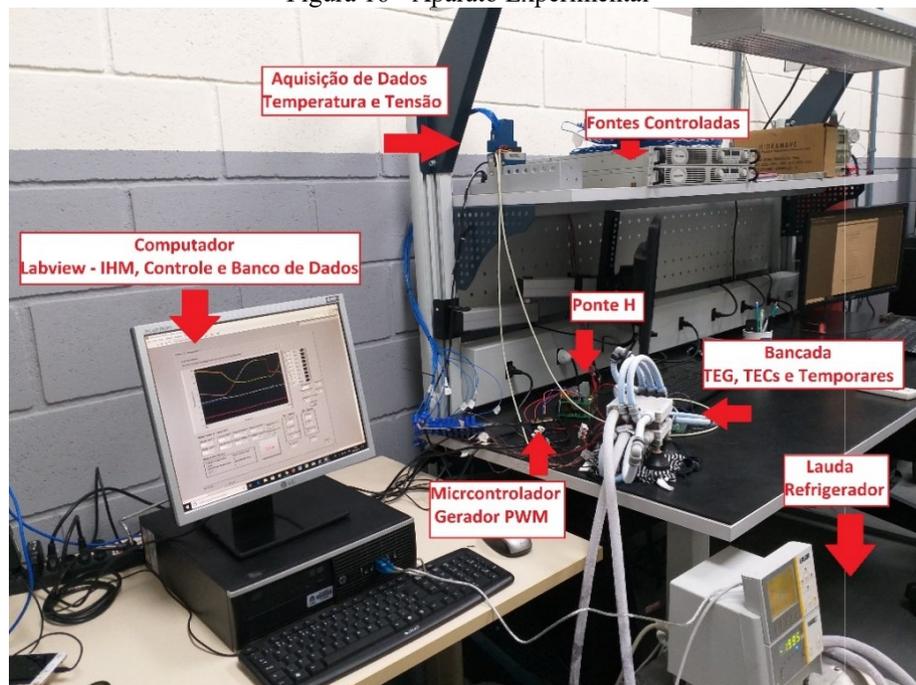
é avaliado com o auxílio de uma bancada de testes que simula o perfil de temperatura da órbita do *cubesat*. No tópico seguinte, é apresentado o aparato experimental.

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 (Bancada de Teste), sensores e sistema de aquisição de dados de temperatura e tensão, duas pontes H, duas fontes de energia, um microcontrolador e um computador.

Os estudos e experimentos aplicados a essa bancada, assim como o desenvolvimento desse conjunto são descritos com mais detalhes nos trabalhos de BECKER et al. (2016), OSTRUFKA et al. (2017) e BORBA et al. (2019). 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.

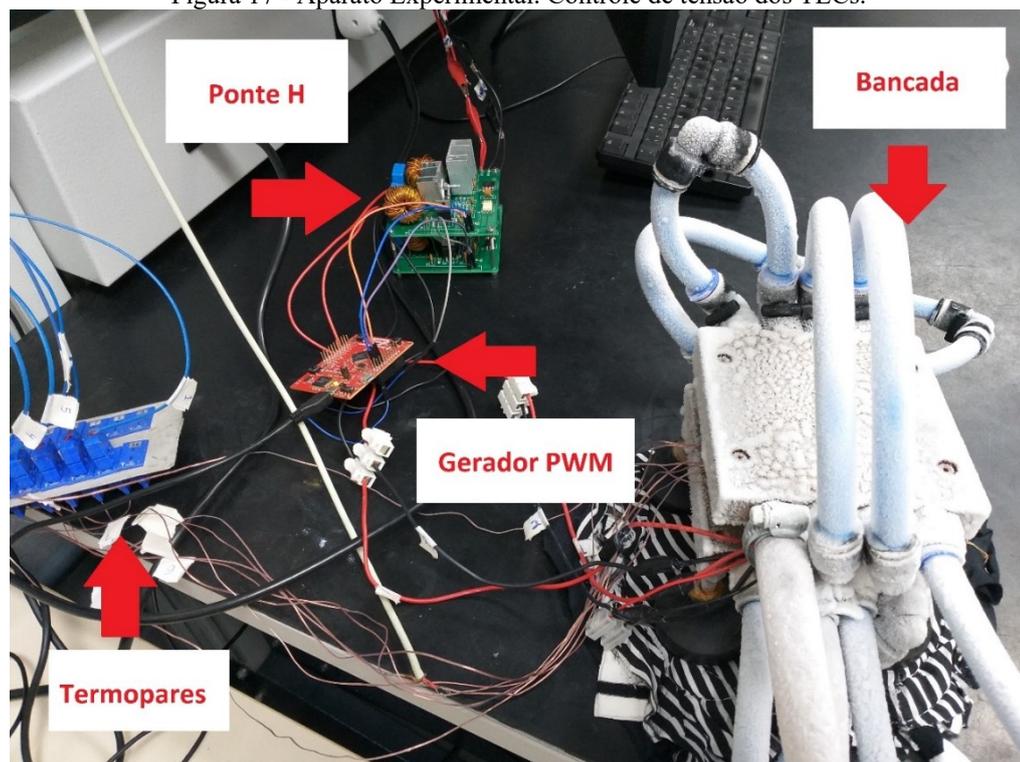
Figura 16 - Aparato Experimental



Fonte: Autor (2019).

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 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 pontes H. Esses circuitos aplicam a tensão ideal (para atingir a temperatura desejada conforme determinado pelo controlador) nos atuadores de temperatura (TEC - Peltier) na bancada de testes. Essas pontes H são alimentadas por duas fontes externas de tensão que fornecem até 15V. A Figura 17 mostra os componentes mais próximos aos atuadores.

Figura 17 - Aparato Experimental. Controle de tensão dos TECs.



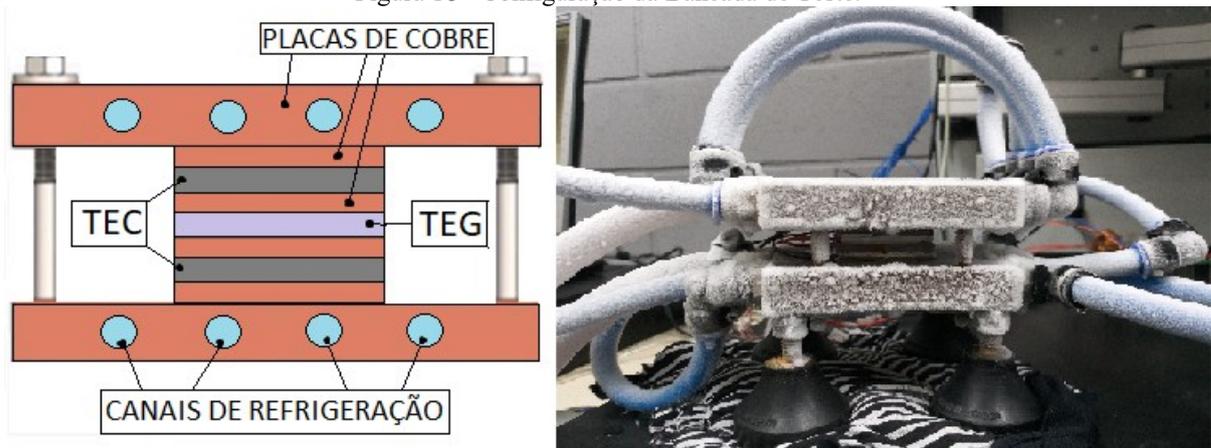
Fonte: Autor (2019).

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 termoelétrico, 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.

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 Brinkmann (modelo Proline Edition X) mostrado na Figura 16. Todo o calor gerado nas extremidades pelos TECs deve ser dissipado. Desta forma, para 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.

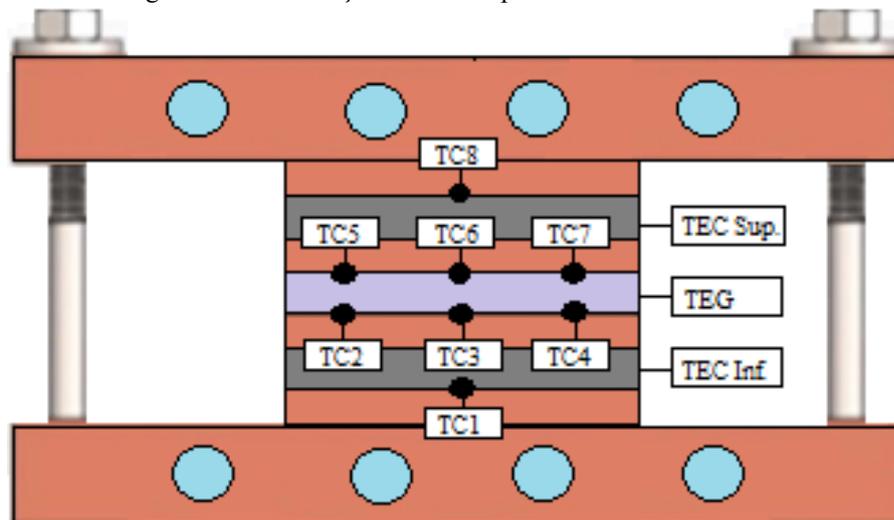


Fonte: Autor (2019).

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.

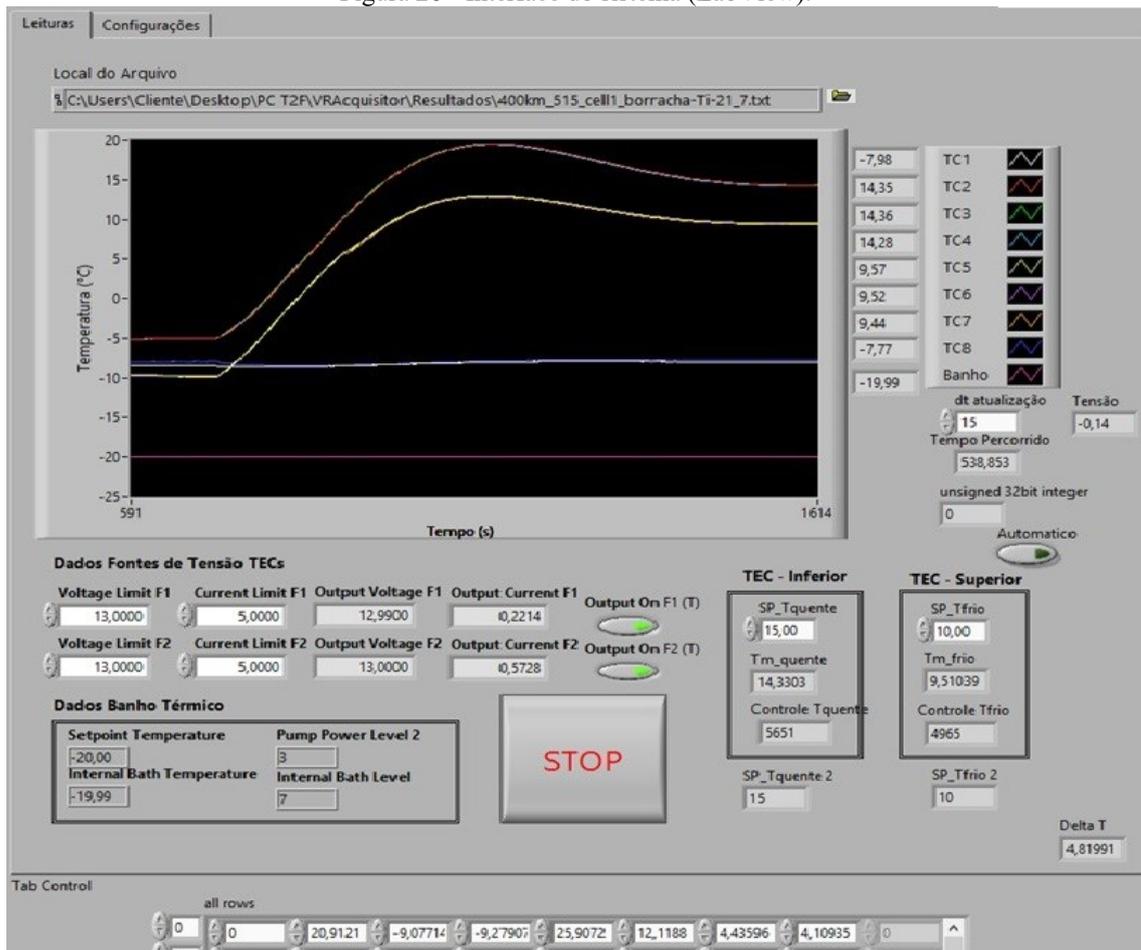
Figura 19 - Localização dos Termopares na Bancada de Teste.



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

Figura 20 - Interface do sistema (LabView).



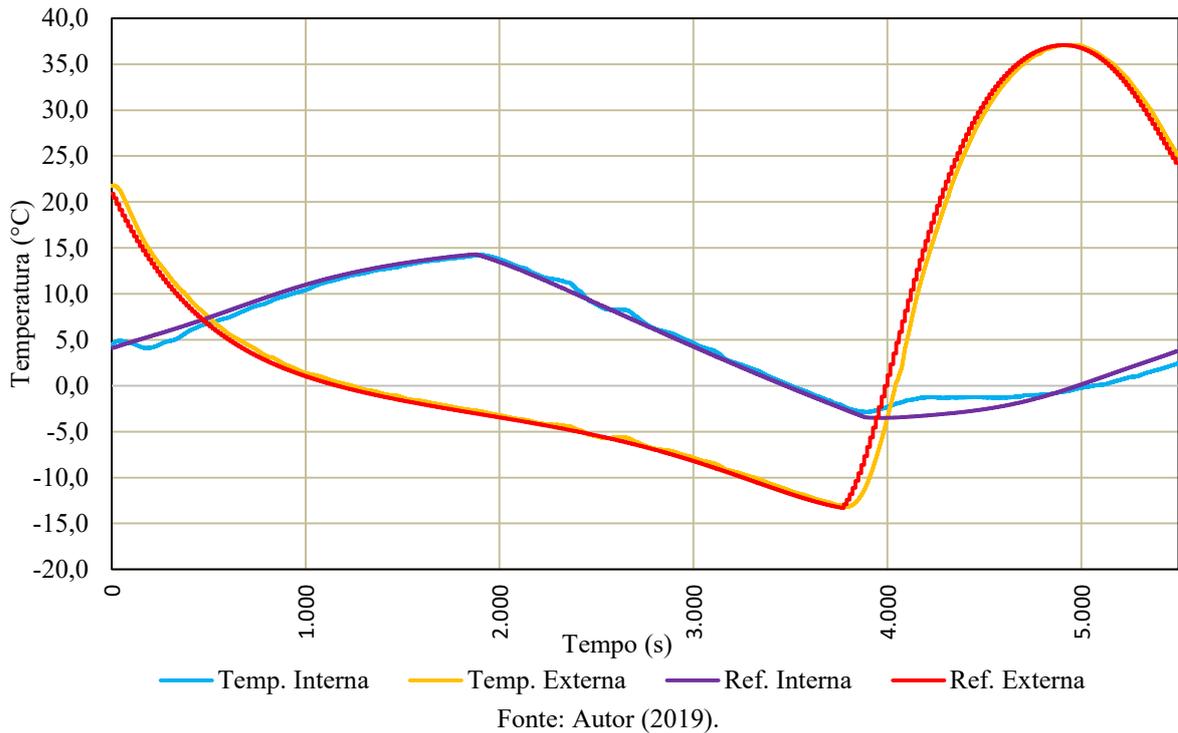
Fonte: Autor (2019).

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

3.2.1 Validação da Bancada

Sendo o *cubesat* 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 a 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).



Todos os perfis de temperatura são encontrados no APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de Temperatura do *Cubesat*. 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, quase não há gradiente de temperatura e desta forma gerando uma tensão extremamente baixa. 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).

3.3 ANÁLISE DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Foi observado o conjunto da bancada de testes para determinar quais são as incertezas experimentais neste trabalho. As incertezas são encontradas nas fontes de tensão regulada responsáveis por alimentar os TECs e nos sistemas de aquisição de dados de temperatura e tensão. A incerteza de medição de cada fonte DC é 0,01 V e 0,001 A. Para o sistema de aquisição de dados de temperatura (NI 9214) são encontrados 0,45 °C de precisão

com ganho de erro em alta resolução de 0,03 %. A incerteza do termopar é de ± 1 °C. Já a incerteza associada ao sistema de medição de tensão (NI 9205) é de 1% do fundo de escala, ou seja, 0,1 V. Para determinar a incerteza da potência elétrica medida a partir dos valores de tensão, resistência equivalente da fonte e resistência equivalente de carga, foi utilizado o método de propagação de erros conforme Audiffred et al. (2016), Ostrufka et al. (2017) e Borba et al. (2019).

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados do *Payload* obtidos através das simulações realizadas na bancada de testes descrita no capítulo anterior. Primeiramente é apresentada a caracterização de dois modelos de TEGs para os seis perfis de temperatura apresentados anteriormente. Esses resultados representam o potencial de geração de energia da fonte. Em seguida, a análise qualitativa das diferentes topologias é apresentada. A análise qualitativa identifica o desempenho dos conversores para os diferentes perfis de temperatura utilizados na simulação. Após esta seção, são apresentados os valores obtidos através da análise quantitativa. Por fim, uma breve seção trata do consumo médio das topologias no processo de *harvesting* para o módulo desenvolvido.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS TEGS UTILIZADOS

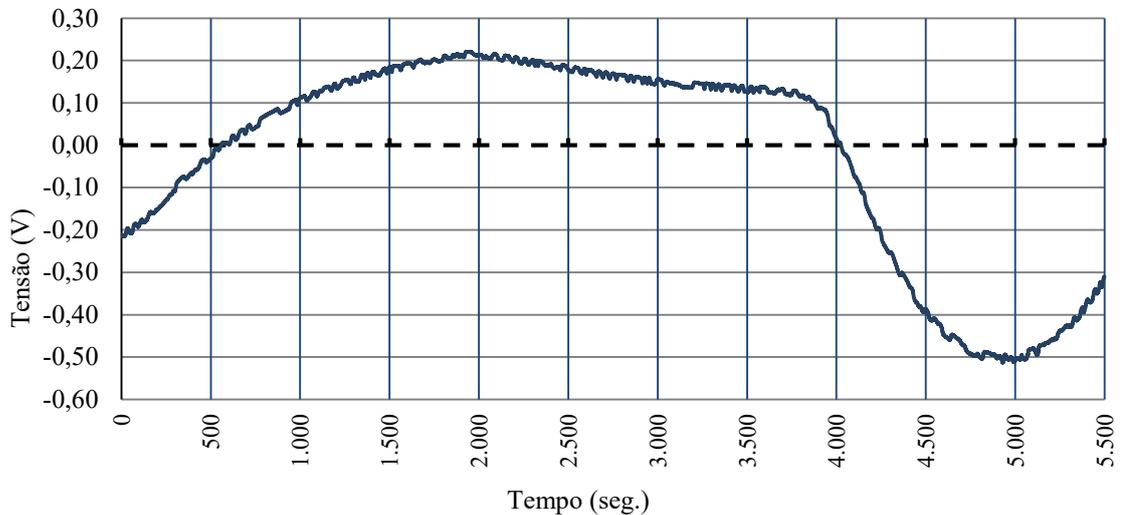
Os TEGs TGPR-10W-4V-40S e TGPR-5W-5V-40S foram utilizados na geração de energia utilizando os perfis de temperatura apresentados. Os resultados da tensão gerada por estes TEGs e seu potencial energético operando em circuito aberto são abordados nesta seção.

Segundo o fabricante estes modelos de TEG foram projetados especificamente para converter fontes de calor de alta temperatura em eletricidade. Os módulos termoeletricos geram energia DC, desde que haja uma diferença de temperatura nos dois lados do TEG. A potência e a eficiência de saída aumentam conforme o gradiente de temperatura também aumenta. A principal vantagem deste modelo são suas faces compostas por grafite altamente condutor. Este material é utilizado para aumentar a condutividade térmica, de modo que não haja necessidade de aplicar pasta térmica ou outro composto de transferência de calor na instalação do gerador termoeletrico. Pastas térmicas comuns são inadequadas para missões espaciais devido ao processo de *outgassing* que pode ocorrer quando o *cubesat* estiver operando no vácuo. *Outgassing* refere-se à liberação de gases que foram dissolvidos, aprisionados, congelados ou absorvidos em algum material ou componente durante o processo de fabricação. Esses gases podem ser prejudiciais para alguns componentes do *cubesat*.

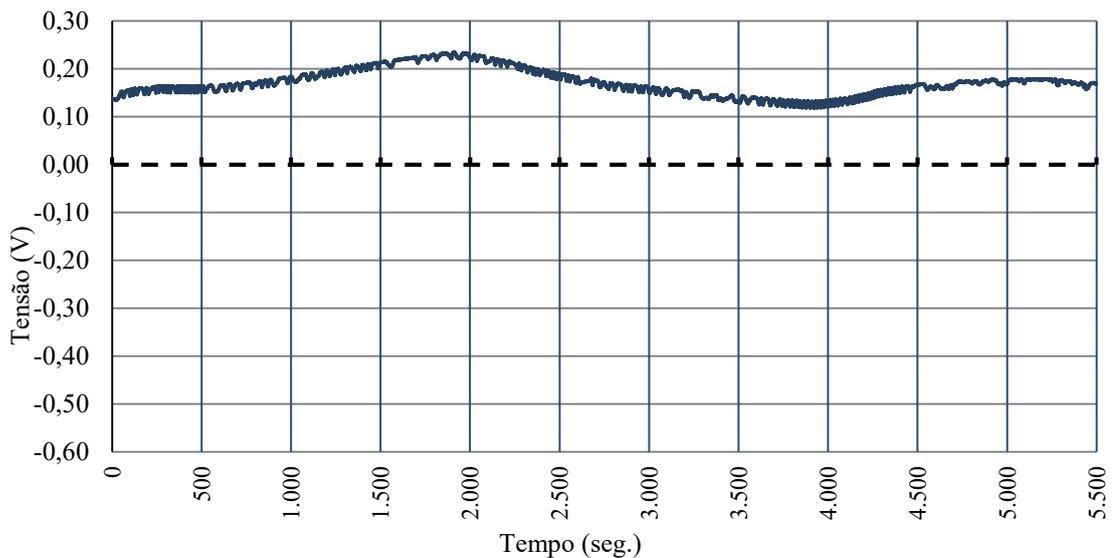
Utilizando os gradientes de temperatura apresentados no APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de Temperatura do *Cubesat*, os modelos TGPR-0W-4V-40S e TGPR-5W-5V-40S foram adicionados a bancada de testes para avaliação da sua capacidade de geração

de energia. Os primeiros testes foram realizados com o modelo TGPR-10W-4V-40S. Este modelo pode operar em temperaturas que podem variar de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, pode gerar até $8,0\text{ V}$ em circuito aberto e possui uma resistência interna equivalente de $1,59\text{ Ohms}$. A Figura 22 mostra a caracterização do TEG em todos os perfis de temperatura. Nos gráficos de tensão é possível observar que a posição 1 possui o maior pico positivo (aproximadamente 200 mV) enquanto a posição 3 apresenta o maior pico negativo (aproximadamente -550 mV). Também é observável que na posição 6, o TEG não gera praticamente nenhuma energia, conforme comentado no capítulo anterior.

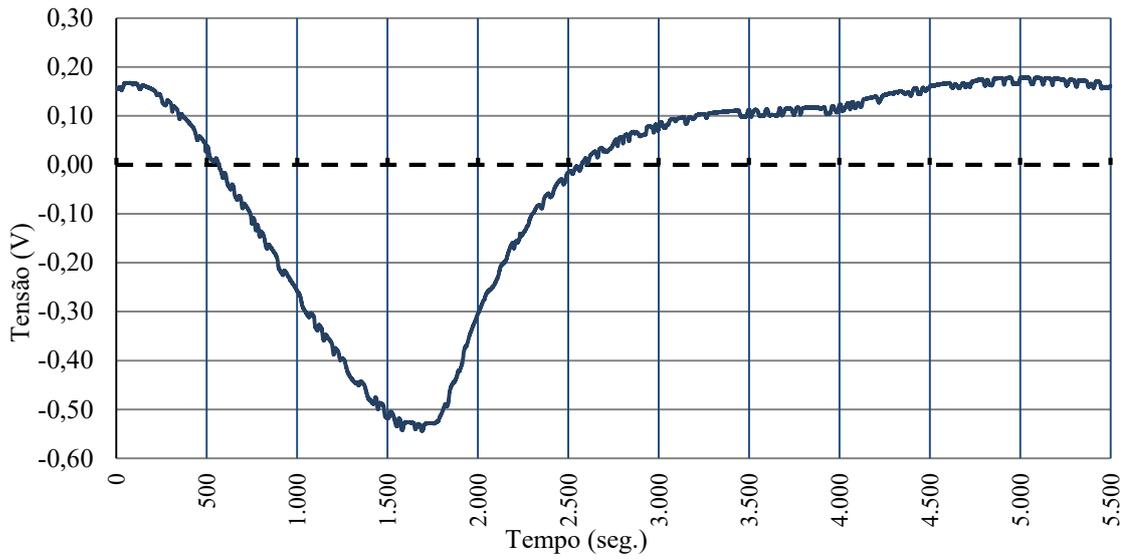
Figura 22 - TGPR-10W-4V-40S Caracterização da tensão gerada em circuito aberto nas seis faces do *cubesat*.



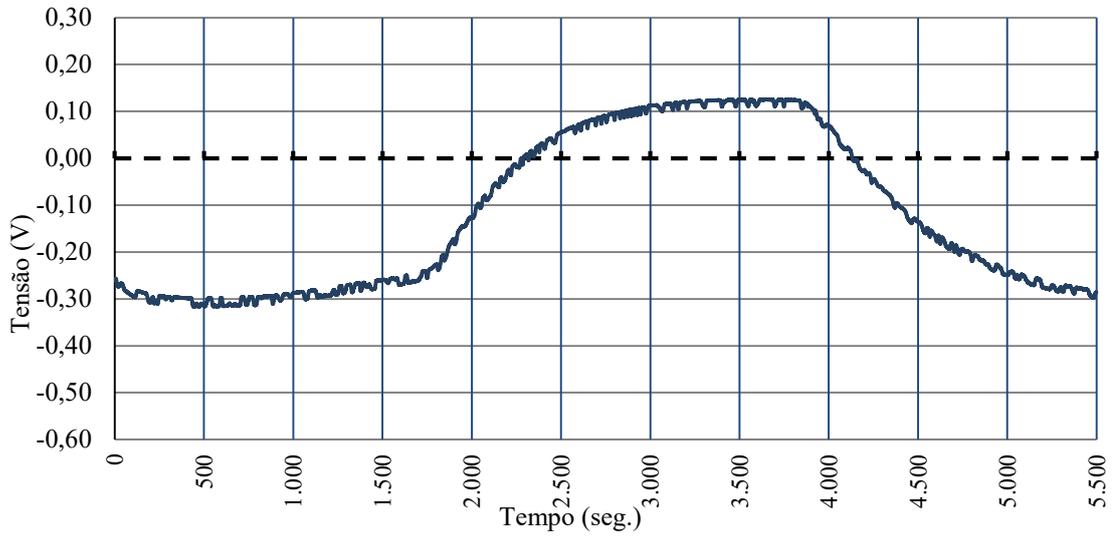
(a) Geração de Energia 10W-4V-40S – Célula 1



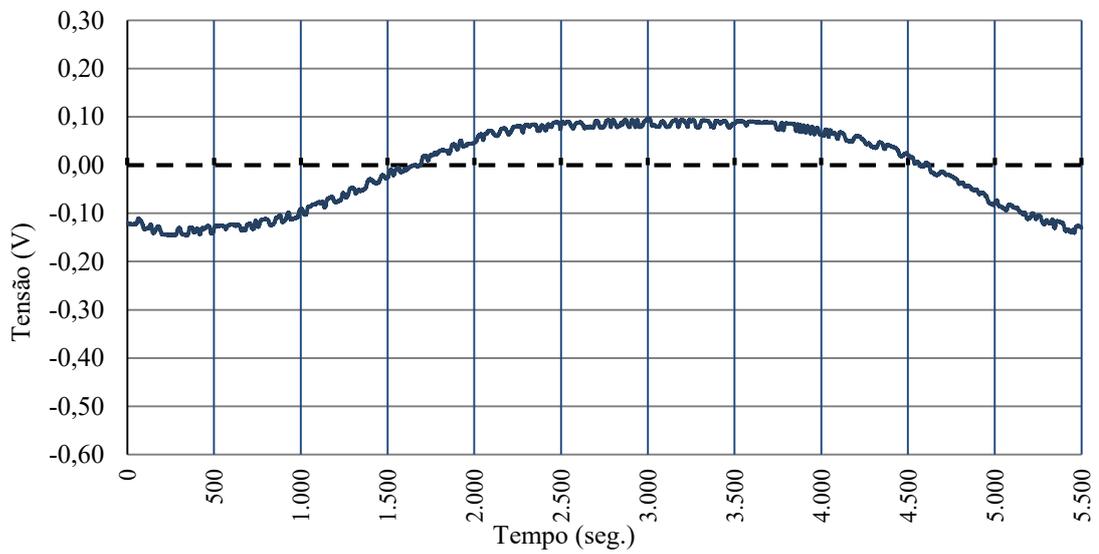
(b) Geração de Energia 10W-4V-40S – Célula 2

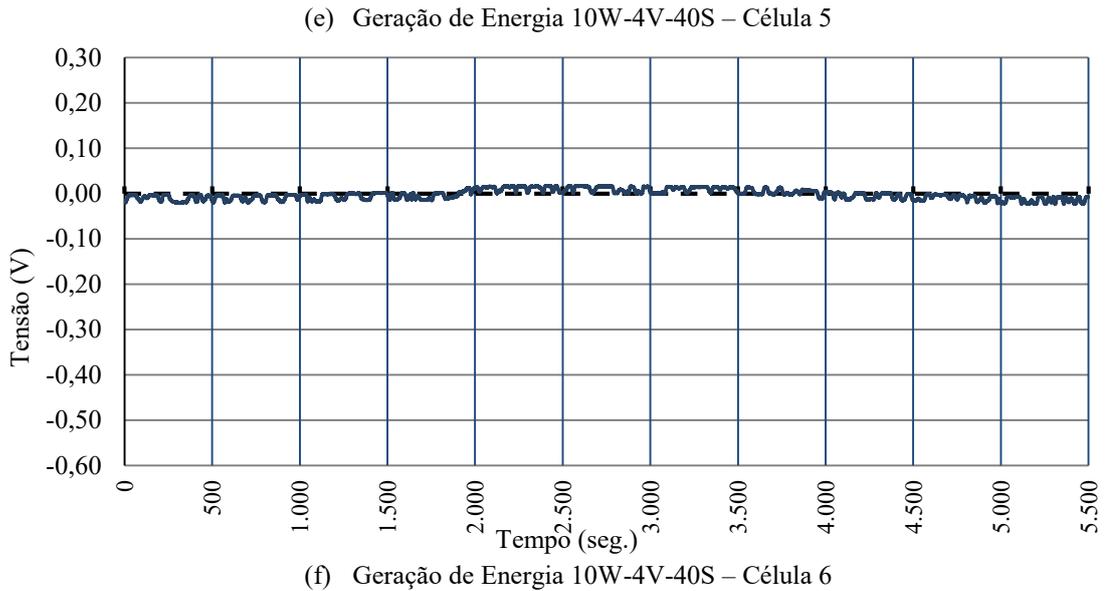


(c) Geração de Energia 10W-4V-40S – Célula 3



(d) Geração de Energia 10W-4V-40S – Célula 4

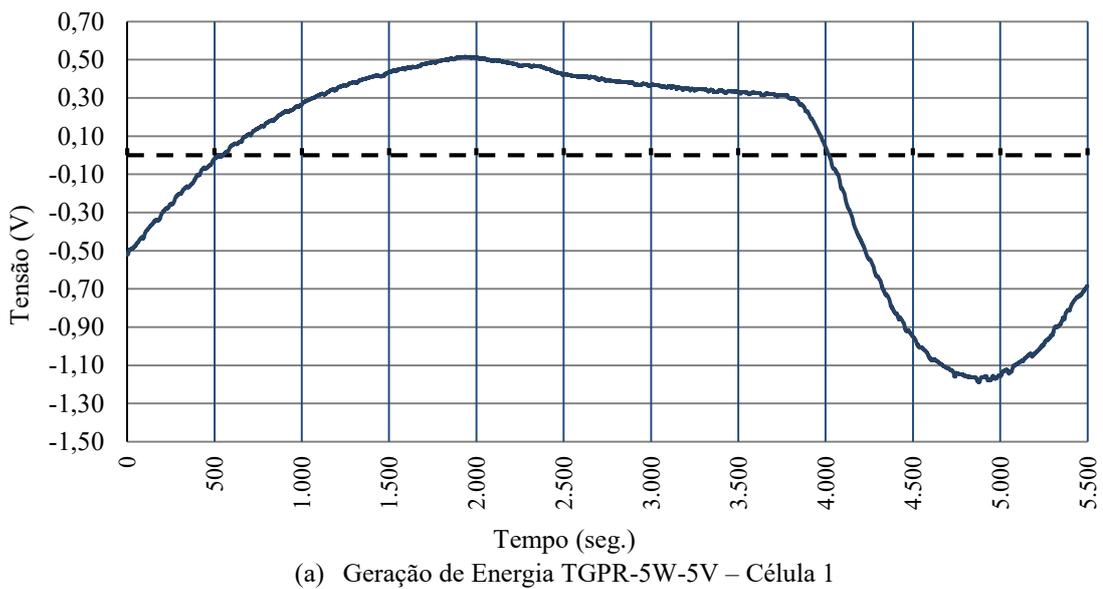


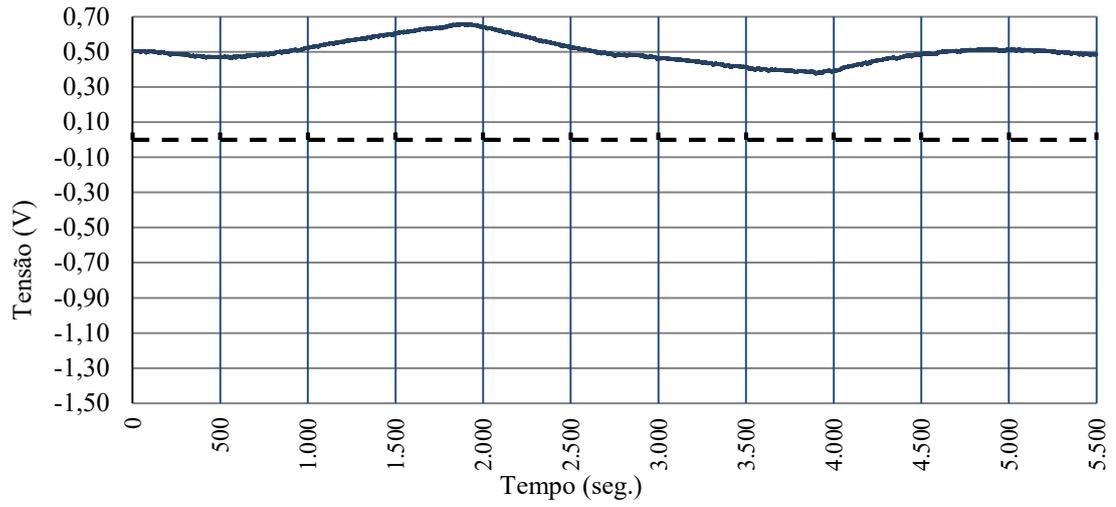


Fonte: Autor (2019).

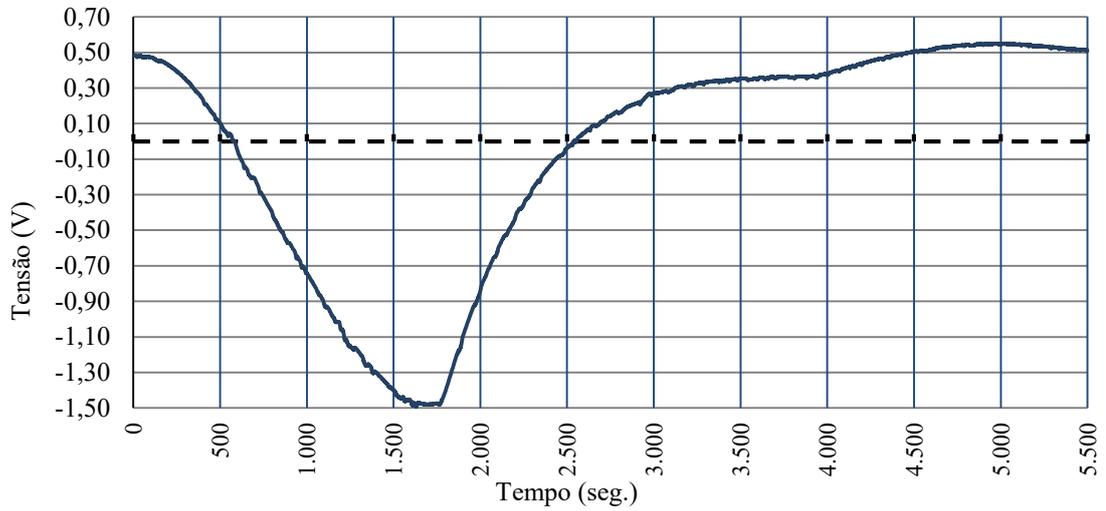
A mesma caracterização foi realizada com o modelo TEG TGPR-5W-5V-40S. Este modelo pode operar em temperaturas que variam de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, pode gerar até $10,8\text{ V}$ em circuito aberto e possui uma resistência interna equivalente de $5,40\text{ Ohms}$. A Figura 23 mostra a caracterização do TEG em todos os perfis de temperatura. Nos gráficos é possível observar que os picos de tensão superior (aproximadamente 600 mV) e inferior (aproximadamente $-1,5\text{ V}$). Nestes níveis de tensão ambos os conversores LTC possuem eficiência extremamente baixa.

Figura 23 - TGPR-5W-5V-40S Caracterização da tensão gerada em circuito aberto nas seis faces do *cubesat*.

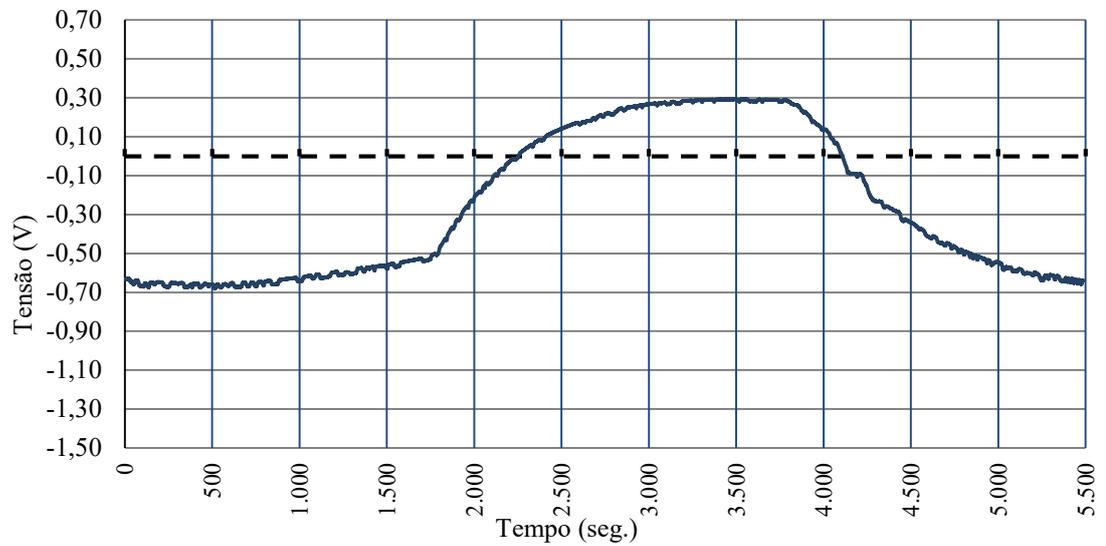




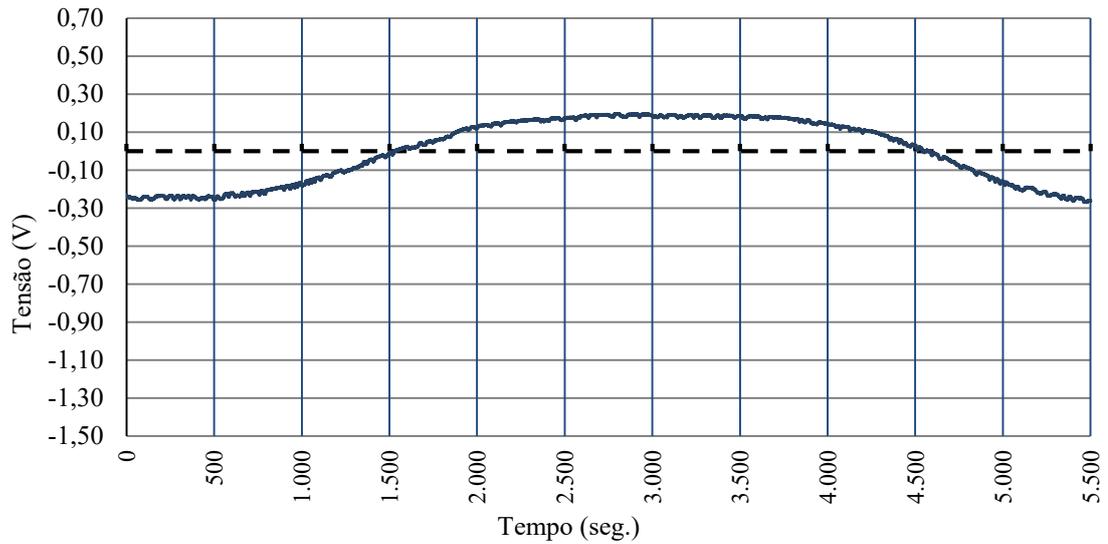
(b) Geração de Energia TGPR-5W-5V – Célula 2



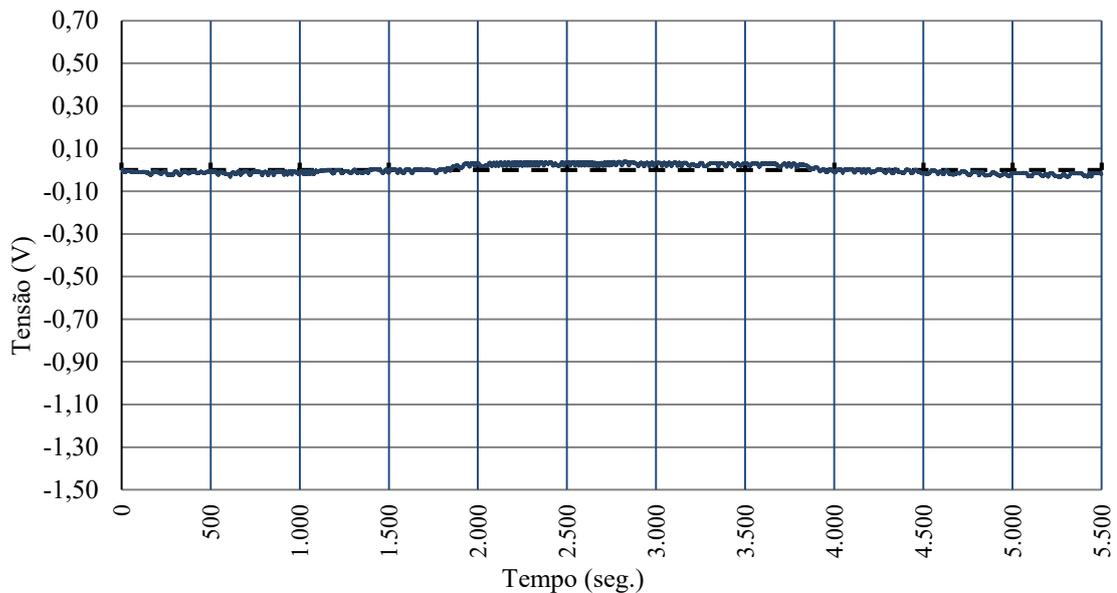
(c) Geração de Energia TGPR-5W-5V – Célula 3



(d) Geração de Energia TGPR-5W-5V – Célula 4



(e) Geração de Energia TGPR-5W-5V – Célula 5



(f) Geração de Energia TGPR-5W-5V – Célula 6

Fonte: Autor (2019).

Conforme apresentado no capítulo de revisão bibliográfica deste trabalho e segundo os cálculos apresentados no trabalho de Goupil et. al. (2011), a máxima eficiência em um gerador termoelétrico é obtida quando a resistência da carga é equivalente a resistência da fonte. O conversor modelo BQ25570 é um exemplo que utiliza um sistema de MPPT para atingir este estado através da impedância equivalente. Desta forma, foi utilizado o valor de resistência equivalente fornecida pelo fabricante dos geradores termoelétricos para fins de cálculo de potência da fonte.

Com os valores de tensão descritos acima e com os valores de resistência equivalente de ambos os TEGs é possível obter a potência instantânea aproximada para cada fonte. Conforme apresentado nos trabalhos de Borba et al. (2019) e Ostrufka et al. (2019) a potência instantânea (Watt) gerada pelo TEG pode ser descrita pela equação:

$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2 (R_L)}{(R_L + R_{in})^2} \quad (2)$$

onde V_{inst} é a tensão instantânea medida em circuito aberto nos terminais do gerador termoelétrico, R_{in} é a resistência interna do TEG e R_L é a resistência de carga externa. Com esta equação pode-se mostrar que a potência máxima é obtida quando $R_L=R_{in}$, conforme mencionado anteriormente. A equação resultante é apresenta:

$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2}{4 R_{in}(T)} \quad (3)$$

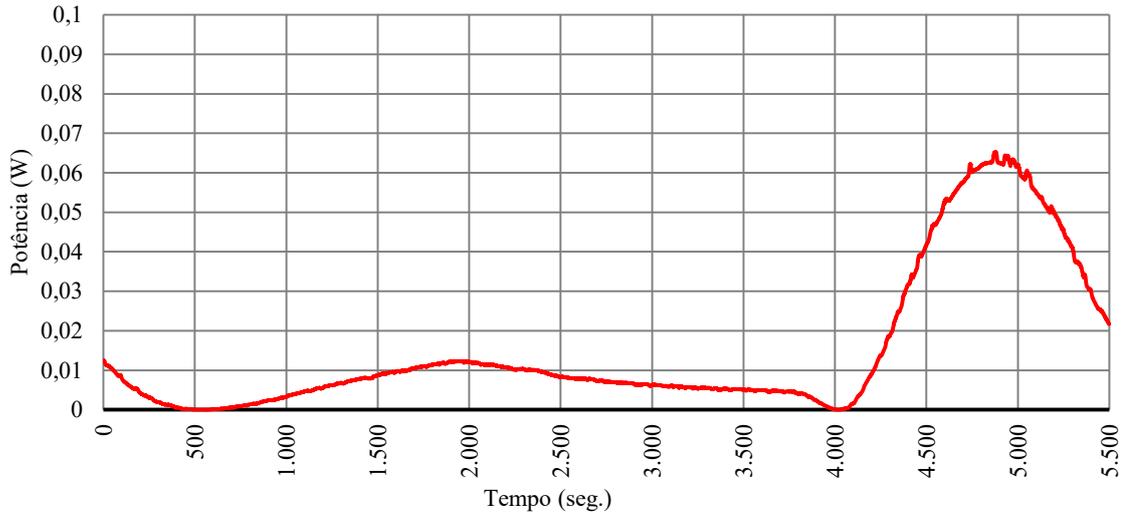
onde $R_{in}(T)$ é a resistência interna equivalente em função da temperatura, uma vez que esta resistência é variável nos geradores termoelétricos. Para fins de estimativas deste trabalho, foi utilizada a resistência interna equivalente sugerida pelo fabricante na folha de dados de cada TEG. A variação da resistência para os níveis de tensão utilizados não é descrita pelo fabricante. Segundo Borba et al. (2019) a equação para estimar a potência elétrica de um TEG em circuito aberto pode ser descrita como:

$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2}{4 R_{eq}} \quad (4)$$

onde R_{eq} é a resistência interna equivalente sugerida pelo fabricante, V_{inst} é a tensão obtida nos terminais do gerador termoelétrico .

Com o valor de potência obtido para cada ponto da curva de tensão é possível gerar o perfil de potência da fonte. A Figura 24 apresenta a curva de potência do modelo TGPR-5W-5V-40S para o perfil 1 e serve de exemplo para os demais perfis.

Figura 24 - Curva de Potência do perfil 1 para o modelo TGPR-5W-5V-40S.



Fonte: Autor (2019).

Finalmente, após obter os valores correspondentes de potência instantânea é realizada a integração da curva de potência. Este cálculo resulta na energia total gerada pelo TEG em um perfil de órbita completo para cada célula descrita no trabalho. Conforme descrito na Seção de Análise de Incertezas, os instrumentos possuem incertezas que devem ser consideradas. Segundo os trabalhos apresentados por Audiffred et al. (2016) e Ostrufka et al. (2017) a resistência interna do gerador termoelétrico pode variar em até 10% do valor nominal. Sendo assim, considera-se a resistência interna equivalente fornecida pelo fabricante com um erro estimado em 10% em torno deste valor. Com isto, pode-se descrever a equação de incertezas para a potência elétrica instantânea da fonte conforme a equação:

$$\Delta P_{inst} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial V}\right)^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + \left(\frac{\partial P_{inst}}{\partial R}\right)^2 \cdot (\Delta R_{eq})^2} \quad (5)$$

$$\Delta P_{inst} = \sqrt{\left(\frac{2V_{inst}}{4R_{eq}}\right)^2 \cdot (\Delta V_{inst})^2 + \left(-\frac{V_{inst}}{4R_{eq}^2}\right)^2 \cdot (\Delta R_{eq})^2} \quad (6)$$

onde ΔV_{inst} é a incerteza do instrumento de medição de tensão e ΔR_{eq} é a incerteza da resistência equivalente. Da mesma forma a incerteza associada à potência total é dada por:

$$\Delta P_{total} = \sqrt{(\Delta P_{inst_1})^2 + (\Delta P_{inst_2})^2 + (\Delta P_{inst_3})^2 + \dots + (\Delta P_{inst_n})^2} \quad (7)$$

Com os dados de potência total e de incerteza das medições são apresentados os valores em Joules (J) na Tabela 3.

Tabela 3 - Energia gerada pelos TEGs em circuito aberto.

Perfis de Temperatura	TGPR-10W-4V-40S	TGPR-5W-5V-40S
Perfil 1	$51,44 \pm 1,239 J$	$83,06 \pm 0,466 J$
Perfil 2	$25,98 \pm 0,878 J$	$65,69 \pm 0,415 J$
Perfil 3	$44,25 \pm 1,149 J$	$105,93 \pm 0,528 J$
Perfil 4	$36,69 \pm 1,046 J$	$52,75 \pm 0,373 J$
Perfil 5	$6,33 \pm 0,435 J$	$7,19 \pm 0,146 J$
Perfil 6	$0,10 \pm 0,055 J$	$0,103 \pm 0,016 J$

Fonte: Autor (2019).

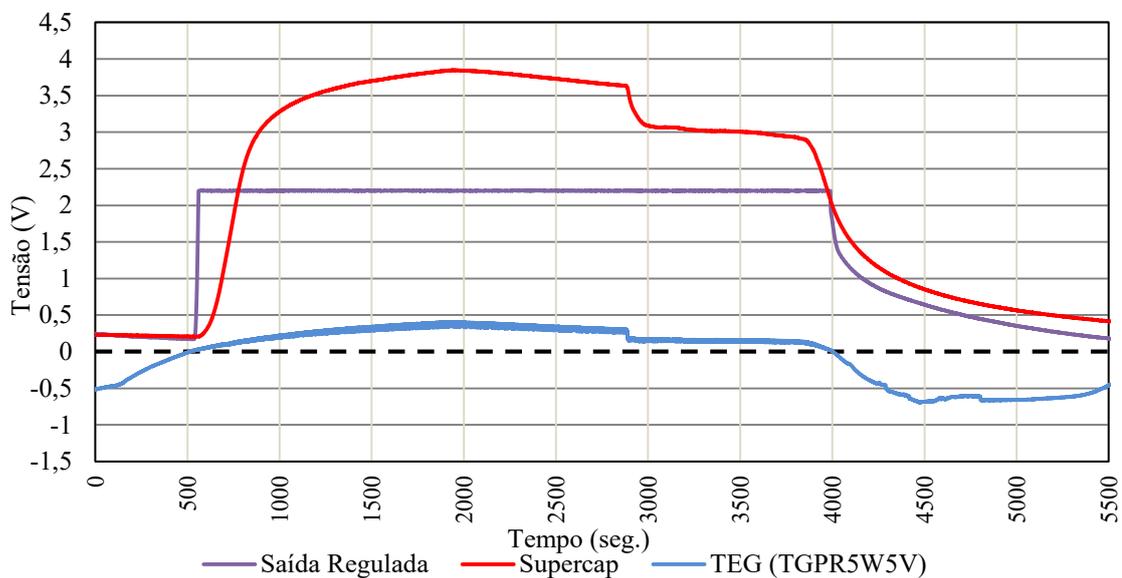
Nas análises de Ostrufka et al. (2017), a posição 1 foi responsável por gerar mais energia se comparada as demais. Isto se repete na análise, do trabalho atual para o primeiro modelo de TEG. Porém para o segundo modelo os resultados apontaram o perfil 3 com o maior potencial energético entre todos os perfis. Este resultado mostra que a escolha do TEG influencia diretamente na qualidade e na capacidade de geração para os mesmos gradientes de temperatura, mesmas dimensões do TEG com resistências internas diferentes. Para explicar melhor a ocorrência, os perfis 1 e 3 possuem gradientes bem parecidos, diferenciando-se da posição e polaridade de seus picos de temperatura. O perfil 1 possui seu pico com um gradiente de aproximadamente 40 °C, sendo o lado frio com temperatura de aproximadamente 0 °C e o quente aproximadamente 40 °C ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$; $T_{frio} = 0^{\circ}\text{C}$; $T_{quente} = 40^{\circ}\text{C}$). O perfil 3 também possui seu maior pico com gradiente a 40 °C, a diferença está no *offset*. O lado frio no perfil 3 está à aproximadamente 15 °C enquanto o lado quente está a 55 °C ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$; $T_{frio} = 15^{\circ}\text{C}$; $T_{quente} = 55^{\circ}\text{C}$). Porém, para o modelo TGPR-10W-4V-40S o perfil 1 apresentou um melhor resultado, enquanto para o modelo TGPR-5W-5V-40S o melhor resultado foi obtido com o perfil 3. Devido à resistência interna do gerador termoeletrico o potencial energético de cada fonte possui melhor eficiência em níveis diferentes de temperatura. Na próxima seção, apresentam-se os resultados qualitativos para as diferentes topologias de conversores propostos neste trabalho.

4.2 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DAS TOPOLOGIAS

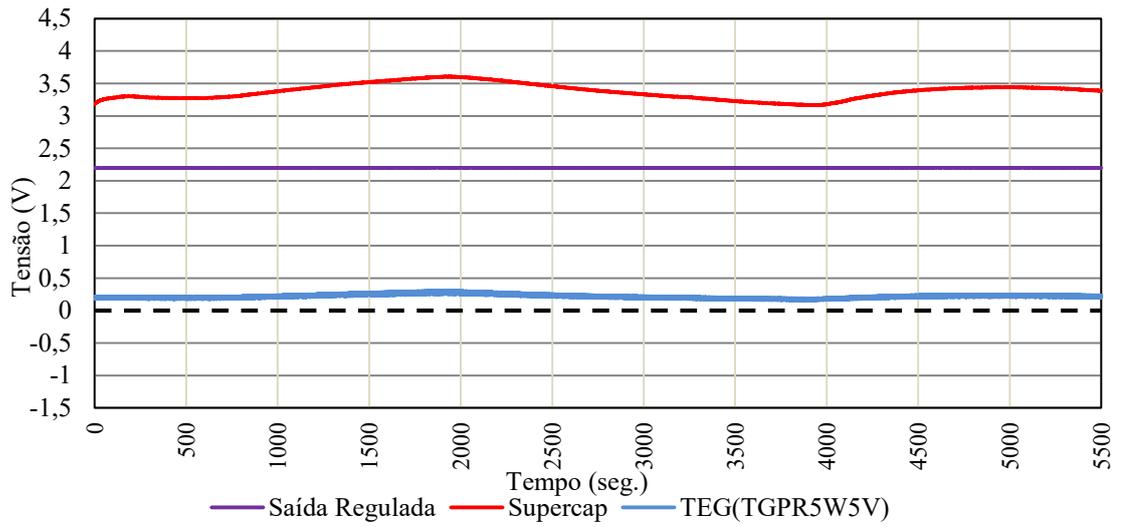
Foram utilizados três modelos de conversores DC-DC ULP e três modelos de capacitores para realização dos testes. Nesta seção, os conversores são comparados de forma qualitativa no que diz respeito aos períodos e condições de operação para cada perfil de temperatura utilizado.

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. Os picos de eficiência dos modelos LTC ficam próximos a 100 mV para as configurações escolhidas para este trabalho (segundo o fabricante). O pico de eficiência é diretamente relacionado ao transformador utilizado na entrada do conversor, que neste caso, está sendo considerado uma relação de 1:100. Outras relações (1:20 e 1:50) podem ser futuramente anexadas ao circuito para fins de comparação entre as configurações. Esta afirmação também é válida para ambos os modelos citados neste parágrafo. Os perfis da (a) à (e) apresentados na Figura 25 referem-se ao modelo unipolar LTC3108.

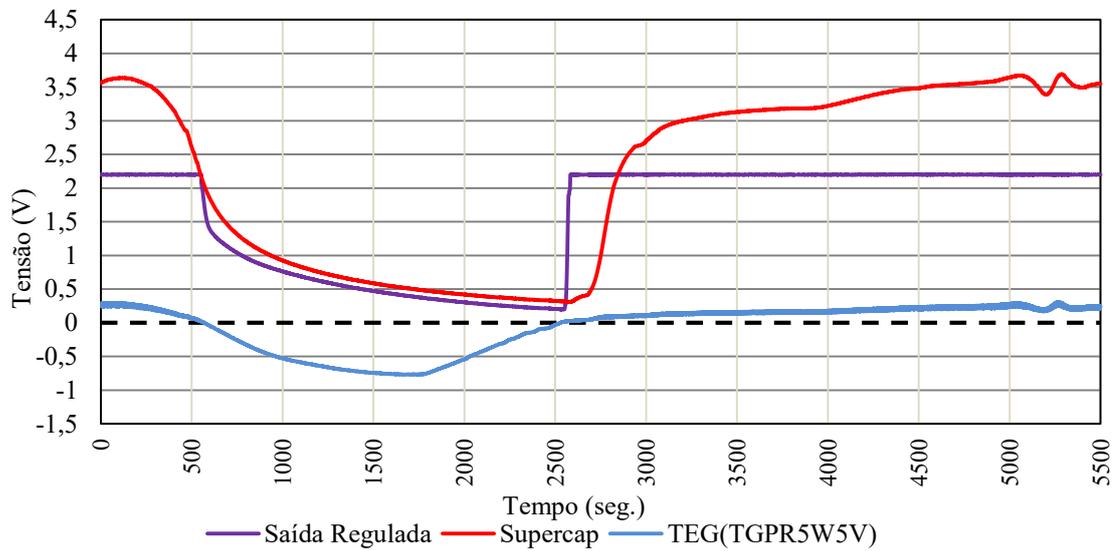
Figura 25 - Geração de energia utilizando o conversor LTC3108.



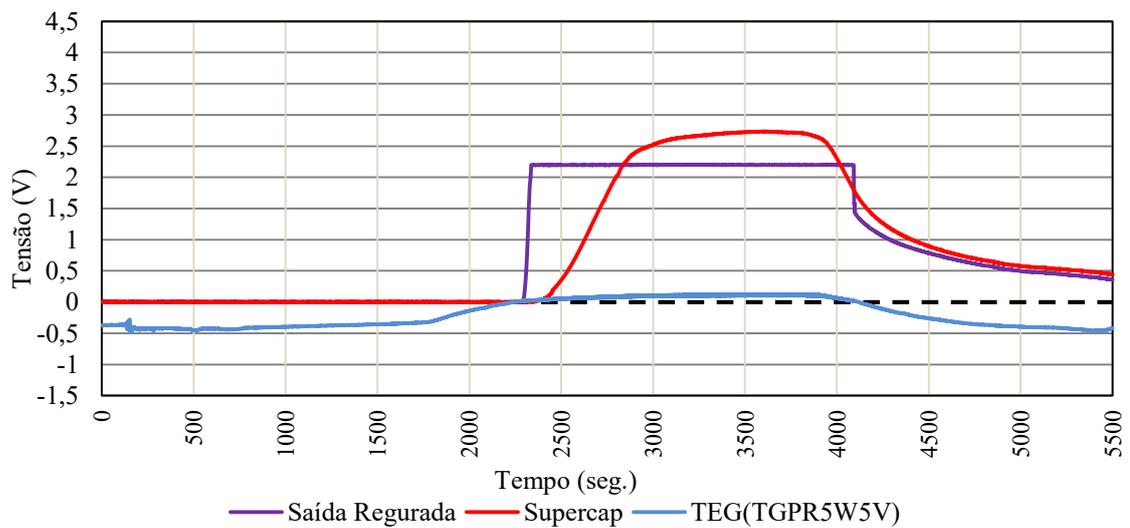
(a) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 para o Perfil 1



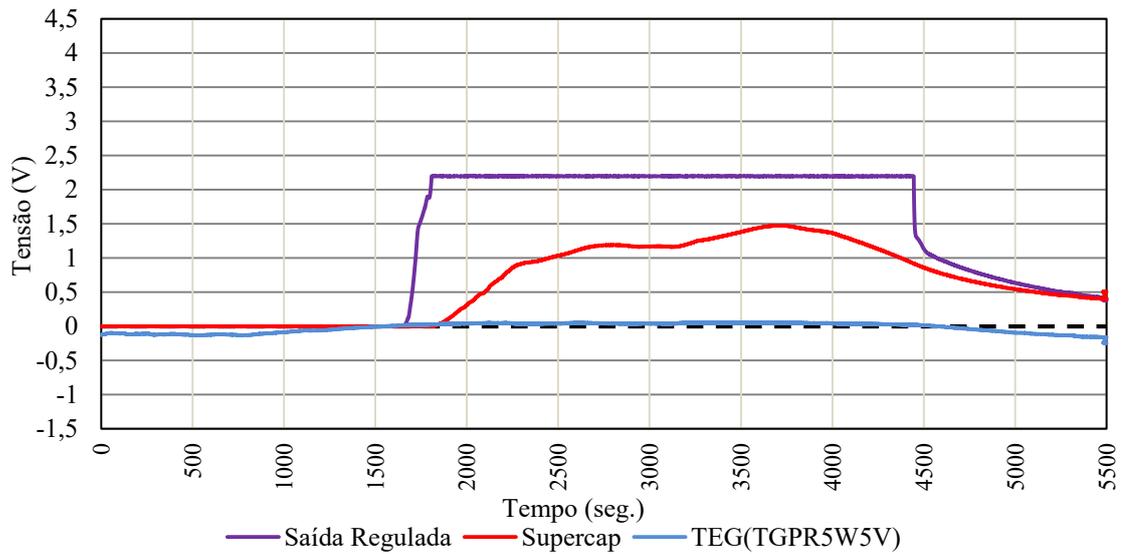
(b) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 para o Perfil 2



(c) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 para o Perfil 3



(d) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 para o Perfil 4



(e) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 para o Perfil 5

Fonte: Autor (2019).

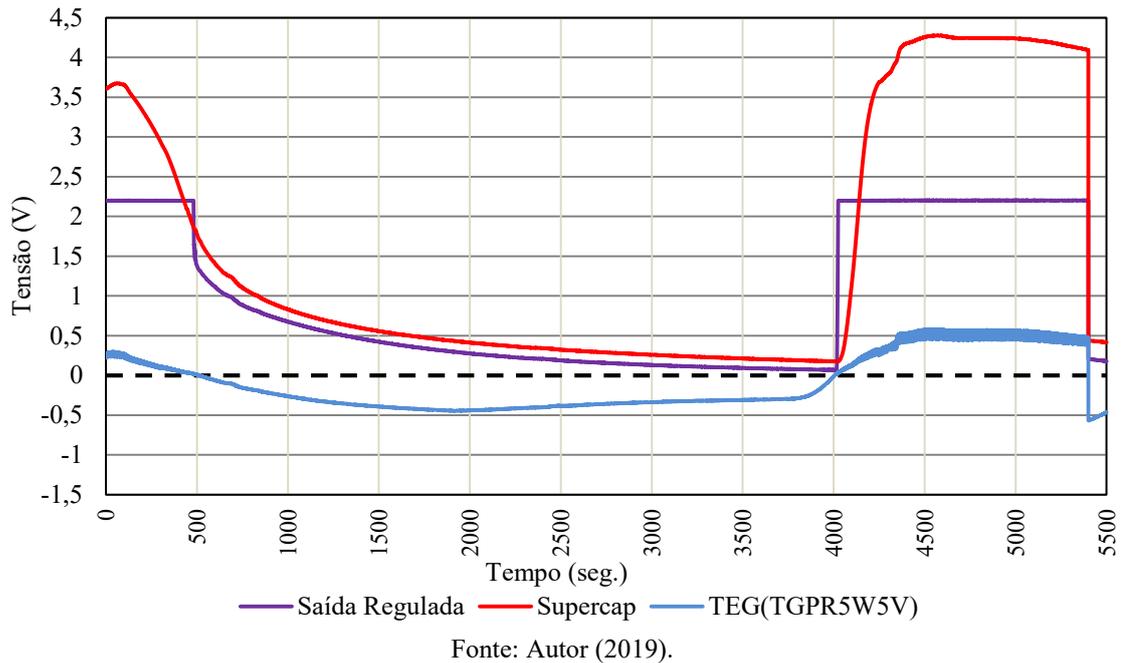
Na Figura 25 pode-se observar três sinais que se referem a:

- **Saída Regulada:** cor roxa, representando a saída de tensão regulada LDO (*Low Drop Out*) fornecida pelo conversor LTC3108;
- **Supercap:** cor vermelha, representando a tensão armazenada no capacitor da saída principal do conversor (C_{out});
- **TEG(TGPR5W5V):** cor azul, representando a tensão medida entre o TEG e a entrada para o circuito do *Payload*.

Pelos sinais apresentados é possível observar o período em que o conversor está operando. Conforme descrito anteriormente, para o modelo LTC3108 a polaridade é determinante. No perfil 2 ao fixar o TEG com a polaridade invertida o mesmo não entraria em operação. Em outros perfis este modelo também pode sofrer com a instalação invertida conforme apresentado na Figura 26.

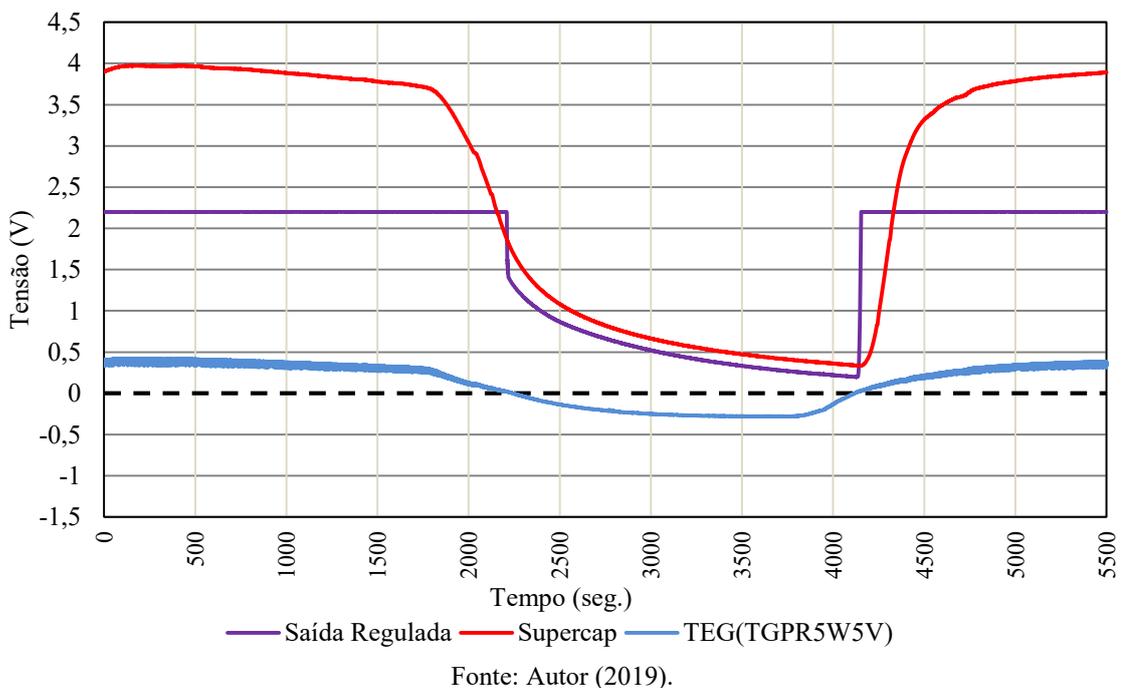
A escolha do lado de fixação é tão importante quanto o posicionamento do próprio TEG no *cubesat*. O perfil 1 apresentado nas duas polaridades mostra a diferença. A saída regulada LDO é usada nestes gráficos para indicar quando o conversor entra em operação. Isto porque este é o primeiro sinal a fornecer uma saída de tensão. Observando este sinal no gráfico gerado com o perfil 1 na Figura 25 é possível verificar que o conversor apresenta período de operação de aproximadamente 63%. O mesmo perfil 1 no gráfico da Figura 26 representa a geração com a polaridade do TEG invertida. Este gráfico mostra a redução no aproveitamento para aproximadamente 36% do mesmo ciclo de órbita.

Figura 26 - Geração de energia do Perfil 1 utilizando LTC3108 em polaridades invertida.



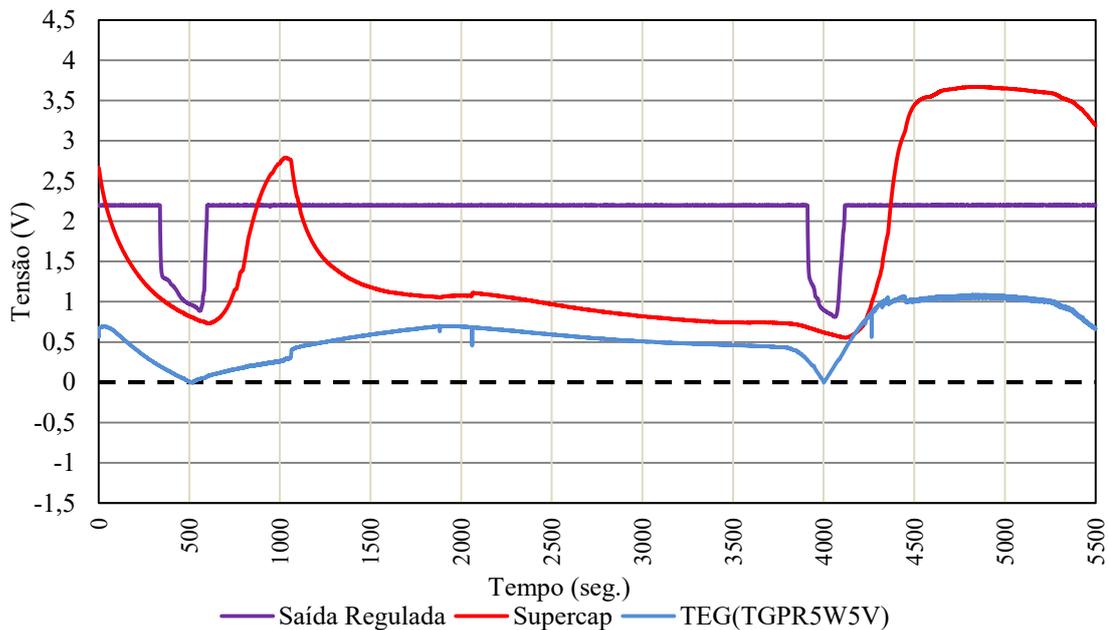
Na Figura 27 é mostrado que o inverso também é verdadeiro. Neste caso, o perfil 4 fornece energia suficiente para o conversor LTC3108 operar durante aproximadamente 33% no gráfico (d) da Figura 25. Quando sua polaridade é invertida aproximando-se de um aproveitamento de quase 66% conforme pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Geração de energia do Perfil 4 utilizando LTC3108 em polaridades diferentes.



Para que o modelo LTC3108 possa operar independente da polaridade, foi utilizado um circuito externo com relés ópticos gerenciados por um microcontrolador para realizar a inversão de polaridade. Como descrito no Capítulo 0 - Materiais e Métodos, o microcontrolador realiza leituras de tensão e temperaturas e através destes valores podem ser identificadas as inversões dos gradientes e/ou polaridade do sistema. Aplicando este recurso ao modelo LTC3108 são obtidos os sinais apresentados na Figura 28.

Figura 28 - Geração de energia do Perfil 1 para o conversor LTC3108 utilizando o circuito de gerenciamento do *Payload* para aplicação da auto polaridade na entrada do circuito.

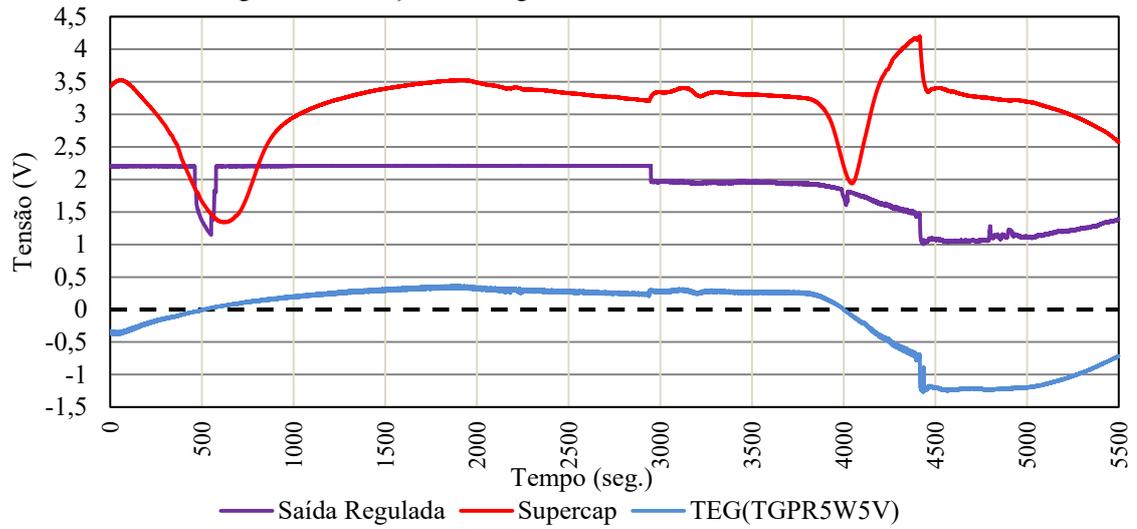


Fonte: Autor (2019).

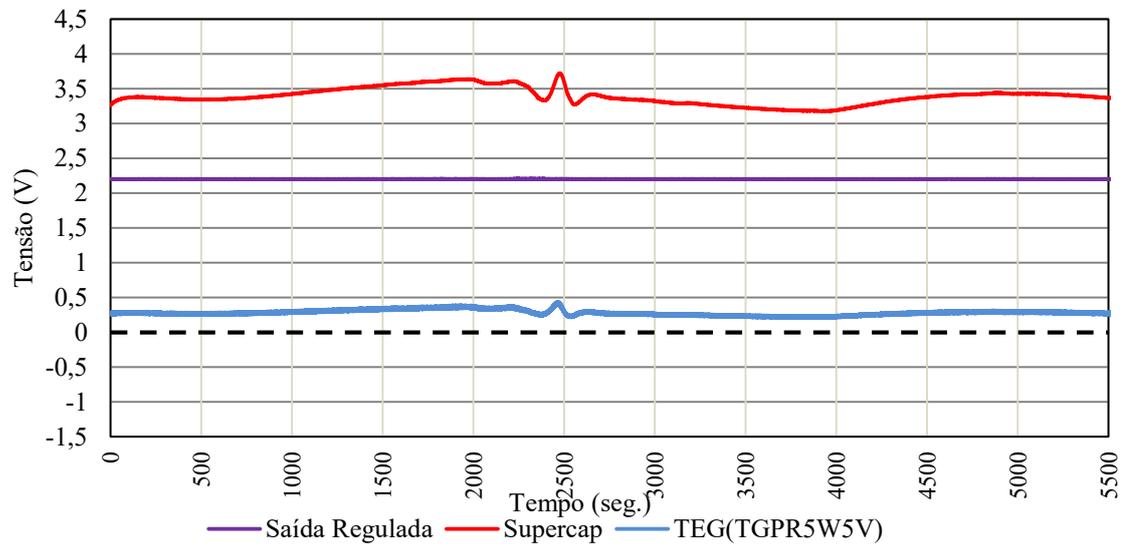
Neste caso o LTC3108 mantém sua operação independente do gradiente durante o ciclo de órbita desde que a mínima tensão fornecida pelo TEG esteja acima de 20mV. Os relés ópticos atuam antes do ponto de leitura analógica de tensão pelo microcontrolador, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 4. O resultado desta inversão é lido então pelo ADC12 do microcontrolador e é representado pela cor azul no gráfico da Figura 28. Por este motivo não ocorre a inversão de polaridade na curva de tensão do TEG. Com esta solução o modelo faz um aproveitamento de aproximadamente 90% de todo o ciclo de órbita para o perfil 1.

A mesma análise poderia ser feita para o modelo LTC3109. A proximidade dos resultados entre os modelos LTC ficam evidentes ao observar os sinais obtidos nos testes. A Figura 29 apresenta a conversão de energia realizada por este modelo.

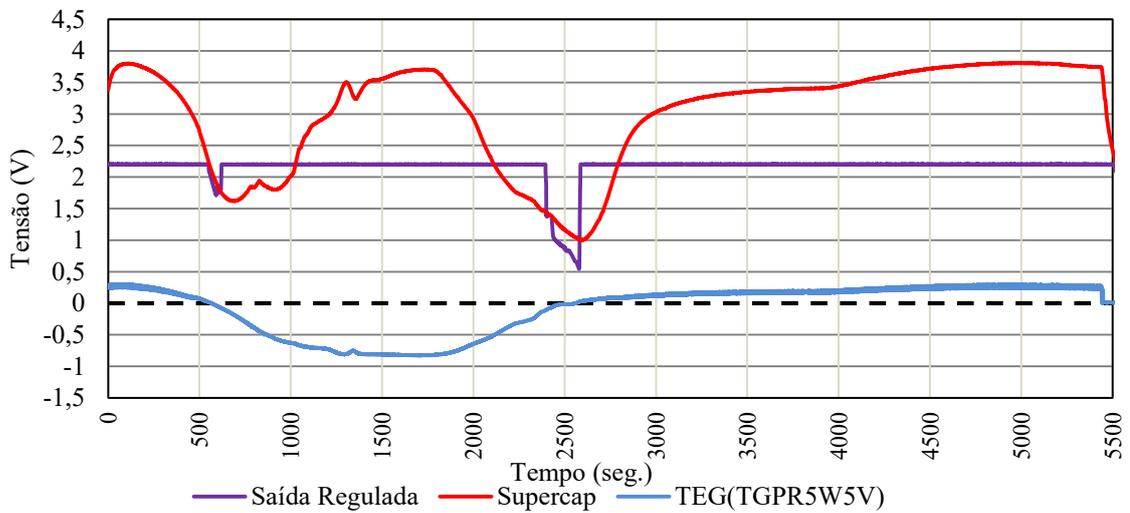
Figura 29 - Geração de energia utilizando o conversor LTC3109.



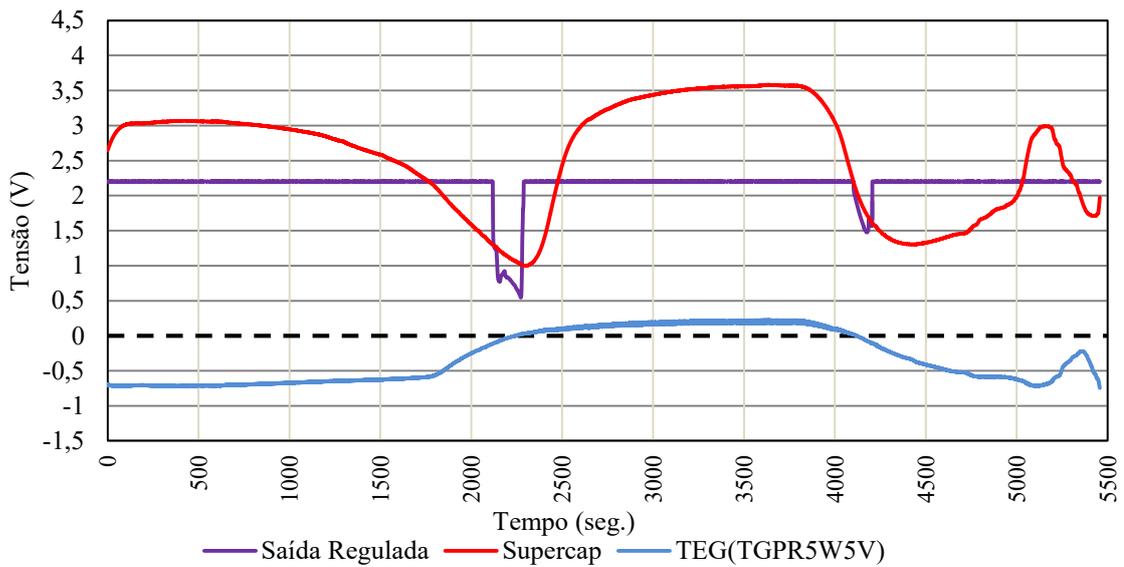
(a) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 1



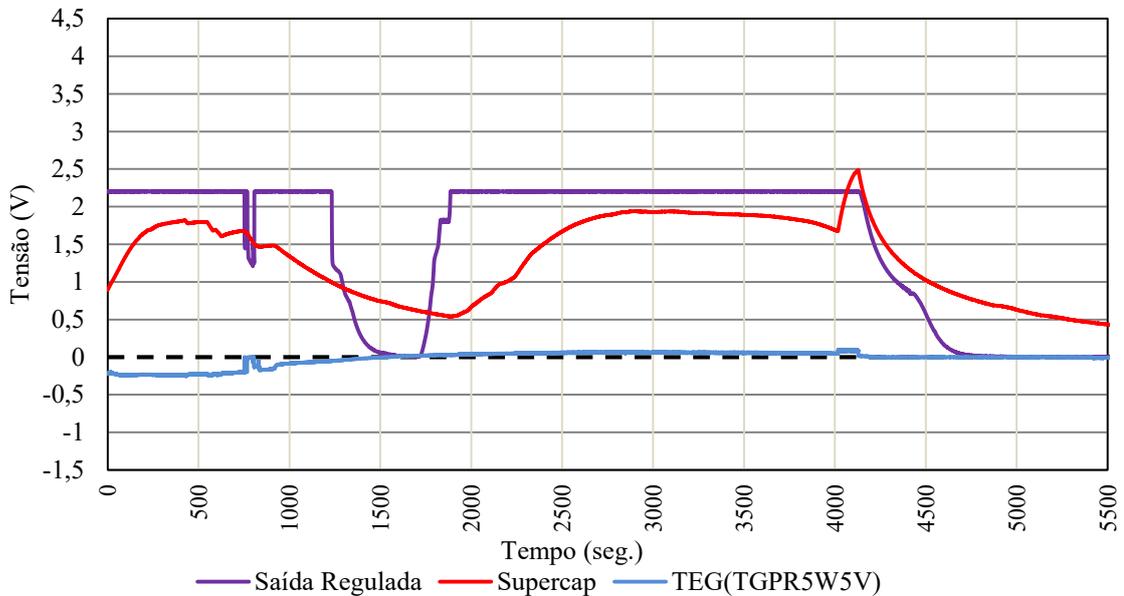
(b) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 2



(c) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 3



(d) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 4



(e) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 5

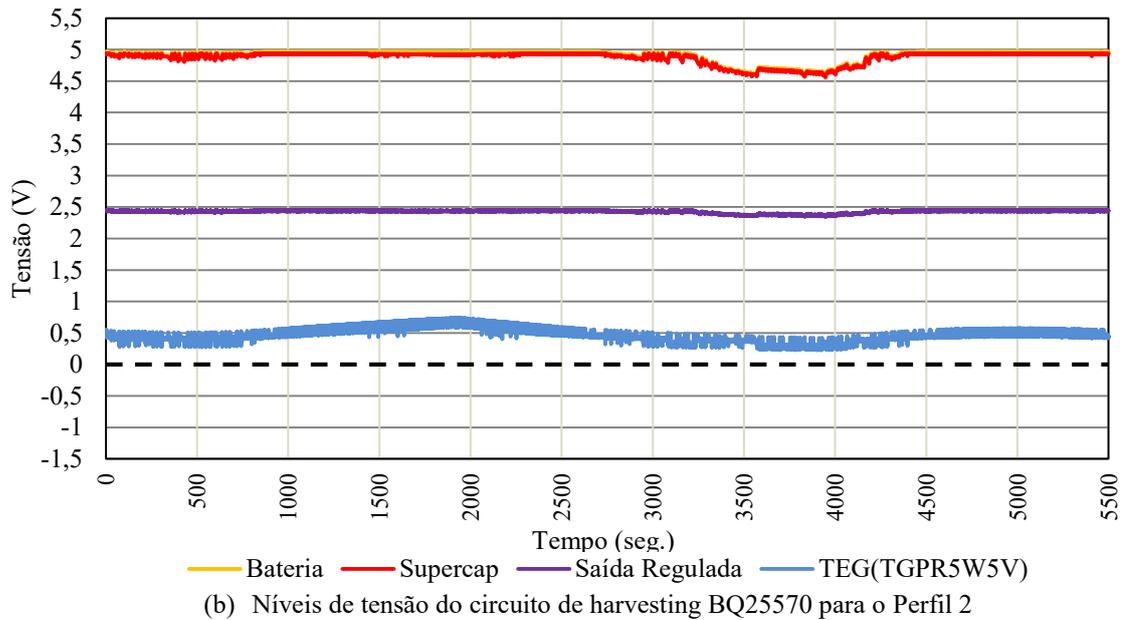
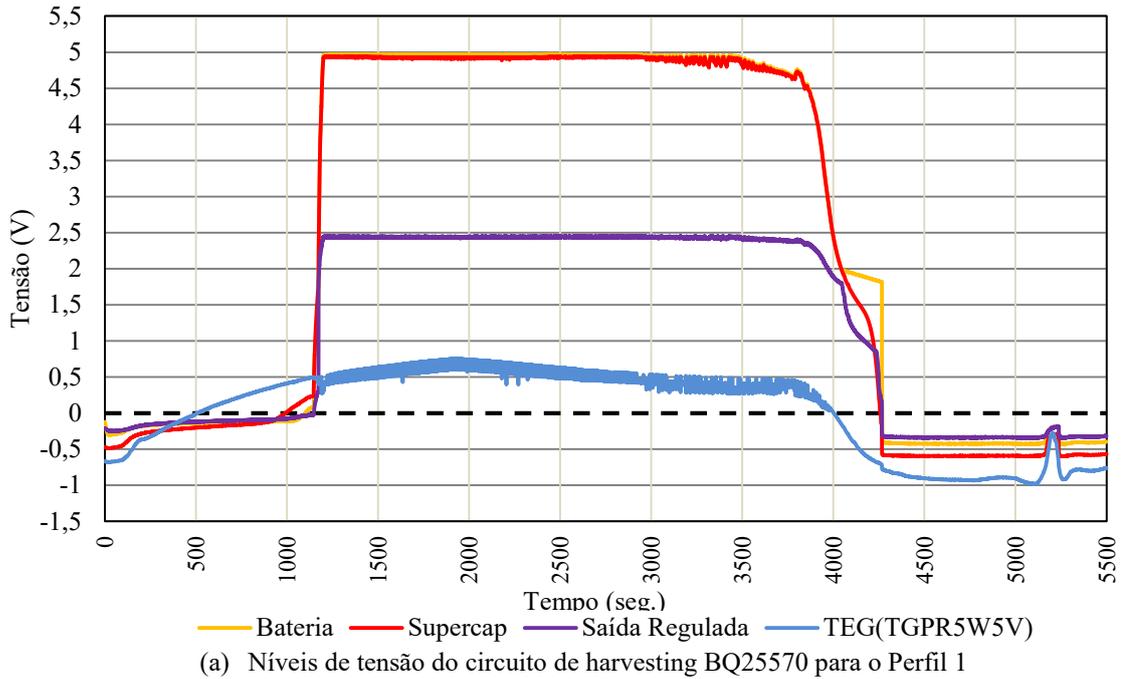
Fonte: Autor (2019).

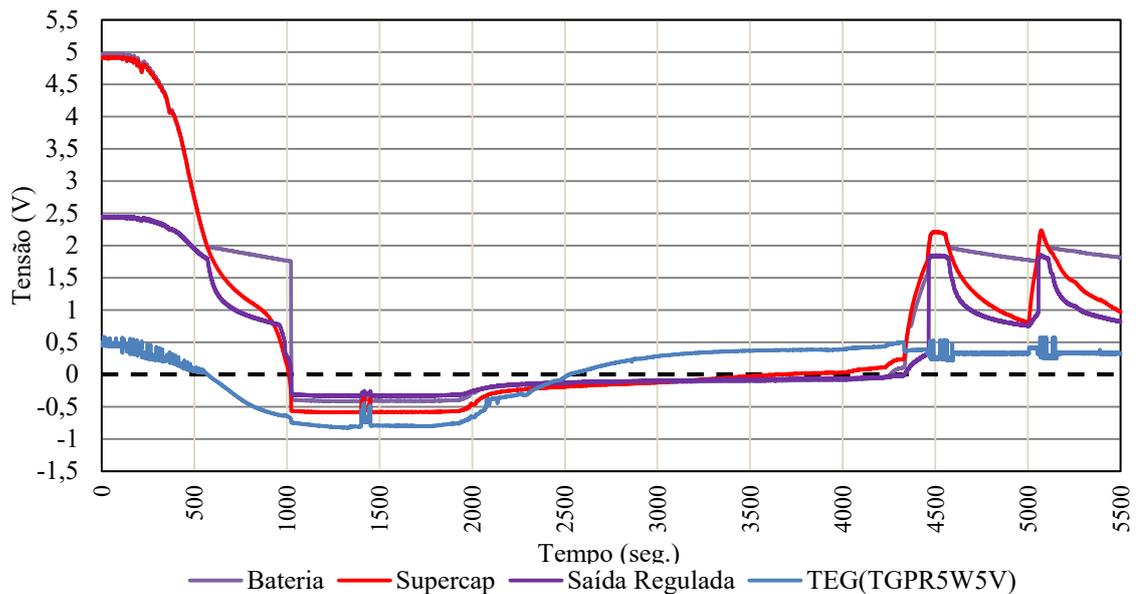
Para o modelo LTC3109, a inversão de polaridade está disponível no próprio circuito do conversor. Para manter o LTC3109 em funcionamento basta que a fonte forneça uma tensão superior a 30 mV. Mesmo em situações de um fornecimento extremamente baixo, que é o caso do perfil 5 (o perfil com a menor geração entre os 5 perfis aplicáveis conforme Tabela 3), o LTC3109 chega a operar por aproximadamente 67% do ciclo de órbita.

No caso do modelo BQ25570, sua partida a frio a 600 mV pode prejudicar o início de sua operação. Tomando a posição 2 como exemplo é possível observar que a tensão varia

levemente entre 450 mV e 650 mV. Se acaso o conversor entre em operação, dificilmente deixará o estado ativo durante o restante da órbita. Isto porque após iniciar a operação, o conversor aceita entradas mínimas de até 100 mV. O principal problema para este conversor é encontrado nos perfis com inversão de polaridade. Os sinais de tensão obtidos para o modelo BQ25570 são apresentados na Figura 30.

Figura 30 - Geração de energia utilizando o conversor BQ25570.





(c) Níveis de tensão do circuito de harvesting BQ25570 para o Perfil 3

Fonte: Autor (2019).

O modelo BQ25570 possui características diferentes para suas saídas. Para este modelo, considera-se as saídas V_{store} e V_{bat} conectadas, ou seja, carregam seus capacitores simultaneamente. Durante a ausência de tensão mínima na entrada, estas saídas permanecem conectadas até atingir o nível de tensão programado nos resistores do circuito externo, que neste caso é 1,8 V. No gráfico do perfil 1 é possível observar que ao atingir este limite o sinal em Bateria (C_{bat}) é mantido até que a energia no Supercap (C_{store}) caia abaixo do nível do estado de partida a frio em 330 mV (estado só pode ser atingido após a primeira carga do circuito). A Saída Regulada neste conversor é dada pelo sinal do conversor *buck* incluso neste modelo e é representada por V_{out} . Esta saída é regulada em 2,5 V. Na Figura 30 pode-se observar os 4 sinais que referem-se a:

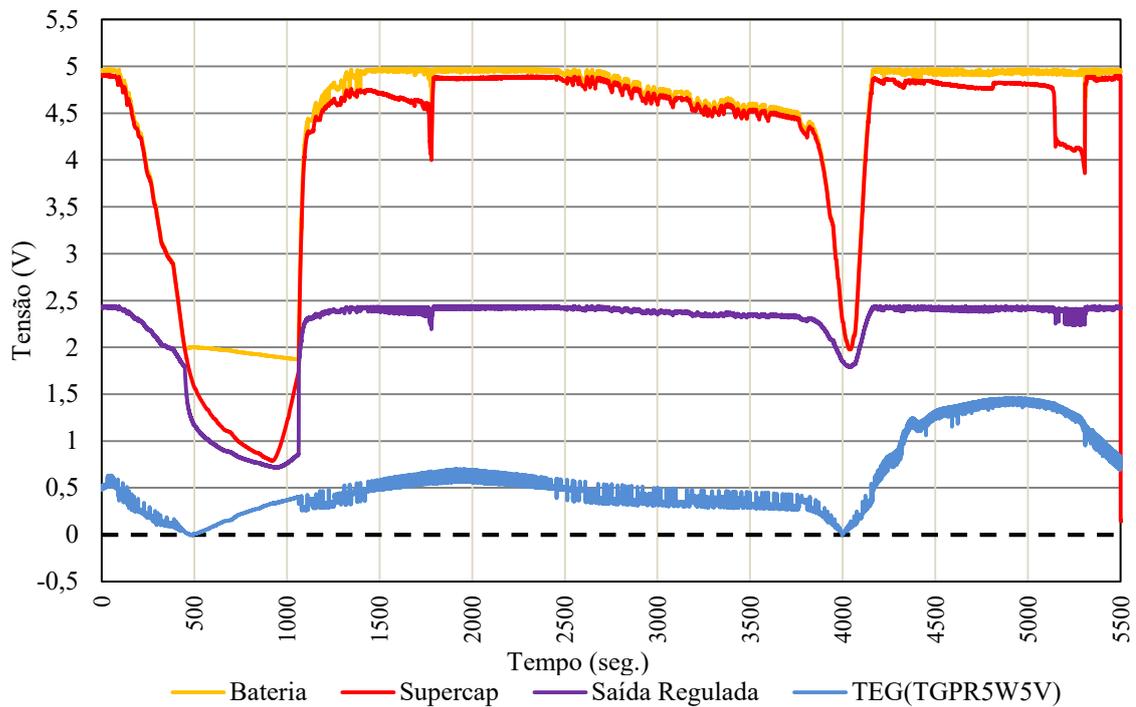
- **Bateria:** cor amarela representando a tensão armazenada no capacitor que age como uma bateria na ausência de tensão na entrada do conversor (C_{bat});
- **Supercap:** cor vermelha que refere-se ao armazenamento principal de carga do circuito (C_{store});
- **Saída Regulada:** cor roxa que é saída de tensão regulada do circuito (V_{out});
- **TEG(TGPR5W5V):** cor azul, representando a tensão medida entre o TEG e a entrada para o circuito do *Payload*.

O modelo BQ25570 entrou em operação em apenas metade dos perfis testados, conforme apresentado na Figura 30. Para o perfil 1 o conversor operou por aproximadamente 56% do ciclo de órbita. Já no perfil 2, o conversor conseguiu entrar em operação durante os

primeiros segundos de teste e conforme descrito anteriormente, manteve-se até a conclusão. Durante a execução do perfil 3, o modelo não apresentou bons resultados. Isto pode ser diferente aplicando a inversão de polaridade sendo que o maior gradiente de temperatura fornece a tensão em polaridade inversa à utilizada.

Da mesma que forma que para o modelo LTC3108, o conversor BQ25570 foi testado utilizando o circuito de auto polaridade integrada ao *Payload*. O resultado é apresentado para o perfil 1 na Figura 31.

Figura 31 - Geração de energia para o conversor BQ25570 utilizando o circuito de gerenciamento do *Payload* para aplicação da inversão de polaridade na entrada do circuito.



A diferença entre o aproveitamento do modelo antes e depois de utilizar o circuito de auto polaridade é previsível. Porém, alguns pontos ainda podem ser destacados. Durante o período de inversão de polaridade, o modelo foi capaz de manter energia para retomada rápida na reinicialização. Entre 500 e 1000 segundos é possível observar que o sinal da bateria (C_{bat}) manteve-se alto, isto porque o capacitor C_{store} não atingiu o limite inferior para entrada no estado de partida a frio. O aproveitamento neste caso foi de aproximadamente 85% para carregamento em C_{store} . A Tabela 4 traz um resumo da avaliação qualitativa dos circuitos apresentados nesta seção.

Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens qualitativas dos modelos de conversores propostos, segundo o fabricante e observações dos testes em bancada.

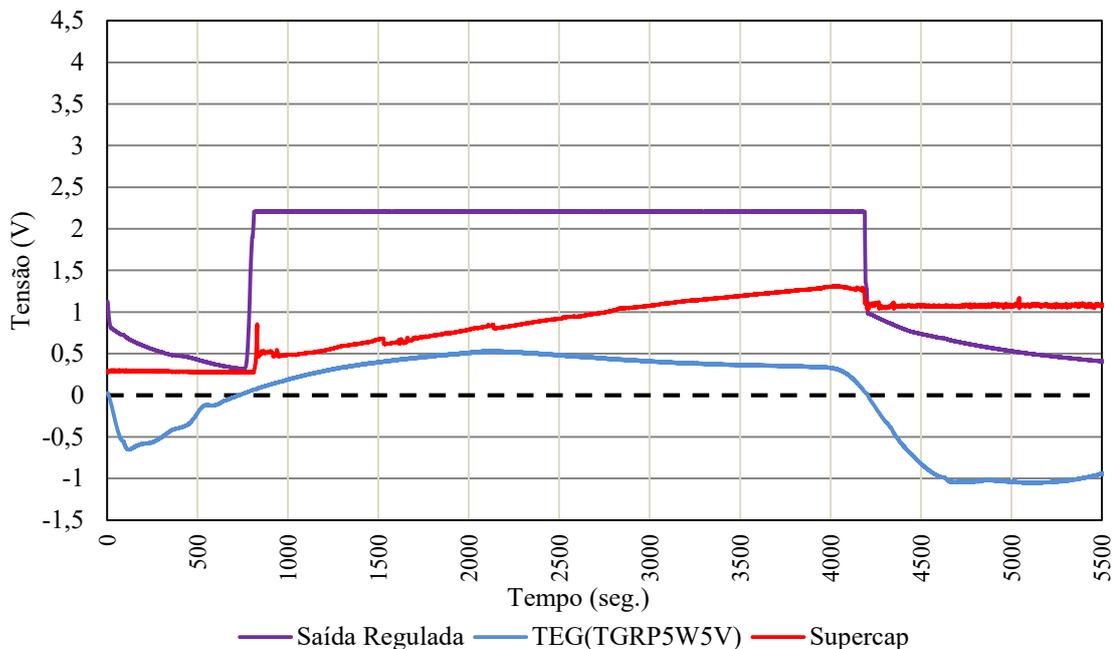
Circuito	Vantagens	Desvantagens
LTC3108	- Inicia com tensões extremamente baixas.	- Opera em apenas uma polaridade. - Eficiência extremamente baixa para tensões mais elevadas da fonte.
LTC3108-Bipolar	- Inicia com tensões extremamente baixas. - Opera em ambas as polaridades. - Operação observada em 5 dos 6 perfis de temperatura. - Melhor aproveitamento. Possui o maior período de operação em 1 ciclo de órbita.	- Eficiência extremamente baixa para tensões mais elevadas da fonte.
LTC3109	- Inicia com tensões extremamente baixas. - Opera em ambas as polaridades - Operação observada em 5 dos 6 perfis de temperatura. - Melhor aproveitamento. Possui o segundo maior período de operação em 1 ciclo de órbita.	- Eficiência extremamente baixa para tensões mais elevadas da fonte.
BQ25570	- Alta eficiência na conversão.	- Opera em apenas uma polaridade. - Necessita de tensões mais elevadas da fonte para entrar em operação. - Operação garantida em apenas 2 dos 6 perfis de temperatura apresentados. - Pior aproveitamento. Possui o menor período em operação em 1 ciclo de órbita.
BQ25570-Bipolar	- Maior eficiência na conversão. - Opera em ambas as polaridades.	- Necessita de tensões mais elevadas da fonte para entrar em operação.

Fonte: Autor (2019).

Todos os sinais de carga apresentados até este momento foram obtidos utilizando o conjunto de capacitores de tântalo. Esses capacitores foram descritos anteriormente como uma das opções para armazenamento de carga. O problema desses capacitores são observados nos gráficos apresentados desde a Figura 25, em que é possível observar uma descarga rápida da energia armazenada. Isto ocorre quando não há energia suficiente na entrada do conversor mostrando uma elevada corrente de fuga para estes modelos. Além disso, nota-se grande

dificuldade em se atingir valores mais elevados de tensão. Isto não deveria ser problema, uma vez que a capacitância somada desses modelos não ultrapassa os 16 mF e sua resistência interna fica em torno de 100 mOhms. Utilizando o supercapacitor de 1F é observada a diferença neste comportamento conforme apresentado na Figura 32.

Figura 32 – Armazenamento de energia utilizando o supercapacitor de 1F.



Fonte: Autor (2019).

A corrente de fuga deste modelo é extremamente baixa. Após o conversor entrar em repouso, o capacitor mantém seu nível de tensão próximo ao valor de carga até então obtido. Isto traz grandes vantagens em perfis de temperatura que sofrem com a inversão do gradiente, mesmo nos casos onde um circuito de auto polarização esteja incluso. Na próxima seção, as topologias são comparadas de forma quantitativa.

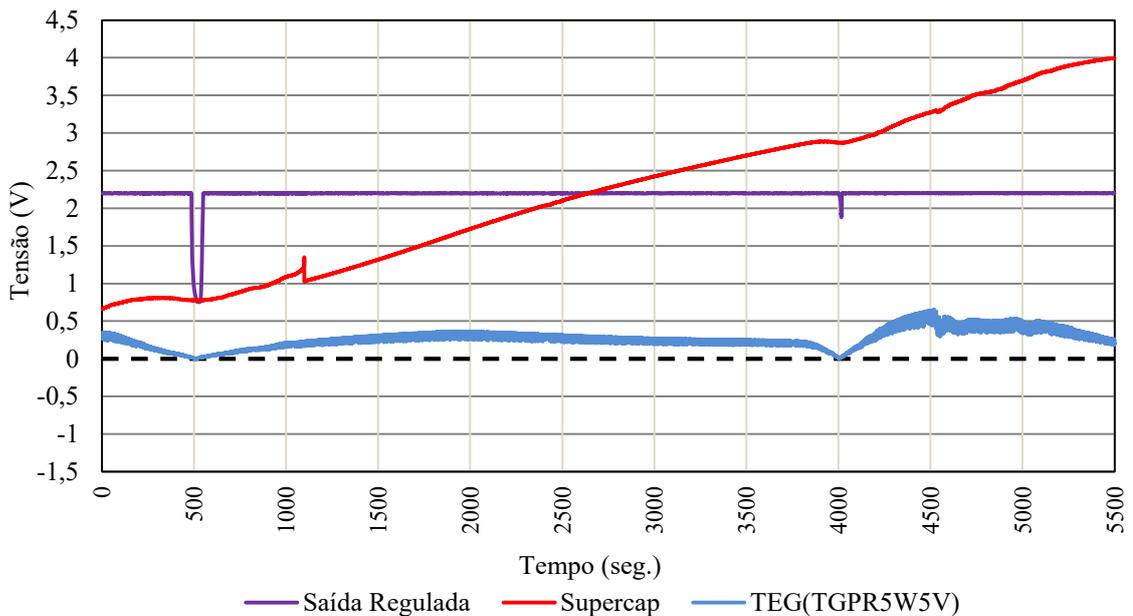
4.3 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DAS TOPOLOGIAS

Na seção anterior foram apresentados gráficos que mostram as principais características de cada modelo de conversor empregado. Foi observado que a inclusão de um circuito de auto polaridade é de grande importância para garantir o funcionamento dos conversores unipolares por um maior período. Por este motivo, nesta seção, são considerados apenas as versões bipolares descritas anteriormente. Para armazenar esta energia, descartou-se o uso dos capacitores de tântalo devido ao seu baixo desempenho nos experimentos

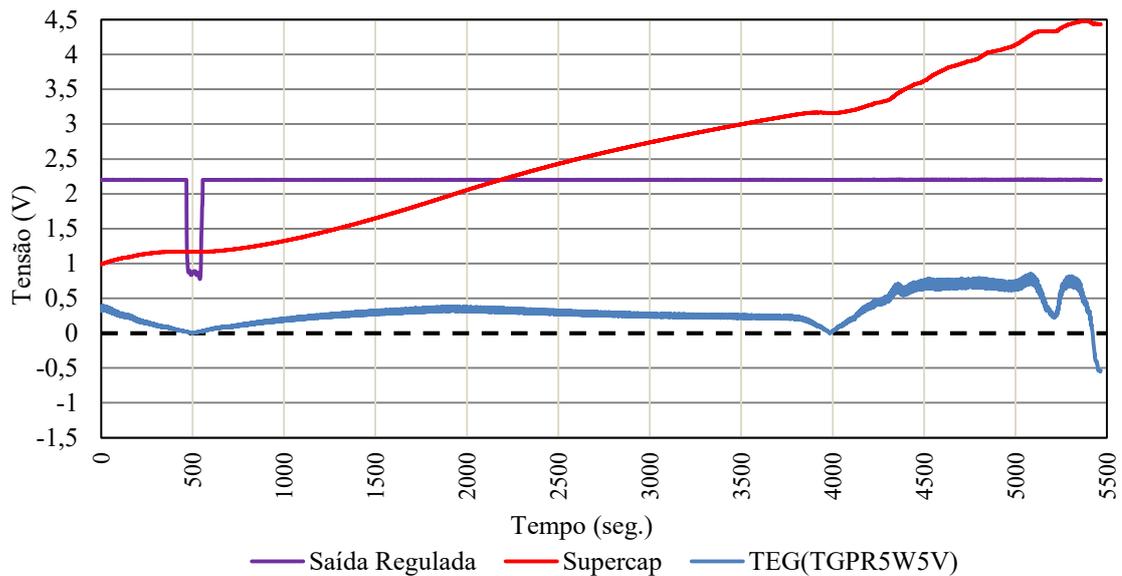
apresentados. O TEG utilizado para quantização é o modelo TGPR-5W-5V-40S por possuir uma taxa maior de geração em relação ao gradiente de temperatura. Para avaliar o aproveitamento dos conjuntos conversor-supercapacitor é utilizada apenas 1 dos 6 perfis possíveis. O perfil 1 foi escolhido para essa tarefa uma vez que este apresenta picos elevados de tensão que permitem o modelo BQ25570 entrar em operação. Além disso, apresenta inversão de polaridade que coloca a prova os conversores nos quesitos de reinicialização e consumo. Para além da avaliação do perfil de temperatura são utilizados gradientes fixos para avaliar o desempenho de carga contínua dos dois modelos de supercapacitores.

Conforme observado na Tabela 4, o modelo LTC3108 bipolar é equiparável ao modelo LTC3109 em todos os quesitos de qualidade. Desta forma, os modelos obtêm resultados bem parecidos, conforme apresentado na Figura 33.

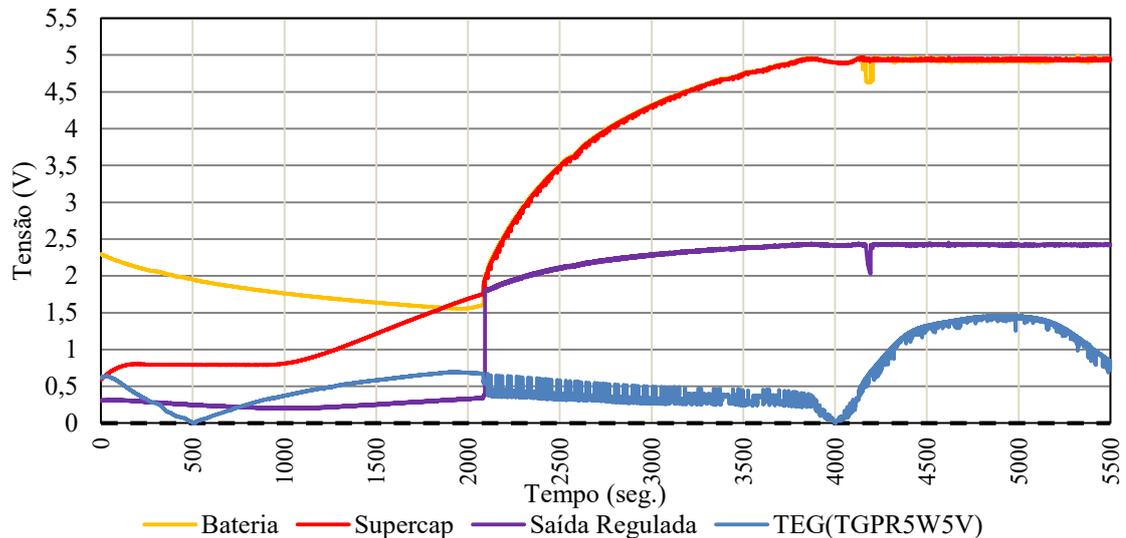
Figura 33 – Carregamento do capacitor de 1F utilizando os 3 modelos de conversores, circuito de auto polaridade, gradiente de temperatura do perfil 1 e TEG TGPR-5W-5V-40S.



(a) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3108 bipolar para o Perfil 1 e capacitor de 1F



(b) Níveis de tensão do circuito de harvesting LTC3109 para o Perfil 1 e capacitor de 1F



(c) Níveis de tensão do circuito de harvesting BQ25570 bipolar para o Perfil 1 e capacitor de 1F

Fonte: Autor (2019).

Uma leve diferença no tempo desativado pode ser observada entre os modelos da *Linear Technologies*. Isto se deve à diferença de 10 mV da partida a frio dos conversores. O comportamento do BQ25570 é apresentado no gráfico (c). Este modelo, apesar de possuir nível de tensão de partida a frio elevado, não apresenta dificuldades em carregar o supercapacitor ao máximo. Nos primeiros 2 mil segundos, o conversor BQ25570 encontra-se em estado de partida a frio, carregando lentamente os capacitores até o próximo estágio (encontrado em 1,8 V). Além disso, o modelo passa pela primeira inversão de polaridade sem

descarregar o pouco de energia que possui no supercapacitor. Logo em seguida, a eficiência elevada do conversor se destaca carregando rapidamente o “Supercap” (V_{store}).

A energia fornecida pela fonte, observada na Figura 33, é diferente para os três casos. Deve-se lembrar que a eficiência do TEG depende da resistência equivalente da carga. A carga nesta afirmação é o próprio conversor. Os modelos LTC possuem resistências equivalentes bem parecidas. Nas especificações dos conversores LTC é possível obter a resistência equivalente para determinadas entradas (neste caso para um transformados 1:100). Para o modelo LTC3108, considerando uma entrada de 100 mV por exemplo, a resistência equivalente fica em torno de 3 Ohms enquanto que para o modelo LTC3109 será 3,5 Ohms. Lembrando que o TEG TGPR-5W-5V-40S possui resistência equivalente sugerida de 5,4 Ohms. Já para o modelo BQ25570 um valor elevado de tensão fornecida pela fonte é observado. Para os modelos LTC a fonte possui geração com pico de tensão em torno de 600 mV e este valor é mais que o dobro no caso do BQ25570, chegando a atingir 1,5V. A diferença está basicamente no circuito MPPT integrado ao modelo. Conforme descrito no capítulo anterior, o MPPT é utilizado para maximizar a colheita através da impedância relativa.

Para avaliar a carga obtida neste perfil são considerados os níveis iniciais e finais de tensão no capacitor. O tempo de carga também é considerado. A equação que descreve a energia (em Joules) armazenada no supercapacitor é dada por:

$$E_{max} = \frac{C_{nom} V_{cap}^2}{2} \quad (8)$$

onde C_{nom} é a capacitância nominal fornecida pelo fabricante e V_{cap} é o nível de tensão no momento da leitura. Para determinar a incerteza dos valores de energia obtidos nesta medição é utilizada a equação:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E_{max}}{\partial V_{cap}}\right)^2 \cdot (\Delta V_{cap})^2 + \left(\frac{\partial E_{max}}{\partial C_{nom}}\right)^2 \cdot (\Delta C_{nom})^2} \quad (9)$$

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{2C_{nom}V_{cap}}{2}\right)^2 \cdot (\Delta V_{cap})^2 + \left(\frac{V_{cap}^2}{2}\right)^2 \cdot (\Delta C_{nom})^2} \quad (10)$$

onde ΔV_{cap} é a incerteza do instrumento de medição e ΔC_{nom} é a tolerância do capacitor descrita pelo fabricante. Os supercapacitores, de forma geral, possuem elevado valor de tolerância e incerteza para sua capacitância. Por este motivo o valor de incerteza de medição também é elevado na análise a seguir. A Tabela 5 apresenta a quantidade de energia armazenada no supercapacitor de 1F para cada modelo durante o ciclo de órbita utilizando o perfil 1.

Tabela 5 - Energia obtida para o perfil 1 utilizando o supercapacitor de 1F.

Conversor – modelos bipolares	Energia Total Armazenada (Joule) em um ciclo completo de órbita.	Tempo (seg.) para atingir 4V
LTC3108	$7,77^{+2,296}_{-0,692} J$	5490,20 s
LTC3109	$9,54^{+2,573}_{-0,776} J$	4831,15 s
BQ25570	$12,14^{+2,851}_{-0,859} J^*$	2771,23 s

* Carga máxima obtida ao completar 1 hora e 6 min. de operação.

Fonte: Autor (2019).

A partir dos dados apresentados na Tabela 5 é observado o alto desempenho do modelo BQ25570. Enquanto os modelos LTC3108 e LTC3109 demoram praticamente o ciclo de órbita inteiro para carregar 4 V, o modelo BQ supera esta marca antes de completar 51% da órbita. A Tabela 5 também apresenta a energia disponível no curto período de uma órbita. O BQ25570 consegue realizar a carga completa do supercapacitor e poderia suprir a demanda energética de alguma aplicação antes mesmo de finalizar o ciclo de órbita. Em seguida, pode dar início a um novo carregamento. Enquanto isso, os modelos LTC3108 e LTC3109 estariam realizando a primeira carga no supercapacitor.

Outra comparação foi realizada desta vez utilizando gradientes fixos de temperatura. Para avaliar o desempenho no armazenamento de energia quando o gradiente se mantém muito baixo, foram realizados testes utilizando o supercapacitor de 1 F e um gradiente de 2 °C. Este gradiente gera em torno de 35 mV na fonte utilizada (quando está conectada aos conversores) e se aproxima do mínimo exigido para os modelos LTC. Para comparação entre os modelos, foi utilizado um gradiente de 15 °C que gera aproximadamente 600 mV quando a fonte está conectada ao conversor BQ25570. Este valor é o mínimo para que este conversor saia do estado de partida a frio. Este mesmo gradiente é aplicado quando a fonte está conectada ao LTC3108 e ao LTC3109. Porém, nestes casos, a fonte fornece em média

300~320 mV. O mesmo gradiente é aplicado para carga dos supercapacitores de 5 F. A Tabela 6 mostra o armazenamento de energia nestas condições.

Tabela 6 - Energia obtida com gradientes fixos de temperatura durante 1 hora utilizando o supercapacitor de 1F e os 2 supercapacitores de 5F em série.

Conversor – modelos bipolares	Supercapacitor - 1F		2 Supercapacitores em série - 5F
	Gradiente 2°C	Gradiente 15°C	Gradiente 15°C
LTC3108	0,026 $^{+0,130}_{-0,039} J$	3,454 $^{+1,510}_{-0,455} J$	1,322 $\pm 0,311 J$
LTC3109	0,036 $^{+0,156}_{-0,047} J$	5,215 $^{+1,869}_{-0,563} J$	0,680 $\pm 0,239 J$
BQ25570	-	12,14 $^{+2,851}_{-0,859} J$	3,48 $\pm 0,512 J$

* Carregamento completo em 45 minutos.

Fonte: Autor (2019).

Nota-se que o desempenho do modelo LTC3108 agora é melhor que o do modelo LTC3109. Nas condições impostas neste teste a eficiência de ambos os modelos é bem parecida (segundo o datasheet) sendo algo em torno de 8%. A diferença pode estar na resistência equivalente que para o modelo LTC3109 fica próximo a 3 Ohms enquanto que para o modelo LTC3108 a resistência não é caracterizada nesta condição. Para o supercapacitor de 1 F o LTC3109 obteve melhor desempenho. Já para os modelos de 5 F em série o LTC3108 é que possui o melhor desempenho. Observa-se a diferença de desempenho também utilizando o mesmo supercapacitor em gradientes diferentes. O LTC3108 possui seu pico de eficiência com tensões menores que o LTC3109. Isto resulta em um melhor desempenho com gradientes mais baixos. Já o modelo BQ25570 carregou completamente o supercapacitor de 1 F em aproximadamente 45 minutos. No carregamento de dois supercapacitores de 5 F em série o modelo operou apenas em seu modo de partida a frio. A tensão em C_{store} atingiu aproximadamente 2 V poucos segundos antes de finalizar o teste de 1 hora. É esperado que após este período de carga inicial este conversor consiga carregar rapidamente os supercapacitores. Infelizmente este teste não pode ser realizado a tempo da conclusão deste trabalho.

Os testes de carga também foram realizados utilizando fontes de tensão reguladas para fins de avaliação de período para carga máxima dos capacitores. Utilizando a fonte regulada em 200 mV, o modelo LTC3109 levou aproximadamente 1 hora 50 minutos para carregar o supercapacitor de 1 F. No caso dos supercapacitores de 5 F em série, com o mesmo conversor e gradiente, demorou aproximadamente 8 horas.

4.3.1 Consumo médio dos circuitos conversores

Entre as questões mais importantes no processo de *harvesting*, está o conhecimento do consumo médio do circuito responsável pelo processo. Utilizando o datasheet de cada CI foi estimado o consumo médio para cada circuito conversor.

A fim de representar o consumo médio foram observados os valores de corrente quiescente e corrente de fuga fornecidos pelo fabricante para cada conversor. Componentes não envolvidos diretamente no processo de *harvesting* não são incluídos nesta avaliação como, por exemplo, o microcontrolador, sensores de temperatura, *switchs* e *ampops*. Desta forma, o consumo médio de cada topologia é apresentado na Tabela 7. Na coluna que descreve o consumo médio do circuito é completo estão sendo considerados relés ópticos, diodos e conversores.

Tabela 7 - Consumo médio quando o circuito não está convertendo energia.

Circuitos Conversores	Consumo Médio do Conversor (μA)	Consumo Médio do Circuito Conversor Completo (μA)
Circuito LTC3108	$7,5 \mu A$	$9,5 \mu A$
Circuito LTC3109	$7,35 \mu A$	$9,35 \mu A$
Circuito BQ25570	$0,488 \mu A$	$2,488 \mu A$

Fonte: Autor (2019).

O consumo médio dos conversores LTC são baseados nos valores de corrente quiescente em V_{out} e V_{aux} e da corrente de fuga em V_{store} e V_{out2} . A corrente quiescente para o modelo LTC3108 é de $6 \mu A$ e de $7 \mu A$ para o modelo LTC3109. Por outro lado, a corrente de fuga em V_{out2} para o LTC3108 é 1000 nA e para o modelo LTC3109 é de 50 nA . A menor corrente quiescente é apresentada para o modelo BQ25570 (488 nA) e é dada como a corrente típica em repouso para todo o modelo.

Os circuitos completos são apresentados na seção Conversores 3.1.1. Para o circuito LTC3108 são utilizados 2 relés para polarização, 2 relés para ativação de circuito, 1 transformador *coilcraft* e 1 diodo na saída do circuito. Os relés são comuns aos 3 circuitos conversores assim como o diodo de baixa corrente de retorno na saída do circuito, algo em torno de $0.1 \mu A$ (à $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Assim, a diferença para o modelo LTC3109 é o transformador adicional para auto polarização do próprio CI. Os relés de polarização poderiam ser excluídos para este modelo, porém neste trabalho o circuito seletor é reutilizado para todas as

topologias. Para fins de cálculo de consumo os relés ópticos são desprezíveis. A energia utilizada para manter os relés ativos é fornecida atualmente por uma fonte externa. Para análises futuras, onde a energia convertida será utilizada no gerenciamento do *harvesting*, o consumo do rele óptico deverá ser determinado. No caso do modelo BQ25570 os transformadores *coilcraft* não estão inclusos. Neste modelo são utilizados dois indutores. Os componentes passivos não entram no cálculo de consumo, porém, deve-se considerar o modelo à ser utilizado devido suas características e comportamento em níveis de tensão extremamente baixo. O diodo BAT54 utilizado na saída dos circuitos possui uma corrente de fuga de 2 μA e é o principal componente (além dos conversores) que consome energia durante o *harvesting*. Este consumo é somado ao dos conversores e apresentado na segunda coluna da Tabela 7. Os valores apresentados como consumo médio quando o circuito não está convertendo energia servem como aproximação para o consumo quando os mesmos estão operando. Os componentes utilizados na composição dos circuitos conversores deste projeto são os modelos comerciais recomendados pelo fabricante.

5 CONCLUSÃO

O projeto do *Payload* apresentado neste trabalho, propõe três conjuntos para o *harvesting* termoelétrico. Um circuito eletrônico é proposto, capaz de gerenciar o módulo, monitorar os níveis de temperatura e tensão, além de transmitir os dados para o computador de bordo. O objetivo principal do trabalho foi alcançado. O desenvolvimento de um módulo que avalie o potencial energético para o aproveitamento da energia termoelétrica em missões espaciais de microssatélites foi bem-sucedido. O módulo de *harvesting* passou por simulações em perfis de temperatura simulando condições de órbita e testes em bancada. Os resultados obtidos nos experimentos realizados foi satisfatório, retornando o melhor conjunto (entre os propostos) para realização de *harvesting*.

Os três conversores propostos foram comparados em vários quesitos. Na avaliação qualitativa o modelo LTC3109 obteve o melhor resultado no que diz respeito ao aproveitamento do tempo de órbita. Porém, aplicando o circuito gerenciador de polaridade aos demais conversores, o resultado atingido foi equiparável ao modelo LTC3108 bipolar. O modelo LTC3108 obteve um aproveitamento bem próximo ao LTC3109. Isto era esperado, uma vez que o próprio fabricante considera o modelo LTC3109 uma versão com bipolaridade do modelo LTC3108. O modelo BQ25570 apresentou mais problemas para iniciar sua operação. Em perfis de temperatura onde o gradiente é inferior à 15 °C o conversor não entrou em operação.

Na avaliação de geração e conversão de energia, destaca-se o desempenho do modelo BQ25570 que obteve um aproveitamento extremamente elevado em comparação aos modelos LTC. Este aproveitamento chegou a ser aproximadamente 30% melhor que o segundo colocado (LTC3109) na geração de energia do perfil 1 de temperatura. Os modelos LTC tiveram um aproveitamento equivalente. Para geração no perfil 1, o LTC3109 obteve melhor desempenho comparado ao LTC3108. Para o gradiente fixo, o LTC3108 foi melhor que o LTC3109. Em todos os casos, o modelo BQ25570 apresentou o melhor aproveitamento, seja em gradientes variáveis ou fixos.

Os supercapacitores assim como o conjunto de capacitores de tântalo foram testados e comparados em relação às suas características e desempenho. O capacitor de tântalo de 1 mF (modelo TPSE108M006R0100) utilizado nos experimentos obteve um resultado péssimo se comparado aos supercapacitores. Isto foi devido à elevada corrente de fuga e a baixa

capacitância deste modelo. Nos testes realizados, o capacitor não conseguiu manter o nível de tensão após o carregamento (lembrando que a corrente de retorno no diodo colabora com a descarga do capacitor de armazenamento). Além disso, a sua baixa capacitância não permitiria aplicações que exijam mais energia. Os supercapacitores de 5 F colocados em série (modelo BCAP0005P270T01) por outro lado, obtiveram um bom resultado minimizando as correntes de fuga. O problema neste caso foi o tempo de carregamento. Mesmo utilizando a alta eficiência do conversor BQ25570 o modelo levaria de 8 a 9 horas para atingir 5 V utilizando um gradiente de 15 °C. Este período é quase o mesmo que o modelo LTC3108 demorou para carregar o supercapacitor de 1 F. O modelo de supercapacitor de 1 F (modelo EECF5R5H105) apresentou um bom equilíbrio entre energia máxima fornecida e tempo de carregamento.

Cada conjunto conversor-capacitor foi testado para cada um dos perfis de temperatura obtidos numericamente que representam as temperaturas nas faces do *cubesat* durante uma órbita. Foi identificado que cada modelo de TEG pode obter melhor desempenho em órbitas diferentes. O modelo TGPR-4W-4V-40S gerou mais energia durante os testes com o perfil 1 (obtendo 51,44 Joules), operando em circuito aberto. Já o modelo TGPR-10W-5V-40S gerou mais energia no perfil 3 (obtendo 105,93 Joules). O resultado mostra que a escolha do TEG influencia diretamente na qualidade e na capacidade de geração para os mesmos gradientes de temperatura, mesmas dimensões e com deslocamento de temperatura diferente. Utilizando o modelo de TEG TGPR-10W-5V-40S foi possível carregar o supercapacitor de 1F em menos de um ciclo de órbita utilizando o modelo de conversor BQ25570. A energia disponível após 1 hora e 6 min. foi de 12,3 Joules. O melhor resultado entre todas as topologias disponíveis. Em todos os testes apresentados onde o conjunto BQ25570 e Supercapacitor de 1 F entram em operação, estes obtiveram os melhores resultados.

Por fim, foi estimado o consumo médio para cada um dos conversores. O modelo BQ25570 novamente apresentou os melhores valores. A corrente quiescente deste conversor é de 0.488 μ A. Os modelos LTC apresentam uma corrente quiescente 15 vezes maior.

A utilização deste *Payload* em aplicações que exijam correntes elevadas deve ser estudado uma vez que os supercapacitores apresentados neste trabalho possuem uma corrente limitada de descarga. Os resultados apresentados neste trabalho apontam a utilização do modelo BQ25570 com circuito de bipolaridade (juntamente com um supercapacitor de baixa corrente de fuga) como uma ótima escolha para aplicações reais de missões espaciais em *cubesat*. Se a garantia de um mínimo gradiente de 15 °C for atendida, este modelo compensa o

período inativo utilizando a sua alta eficiência. Para fins de garantia da missão, pode-se propor uma solução híbrida utilizando um modelo LTC3109 para aproveitamento da fonte em gradientes menores (mínimo 2 °C). Para isso, os conversores devem possuir relés ópticos em suas entradas e saídas para garantir o isolamento entre as topologias. Um microcontrolador de baixo consumo como o MSP430 apresentado neste trabalho pode realizar o gerenciamento habilitando os conversores para as situações em que possua o melhor desempenho. Os estudos apresentados são pioneiros neste tipo de aplicação. Por fim, este trabalho pode ser utilizado como base para inúmeros outros que virão.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Em adicional as análises apresentadas, poderiam ser aplicadas variações dos componentes e circuitos apresentados. Porém, devido ao tempo de estudo empregado neste trabalho não foi possível implementar estas variações. Um exemplo é a substituição dos transformadores *coilcraft* para diferentes relações (1:20, 1:50 e 1:100) para os modelos LTC. Esta mudança implicaria no deslocamento do ponto de máxima eficiência esperado. A tensão de saída também poderia ser alterada de 5 V para 3,3 V, ou até mesmo 1,8 V, a fim de comparar a energia total aproveitada em cada perfil de temperatura. Mudar a tensão de saída reduziria o consumo dos componentes responsáveis por elevar o nível de tensão. Um segundo modelo com MPPT incluso pode ser testado no lugar do BQ25570. O BQ25505 mantém sua partida a frio até 330 mV, ou seja, uma diferença de 270 mV para o modelo atual utilizado. Esta diferença faz com que a topologia inicie seu carregamento máximo em um menor tempo. Além disso, possui o mesmo *footprint* do BQ25570 facilitando sua inclusão nos testes. Infelizmente, não foi possível obter este modelo antes da conclusão deste trabalho. Para ampliar as possibilidades, outros modelos de conversores também poderiam ser incluídos na análise do *Payload*. Para isto necessitaria de um novo projeto de PCB. Ainda sobre as possibilidades e variações, outros modelos de TEG podem ser adquiridos para atingir níveis maiores de tensão, ou valores específicos de resistência equivalente para melhor aproveitamento da energia gerada.

Para trabalho futuros pode-se aplicar as variações do circuito já desenvolvido para realizar novos testes em bancada. Outros métodos para o aproveitamento da energia termoelétrica também podem ser utilizados como, por exemplo, utilizar mais de um TEG conectado em série. Aplicar outras técnicas para obtenção de resistência equivalente entre

fonte e conversor também é uma opção de trabalho futuro. Conforme descrito anteriormente, os trabalhos futuros possuem inúmeros caminhos a serem seguidos.

O protótipo de *Payload* apresentado neste trabalho deve ser testado em câmara vácuo térmica para validação dos componentes e dos dados obtidos. Aplicar as condições de operação em órbita garantirá o bom desempenho durante a missão.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, S.-E. et al. **Self-powered ultra-low power DC-DC converter for RF energy harvesting**. 2012 IEEE Faible Tension Faible Consommation. **Anais...** In: 2012 IEEE FAIBLE TENSION FAIBLE CONSOMMATION. jun. 2012
- ARRABAÇA, D. A.; GIMENEZ, S. P. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações eletrônica de potência - conceitos, metodologia de análise e simulação**. São Paulo: Érica, 2013.
- AUDIFFRED, D. et al. **Experimental analysis of thermoelectric energy generation for nanosatellites**. . In: 2ST IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP. 2016
- BASSI, G. et al. **A 150mV-1.2V fully-integrated DC-DC converter for Thermal Energy Harvesting**. Automation and Motion International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives. **Anais...** In: AUTOMATION AND MOTION INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES. jun. 2012
- BECKER, M. P. et al. **Automação de um sistema caracterizador de dispositivos termoeletrônicos**. Joinville, SC, 2016.
- BORBA, A. C. DE et al. **Análise experimental e analítica de geradores termoeletrônicos aplicados em nanossatélites**. Joinville, SC, 2019.
- BUZILO, R. et al. **Approach to integrated energy harvesting voltage source based on novel active TEG array system**. 2014 IEEE Faible Tension Faible Consommation. **Anais...** In: 2014 IEEE FAIBLE TENSION FAIBLE CONSOMMATION. maio 2014
- CAILLAT, T. et al. **Status of Skutterudite-Based Segmented Thermoelectric Technology Components Development at JPL**. 23rd Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion Symposium on Space Nuclear Power and Propulsion STAIF 2006. **Anais...** In: SYMPOSIUM ON SPACE NUCLEAR POWER AND PROPULSION. New Mexico, Pasadena, CA: 2006Disponível em: <<https://trs.jpl.nasa.gov/>>
- CALTECH. **Brief history of thermoelectrics**. Disponível em: <<http://thermoelectrics.caltech.edu.>>. Acesso em: 16 out. 2018.
- CHIN, J. et al. **Cubesat 101 - Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers**. Disponível em: <<https://www.nasa.gov>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- 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**, v. 64, n. 11, p. 2918–2925, nov. 2015.
- 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**, v. 239, p. 1–7, 1 mar. 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**, v. 13, n. 3, p. 1550147716685423, 1 mar. 2017.

DUNN, W. C. **Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processos**. [s.l.] Bookman Editora, 2013.

FRANTZ, G.; FREEMAN, D.; LINK, C. Approaching the horizon of energy harvesting. **TI technology opens new frontiers for perpetual devices**, p. 7, 2012.

FUJITSU. **FRAM - Memória Ferroelétrica de Acesso Aleatório não volátil**. Disponível em: <https://www.fujitsu.com/us/Images/SPBG_FRAM_Overview_BR_PT.pdf>. Acesso em: 23 maio. 2018.

GOUPIL, C. et al. Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications. **Entropy**, v. 13, n. 8, p. 1481–1517, ago. 2011.

JOHNSON, C. D. **Process control instrumentation technology**. London: Pearson, 2014.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **Datasheet: LTC3108 - Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager**, 2010a. Disponível em: <<http://cds.linear.com>>

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **Datasheet: LTC3109 - Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager**, 2010b. Disponível em: <<http://cds.linear.com>>

LUKOWICZ, M. VON et al. Thermoelectric Generators on Satellites—An Approach for Waste Heat Recovery in Space. **Energies**, v. 9, n. 7, p. 541, 14 jul. 2016.

MATEU, L.; MOLL, F. **Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics**. VLSI Circuits and Systems II. **Anais...** In: VLSI CIRCUITS AND SYSTEMS II. International Society for Optics and Photonics, 30 jun. 2005

MOHAN, N.; SOUZA, J. R. **Eletrônica De Potência - Curso Introdotório**. Brasil: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS. **LabView**. . Acesso em: 2 jul. 2018.

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

OSTRUFKA, A. L. A. et al. Experimental evaluation of thermoelectric generators for nanosatellites application. **Acta Astronautica**, v. 162, p. 32–40, 1 set. 2019.

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

PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy Harvesting Technologies**. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2008.

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

RICHELLI, A.; COLALONGO, L.; KOVACS-VAJNA, Z. **A Review of DC/DC Converters for Ultra Low Voltage Energy Harvesting.** Text. Disponível em: <<https://www.ingentaconnect.com>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

ROSA, A. **Processos de Energia Renováveis.** [s.l.] Elsevier Brasil, 2016.

ROWE, D. M. Applications of nuclear-powered thermoelectric generators in space. **Applied Energy**, v. 40, n. 4, p. 241–271, 1 jan. 1991.

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.** Proceedings of the 2st IAA Latin American Cubesat Workshop. **Anais...** In: 2ST IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP. Chantal Cappelletti, Eduardo Augusto Bezerra, Kleber Vieira de Paiva, 2016

TEXAS INSTRUMENTS. **bq25570 nano power boost charger and buck converter for energy harvester powered applications**Texas Instruments, , 2018a. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2019

TEXAS INSTRUMENTS. **Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE).** Disponível em: <<http://www.ti.com>>. Acesso em: 15 maio. 2018b.

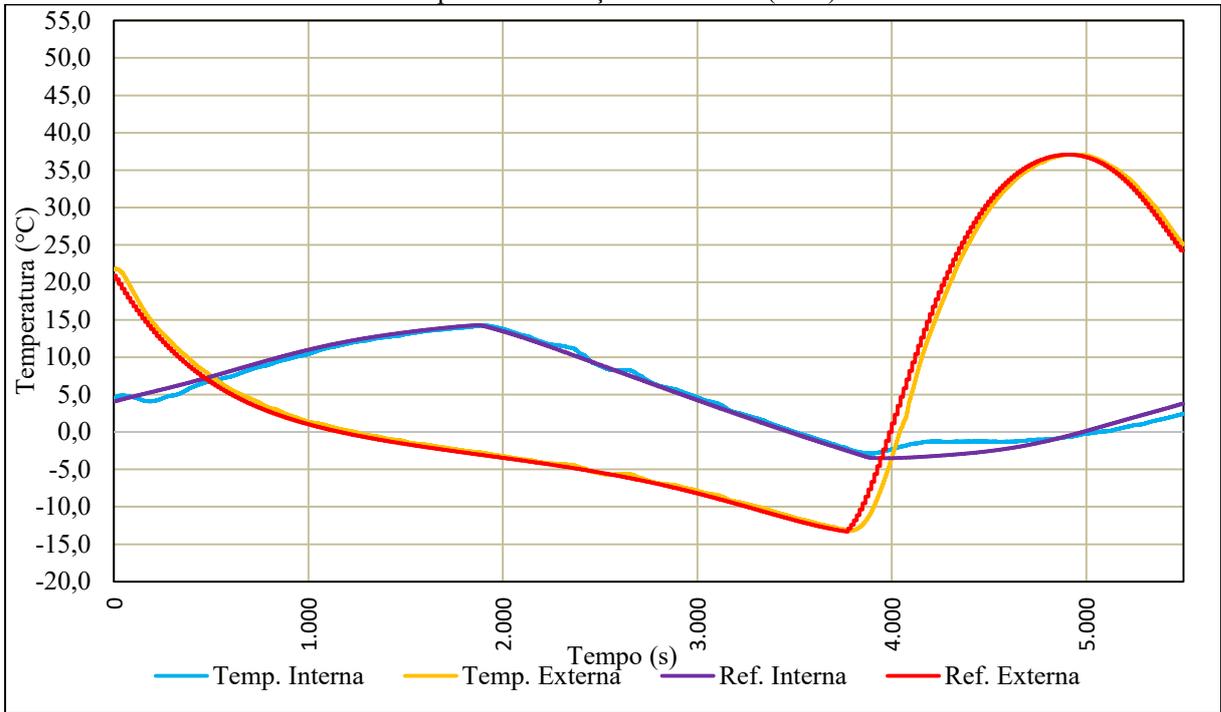
VILLA, P. R. C. et al. **A complete CubeSat mission: the Floripa-Sat experience.** Proceedings of the 1st IAA Latin American Cubesat Workshop. **Anais...** In: 1ST IAA LATIN AMERICAN CUBESAT WORKSHOP. Chantal Cappelletti, Eduardo Augusto Bezerra, 2014

WIN, K. K.; DASGUPTA, S.; PANDA, S. K. **An optimized MPPT circuit for thermoelectric energy harvester for low power applications.** 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. **Anais...** In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS - ECCE ASIA. maio 2011

YILDIZ, F. Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques. **The Journal of Technology Studies**, v. 35, n. 1, 2009.

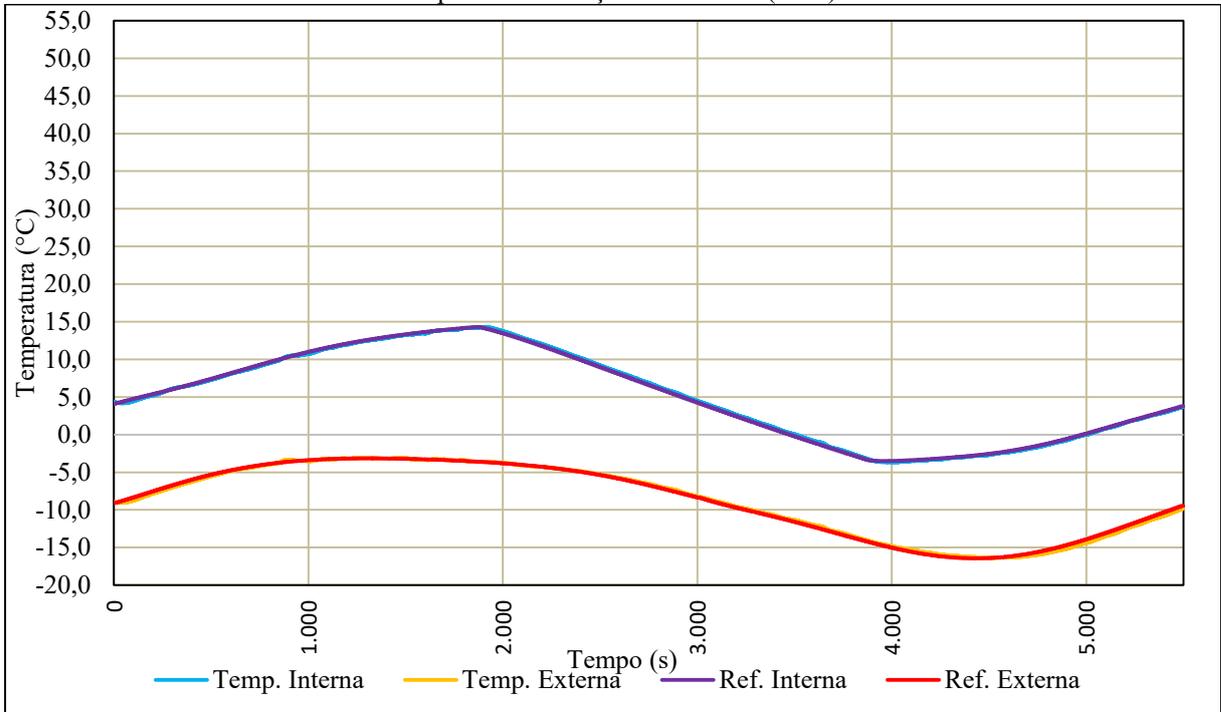
APÊNDICE A – Validação da Bancada. Perfis de Temperatura do *Cubesat*

Temperatura - Posição da Célula 1 (TEG)



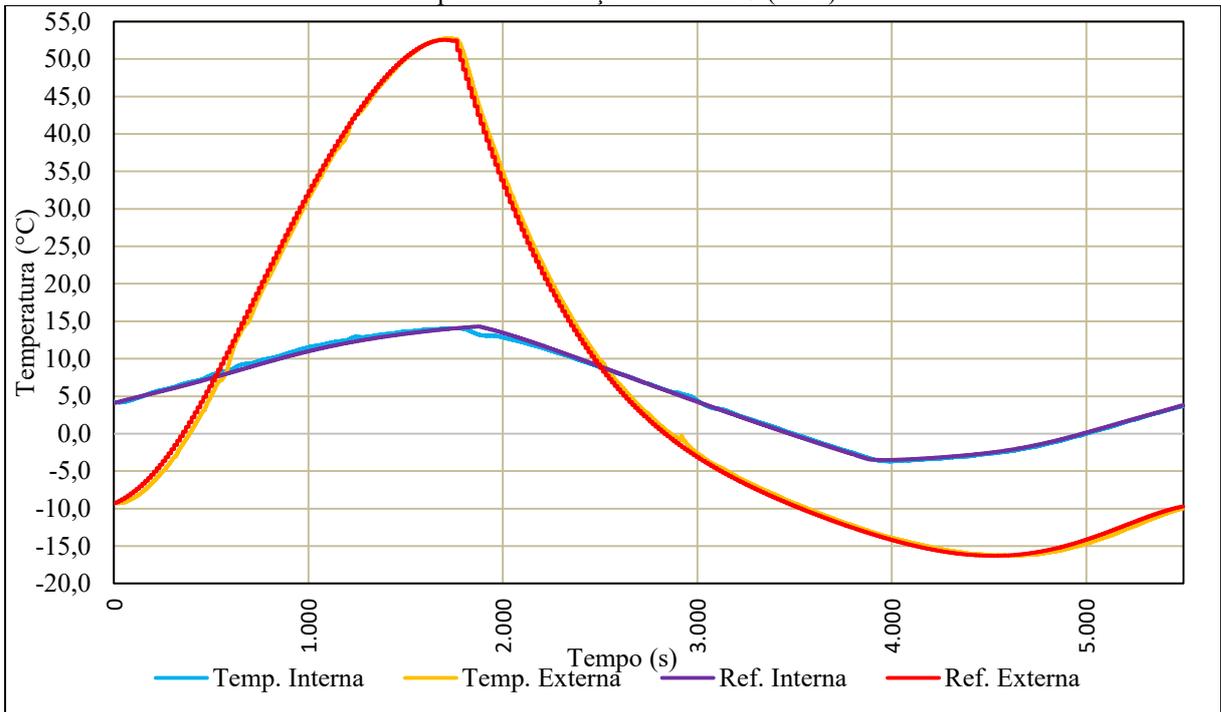
Fonte: Autor (2019).

Temperatura - Posição da Célula 2 (TEG)



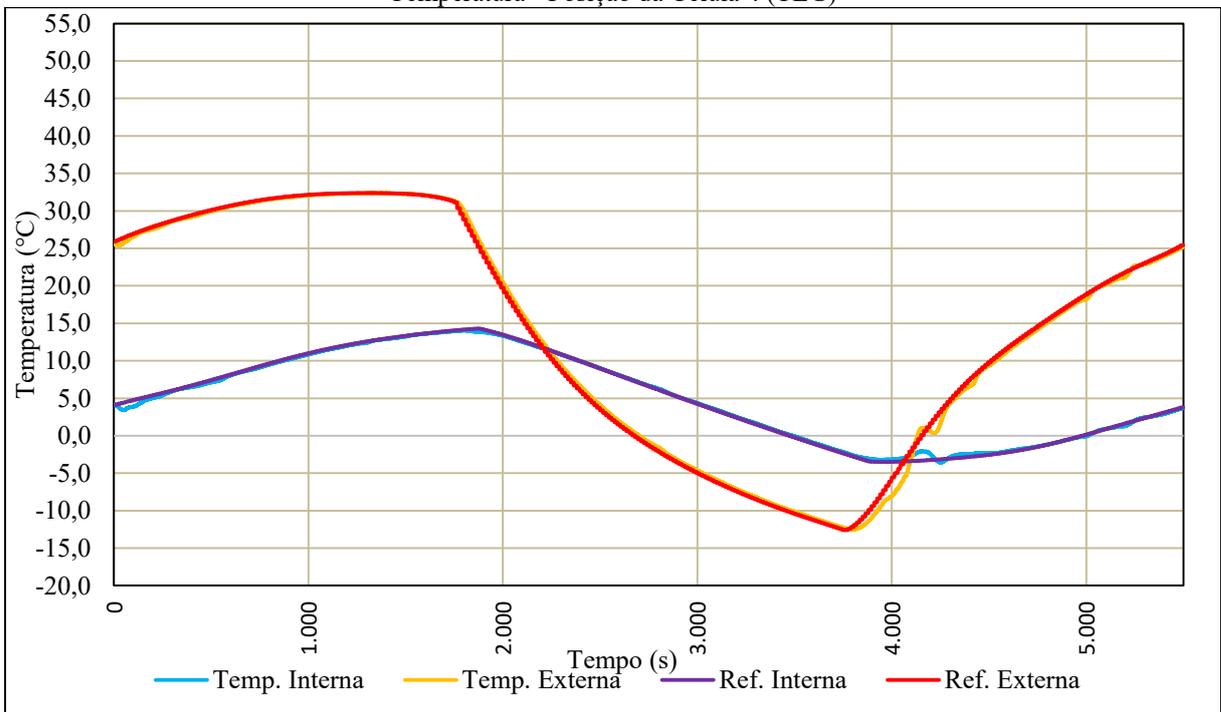
Fonte: Autor (2019).

Temperatura - Posição da Célula 3 (TEG)



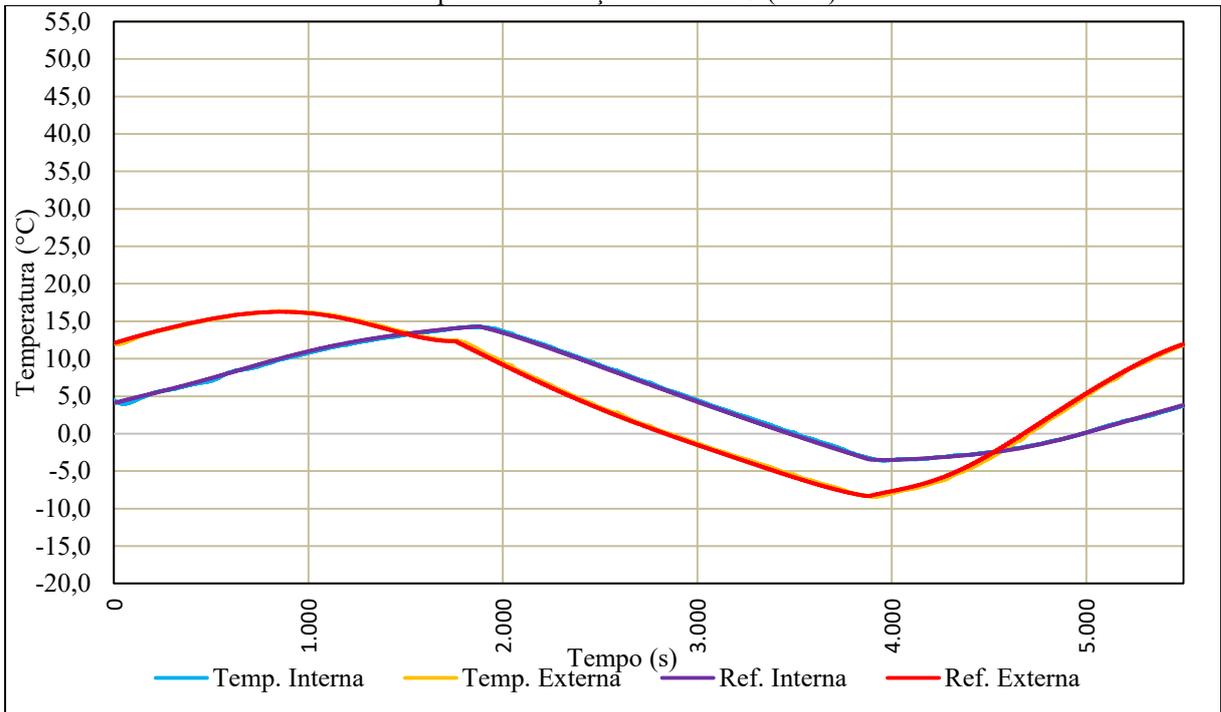
Fonte: Autor (2019).

Temperatura - Posição da Célula 4 (TEG)



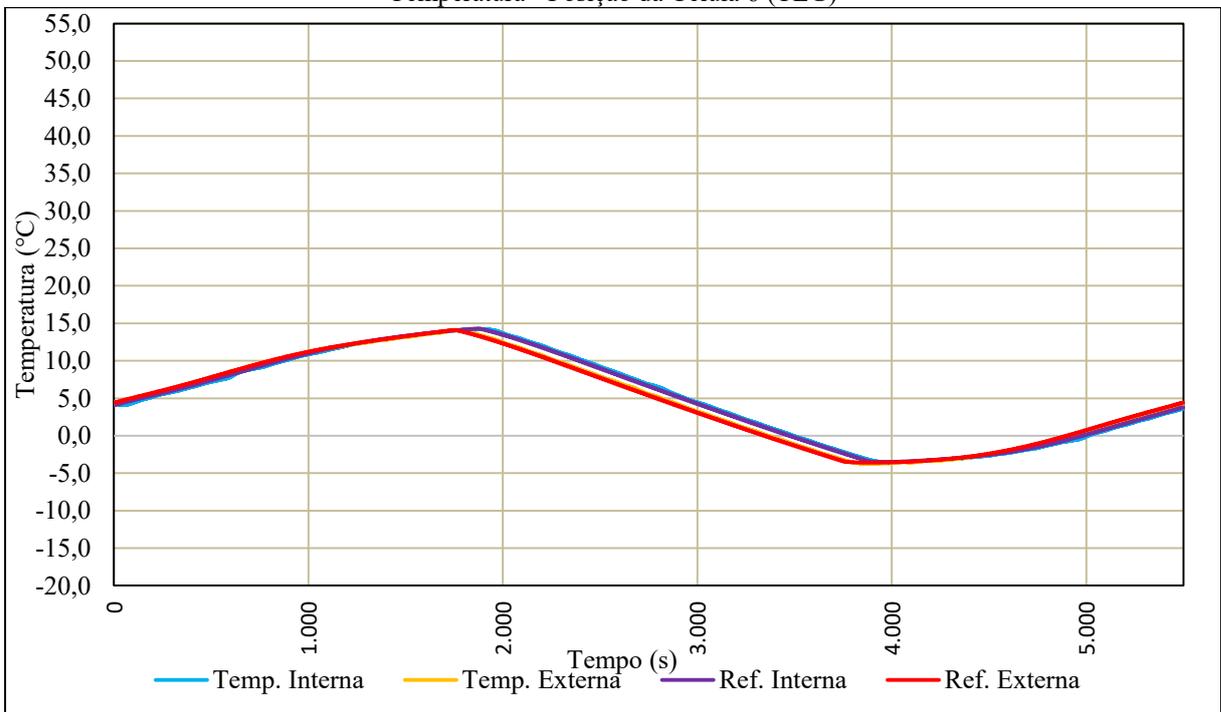
Fonte: Autor (2019).

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*

