

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

ANDRÉ LUIZ ALCANTARA OSTRUFKA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POSICIONAMENTO DE UM GERADOR
TERMOELÉTRICO EM CUBESATs

JOINVILLE

2017

ANDRÉ LUIZ ALCANTARA OSTRUFKA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POSICIONAMENTO DE UM GERADOR
TERMOELÉTRICO EM CUBESATs

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Aeroespacial, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Dr. Anderson Wedderhoff Spengler
Coorientador: Dr. Kleber Vieira de Paiva

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelas oportunidades concedidas ao longo de minha vida que me permitiram chegar até este momento.

Também agradeço a toda minha família pelo constante apoio e incentivo aos estudos e pelo auxílio em diversas áreas da minha vida.

A todos os professores e colaboradores da UFSC Campus Joinville aos quais tive a oportunidade de conviver ao longo da graduação, seja por meio de aulas, grupos de pesquisas, entre outras atividades.

Aos colegas que ao longo dos semestres me ajudaram de diversas formas, como no estudo coletivo, conversas e explicações, trabalhos em equipe e a amizade dentro e fora da sala de aula.

Agradeço pelo apoio da banca avaliadora deste trabalho de conclusão de curso, em especial ao professor Kleber Paiva, que auxiliou muito no desenvolvimento do mesmo, disponibilizando toda a estrutura necessária de laboratório para a realização dos experimentos, e ao professor orientador Anderson Spengler, que sempre mostrou disponibilidade para ajudar e responder todas as dúvidas que surgiram ao longo do desenvolvimento, e por dar um forte apoio na construção e avaliação deste trabalho.

Por fim, também agradeço a todas as pessoas que de certa forma, mesmo indiretamente, contribuíram na minha trajetória acadêmica e ajudaram a tornar este momento uma realidade.

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar de forma experimental o desempenho de um gerador termoelétrico para a geração de energia através dos gradientes de temperatura aos quais um *CubeSat* pode ser submetido ao longo de uma órbita. O desempenho é avaliado de acordo com a capacidade de geração em diferentes configurações de posicionamento do TEG em relação as superfícies do nanossatélite, onde estão localizados os painéis solares. Além disso, também é avaliado o melhor caso para o uso de diferentes circuitos de *energy harvesting*, responsáveis por armazenar e gerenciar a energia gerada. A partir de dados dos perfis de temperatura das faces do FloripaSat, nanossatélite desenvolvido pela UFSC, foi possível simular experimentalmente a variação do gradiente de temperatura entre as faces do TEG para uma órbita com 51.5° de inclinação. Pretende-se através deste trabalho avaliar a capacidade do aparato experimental desenvolvido de reproduzir as condições encontradas no espaço, assim como analisar os resultados em diferentes configurações para que se encontre as opções que proporcionem uma maior eficiência na conversão de um gradiente de temperatura em energia, que pode ser reutilizada em outros sistemas do *CubeSat*. Como resultado, duas configurações de melhor desempenho foram encontradas, sendo referentes aos dois diferentes tipos de circuito de *energy harvesting* analisados, que apresentam características diferentes de captação da energia gerada pelo TEG.

Palavras-Chave: *CubeSat*. Geração de Energia. Gradiente de Temperatura. Dispositivos Termoelétricos. *Energy Harvesting*.

ABSTRACT

The present paper work has the objective of experimentally evaluate the performance of a thermoelectric generator for energy generation through the temperature gradients which a CubeSat can be submitted along an orbit. The performance is evaluated according to the generation capacity in different positioning configurations of the TEG in relation to the surfaces of the nanosatellite, where the solar panels are located. In addition, the best case is also evaluated for the use of different energy harvesting circuits, responsible for storing and managing the generated energy. From the data of the FloripaSat face temperature profiles, a nanosatellite developed by UFSC, it was possible to experimentally simulate the temperature gradient variation between the TEG faces for an orbit with 51.5° slope. The work developed aims to evaluate the capacity of the experimental apparatus to reproduce the conditions found in space, as well as to analyze the results in different configurations so that the options that provide a greater efficiency in the conversion of a temperature gradient into energy can be reused on other CubeSat systems. As a result, two configurations of better performance were found, being related to the two different types of energy harvesting circuit analyzed, which present different characteristics of capture of the energy generated by the TEG.

Key-Words: CubeSat. Energy Generation. Temperature Gradient. Thermoelectric Devices. Energy Harvesting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Comparação dimensional entre os <i>CubeSats</i> 1U, 1.5U, 2U e 3U.....	15
Figura 02: Número de <i>CubeSats</i> lançados a cada ano (2000-2015).....	15
Figura 03: Disposição dos subsistemas de um <i>CubeSat</i> dentro da estrutura.....	17
Figura 04: Estrutura de uma célula fotovoltaica.....	18
Figura 05: Circuito Efeito Seebeck.....	19
Figura 06: Circuito Efeito <i>Peltier</i>	20
Figura 07: Funcionamento de um módulo TEC.....	23
Figura 08: Arranjo interno de um TEC.....	23
Figura 09: Arranjo interno de um TEG.....	24
Figura 10: Representação de um STEG.....	25
Figura 11: Logo oficial do projeto FloripaSat	26
Figura 12: Modelo geométrico do FloripaSat e vista explodida dos componentes.....	27
Figura 13: Fases do satélite em órbita.....	28
Figura 14: Perfil de temperatura temporal para o ponto central das superfícies externas dos painéis solares para uma inclinação de 51.5°.....	29
Figura 15: Perfil de temperatura temporal para o ponto central da bateria para diferentes inclinações orbitais.....	29
Figura 16: Aparato experimental	30
Figura 17: Configuração geral do experimento.....	31
Figura 18: Configuração da bancada de testes.....	32
Figura 19: Bancada de Testes.....	33
Figura 20: Posicionamento dos termopares na bancada de testes.....	34
Figura 21: Unidade de aquisição, comunicação e registro de dados HP 34970A	35
Figura 22: TIVA C Series TM4C12G LaunchPad.....	36
Figura 23: Placa de circuito de ponte H.....	41
Figura 24: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1	44
Figura 25: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 3.....	45
Figura 26: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 5.....	46

Figura 27: Resistência interna do TEG para diferentes temperaturas.....	47
Figura 28: Curva de tensão ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1.....	48
Figura 29: Curva de potência ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
ADCS	Sistema de determinação e controle de atitude (do inglês <i>Attitude Determination & Control System</i>)
CCS	<i>Code Composer Studio</i>
C&DH	Subsistema de comando e tratamento de dados (do inglês <i>Command & Data Handling</i>)
CI	Circuito integrado
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
EPS	Subsistema de energia elétrica (do inglês <i>Electrical Power System</i>)
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês <i>Integrated Development Environment</i>)
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MSS	Subsistema estrutural mecânico (do inglês <i>Mechanical Structural System</i>)
MOSFET	Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (do inglês <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PS	Subsistema de carga útil (do inglês <i>Payload System</i>)
PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>)
STEG	Gerador termoelétrico solar (do inglês <i>Solar Thermoelectric Generator</i>)
TEC	Refrigerador termoelétrico (do inglês <i>Thermoelectric Cooler</i>)
TEG	Gerador termoelétrico (do inglês <i>Thermoelectric Generator</i>)
TT&C	Subsistema de telemetria, rastreamento e comando (do inglês <i>Telemetry, Tracking & Command</i>)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

V_0	Tensão gerada	[V]
α	Coefficiente de <i>Seebeck</i>	[V/K]
ΔT_{BA}	Gradiente de temperatura entre as junções B e A	[T]
q	Quantidade de calor	[W]
π	Coefficiente de <i>Peltier</i>	[W/A]
I	Corrente medida	[A]
T	Temperatura absoluta do sistema	[K]
β	Coefficiente de <i>Thomson</i>	[V/K]
Res	Resolução do sinal PWM	[–]
f_{PWM}	Frequência PWM	[Hz]
f_{clock}	Frequência de <i>clock</i> de operação	[Hz]
R_{in}	Resistência interna do TEG	[Ω]
T_{med}	Temperatura média entre as faces do TEG	[K]
P_{inst}	Potência Instantânea	[W]
V_{inst}	Tensão Instantânea	[V]
E	Energia gerada em uma órbita	[Wh]
ΔP_i	Erro padrão da potência gerada em um intervalo de tempo Δt	[W]
ΔE_i	Erro padrão da energia gerada em um intervalo de tempo Δt	[Wh]
ΔE_{Total}	Erro padrão total da potência gerada em uma órbita	[Wh]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1.	NANOSSATÉLITES – IMPORTÂNCIA E POTENCIAL	14
2.2.	SUBSISTEMAS DE UM NANOSSATÉLITE.....	16
2.3.	CAPTAÇÃO DE ENERGIA NO ESPAÇO.....	17
2.4.	EFEITO TERMOELÉTRICO.....	19
2.5.	DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS	22
2.6.	FLORIPASAT – NANOSSATÉLITE DA UFSC.....	25
2.7.	PERFIS DE TEMPERATURA DO FLORIPASAT AO LONGO DA ÓRBITA.....	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	BANCADA DE TESTES.....	32
3.2.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO	34
3.3.	MICROCONTROLADOR	36
3.4.	COMPUTADOR	36
3.4.1.	<i>Software LabVIEW</i>	37
3.4.2.	<i>Software Code Composer Studio</i>	39
3.5.	PONTE H.....	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1.	MELHORIAS REFERENTES AOS TRABALHOS ANTERIORES	42
4.2.	LIMITES FÍSICOS DA BANCADA DE TESTES.....	43
4.3.	ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA E ANÁLISE DE ERRO.....	47
4.4.	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM GERAÇÃO DE ENERGIA.....	51
4.5.	COMPARAÇÃO ENTRE CÉLULAS SOLARES E TEGs.....	53
5.	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57
	APÊNDICE A – Tabela de temperaturas de cada painel solar para um ângulo de inclinação de 51.5°	60

APÊNDICE B – Interface de usuário e páginas de diagrama de bloco em forma de diagrama de estados (Inicialização, Leituras, Conversão & Cálculo, Salva Dados, Envio e Finalização).....	61
APÊNDICE C – Código implementado no CCS para geração de sinais PWM.....	68
APÊNDICE D – Esquemático do circuito de ponte H.....	74
APÊNDICE E – Gráficos de temperatura, tensão e potência gerados a partir dos testes em bancada experimental para as 6 configurações de posição nos painéis solares (Célula 1 – 6).....	75

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor espacial pode trazer inúmeros avanços para a nação em diversas áreas. Além do domínio de novas tecnologias, que podem ser revertidas posteriormente em aplicações diretas à população, muitos benefícios para a sociedade e para o meio ambiente também podem ser alcançados com investimentos neste setor.

Segundo pesquisa realizada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2009), apenas cerca de 6% da população brasileira considera a exploração espacial como sendo uma área importante a ser desenvolvida pelo país, o que enfatiza a falta de conhecimento popular sobre as vantagens do avanço espacial.

O setor espacial é uma área estratégica para o país, porém, há necessidade de um alto investimento para que este se desenvolva, uma vez que esta tecnologia impõe custos altíssimos de componentes, materiais e conhecimentos técnicos. De acordo com Rodrigues (2015), o orçamento anual de 122 milhões de dólares da Agência Espacial Brasileira (AEB), que já é muito baixo quando comparado a outros países cujo programa espacial é mais desenvolvido, sofreu corte de 14% em 2015. Sendo assim, o Brasil precisa encontrar maneiras viáveis de desenvolver o setor espacial nacional com o baixo recurso disponível, pois uma vez que resultados relevantes vão sendo concretizados, maior se torna o reconhecimento da importância do mesmo.

Os nanossatélites, classificados por possuírem uma massa entre 1 e 10 kg, podem ser excelentes soluções para missões espaciais de baixa órbita de cunho científico e acadêmico, como análise de lixo espacial, testes de cargas úteis em micro gravidade, mapeamento da superfície terrestre, entre muitas outras aplicações, uma vez que eles têm a capacidade de promover resultados muito significativos com um custo muito baixo (WAYDO, 2002).

Monserrat Filho (2013, p. 1) comenta sobre a importância da aplicação de soluções de baixo custo para o desenvolvimento espacial, e destaca que “[...] Hoje, o uso de pequenos, micros e nanossatélites é tendência universal sem volta”. Além disso, as missões envolvendo satélites de pequeno porte, como os *CubeSats*, que são uma configuração padrão de nanossatélites, possuem aplicações muito amplas, tornando cada missão uma praticamente única, dependendo dos objetivos e do tipo de carga útil considerada, assim como sua

configuração e localização geográfica. Portanto, mesmo existindo inúmeras missões já realizadas e documentadas pelo mundo, ainda existe um campo enorme a ser explorado, principalmente no Brasil, onde esse tipo de iniciativa está dando seus primeiros passos e ainda existe muito a ser explorado.

Dentre as inúmeras áreas de conhecimento necessárias para o desenvolvimento de um satélite, a captação e armazenamento de energia se mostra como uma das mais desafiadoras, uma vez que os recursos no espaço são bastante limitados. Por esse motivo, pesquisas sobre diferentes formas de gerar ou reutilizar energia no espaço, como é o caso dos dispositivos termoelétricos, vem crescendo muito, desencadeando avanços em tecnologia, novos equipamentos e materiais.

Sendo assim, o presente trabalho de conclusão de curso apresenta uma avaliação experimental do desempenho de um dispositivo termoelétrico na geração de energia (TEG) através de gradientes de temperatura encontrados no espaço. Através de simulações de variação dos gradientes de temperatura de forma experimental, pode-se avaliar o desempenho do TEG durante uma órbita planejada para a missão de nanossatélites, além de validar o desempenho do aparato experimental e avaliar as condições de maior eficiência para a geração de energia utilizando este sistema. As informações aqui contidas serão utilizadas para o desenvolvimento de uma carga útil (experimento) no projeto FloripaSat, que está sendo desenvolvido pela UFSC, no departamento de Engenharia Elétrica/Eletrônica.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Avaliar experimentalmente o desempenho de um gerador termoelétrico em diferentes configurações de posicionamento em um *CubeSat* para a geração de energia através de gradientes de temperatura.

Objetivos Específicos

- Aperfeiçoar o aparato experimental utilizado em trabalhos anteriores para melhorar o desempenho dos resultados e possibilitar um controle dinâmico de temperatura ao longo dos experimentos;

- Simular as condições orbitais de temperatura às quais o TEG é submetido de forma experimental em laboratório;
- Avaliar o desempenho do aparato experimental para os testes de bancada;
- Analisar os resultados obtidos para determinar a configuração mais eficiente de posicionamento do gerador termoelétrico para diferentes circuitos de *energy harvesting*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

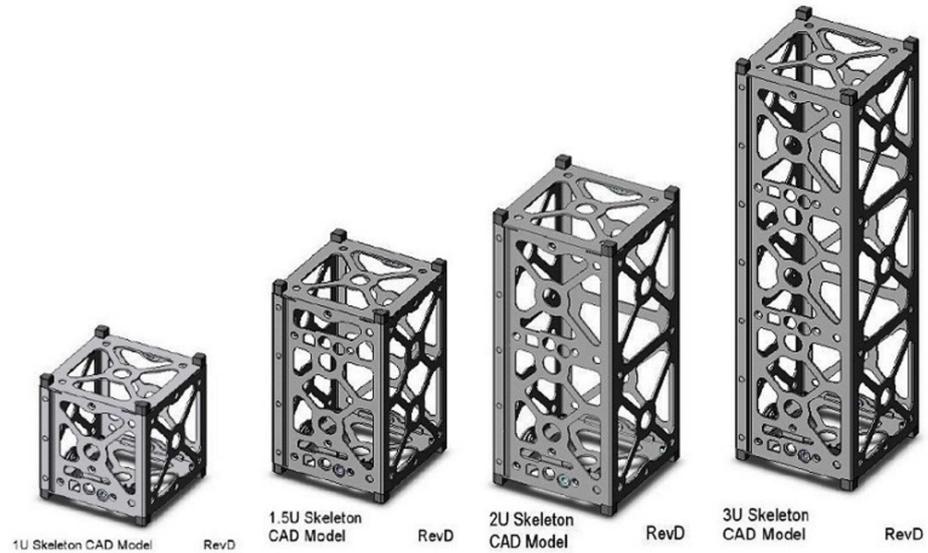
2.1. NANOSSATÉLITES – IMPORTÂNCIA E POTENCIAL

A exploração espacial sempre foi vista como uma área estratégica para os países, principalmente com os avanços tecnológicos e a crescente ascensão da conectividade e da globalização. O lançamento e operação de satélites, por exemplo, impulsionou não somente o desenvolvimento espacial, como também muitas outras áreas de suma importância para o mundo atual, como a comunicação, navegação, monitoramento da superfície terrestre, entre outras. Porém, durante longo período, o investimento no espaço era praticamente restrito a grandes governos e instituições de cooperação internacional, devido ao altíssimo custo necessário para desenvolver tal tecnologia.

Desde as últimas décadas, este cenário vem mudando cada vez mais, pois o surgimento de soluções que permitem que a exploração espacial se estenda para a iniciativa privada, assim como para as universidades e institutos de pesquisa, vem se tornando uma realidade. Os nanossatélites são um exemplo disso, uma vez que tornam possível o lançamento de satélites de pequeno porte e de órbita baixa com custos muito inferiores aos dos satélites convencionais, e de uma forma muito mais rápida.

O *CubeSat* é um conceito padrão de nanossatélite que surgiu em 1999, com a colaboração de trabalho entre os professores Jordi Puig Suari, da *California Polytechnic State University*, e Bob Twiggs, do *Stanford University's Space Systems Development Laboratory*. Eles desenvolveram o conceito de um satélite miniaturizado, com o principal objetivo de aplicação em pesquisas espaciais determinadas (GONZÁLEZ, 2014). Os *CubeSats* possuem uma unidade básica de dimensão e massa, também conhecida como *CubeSat* 1U, que consiste em um cubo de 10cm de aresta, com massa de no máximo 1.33kg. Porém, existem outras classes de *CubeSats* referente ao tamanho, onde cada uma equivale a uma variação do *CubeSat* 1U, como por exemplo, *CubeSat* 1.5U (15x10x10cm/2kg), *CubeSat* 2U (20x10x10 cm/2.66kg) e *CubeSat* 3U (30x10x10 cm/4kg). A Figura 01 ilustra de forma visual a diferença dimensional entre cada tipo de configuração de *CubeSat* discutida acima.

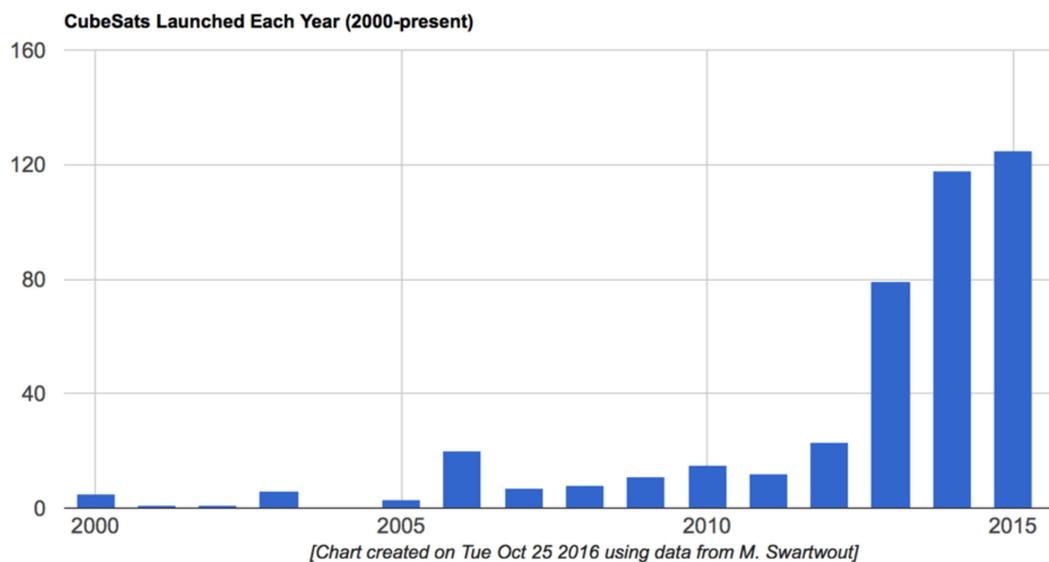
Figura 01: Comparação dimensional entre os *CubeSats* 1U, 1.5U, 2U e 3U



Fonte: NAIK (2013)

Após o surgimento deste conceito, o número de *CubeSats* em órbita vem crescendo ao longo dos anos, como mostra o gráfico da Figura 02. Porém, do ano de 2013 em diante, devido ao aumento da taxa de lançamentos, este crescimento vem se acentuando ainda mais, sendo que cerca de 125 satélites foram colocados em órbita somente no ano de 2015.

Figura 02: Número de *CubeSats* lançados a cada ano (2000-2015)



Fonte: SWARTWOUT (2016)

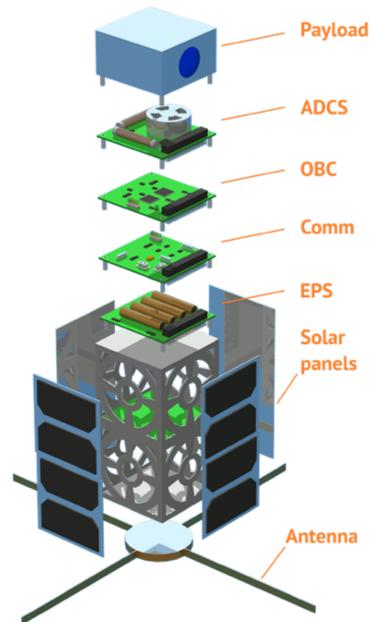
2.2. SUBSISTEMAS DE UM NANOSSATÉLITE

O ambiente espacial é um dos ambientes mais hostis já conhecidos pelo homem, isso faz com que o projeto e lançamento de satélites se tornem tarefas de grande complexidade, pois a plataforma deve suportar níveis altíssimos de radiação, enormes variações de temperatura, intensas vibrações durante o lançamento, e além disso tudo, deve funcionar de forma harmônica e sem falhas. Assim como para os satélites convencionais, com o intuito de facilitar o desenvolvimento dessas máquinas tão complexas, os nanossatélites são divididos em subsistemas, onde cada um é responsável por executar uma atividade vital para o funcionamento do satélite. Inicialmente, cada subsistema é, de certa maneira, tratado de forma individual, considerando requisitos globais de projeto que levam em consideração entradas e saídas esperadas para o sistema em específico, porém, inevitavelmente, existe a necessidade de que todos estes subsistemas sejam integrados e testados em conjunto. Os principais subsistemas que constituem um nanossatélite são:

- Subsistema de comando e tratamento de dados (*Command & Data Handling - C&DH*);
- Subsistema de telemetria, rastreamento e telecomando (*Telemetry, Tracking & Command - TT&C*);
- Subsistema de energia elétrica (*Electrical Power System - EPS*);
- Subsistema estrutural mecânico (*Mechanical Structure System - MSS*);
- Subsistema de determinação e controle de atitude (*Attitude Determination & Control System - ADCS*);
- Subsistema de carga útil (*Payload System - PS*);

A Figura 03 ilustra a vista explodida de um *CubeSat*, mostrando como cada subsistema pode ser depositado dentro da estrutura do satélite, enfatizando a integração de todos os sistemas e a otimização de espaço necessário para reduzir volume e massa. Neste trabalho, os dois principais subsistemas que estão mais diretamente relacionados com os objetivos propostos são o subsistema de carga útil e o subsistema de energia elétrica.

Figura 03: Deposição dos subsistemas de um *CubeSat* dentro da estrutura



Fonte: Autor Desconhecido

2.3. CAPTAÇÃO DE ENERGIA NO ESPAÇO

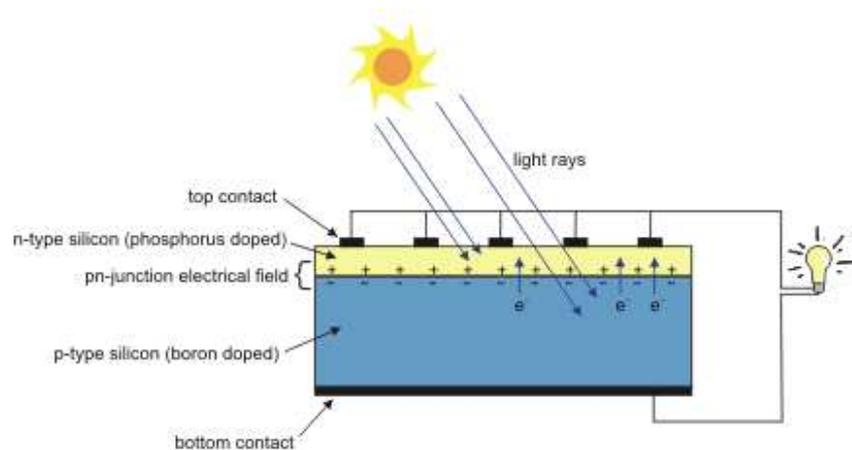
A captação é o processo onde a energia, provida de uma fonte qualquer, é capturada pelo sistema de energia da plataforma. As fontes de energia podem ser de natureza externa, como no caso do sol, que é a principal e mais comum fonte utilizada em satélites em geral, ou de natureza interna, quando o satélite carrega o equipamento ou material responsável por fornecer a energia necessária, como no caso de geradores químicos ou nucleares. *Energy Harvesting* é um termo usado para se referir ao processo de captação, armazenamento e gerenciamento de energia proveniente de uma fonte externa qualquer por um sistema ou plataforma.

A tecnologia espacial está atrelada a custos e investimentos muito altos, pois devido ao ambiente hostil encontrado, além da necessidade de mão de obra muito especializada para o desenvolvimento da tecnologia, os materiais e equipamentos utilizados devem possuir características especiais e específicas para este tipo de missão. Por estes motivos, fatores como massa, confiabilidade e custo são fundamentais em um projeto espacial, o que acaba gerando limitações para o desenvolvimento de alguns subsistemas. Devido a estas limitações e alguns outros fatores, diferente da terra, no espaço há um número mais limitado de maneiras para a captação ou geração de energia. O sol, sendo uma fonte energética muito poderosa, limpa e conveniente para aplicações espaciais, particularmente para satélites, é o principal

recurso utilizado para a captação de energia a bordo, uma vez que a energia contida na radiação solar pode ser convertida em energia elétrica através dos painéis solares ou células fotovoltaicas (ESA, 2003).

As células fotovoltaicas, dispositivos que convertem a luz solar diretamente em energia elétrica, são compostas por materiais semicondutores capazes de absorver a energia proveniente dos fótons da luz solar e criar um fluxo não balanceado de elétrons de um lado da célula a outro. As extremidades são conectadas por materiais metálicos, também chamados de eletrodos ou contatos, que permitem a movimentação dos elétrons, e este movimento gera a eletricidade (EFMS, 2009). A Figura 04 ilustra a estrutura de uma célula fotovoltaica e seu princípio de funcionamento.

Figura 04: Estrutura de uma célula fotovoltaica



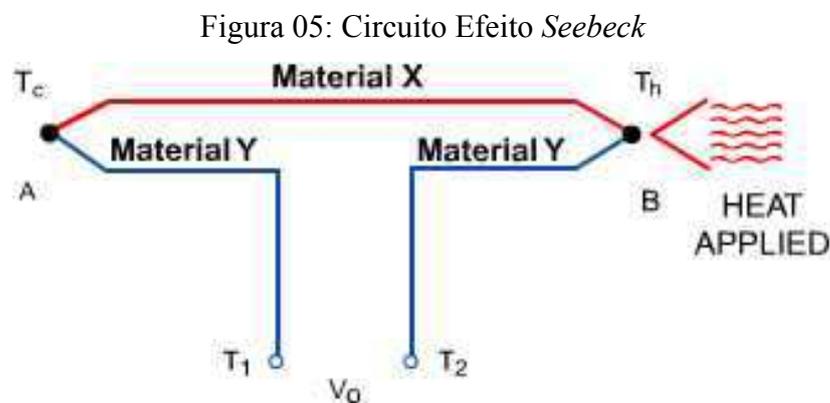
Fonte: NLPIP (2006)

Pela baixa necessidade de manutenção e pelo fato da menor influência atmosférica no espaço tornar o sol uma fonte energética mais eficiente do que na terra, as células fotovoltaicas se tornaram o principal recurso de captação de energia em satélites. Porém, a dependência do contato direto com os raios solares faz com que a captação de energia cesse nos momentos de eclipse, limitando a energia disponível ao que já fora armazenado em baterias ou proveniente de outras fontes. Por este motivo, estudos de novas formas de geração de energia no espaço que permitam uma captação contínua, principalmente quando a captação solar não é possível, vem crescendo nos últimos tempos, e os dispositivos termoeletrônicos são uma das alternativas encontradas para utilizar os gradientes de temperatura como fonte energética.

2.4. EFEITO TERMOELÉTRICO

O efeito termoelétrico consiste na conversão de um gradiente de temperatura em uma diferença de potencial elétrico, ou vice-versa. Segundo Ismail e Alaskalany (2014), este fenômeno pode ser descrito por três efeitos. O efeito *Seebeck* é a conversão de um gradiente de temperatura em uma tensão elétrica, o efeito *Peltier* consiste no processo inverso ao efeito *Seebeck*, ou seja, é a conversão de uma diferença de potencial elétrico em um diferencial de temperatura, e o efeito *Thomson* representa o fluxo de calor em um condutor com terminais em diferentes temperaturas.

Em 1821, o físico Thomas Johann Seebeck mostrou que uma força eletromotriz poderia ser produzida ao aquecer uma junção entre dois condutores elétricos diferentes, resultando em uma pequena tensão entre os terminais das extremidades. A combinação destes dois condutores recebeu o nome de termopar (GOLDSMID, 2010). Seebeck descobriu que ao gerar uma diferença de temperatura entre duas junções conectadas eletricamente em um circuito fechado, aquecendo uma e esfriando a outra, o efeito gerado conseguia defletir a agulha de uma bússola ao aproximá-la do dispositivo. Inicialmente, ele achou que conseguira converter energia térmica em campo magnético, porém, posteriormente descobriu que o campo magnético era gerado por uma corrente elétrica que surgia a partir de uma tensão eletromotriz (CREMALDI, 2009). Essa tensão pode ser medida entre os terminais das extremidades do conjunto, como mostrado na Figura 05. Os pontos A e B representam as junções entre os materiais X e Y, e ao aplicar o fluxo de calor no sentido B-A, uma tensão é gerada nos terminais T_2 e T_1 .



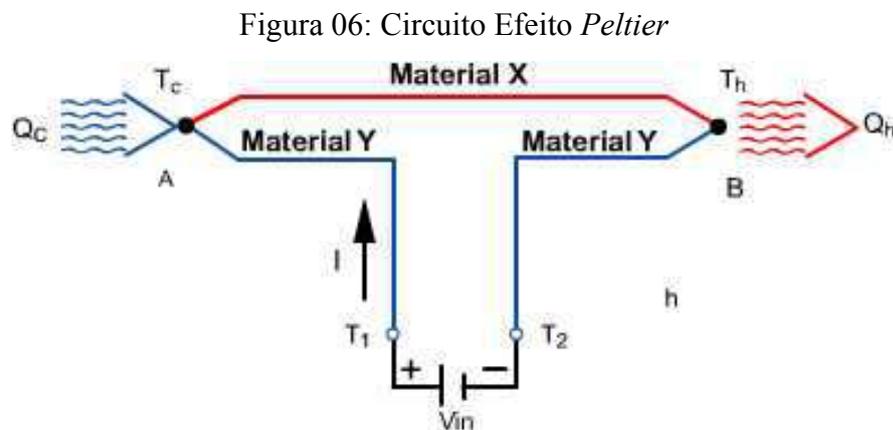
Fonte: FERROTEC (2017)

A magnitude da tensão gerada é diretamente proporcional a diferença de temperatura das junções, dependendo também dos materiais utilizados, que são representados pelo coeficiente de *Seebeck* na equação abaixo:

$$V_0 = \alpha \Delta T_{BA} \quad (1)$$

onde V_0 é a tensão gerada em Volts, α é o coeficiente *Seebeck*, dado em Volts/Kelvin, e ΔT_{BA} é a diferença de temperatura entre as junções B e A, medido em Kelvin.

De acordo com Cremaldi (2009), em 1834, o francês Jean Charles Athanase Peltier observou um segundo efeito termoelétrico, desta vez, realizando o processo inverso ao feito por Seebeck. Passando uma corrente entre os terminais do conjunto, foi possível identificar uma diferença de temperatura entre as duas junções, sendo o sentido da corrente determinante para saber qual lado aquece ou esfria. A Figura 06 ilustra o circuito demonstrativo do efeito *Peltier*.



Fonte: FERROTEC (2017)

O calor bombeado entre as junções B e A pode ser expresso através da equação abaixo, que associa a corrente aplicada e o coeficiente de *Peltier*, que assim como o coeficiente de *Seebeck*, depende dos materiais utilizados (ISMAIL; ALASKALANY, 2014).

$$q = \pi I \quad (2)$$

onde q é a quantidade de calor em Watts, π é o coeficiente de *Peltier*, dado em Watts/Ampere, e I é a corrente medida em Amperes.

A eficiência de conversão de energia térmica em energia elétrica em dispositivos termoelétricos depende principalmente do material utilizado, onde as propriedades elétricas, térmicas e a temperatura absoluta de operação têm grande importância. Para quantificar o efeito termoelétrico em um material, o número de mérito pode ser calculado, pois este consiste em uma medida da capacidade em transformar energia elétrica em térmica (AUDIFFRED, 2015). Os semicondutores são os principais materiais utilizados em dispositivos termoelétricos, pois apresentam valores de número de mérito maiores do que os outros materiais. O número de mérito pode ser calculado através da equação abaixo.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (3)$$

onde Z é o número de mérito medido em K^{-1} , k é a condutividade térmica medida em W/mK e ρ é a resistividade térmica medida em mK/W .

Finalmente, a dependência entre os dois efeitos anteriores foi descoberta apenas em 1855, por Willian Thomson, também conhecido como Lord Kelvin. Aplicando a teoria da termodinâmica sobre o problema, Thomson encontrou uma relação entre os coeficientes de *Seebeck* e *Peltier*, dado na equação abaixo (GOLDSMID, 2010).

$$\pi = \alpha T \quad (4)$$

onde T é a temperatura absoluta do sistema.

Além disso, Thomson propôs um terceiro efeito termoelétrico, chamado de efeito de *Thomson*, aplicável em condutores homogêneos. O efeito consiste no aquecimento ou resfriamento reversível quando há fluxo de corrente elétrica e gradiente de temperatura aplicados simultaneamente no sistema. A equação abaixo relaciona o calor absorvido ou gerado com a corrente elétrica e a variação de temperatura das junções através do coeficiente de *Thomson*.

$$q = \beta I \Delta T_{BA} \quad (5)$$

onde β é o coeficiente de *Thomson* medido em Volts/Kelvin.

2.5. DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS

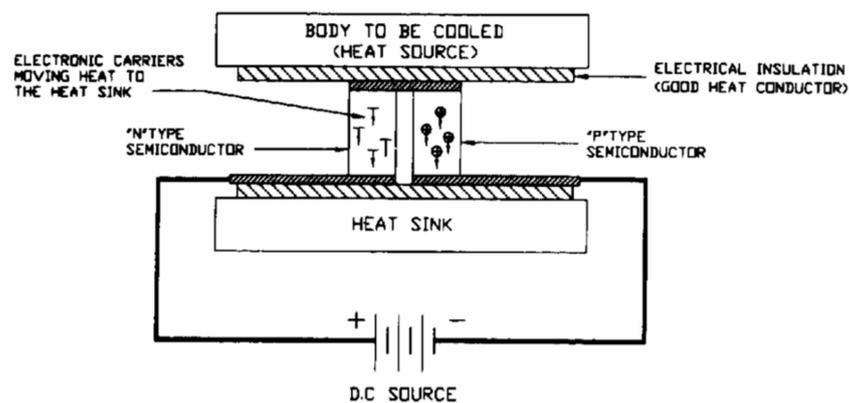
Os dispositivos termoelétricos podem ser aplicados em diversos setores, pois a possibilidade de refrigeração limpa e sem ruído, assim como o aproveitamento de energia perdida por calor dissipado é uma alternativa que interessa diferentes indústrias das mais variadas áreas de atuação, como por exemplo, o setor automotivo, espacial, alimentício, eletrônico, entre outros. Humel (2014) comenta que os dispositivos termoelétricos não precisam de partes mecânicas móveis para realizar a conversão de energia, o que resulta em uma baixa necessidade de manutenção e uma vida útil de operação muito longa, fato de relevante importância para aplicações espaciais. Além disso, a baixa massa, a possibilidade de ser compacto e utilizar a energia térmica associada aos altos gradientes de temperatura encontrados no ambiente espacial são características que destacam estes dispositivos para tais fins. Porém, conforme afirma Weisse (2010), a eficiência termoelétrica de tais dispositivos está na ordem de um sexto da eficiência máxima do ciclo de *Carnot*, o que torna a busca por melhor desempenho um grande desafio, pois isso depende muito do tipo de material utilizado.

Existem dois tipos principais de dispositivos termoelétricos, o primeiro opera de acordo com o efeito *Peltier* e é chamado de refrigerador termoelétrico ou TEC (*Thermoelectric Cooler*), devido à suas aplicações em refrigeração. O segundo tipo opera segundo o efeito *Seebeck* e é conhecido como gerador termoelétrico ou TEG (*Thermoelectric Generator*), utilizado para geração de energia a partir de uma fonte de calor.

O princípio de funcionamento de um TEC consiste em diversos elementos semicondutores de diferentes dopagens conectados entre si. Como mostrado na Figura 07, o módulo é composto por um elemento semicondutor do tipo n, característico por possuir muitos elétrons livres internamente, e um elemento semicondutor do tipo p, que apresenta lacunas em seu interior, ou seja, possui poucos elétrons no interior. Segundo Melcore (2006), ao ser aplicado uma tensão no sistema, cuja função é fornecer energia para movimentar os elétrons através do circuito, na junção fria, representada pela parte superior da Figura 07, a temperatura diminui e o calor externo é absorvida pelos elétrons a medida que eles passam de um nível energético baixo, no elemento do tipo p, para um nível energético alto, no elemento n. Uma vez absorvido, o calor é movido para a junção quente através do movimento dos elétrons, e então a energia é absorvida pelo sumidouro a medida que os elétrons passam de um nível energético alto no elemento n, para um nível energético baixo no elemento p.

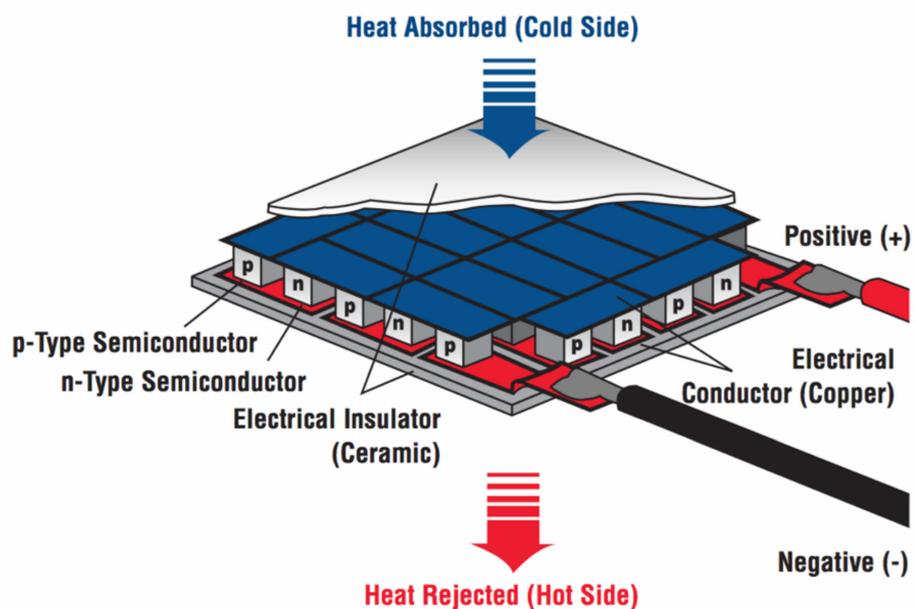
Os refrigeradores termoeétricos são formados por módulos compostos de vários conjuntos de pares semicondutores para que se possa aplicar uma tensão mais alta no sistema. Estes elementos são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, e fixados por soldagem entre placas cerâmicas com o intuito de isolar e proteger a estrutura interna (GROMOV, 2009). A Figura 08 ilustra o arranjo interno de um TEC contendo vários pares semicondutores.

Figura 07: Funcionamento de um módulo TEC



Fonte: MELCORE (2006)

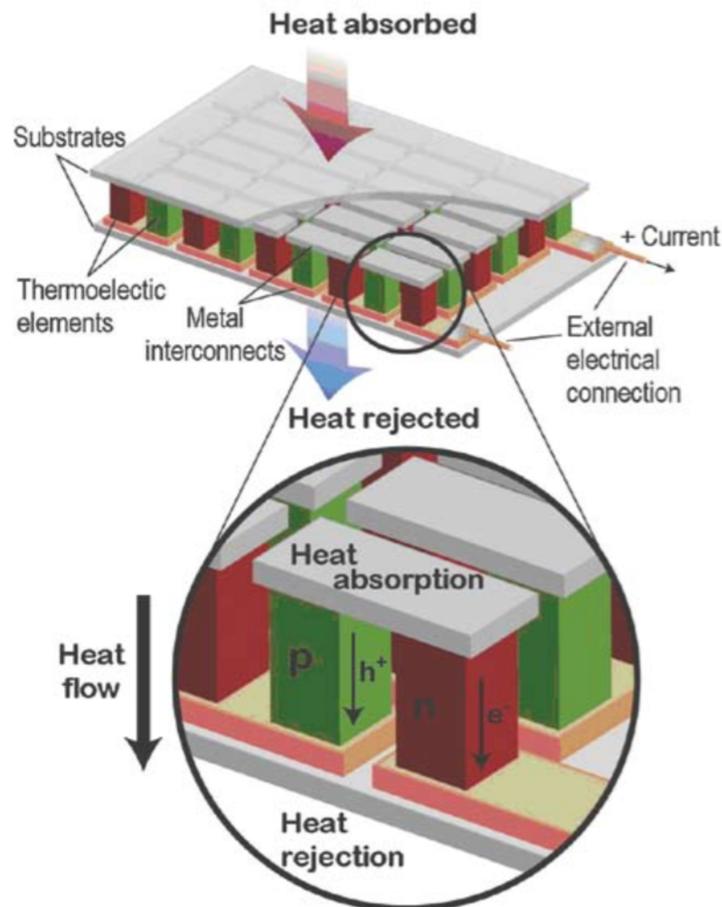
Figura 08: Arranjo interno de um TEC



Fonte: MELCORE (2006)

Os geradores termoelétricos possuem um princípio de funcionamento muito similar ao descrito acima para os TECs, porém, neste caso, um gradiente de temperatura externo é responsável por gerar uma tensão elétrica entre os terminais do dispositivo. Snyder e Toberer (2008) explicam que a medida que o fluxo de calor flui do lado quente para o frio, devido a configuração de elementos com elétrons em excesso e com lacunas, os portadores de elétrons livres também são deslocados para a junção fria. Conectando os elementos de tipo n e tipo p em série, é possível que uma tensão resultante seja produzida entre os terminais do TEG, como resultado da amplificação da tensão gerada por cada elemento. A Figura 09 apresenta o esquemático deste funcionamento.

Figura 09: Arranjo interno de um TEG

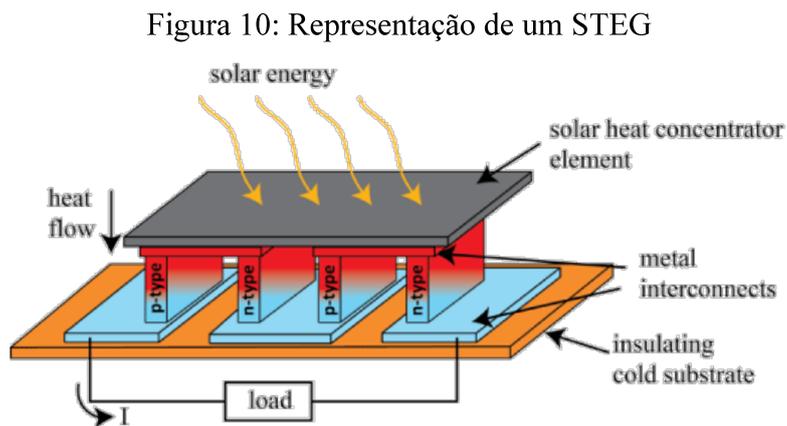


Fonte: SNYDER E TOBERER (2008)

Com o intuito de aumentar a eficiência dos dispositivos termoelétricos, novos estudos vêm sendo feitos para melhorar o desempenho de tais equipamentos, e a agregação de outras tecnologias com estes dispositivos se mostrou uma alternativa promissora. Os geradores

termoelétricos solares, ou STEGs (*Solar Thermoelectric Generators*), por exemplo, são uma aposta que promete ter a maior eficiência entre todos os dispositivos termoelétricos atuais.

Segundo Olsen et al. (2013), o STEG absorve a luz do sol e a transforma em calor através de um elemento concentrador de calor, que por sua vez, permite que o dispositivo termoelétrico a transforme em energia elétrica. A eficiência do dispositivo, portanto, depende tanto da eficiência de conversão da luz solar em calor, quanto da eficiência termoelétrica, ou seja, a eficiência total não é apenas referente a quantidade de luz solar absorvida pelo sistema, mas também depende da quantidade de calor perdido pela superfície. Olsen et al. (2013) também afirma que os STEGs têm o potencial de converter energia solar com uma eficiência maior que 15%, valor máximo obtido por um TEG de alta performance com um gradiente de temperatura de 200-1000 graus Celsius. A Figura 10 mostra uma representação de um STEG com seus principais componentes.



Fonte: QUINTANA et al. (2013)

2.6. FLORIPASAT – NANOSSATÉLITE DA UFSC

FloripaSat é um projeto vinculado ao programa UNIESPAÇO, que é promovido pela Agência Espacial Brasileira (AEB). Este projeto consiste no desenvolvimento de um *CubeSat* científico 1U feito por estudantes e professores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Seu principal objetivo é expor aos envolvidos a experiência de trabalhar em uma missão espacial completa, incluindo todos os módulos e subsistemas de um nanossatélite até a estação de solo, desenvolvendo assim seus conhecimentos em sistemas de engenharia e tecnologia espacial. A Figura 11 mostra a logo oficial do projeto FloripaSat.

Figura 11: Logo oficial do projeto FloripaSat



Fonte: UFSC (2017)

De acordo com UFSC (2017), a missão do *CubeSat* pode ser dividida em quatro objetivos principais, como descrito abaixo:

1. Projetar, construir e testar um satélite. Critério de sucesso: entrega de um satélite e estação de solo completamente testados e prontos para lançamento.
2. Lançar um satélite e comunicar-se com ele usando os sistemas do satélite e estação de solo. Critério de sucesso: Estabelecer uma conexão de rádio com a estação de solo e fazer o *download* da telemetria.
3. Desenvolver a maioria dos módulos usados na missão. Critério de sucesso: Avaliar a funcionalidade dos módulos no espaço.
4. Operar uma carga útil científica ou tecnológica de demonstração. Critério de sucesso: Receber dados da carga útil e confirmar operações.

O Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da UFSC é o responsável pelo desenvolvimento de uma das cargas úteis que serão embarcadas no FloripaSat, sendo que seu objetivo principal é a geração de energia através do gradiente de temperatura existente entre o interior e as faces do satélite, que são provenientes da presença ou ausência dos raios solares ao longo da órbita, utilizando um gerador termoelétrico. Esta carga útil será autônoma em termos de energia, ou seja, a energia gerada pelo sistema será revertida para a própria placa.

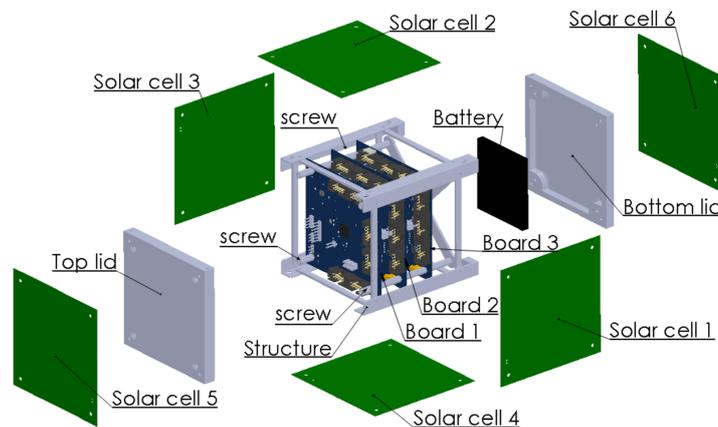
Neste contexto, o presente trabalho tem a função de dar sequência e contribuir com os trabalhos já desenvolvidos por Audiffred (2015) e Becker (2016). Audiffred (2015) realizou uma análise para verificar e validar a viabilidade do uso de um TEG para a geração de energia no espaço, enquanto Becker (2016) desenvolveu uma técnica experimental para realizar a medição da resistência interna do TEG durante os experimentos. Já no presente trabalho, o

objetivo foi simular a variação dos gradientes de temperatura do *CubeSat* de forma experimental, possibilitando assim avaliar o desempenho do TEG durante a órbita planejada para a missão do FloripaSat, além de validar o desempenho do aparato experimental e avaliar as condições de maior eficiência para a geração de energia utilizando este sistema.

2.7. PERFIS DE TEMPERATURA DO FLORIPASAT AO LONGO DA ÓRBITA

Filho et al. (2017) realizaram um trabalho de análise de performance térmica do FloripaSat de acordo com inclinações orbitais do satélite de 30° até 113.5° , considerando que uma das faces do *CubeSat* aponta sempre para a superfície terrestre. Para simular as temperaturas, Filho et al. (2017) utilizaram um modelo numérico térmico tridimensional, que utiliza parâmetros do FloripaSat para resolver equações de transferência de calor para todo o domínio do nanossatélite, baseando-se no método de volume finito. A Figura 12 mostra o modelo geométrico 3D com vista explodida do FloripaSat, cujo domínio foi discretizado por uma malha hexagonal de 1.357.484 volumes.

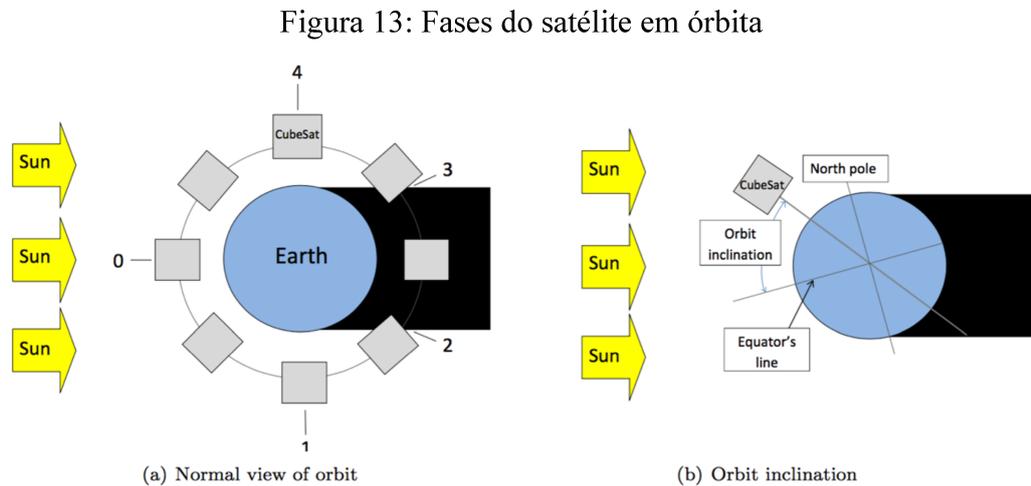
Figura 12: Modelo geométrico do FloripaSat e vista explodida dos componentes



Fonte: FILHO et al. (2017)

Para todos os casos estudados por Filho et al. (2017), que consideram uma órbita circular com altitude de 400km, a face contendo a célula solar 6 se mantém apontando para a terra e não gira em torno de seu próprio eixo. A Figura 13 (a) mostra como o fator de forma, que representa a área efetiva do satélite que recebe os raios solares, varia dependendo da posição do satélite na órbita. O fator de forma é o principal aspecto que determina o quanto

cada painel solar recebe de luz solar, o que está diretamente relacionado à quantidade de calor recebido e energia que o TEG consegue gerar em cada face. Já a Figura 13 (b) apresenta uma ilustração dos ângulos de inclinação de órbita, que se referem à inclinação do plano orbital do satélite em relação à linha do equador do planeta Terra.

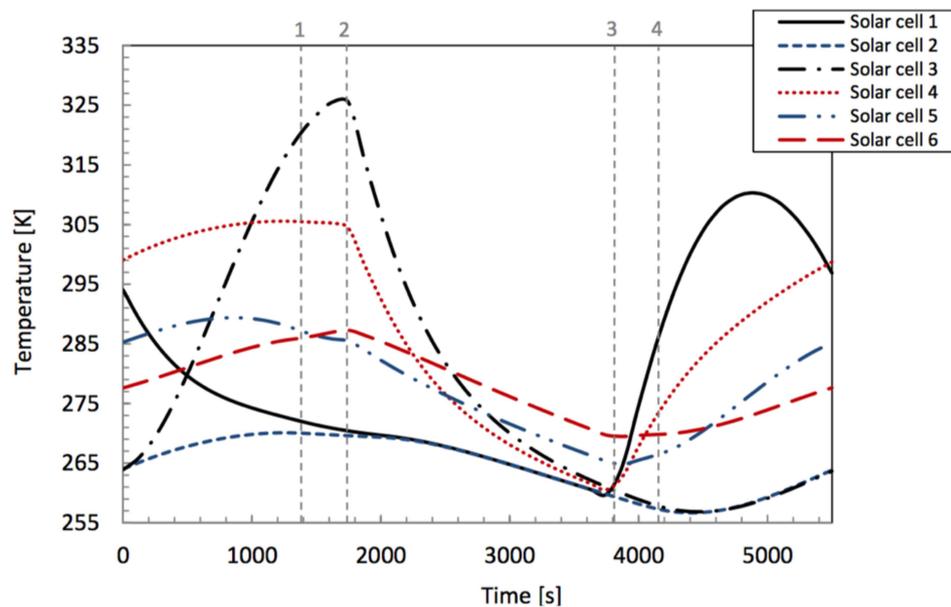


Fonte: FILHO et al. (2017)

No presente trabalho, o ângulo de inclinação orbital escolhido para a realização dos experimentos foi a de 51.5° , pois esta foi a configuração mais enfatizada no trabalho de Filho et al. (2017), sendo os resultados de fluxos de calor e distribuição de temperatura para uma órbita fixa em 51.5° apresentados e analisados de acordo com o comportamento físico esperado para um *CubeSat* em órbita baixa. As Figuras 14 e 15, que são provenientes das simulações feitas por Filho et al. (2017), mostram os perfis de temperatura de cada face do satélite para uma órbita de 51.5° de inclinação, e os perfis de temperatura do ponto central da bateria para todos os casos estudados, respectivamente. Os dados fonte utilizados para a criação dos gráficos mostrados nas Figuras 14 e 15 apresentam valores de temperatura simulados a cada 125 segundos ao longo da órbita de 5500 segundos, tempo estimado para a órbita escolhida para a missão do FloripaSat. A tabela contendo os valores de temperatura dos painéis solares e do ponto central da bateria, referentes ao ângulo de inclinação de 51.5° , podem ser encontrados no APÊNDICE A. Para realizar os experimentos em bancada utilizando os dispositivos termoeletricos, os dados de temperatura gerados por Filho et al. (2017) foram utilizados como referência, porém, o intervalo entre cada ponto de temperatura simulada é de 125 segundos. Para que houvesse uma maior precisão e transições mais suaves de temperatura ao longo do experimento, foi necessário fazer uma interpolação exponencial

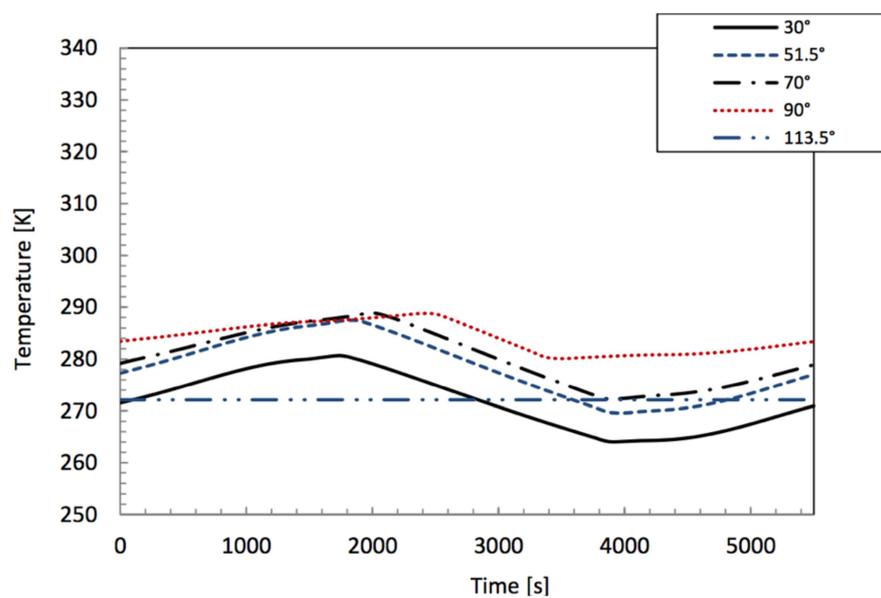
de ordem 6 sobre os dados simulados para que o intervalo entre cada temperatura passasse a ser de 1 segundo.

Figura 14: Perfil de temperatura temporal para o ponto central das superfícies externas dos painéis solares para uma inclinação de 51.5°



Fonte: FILHO et al. (2017)

Figura 15: Perfil de temperatura temporal para o ponto central da bateria para diferentes inclinações orbitais

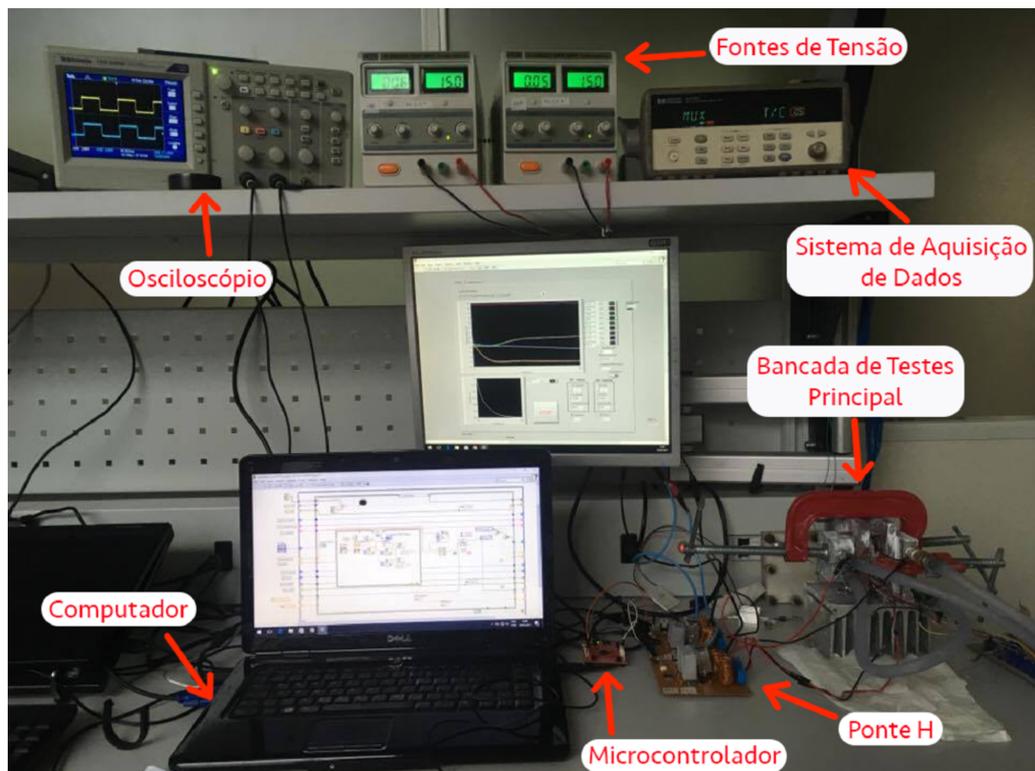


Fonte: FILHO et al. (2017)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de simular de forma experimental a variação de temperatura dos painéis solares e do ponto central da bateria do FloripaSat ao longo de sua órbita, assim como avaliar o perfil de tensão gerado pelo TEG ao ser submetido aos gradientes de temperatura, foi utilizado uma bancada de testes desenvolvida a partir do aparato experimental usado por Audiffred (2015) e Becker (2016), porém, com algumas modificações e aperfeiçoamentos. A Figura 16 apresenta uma imagem do aparato experimental utilizado neste trabalho, contendo todos os componentes do sistema.

Figura 16: Aparato experimental

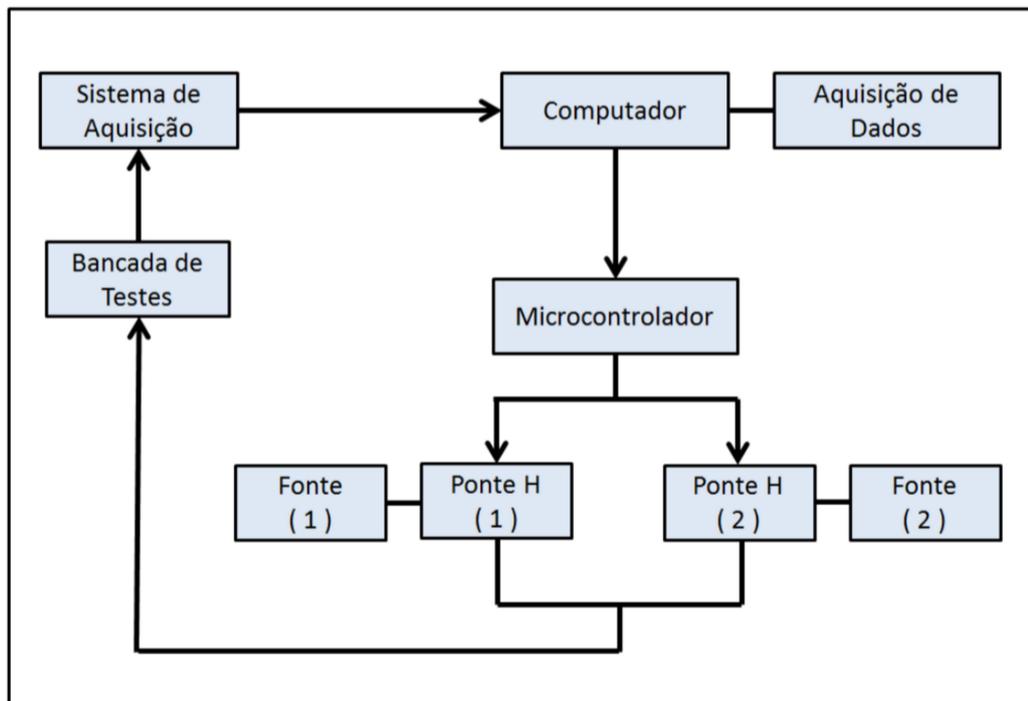


Fonte: Autor

O experimento consiste em uma bancada de testes principal, responsável por simular os efeitos físicos de temperatura a qual o TEG seria submetido no espaço. Os dados de

temperatura são capturados pelo sistema de aquisição, que os envia para o computador, onde são armazenados. Além disso, esses dados são utilizados como *feedback* para o controle PID responsável por controlar a variação de temperatura do sistema de acordo com os perfis de temperatura apresentados por Filho et al. (2017). Através do *Software LabVIEW*, os comandos do controlador PID são enviados para um microcontrolador que os converte em sinais PWM, aos quais são ampliados e modificados através de um circuito de ponto H, alimentado por fontes de tensão de bancada. Assim, é possível o envio dos sinais de comando com correntes maiores para os TECs da bancada principal, controlando os gradientes de temperatura entre os extremos do TEG. A configuração geral de conexão entre os componentes do sistema é a mesma utilizada por Audiffred (2015), sendo que as modificações e os aperfeiçoamentos realizados neste trabalho em termos do aparato experimental foram feitos de forma específica em alguns componentes, não impactando na configuração geral. A Figura 17 mostra a configuração geral do experimento, ilustrando o que foi explicado acima.

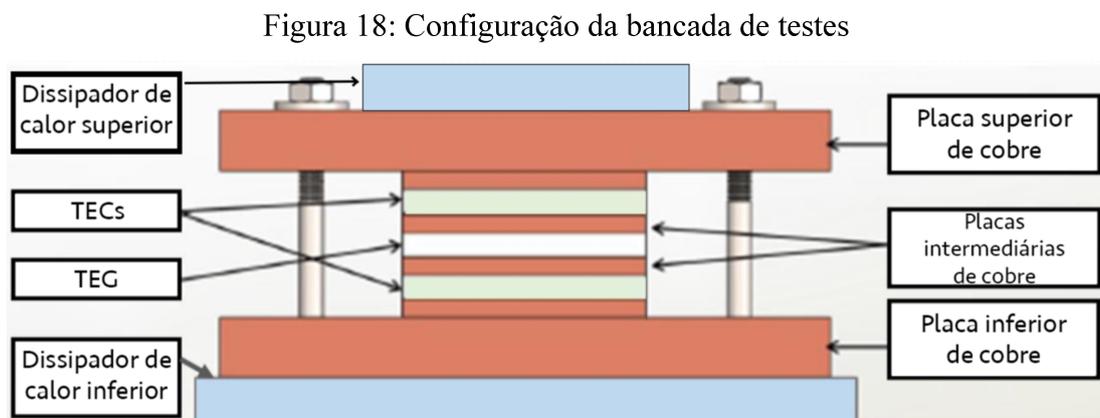
Figura 17: Configuração geral do experimento



Fonte: AUDIFFRED (2015)

3.1. BANCADA DE TESTES

A bancada de testes tem o objetivo simular condições de temperatura semelhantes as encontradas no espaço. Para que isso seja possível, dois TECs são utilizados para gerar os gradientes de temperatura desejados, sendo um colocado em cada lado do TEG, fazendo contato através de placas intermediárias de cobre, responsáveis por conduzir o calor gerado pelos TECs até as superfícies do TEG. Como discutido anteriormente, os TECs se caracterizam por fornecer uma superfície fria e outra quente quando em funcionamento, portanto, sua função dos TECs neste experimento é exclusivamente gerar uma temperatura desejada no lado em contato com o TEG. O calor gerado no outro lado deve ser dissipado de alguma forma para não influenciar o resto do sistema. Sendo assim, dissipadores de calor são utilizados na parte superior e inferior da bancada de testes para retirar o calor das extremidades. A Figura 18 ilustra a configuração de montagem da bancada de testes, incluindo todos os equipamentos citados acima.

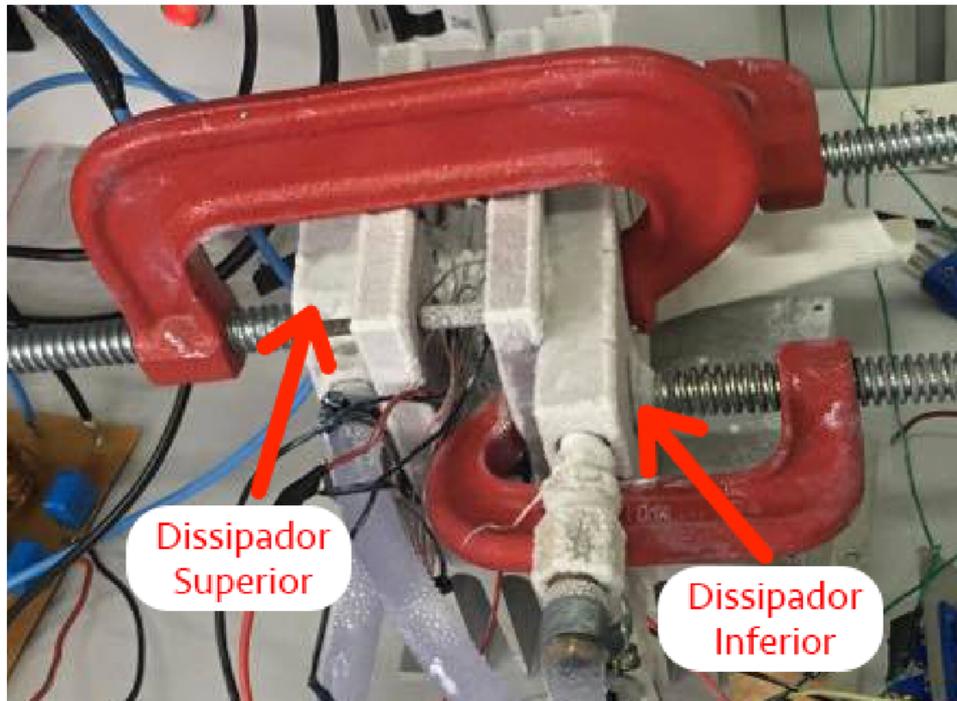


Fonte: Adaptado de BECKER (2016)

A bancada de testes apresentada acima é o resultado de um aperfeiçoamento do equipamento utilizado por Audiffred (2015) e Becker (2016). Em ambos os casos, foram realizadas simulações com gradientes de temperatura fixos, ou seja, que não variavam dinamicamente. Além disso, os gradientes analisados por ambos se davam sempre no mesmo sentido, o que exigia a utilização de um dissipador de calor em apenas um extremo da bancada. Portanto, como a proposta deste trabalho é simular as condições de órbita, os gradientes de temperatura variam ao longo do tempo e podem assumir sentidos diferentes, o que exige a utilização de dissipadores de calor na parte superior e inferior da bancada. Os dissipadores são conectados por mangueiras entre si, que por sua vez é conectada a um banho

termoplástico (LAUDA Ecoline Staredition RE 212 J). Este equipamento que permite escoamento de um líquido frio através dos dissipadores, podendo atingir até -11°C na prática. A Figura 19 mostra a bancada de testes, enfatizando os dois dissipadores de calor.

Figura 19: Bancada de Testes



Fonte: Autor

Outra modificação realizada foi referente aos TECs. Audiffred (2015) e Becker (2016) utilizaram dois modelos diferentes em seus experimentos, sendo um deles do fabricante *Hebei*, modelo 12708, e o outro do fabricante CUI, modelo CP60240, que apresenta um desempenho inferior ao primeiro, ou seja, consegue gerar um fluxo de calor menor com o mesmo valor de tensão de entrada. Como os gradientes agora variam dinamicamente, essa diferença de performance entre os TECs faz com que em alguns casos específicos as temperaturas desejadas não sejam atingidas, mesmo quando o gradiente não é muito grande, portanto, optou-se por substituir o TEC modelo CP60240 da CUI pelo CP14.127.045 da *Laird Technologies*. Este modelo apresenta um desempenho semelhante ao modelo 12708 da *Hebei*, o que torna a performance do sistema equivalente em ambos os sentidos dos gradientes de temperatura. A Tabela 01 compara algumas propriedades dos três modelos de TEC.

O TEG utilizado não foi alterado, sendo este do modelo TEG241-1.0-1.2 do fabricante *EVERREDtronics*.

Tabela 01: Comparação entre TECs

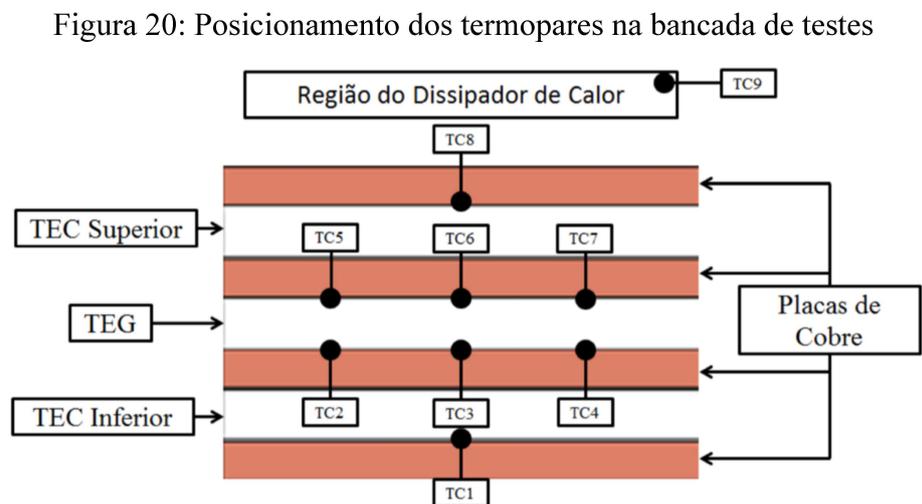
	CP60240 (CUI)	12708 (Hebil)	CP14.127.045 (Laird)
Hot Side Temp. (°C)	27 – 50	25 – 50	25 – 50
Qmax (Watt)	13.0 – 14.5	71 – 79	72.0 – 81.5
Delta Tmax (°C)	68 – 75	66 – 75	67 – 75
I _{max} (Amps)	6.0 – 6.0	8.5 – 8.4	8.5 – 8.5
V _{max} (Volts)	3.8 – 3.8	15.4 – 17.5	14.5 – 16.4

Fonte: Autor com os dados de CUI INC (2016); HEBEI (2017) e LAIRD (2008)

3.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Para que seja possível avaliar se o funcionamento da bancada de testes está coerente com os valores esperados referentes às temperaturas as quais o satélite é submetido no espaço, foram utilizados termopares para medir as temperaturas instantâneas em alguns pontos da bancada de testes. Os termopares utilizados neste trabalho são todos do tipo T.

As regiões principais para a realização das medições de temperatura são as duas superfícies do TEG. Foram colocados três termopares em cada face para que se pudesse verificar a distribuição de temperatura. São nestes pontos que se deseja simular os gradientes de temperatura encontrados ao longo da órbita. Além disso, foram colocados um termopar em cada face externa dos TECs, pois nestas regiões o calor gerado deve ser dissipado, portanto, é importante verificar as temperaturas destes pontos para analisar se o sistema de resfriamento está conseguindo dissipar o calor de forma eficiente. A Figura 20 ilustra o posicionamento dos termopares na bancada de testes.



Fonte: AUDIFFRED (2015)

Como podemos ver, os termopares TC2, TC3 e TC4 medem os três pontos da face inferior do TEG, sendo que o valor médio é usado no controlador PID como *feedback*. Da mesma forma, os termopares TC5, TC6 e TC7 medem os três pontos da face superior do TEG. Além disso, os termopares TC1 e TC8 são responsáveis por medir as temperaturas das faces externas dos TECs inferior e superior, respectivamente, e o TC9 mede a temperatura ambiente durante todo o experimento.

Todos os termopares são conectados a um sistema de aquisição de dados, responsável por realizar a leitura instantânea de cada termopar em intervalos determinados de tempo, além de armazenar e enviar os dados para o computador, para que este posteriormente possa realizar o processamento e utilizar estes dados para o controle do sistema experimental. Neste trabalho, foi utilizado a unidade de aquisição, comunicação e registro de dados do modelo 34970A, do fabricante HEWLETT PACKARD, também chamada de *Data Logger*, onde usou-se um canal para a aquisição de dados de cada termopar, totalizando nove canais utilizados no geral. Essa unidade de aquisição possui intervalos de escaneamento com armazenamento de até 50000 leituras, taxas de leitura de até 600 por segundo, e é possível medir 250 canais por segundo (HEWLETT-PACKARD, 1997). Este equipamento é também conectado ao computador por uma porta serial, com o objetivo de transmitir os dados adquiridos para processamento e armazenamento. A Figura 21 mostra uma imagem da unidade de aquisição utilizada.

Figura 21: Unidade de aquisição, comunicação e registro de dados HP 34970A



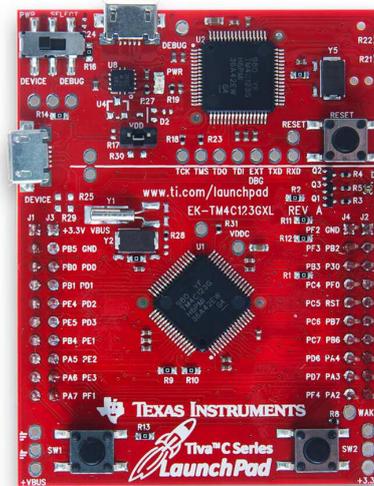
Fonte: Autor

3.3. MICROCONTROLADOR

O microcontrolador usado neste projeto foi o TIVA TM4C123G da *Texas Instruments*, que possui um processador ARM Cortex-M4 Core de 32 bits e um sistema de frequência de *clock* de até 80MHz. Este dispositivo conecta-se ao computador via comunicação serial através de um protocolo USB, assim tornando possível que os dados gerados no *software LabVIEW* possam ser enviados ao microcontrolador, que por sua vez, gera os sinais PWM enviados para o circuito de ponte H pelos pinos PD0 e PD1. A Figura 22 mostra uma imagem da placa contendo o microcontrolador usado neste trabalho.

Para verificar em tempo real se os sinais PWM gerados pelo TIVA estão de acordo com o esperado, foi utilizado um osciloscópio de dois canais para a leitura dos sinais de saída dos pinos do microcontrolador. Neste caso, foram utilizados os dois canais do osciloscópio, um para cada pino de saída PWM.

Figura 22: TIVA C Series TM4C12G LaunchPad



Fonte: Autor desconhecido

3.4. COMPUTADOR

O computador é responsável pelo processamento e armazenamento dos dados medidos pelo sistema de aquisição de dados, assim como pelo controle do experimento através do controlador PID e do microcontrolador responsável por gerar os sinais PWM. Para gerenciar a leitura, armazenamento e processamento dos dados, foi implementado um código em *LabVIEW* que inclui uma interface para acompanhamento das principais informações do

experimento em tempo real. Para o comando do microcontrolador, utilizou-se o *software Code Composer Studio (CCS)*, cujo código implementado é capaz de interpretar os dados provenientes do programa em *LabVIEW* e gerar os sinais PWM de acordo com o esperado.

3.4.1. *Software LabVIEW*

O *software LabVIEW* é uma plataforma de desenvolvimento de sistemas que utiliza uma linguagem de programação gráfica de nome “G”, originada pela empresa *National Instruments*. Esta plataforma é muito usada para projetos de aquisição de dados, controle e supervisão de instrumentos, assim como automação industrial com diferentes tipos de sistemas operacionais. 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 (NI, 2013).

Neste trabalho, o código implementado foi dividido em seis partes, sendo que cada uma possui uma página de diagrama de blocos em forma de diagrama de estados, com função específica para o funcionamento do experimento. Entre elas estão a parte de Inicialização, Leituras, Conversão & Cálculo, Salva Dados, Envio e Finalização. O código utilizado em todos os experimentos foi desenvolvido com base no código utilizado por Audiffred (2015), sendo que modificações foram necessárias para adaptar as novas necessidades propostas no presente trabalho.

A primeira parte do código consiste na página “Inicialização”, que tem a função de inicializar a comunicação entre o computador, microcontrolador e sistema de aquisição de dados. É nesta etapa que a configuração do *Data Logger* é realizada, identificando quais canais serão responsáveis por ler e transmitir dados. Além disso, as configurações de comunicação do microcontrolador são especificadas e são identificados os tipos de termopares conectados ao sistema.

A segunda parte refere-se a página “Leituras”, cujo principal objetivo é controlar o sistema de aquisição de dados para realizar as leituras de temperatura e tensão captadas da bancada experimental. A leitura de dados ocorre a cada segundo, uma vez que o sistema faz uma requisição ao *Data Logger*, que envia *strings* contendo os dados necessários ao computador. Esses dados são então, posteriormente, utilizados como *feedback* para o sistema de controle PID.

A terceira página chama-se “Conversão & Cálculo”, e é nesta parte que o controle PID é implementado. O controle de cada TEC é feito independentemente, uma vez que se utiliza um controlador PID para cada um, sendo os ganhos determinados a partir de uma metodologia de ajuste experimental. Como mostrado anteriormente, em contato com cada face do TEG existem três termopares, portanto, existem três pontos em cada superfície que podem apresentar leves diferenças de temperatura. A primeira tarefa realizada nesta etapa é o cálculo dos valores médios de temperatura das superfícies inferior e superior do TEG a partir dos três termopares de cada face, sendo estes valores utilizados em seguida como o *feedback* dos controladores PID. Além disso, também foram fixados limites máximos e mínimos para os sinais PWM para evitar que este alcance seus valores extremos, uma vez que isso gerou alguns erros na geração dos pulsos pelo microcontrolador.

A quarta parte do código é referente a página “Salva Dados”, que desempenha a função de armazenar os dados recebidos pelo *Data Logger* e gerar um arquivo de texto contendo os valores de temperatura de todos os termopares e de tensão gerada pelo TEG. Também é nesta etapa que a variação dinâmica dos valores de temperatura de referência dos controladores PID é implementada. Primeiramente, os dados fornecidos por Filho et al. (2017) são copiados para dentro do código, que realiza a varredura e atualização dos valores alvo a cada 60 segundos. Além disso, dentro desta página que é escolhido a face do satélite a qual deseja-se realizar a simulação.

A quinta página é a “Envio”, que basicamente envia os dados de saída dos controladores PID para o microcontrolador gerar os sinais PWM com um formato compatível ao implementado no código do microcontrolador.

Finalmente, a sexta e última parte do código, nomeada como “Finalização”, desempenha a função de finalizar a comunicação entre o computador, *Data Logger* e microcontrolador quando o usuário solicita a paralização através da interface do usuário. Além disso, quando algum erro de comunicação ou performance ocorre durante alguma das outras partes do código, o sistema também finaliza a operação e apresenta uma mensagem de erro.

Para que o usuário possa verificar algumas informações do sistema ao longo do progresso de um experimento, uma interface de usuário também foi implementada, permitindo a visualização das temperaturas dos termopares e a tensão no TEG de forma numérica e gráfica, assim como o tempo decorrido de experimento, temperaturas superior e inferior atuais, temperaturas alvo e gradiente instantâneo referente as temperaturas médias

entre as duas faces do TEG. Todas as páginas de código em *LabVIEW*, assim como a imagem da interface de usuário podem ser visualizadas no APÊNDICE B.

3.4.2. *Software Code Composer Studio*

A resolução do sinal PWM está diretamente relacionada a precisão do controle dos TECs da bancada de testes, pois quanto maior o número de passos entre os valores máximo e mínimo, mais suave e contínua é a variação de temperatura. Os dois fatores principais que determinam a resolução do sinal PWM gerado por um microcontrolador são o número de *bits* do módulo de *hardware* gerador de PWM e a frequência de *clock* de operação. Audiffred (2015) utilizou o microcontrolador MSP430F5529, que possui um processador de 16 *bits*, juntamente com o *software* ENERGIA, uma plataforma de programação e compilação baseada no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino. Devido a funções de configuração de PWM disponíveis no ENERGIA, só era possível utilizar 8 *bits* para o envio do sinal, o que acabava limitando o sinal PWM a uma variação de 0 até 255, correspondente a uma resolução de $1/256$.

Com o objetivo de aumentar essa resolução, optou-se pelo microcontrolador TIVA TM4C123G, com um processador de 32 *bits*, e pelo uso do *software Code Composer Studio* (CCS), um ambiente de desenvolvimento integrado mais completo e mais robusto do que o ENERGIA, além de ser desenvolvido especificamente para aplicações com processadores da *Texas Instruments*. Para determinar a resolução do sinal PWM, basta dividir a frequência do sinal PWM projetada para o circuito de ponte H pela frequência de *clock* de operação do microcontrolador, como mostrado na equação abaixo.

$$Res = f_{PWM} / f_{clock} \quad (6)$$

Neste caso, sabendo que a frequência do sinal PWM projetada foi de 10kHz, enquanto a frequência de *clock* de operação do microcontrolador é de 80MHz, obtemos uma resolução equivalente a $1/8000$, muito maior do que a obtida anteriormente. Além disso, para que a informação seja enviada nesta resolução, é necessária a utilização de 2 *bytes* para cada sinal PWM.

Devido a mudança de microcontrolador e IDE, foi necessário o desenvolvimento completo de um novo código através do CCS para realizar a geração dos sinais PWM pelo

microcontrolador. Este código pode ser dividido em três partes principais, e pode ser visualizado integralmente no APÊNDICE C.

A primeira parte do código refere-se apenas à inclusão das bibliotecas necessárias e à declaração das variáveis globais do sistema. A segunda parte consiste em uma interrupção responsável por receber os dados do *LabVIEW* via UART, interpretar, processar e enviar os sinais PWM de saída para as portas PD0 e PD1 do microcontrolador. O pacote de dados enviado pelo *LabVIEW* é composto por sete *bytes*, no formato 1XX2YYA. Os *bytes* que possuem os valores 1 e 2 tem a função de identificar qual dos dois sinais corresponde os valores dos dois *bytes* seguintes, XX ou YY, correspondentes aos sinais PWM propriamente ditos. Por fim, o *byte* que possui a letra A serve para que o sistema identifique o fim do presente pacote de dados e inicie o processamento e envio da informação. Finalmente, a terceira e última parte do código tem a função de configurar a frequência de operação utilizada, comunicação serial via UART, periféricos, PWM, entre outros.

3.5. PONTE H

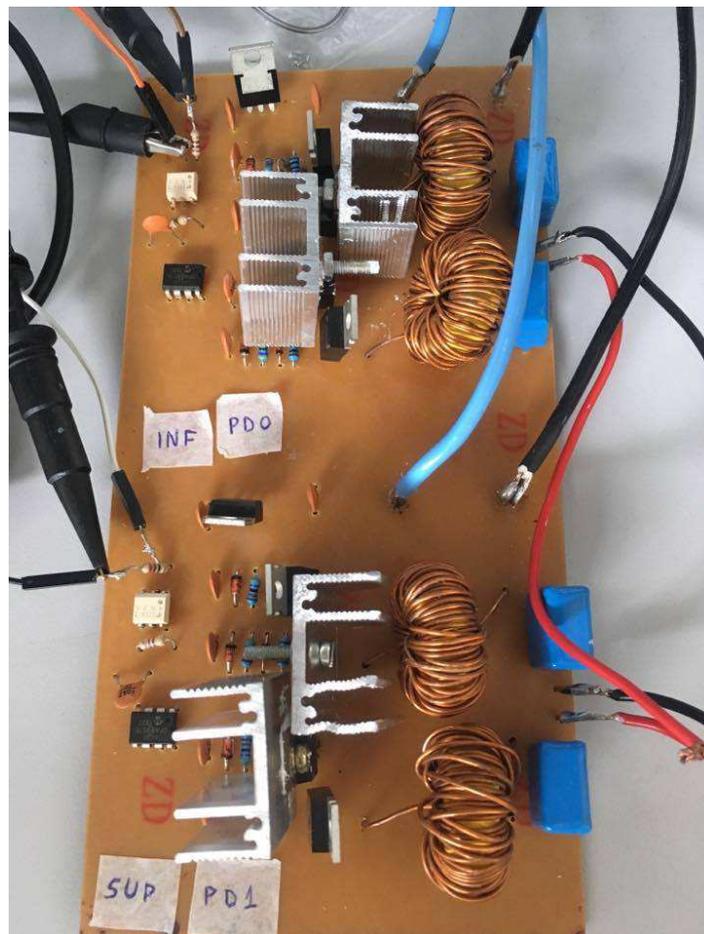
Uma ponte H é um circuito composto por quatro interruptores, que podem ser desde botões físicos até transistores controlados eletricamente. A configuração do circuito permite que o sentido da corrente que passa por uma carga possa ser invertido, e em alguns casos amplificado, tornando possível o controle de rotação de um motor de corrente contínua, ou até mesmo o sentido do gradiente de temperatura de um dispositivo termoeletrico, como é o caso neste trabalho. A conexão de tal circuito possui uma forma de “H”, onde cada lado possui dois interruptores em série conectados entre a fase e o neutro de uma fonte de alimentação, e na linha central há uma carga arbitrária (BEARD, 2014). Para que a corrente passe pela carga central, é preciso que dois interruptores em posições transversais entre si fiquem abertos, enquanto os demais fiquem fechados, assim tornando o caminho através da carga o único caminho possível para a passagem da corrente. Para inverter o sentido da corrente, basta inverter as posições dos interruptores, abrindo os que estavam fechados e fechando os que estavam abertos.

Para este trabalho, foi necessário o uso de dois circuitos de ponto H, sendo cada um responsável por enviar a corrente necessária para um TEC da bancada experimental. O circuito utilizado neste trabalho foi projetado pelo professor orientador Anderson Spengler, cujo esquemático pode ser analisado no APÊNDICE D. A fabricação da placa de circuito impresso foi realizada completamente durante o desenvolvimento deste trabalho, desde o

processo de corrosão da placa de fenolite para a impressão das trilhas do circuito, até a perfuração da placa e soldagem dos componentes eletrônicos. Para evitar superaquecimento em alguns MOSFETs utilizados no circuito devido a alta potência dissipada durante alguns momentos do experimento, foi necessário o uso de quatro dissipadores de calor para aumentar a área de dissipação.

Os sinais PWM gerados pelo microcontrolador controlam os MOSFETs do circuito, que assumem a função de interruptores que determinam o sentido do fluxo de corrente. Além disso, são utilizadas duas fontes de tensão externas configuradas em 15 Volts para alimentar cada circuito e amplificar os sinais que alimentam os TECs. A Figura 23 mostra a placa de circuito desenvolvida, que inclui os dois circuitos de ponte H.

Figura 23: Placa de circuito de ponte H



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados alguns resultados obtidos através dos testes experimentais, com o intuito de explicar e discutir as principais melhorias em relação aos trabalhos anteriores, mostrar os aspectos onde o aparato experimental não conseguiu atingir o comportamento esperado, e analisar o desempenho de geração de energia em cada um dos casos estudados para determinar a melhor configuração considerando diferentes circuitos de *energy harvesting*, responsáveis por armazenar e gerenciar a energia gerada. Além disso, também será apresentada uma análise de erro proveniente das medições dos experimentos e uma análise comparativa do desempenho de geração dos TEGs em relação às células fotovoltaicas. Para que se possa analisar os resultados completos de cada experimento individualmente, todos os gráficos de temperatura, tensão e potência gerados ao longo deste trabalho podem ser visualizados no APENDICE E. Os níveis de temperatura utilizados neste trabalho foram baseados na configuração de 51.5° de inclinação do nanossatélite FloripaSat (FILHO, 2017), variando a posição do TEG em relação a cada um dos seis painéis solares.

4.1. MELHORIAS REFERENTES AOS TRABALHOS ANTERIORES

Como já mencionado anteriormente, inúmeras alterações no aparato experimental e nos códigos utilizados foram realizadas com o intuito de melhorar o desempenho dos resultados ou modificar alguma característica de interesse do experimento.

Primeiramente, observou-se que o uso de dissipadores térmicos na parte superior e inferior da bancada de testes permitiu que se atingisse temperaturas médias mais baixas no lado frio, assim como gradientes de temperatura maiores. Com o uso desses dissipadores, o calor gerado nas extremidades da bancada é dissipado com mais eficiência, evitando que a condução de calor do lado quente para o frio seja mais intensa do que o resfriamento proporcionado pelo TEC. Através de seus experimentos, Audiffred (2015) conseguiu uma temperatura média mínima de 10°C no lado frio, enquanto seu gradiente máximo foi de 20°C, já no presente trabalho, foi possível obter uma temperatura média mínima de -11.5°C e um gradiente máximo de aproximadamente 35°C.

A troca do TEC modelo CP60240 da CUI pelo CP14.127.045 da *Laird Technologies* também contribuiu para chegar nesses valores extremos de temperatura, porém, sua maior contribuição foi para a inversão de polaridade dos gradientes de temperatura. Como o objetivo deste trabalho consistiu em simular experimentalmente os gradientes de temperatura presentes em uma órbita, foi necessário inverter a polaridade dos mesmos, pois quando o satélite passa de um estado de contado direto com o sol para o eclipse, o sentido do gradiente de temperatura no TEG se inverte. Portanto, a troca do TEC modelo CP60240, com desempenho inferior aos demais, pelo CP14.127.045, permitiu que os dois lados da bancada tivessem TECs com desempenho muito semelhantes, fazendo com que os resultados fossem equivalentes independentemente do sentido do gradiente de temperatura.

Para que esse controle dinâmico de temperatura fosse possível, modificações no código em *LabVIEW* também foram necessárias. Além disso, a utilização do microcontrolador TIVA TM4C123G também apresentou melhoria ao experimento, uma vez que a resolução do sinal PWM ficou maior e o controle dos TECs mais preciso.

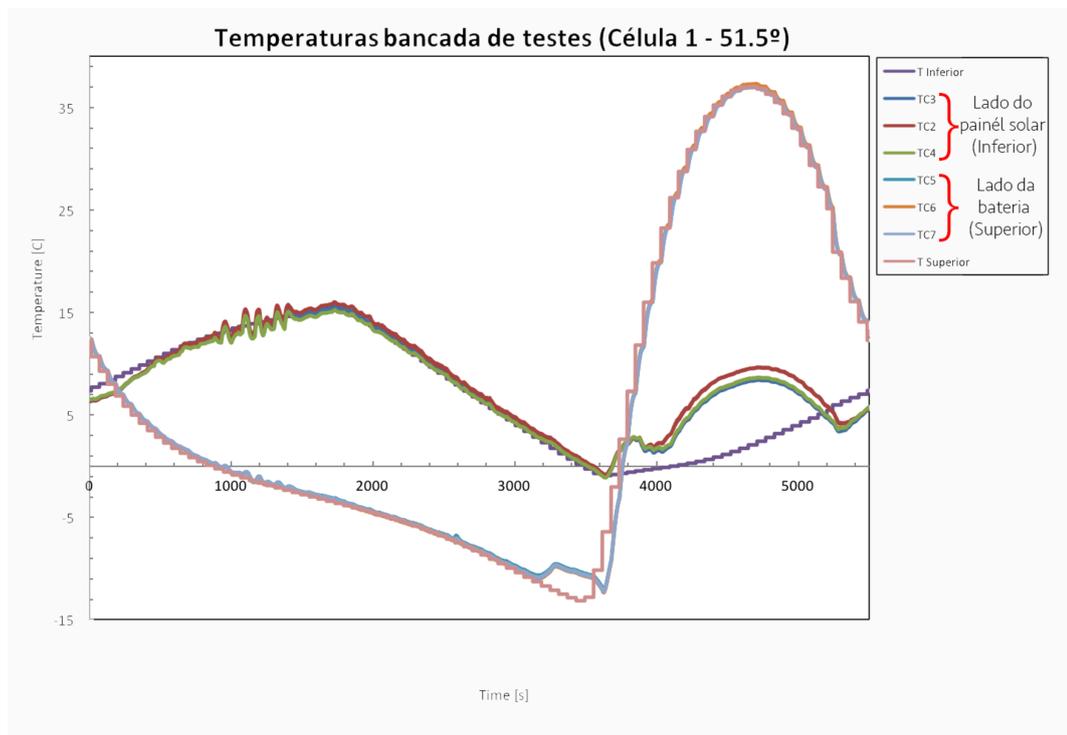
4.2. LIMITES FÍSICOS DA BANCADA DE TESTES

Apesar das melhorias alcançadas, em alguns casos extremos o aparato experimental ainda apresentou dificuldade em atingir os valores esperados de temperatura devido a algumas limitações físicas, principalmente da bancada experimental. Em todos os gráficos de temperatura mostrados a seguir, as curvas com legenda “T Inferior” ou “T Superior” correspondem às curvas de temperatura de referência simuladas por Filho (2017), onde “T Inferior” representa a temperatura da bateria e “T Superior” a temperatura do painel solar. Já as demais curvas representam a leitura dos termopares em suas determinadas posições na bancada de testes. Como mostrado na Figura 20, os termopares “TC2”, “TC3”, “TC4” estão localizados na face inferior do TEG, portanto, tendendo a ser o mais próximo possível de “T Inferior”, enquanto os termopares “TC5”, “TC6”, “TC7” estão localizados na face superior do TEG, tendendo a ser o mais próximo possível de “T Superior”.

O primeiro limite da bancada de testes encontrado ao longo dos experimentos ocorre quando o gradiente de temperatura é muito alto, principalmente quando simultaneamente, a temperatura do lado frio é próxima ou abaixo de zero. Quando isso ocorre, o lado frio não consegue ser resfriado da forma esperada e a temperatura deste ponto se eleva, pois, o calor conduzido da parte quente é mais intenso do que o potencial de resfriamento do TEC e dos dissipadores. Como podemos ver na Figura 24, que mostra as curvas de temperatura

referentes a configuração do TEG em contato com a face da célula 1, após aproximadamente os 4000 segundos, o gradiente de temperatura entre os dois lados do TEG se torna muito grande e a temperatura do lado inferior é inicialmente próxima de zero. Isso faz com que o sistema não consiga resfriar o lado inferior suficientemente, gerando essa diferença entre a curva “T Inferior”, referente a temperatura esperada da parte inferior, e as curvas “TC2”, “TC3” e “TC4”, representando os termopares inferiores.

Figura 24: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1

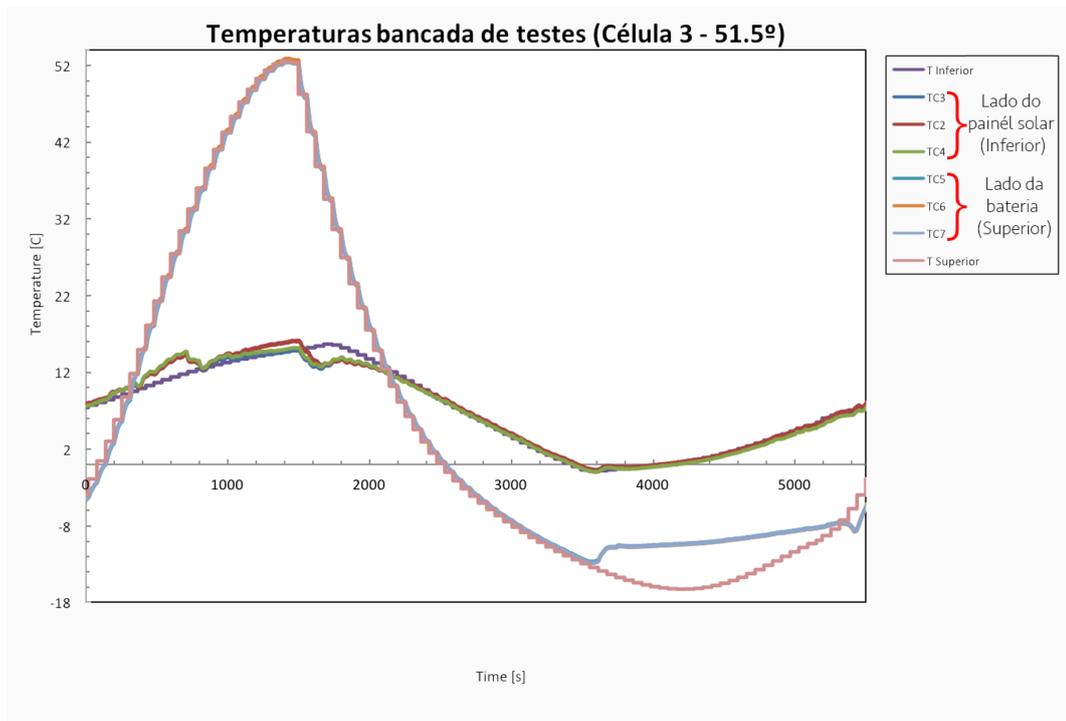


Fonte: Autor

Neste mesmo intervalo, um segundo fenômeno também contribuiu para a divergência da temperatura esperada. A taxa de variação de temperatura elevada, que pode ser visualizada através da inclinação da curva “T Superior”, também gera perturbação no perfil de temperatura inferior. Na Figura 25, que representa a configuração do TEG em contato com a face da célula 3, também podemos verificar a influência da alta inclinação da curva “T Superior”. Aproximadamente entre 500 e 2500 segundos, podemos perceber que existe um gradiente alto entre as duas faces do TEG, porém, diferente do que ocorreu no caso anterior, a divergência de temperatura na parte inferior não foi tão expressiva, pois apesar do gradiente elevado, a temperatura do lado inferior está mais distante de zero. Na realidade, as

divergências que podem ser vistas no início e no fim do intervalo mencionado ocorrem principalmente devido a alta inclinação da curva “T Superior”, que inicialmente aquece muito rapidamente, e em seguida resfria muito rapidamente. Como inicialmente a temperatura superior se eleva em uma taxa alta, esse aumento de temperatura, por condução de calor, influencia a parte inferior, que apresenta um leve aumento, até que o sistema consiga assumir o controle normalmente após alguns segundos. Da mesma forma, quando a temperatura superior começa a decrescer rapidamente, o controle inferior não consegue responder na mesma velocidade e uma leve queda na temperatura pode ser vista, até que o sistema consiga novamente se estabilizar.

Figura 25: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 3



Fonte: Autor

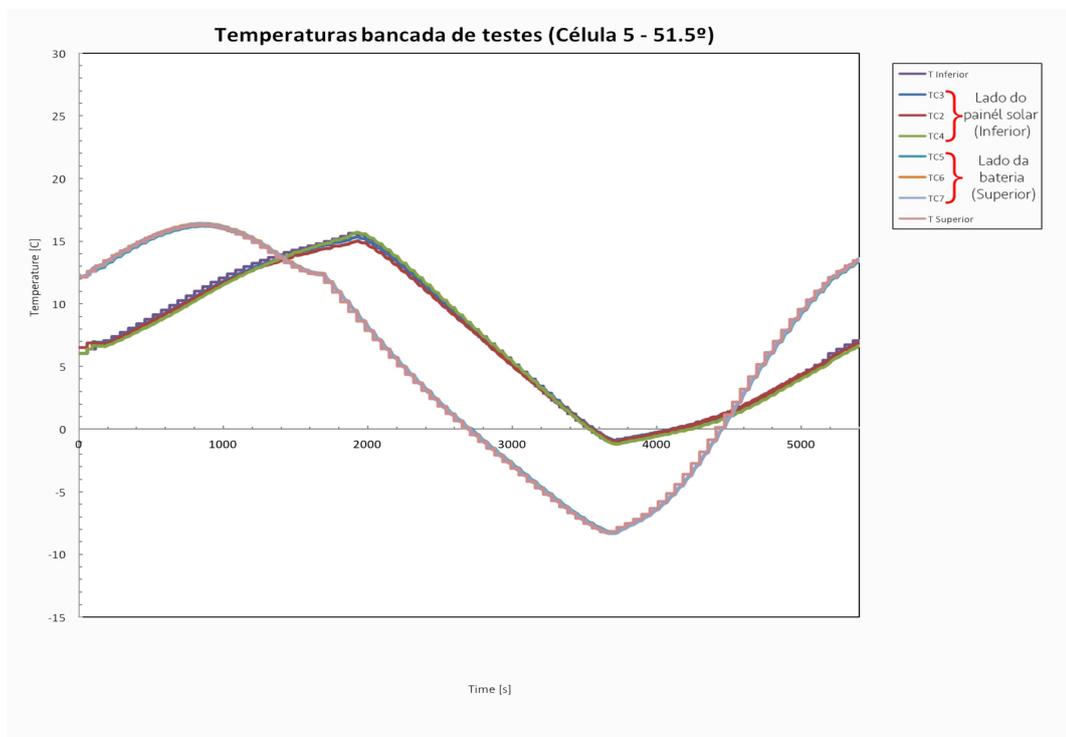
A terceira limitação da bancada de testes ocorre quando a temperatura do lado frio é inferior a -11°C , como também mostrado na Figura 25, a partir dos 3500 segundos. Esse limite está principalmente relacionado com a capacidade dos TECs em gerar temperaturas muito negativas nas faces frias, como também o limite de resfriamento dos dissipadores de calor, cujo banho térmico conseguiu chegar a valores mínimos próximos de -11°C com a utilização de álcool como fluido frio.

Quando nenhum destes três problemas ocorrem, o sistema consegue simular corretamente as condições impostas, sendo que os valores medidos pelos termopares são muito próximos ao esperado, como é o caso mostrado na Figura 26, referente a célula 5.

Em todos os três casos, as limitações físicas fazem com que a temperatura do lado inferior não consiga chegar a valores tão baixos, fazendo com que os gradientes reais se tornem menores do que os esperados. Quanto maior a diferença de temperatura entre as duas faces do TEG, maior é a tensão gerada pelo dispositivo, portanto, as limitações da bancada fazem com que a quantidade total de energia gerada prevista na simulação seja menor do que a capacidade de geração real. Por este motivo, e pelas divergências ocorrerem apenas em alguns casos mais específicos e pontuais, observou-se que os dados obtidos em experimento podem ser usados para avaliar qual configuração pode gerar mais energia, sendo que os dados obtidos são mais conservadores do que no caso real.

Os gráficos com os valores de temperatura das demais configurações de posição do TEG podem ser vistos no APENDICE E.

Figura 26: Curvas de temperatura ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 5



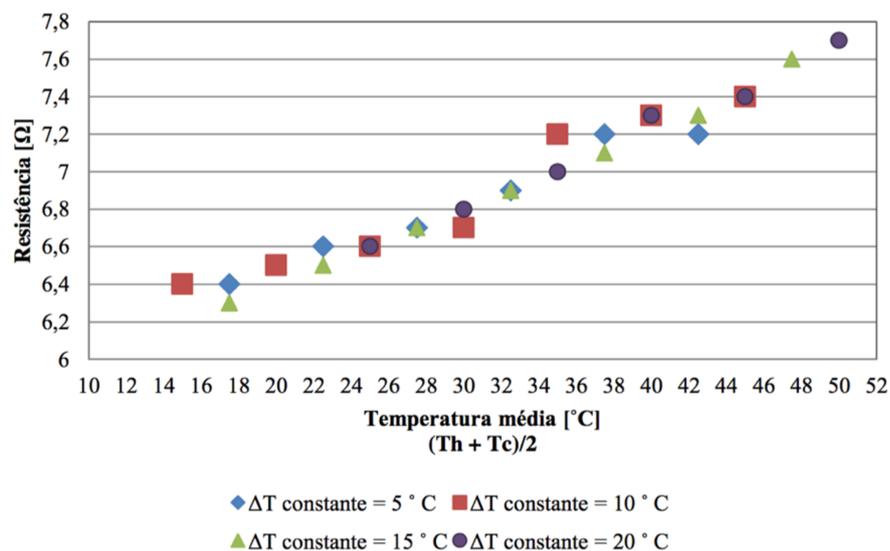
Fonte: Autor

4.3. ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA E ANÁLISE DE ERRO

Além dos dados de temperatura, o sistema de aquisição de dados também faz a leitura do sinal de tensão gerado pelo TEG para cada configuração, que pode ser utilizado para determinar a energia gerada em cada órbita. Para determinar essa energia, é necessário conhecer o perfil de potência gerado ao longo da órbita, que por sua vez, pode ser determinado a partir da curva de tensão medida em experimento e o comportamento da resistência interna do gerador termoelétrico com a variação de temperatura. O procedimento para encontrar a energia gerada é análogo para todas as seis configurações de posicionamento, portanto, apenas um caso será abordado detalhadamente com o intuito de explicar o método utilizado, enquanto os demais serão analisados diretamente pelos valores finais.

Audiffred (2015) realizou medições da resistência interna do TEG, submetido a diferentes gradientes de temperatura, e observou que a medida que a temperatura média aplicada ao TEG cresce, sua resistência interna aumenta praticamente de forma linear, como mostrado na Figura 27.

Figura 27: Resistência interna do TEG para diferentes temperaturas



Fonte: AUDIFFRED (2015)

Portanto, como o modelo do gerador termoelétrico utilizado por Audiffred (2015) é o mesmo usado neste trabalho, considerou-se que a resistência interna varia com a temperatura de acordo com uma equação linear, obtida através de uma interpolação linear dos pontos apresentados na Figura 27. Utilizando o *software Origin*, e sabendo que cada ponto medido

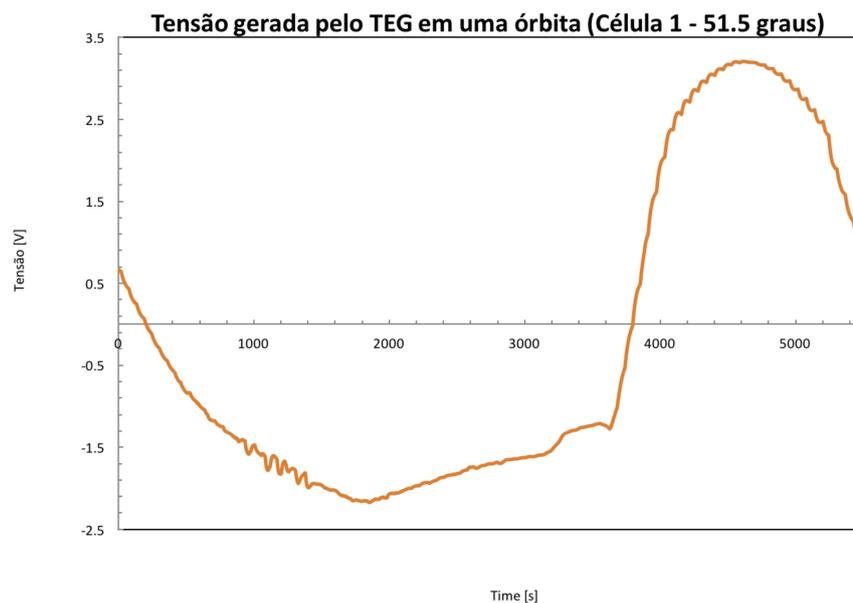
por Audiffred (2015) na Figura 27 possui um erro de medição de $\pm 0.05\Omega$, foi possível encontrar a equação linear que representa o comportamento da resistência interna do TEG em função da variação de temperatura, incluindo o erro atrelado a cada coeficiente, como mostrado abaixo:

$$R_{in} = (0.039 \pm 0.002)T_{med} + (5.67 \pm 0.05) \quad (7)$$

onde R_{in} é a resistência interna do TEG em Ohms e T_{med} é a temperatura média entre as faces do TEG em graus Celsius.

Como mencionado, o sistema de aquisição faz a leitura da variação de tensão gerada pelo TEG a medida que o gradiente de temperatura varia ao longo da órbita. A Figura 28 mostra a curva de tensão para a configuração referente a célula 1 do satélite. Como pode ser visto, em um determinado período da órbita, a tensão gerada assume valores negativos, enquanto em outros momentos, a tensão passa a ser positiva. Isso ocorre pois durante a órbita o sentido do gradiente de temperatura aplicado ao TEG pode se inverter. Existem momentos em que a face do painel solar está voltada para o sol, tornando o lado externo mais quente que o interno, e momentos em que o satélite está na região de eclipse, tornando o lado interno mais quente que o externo devido a ausência dos raios solares no painel.

Figura 28: Curva de tensão ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1



Fonte: Autor

Uma vez que a tensão e a resistência interna são estimadas para todos os pontos da órbita, pode-se encontrar a curva de potência, uma vez que esta é definida pela razão entre o quadrado da tensão e a resistência, como mostrado na equação abaixo:

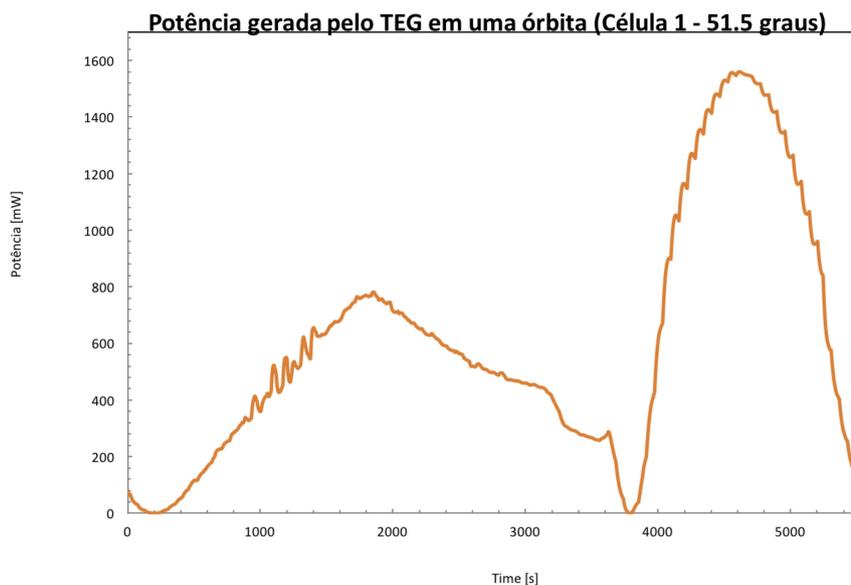
$$P_{inst} = \frac{V_{inst}^2}{R_{in}(T)} \quad (8)$$

onde P_{inst} é a potência instantânea medida em Watt e V_{inst} é a tensão instantânea medida em Volts.

Portanto, utilizando a equação (8), considerando a equação (7) e os dados apresentados na Figura 28, é possível gerar o perfil de potência ao longo da órbita, como mostrado na Figura 29. Finalmente, para obter o valor da energia gerada durante a órbita, basta realizar a integração da curva de potência, que nos cálculos analíticos, que utilizam valores discretos, pode ser representada pelo somatório abaixo:

$$E = \sum_{i=1}^n P_n \Delta t \quad (9)$$

Figura 29: Curva de potência ao longo de um período de órbita para configuração de posicionamento de TEG na célula 1



Fonte: Autor

O erro atrelado aos valores encontrados para a potência gerada depende dos erros independentes provenientes da resistência interna do TEG, que já foram previstos na equação (7), e da tensão medida em experimento, pois estes são os parâmetros aos quais compõem o cálculo da potência. Segundo FCTUC (2004), o erro padrão de uma variável calculada a partir de outras grandezas medidas experimentalmente pode ser estimado através da fórmula de propagação de erro, que nesse caso pode assumir a seguinte forma, considerando um intervalo de tempo Δt :

$$\Delta P_i = \sqrt{\left(\frac{\partial P_i}{\partial V}\right)^2 (\Delta V_i)^2 + \left(\frac{\partial P_i}{\partial R}\right)^2 (\Delta R_i)^2} \quad (10)$$

onde ΔP_i é o erro padrão da potência gerada em um intervalo de tempo Δt , $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial P}{\partial R}$ são as derivadas parciais da equação (8) em relação a tensão e resistência interna, respectivamente, ΔV representa o erro independente atrelado a tensão gerada, que engloba o erro gerado pela limitação da bancada de testes e do erro de medição gerado pelo próprio *datalogger*, e ΔR é o erro independente atrelado a resistência, também calculado pela equação (8).

Da mesma forma que calculamos ΔP_n , podemos encontrar o erro padrão para a energia gerada (ΔE_n) em um intervalo de tempo Δt através da equação (11):

$$\Delta E_i = \sqrt{\left(\frac{\partial E_i}{\partial P}\right)^2 (\Delta P_i)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial t}\right)^2 (\Delta t)^2} \quad (11)$$

onde ΔE_i é o erro padrão da energia gerada em um intervalo de tempo Δt .

Como o intervalo de tempo entre medições é constante ($\Delta t = 1$ *segundo*), podemos simplificar a equação (11) de tal forma que concluímos que o erro padrão para a energia gerada equivale ao erro padrão da potência gerada:

$$\Delta E_i = \sqrt{\left(\frac{\partial E_i}{\partial P}\right)^2 (\Delta P_i)^2} = \sqrt{(\Delta t)^2 (\Delta P_i)^2} = \Delta t \cdot \Delta P_i = \Delta P_i \quad (12)$$

Finalmente, para que se possa encontrar o valor total do erro padrão da energia gerada em cada órbita completa, precisamos considerar o somatório de todas as parcelas de erro dos intervalos temporais através da equação a seguir:

$$\Delta E_{Total} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i)^2} \quad (13)$$

4.4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM GERAÇÃO DE ENERGIA

A energia gerada pelo TEG é armazenada através de circuitos de *energy harvesting*, cujas funções também incluem a conversão, condicionamento e gerência da energia obtida. Estes dispositivos também fazem parte da carga útil desenvolvida pela UFSC para ser embarcada no FloripaSat, sendo que o intuito do projeto é embarcar três circuitos de *energy harvesting* diferentes para realização de testes de performance no espaço. A principal diferença entre os três circuitos está no CI (circuito integrado) utilizado para converter e gerenciar de tensão proveniente do TEG, onde cada um apresenta características individuais, como mostrado na Tabela 02.

Tabela 02: Características dos CIs de conversão e gerenciamento de tensão

Modelo do CI conversor/gerenciador de tensão	Característica de operação	Sentido de tensão
LTC3108	Alta eficiência de captação de energia para sinais de tensão pequenos	Opera apenas em um sentido
LTC3109	Alta eficiência de captação de energia para sinais de tensão grandes	Opera apenas em um sentido
BQ25570	Alta eficiência de captação de energia para sinais de tensão grandes	Opera em ambos os sentidos

Fonte: Autor

Como mostra a Figura 28, dependendo do sentido do gradiente de temperatura aplicado ao TEG, a tensão pode assumir sentidos opostos ao longo da órbita, portanto, apenas o CI BQ25570 conseguiria armazenar energia em todos os instantes de operação para os casos de tensão positiva e negativa. Por esse motivo, duas análises de geração de energia foram

feitas, sendo a primeira considerando a energia gerada a partir de toda a curva de tensão, e a segunda considerando separadamente a quantidade de energia gerada quando a tensão é positiva e negativa, podendo assim analisar a melhor configuração de posicionamento do TEG para os três circuitos de *energy harvesting* utilizados. Realizando a integração das curvas de potência para os seis casos estudados, obtém-se valores de energia em Watt-Segundo, que podem ser escritos em Watt-Hora, pois esta é uma unidade mais comum para representação de energia. Fazendo a análise de potência considerando as duas possibilidades discutidas acima, podemos comparar os resultados apresentados na Tabela 03 e avaliar qual posição do TEG resulta em uma maior geração de energia para cada método de *energy harvesting*.

Tabela 03: Energia gerada em uma órbita para cada configuração de posição do TEG

Conf. Posição do TEG	Energia total gerada [Watt-Hora]	Energia parcial gerada (Tensão +) [Watt-Hora]	Energia parcial gerada (Tensão -) [Watt-Hora]
Célula 1	0.940 ± 0.006	0.490 ± 0.001	0.450 ± 0.007
Célula 2	0.763 ± 0.003	–	0.763 ± 0.003
Célula 3	0.835 ± 0.004	0.556 ± 0.002	0.279 ± 0.003
Célula 4	0.6968 ± 0.0009	0.5687 ± 0.0008	0.1281 ± 0.0004
Célula 5	0.1192 ± 0.0002	0.0315 ± 0.0001	0.0877 ± 0.0002
Célula 6	0.02475 ± 0.00008	–	0.02475 ± 0.00008

Fonte: Autor

Os valores apresentados na primeira coluna de resultados da Tabela 03 representam a quantidade de energia gerada durante toda a órbita, independentemente do sentido da tensão gerada pelo TEG. As demais colunas apresentam uma divisão da energia total gerada, pois considera, de forma separada, o período da órbita em que a tensão do TEG possui sinal positivo e negativo. Analisando os dados apresentados na Tabela 03, podemos identificar que para o caso do CI BQ25570, que tem a capacidade de operar e armazenar a energia independentemente do sentido da tensão de entrada, ou seja, consegue captar a energia ao longo de toda a órbita, a configuração que pode gerar uma maior quantidade de energia é a que o TEG fica em contato com a célula 1 do nanossatélite, podendo chegar a $0.940 \pm 0.006 Wh$. Já para os circuitos que possuem os CIs LTC3108 e LTC3109, por operarem apenas com um sentido de tensão de entrada, a configuração que proporciona uma maior geração de energia é a que o TEG está em contato com a célula 2, pois a tensão neste caso não muda de sentido e a energia captada pode chegar a $0.763 \pm 0.003 Wh$. Portanto, no caso da utilização de apenas um circuito de *energy harvesting*, dependendo de qual CI é usado, a

posição do TEG com maior potencial de geração de energia pode variar entre a em contato com a célula 1 e 2 do *CubeSat*.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE CÉLULAS SOLARES E TEGs

Com o intuito de analisar a relevância do uso de dispositivos termoelétricos como um segundo método de geração de energia no espaço, foi realizada uma comparação entre a capacidade de geração de energia utilizando os TEGs e as células fotovoltaicas, que atualmente representam a principal alternativa para geração de energia em satélites.

Segundo UFSC (2017), o projeto FloripaSat utiliza seis painéis solares, que possuem uma área efetiva de 60.36 cm^2 cada, e ao todo têm uma capacidade média de geração de energia de 3.242 Wh por órbita. Sabendo que o TEG utilizado nos experimentos possui uma área de 16 cm^2 , podemos fazer uma extrapolação linear para estimar a quantidade de energia proporcional que o TEG geraria caso tivesse uma área de 60.36 cm^2 . A Tabela 04 apresenta os valores de energia estimados para um TEG com área de 60.36 cm^2 , calculados com base na extrapolação dos valores da Tabela 03, considerando que a energia pode ser armazenada independentemente do sentido da tensão do TEG.

Tabela 04: Extrapolação da energia gerada considerando um TEG com área de 60.36 cm^2

Conf. Posição do TEG	Energia total gerada [Watt-Hora]
Célula 1	3.544
Célula 2	2.877
Célula 3	3.148
Célula 4	2.627
Célula 5	0.449
Célula 6	0.093
Energia Total	12.738

Fonte: Autor

De acordo com a extrapolação realizada, e considerando um cenário em que todas as faces do satélite possuem um TEG de área igual a 60.36 cm^2 para gerar energia através dos gradientes de temperatura, a quantidade de energia total gerada pelo *CubeSat* é de aproximadamente 12.738 Wh . Porém, os circuitos de *energy harvesting* utilizados permitem que apenas uma pequena parcela deste valor possa ser efetivamente armazenado para futura utilização pelos demais subsistemas do *CubeSat*. De forma conservadora, podemos assumir

que os circuitos de *energy harvesting* permitam que 10% da energia gerada seja armazenada, resultando em um valor de 1.274 *Wh* em uma órbita, que representa 39.3% da energia gerada pelas células solares.

O sistema de geração de energia a partir de geradores termoelétricos apresentou um desempenho compatível com os painéis solares, gerando pouco menos da metade da energia proveniente destes. Além disso, caso as duas tecnologias fossem usadas simultaneamente, a energia final gerada em uma órbita seria de 4.516 *Wh*.

5. CONCLUSÃO

Através das melhorias realizadas no aparato experimental, principalmente com a inclusão de um sistema dissipador de calor baseado em fluxo de líquido refrigerante em ambos os lados da bancada de testes, e com a substituição do TEC modelo CP60240 pelo CP14.127.045, foi possível atingir maiores gradientes de temperatura entre as faces do TEG, além de temperaturas médias mínimas inferiores, quando comparado aos resultados de Audiffred (2015). Com o aperfeiçoamento realizado, foi obtido uma temperatura média mínima de -11.5°C , enquanto o gradiente máximo medido em experimento foi de aproximadamente 35°C .

Mesmo com a melhoria de desempenho, em alguns casos específicos de operação, o sistema não conseguiu atingir com precisão os valores de temperatura esperados, devido a algumas limitações físicas do experimento. Primeiramente, observou-se dificuldade do sistema em manter uma temperatura baixa no lado frio quando o gradiente de temperatura no TEG era muito alto. Além disso, quando a taxa de aumento de temperatura foi muito elevada, notou-se uma divergência na temperatura do lado frio em relação ao esperado. E por fim, a terceira limitação foi identificada quando a temperatura de um dos lados do TEG tende a valores abaixo de -11°C , pois o sistema não tem a capacidade de atingir temperaturas abaixo deste valor. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos em experimentos foram utilizados para verificar a configuração com maior desempenho de geração, uma vez que os dados obtidos são conservadores em relação ao que seria obtido no espaço.

Com a realização dos experimentos para todas as seis possibilidades de posicionamento do TEG, observou-se que dependendo do circuito de *energy harvesting* utilizado para armazenar e gerenciar a energia, a configuração de posicionamento mais eficiente pode mudar. Para o circuito *energy harvesting* que opera independentemente do sentido da tensão de entrada, a configuração de posicionamento do TEG na célula 1 apresentou maior capacidade de geração de energia, totalizando $0.940 \pm 0.006 \text{ Wh}$ em uma órbita. Já para os circuitos capazes de operar apenas com um sentido da tensão, a configuração de posicionamento na célula 2 mostrou-se mais eficiente, podendo gerar $0.763 \pm 0.003 \text{ Wh}$.

Através de uma extrapolação de área dos geradores termoelétricos, e assumindo a utilização de um em cada face do satélite, foi possível estimar a quantidade de energia que seria gerada por um sistema de TEGs ao longo de uma órbita. O sistema apresentou uma capacidade de geração de 1.274 *Wh*, que representa 39.3% da energia gerada pelo conjunto de células solares.

Como sugestão para trabalhos futuros, é proposto a substituição do fluido refrigerante do trocador de calor, no caso deste trabalho o álcool, por um outro fluido com maior capacidade de refrigeração, tornando assim possível a obtenção de temperaturas médias mínimas ainda mais baixas. Além disso, com o intuito de verificar se o perfil linear da variação da resistência interna do TEG com a temperatura é realmente válido para todo o intervalo de operação, uma nova análise experimental da resistência pode ser feita, incluindo regiões de temperatura abaixo de zero. Por fim, para que os efeitos atmosféricos possam ser desprezados e assim permitir que os experimentos tenham uma característica ainda mais próxima da realidade, propõem-se o uso de uma câmara de vácuo para realização de todos os testes realizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AUDIFFRED, M. P. **Utilização de dispositivos termoeétricos para geração de energia elétrica em nanosatélites**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2015.

BEARD, Philip. **Application note regarding H bridge design and operation**. 2014. Disponível em: <<http://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/fall14/group07/PDFs/Application%20Note%20Regarding%20H%20Bridge%20Design%20and%20Operation.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2017.

BECKER, D. B. S. **Automação de um sistema caracterizador de dispositivos termoeétricos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2016.

CREMALDI. **Seebeck and Peltier Effects**. 2009. Disponível em: <http://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/Lab_Seebeck%20and%20Pelt%2339B459.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

CUI INC. **CP60 Peltier Module Datasheet**. 2016. Disponível em: <<http://www.cui.com/product/resource/cp60.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2017.

EMFR, Monitoring Group. **Solar Energy: Lesson plans**. 2009. Disponível em: <<http://www.efmr.org/edu/solar2009.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2017.

ESA, European Space Agency. **Satellite Power Systems: Solar energy used in space**. 2003. Disponível em: <<http://www.esa.int/esapub/br/br202/br202.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2017.

FCTUC, Departamento de Física. **Introdução ao cálculo de erros nas medidas de grandezas físicas**. 2004. Disponível em: <http://fisica.uc.pt/data/20072008/apontamentos/apnt_221_1.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2017.

FERROTECH. **Thermoelectric Technical Reference**. 2017. Disponível em: <<https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref01/>>. Acesso em: 10 maio 2017.

FILHO, E. M. et al. Numerical investigation of orbital inclination influence on thermal control of a nanosatellite in LEO. In: CAPPELLETTI, C. (Org.); BEZERRA, Eduardo Augusto (Org.); PAIVA, K.V. (Org.). **Proceedings of the 2nd IAA Latin American CubeSat Workshop**. 5. ed., Paris: International Academy of Astronautics, 2017. v. 2. 765p.

GOLDSMID, H. Julian. **Introduction to Thermoelectricity**. 2. ed. Sydney, Australia: Springer, 2010.

GONZÁLEZ, Víctor Burgos. **CubeSat, the new way to launch a satellite**. 2014. Disponível em: <<https://techforspace.com/blog/en-En/uncategorized/cubesat-the-new-way-to-launch-a-satellite/>>. Acesso em: 27 set. 2016.

GROMOV, G. **Thermoelectric Cooling Modules**. 2009. Disponível em: <http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf> Acesso em: 10 maio 2017.

HEBEL, I. T. Co. **TEC1-12708 Datasheet**. 2017. Disponível em: <<http://www.hebeiltd.com.cn/peltier.datasheet/TEC1-12708.pdf>> Acesso em: 22 maio 2017.

HEWLETT-PACKARD. **HP 34970A Data Acquisition/Switch Unit: User's Guide**. 2. ed. Loveland: Hewlett-Packard Company, 1997.

HUMEL, Victor. **Potenciais Aplicações de Módulos Termoeletrônicos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Industrial Química, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, 2014.

ISMAIL, Yehea; ALASKALANY, Ahmed. **Thermoelectric Devices: Cooling and Power Generation**. 2014. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1403.3836.pdf>> Acesso em: 12 maio 2017.

LAIRD, Technologies. **Ceramic Plate Series CP14.127.045 Datasheet**. 2008. Disponível em: <<https://assets.lairdtech.com/home/brandworld/files/THR-DS-CP14,127,045,L1,W4.5.pdf>> Acesso em: 22 maio 2017.

MELCOR, The Standard in Thermoelectrics. **Thermoelectric Handbook**. 2006. Disponível em: <https://home.zhaw.ch/~fusa/PSS_VLE_C/CHAPTER_03/CASES/Materials/Melcor_TE_Handbook.pdf> Acesso em: 14 maio 2017.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Exploração espacial é importante para a sociedade e o meio ambiente**. 2009. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=exploracao-espacial-importante-sociedade-meio-ambiente#.V_FMWTkZOqA>. Acesso em: 25 set. 2016.

MONSERRAT FILHO, José. **A era dos pequenos, micros e nano satélites**. 2013. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/a-era-dos-pequenos-micros-e-nano-satelites-1/>>. Acesso em: 27 set. 2016.

NAIK, Siddhesh Ravindra. **CubeSat collection around Mars**. 2013. Disponível em: <http://ccar.colorado.edu/asen5050/projects/projects_2013/Naik_Siddhesh/Cubesats.html>. Acesso em: 27 set. 2016.

NI, National Instruments. **What is LabVIEW?** 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/newsletter/51141/en/>>. Acesso em: 24 maio 2017.

NLPIP, Lighting Research Center. **Photovoltaic Lighting: How the PV panels or PV cells work**. 2006. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/lightingAnswers/photovoltaic/04-photovoltaic-panels-work.asp>>. Acesso em: 11 maio 2017.

OLSEN, M. L. et al. **A high-temperature, high-efficiency solar thermoelectric generator prototype.** *Science Direct Journal*, Golden, p. 1-2, 2013.

QUINTANA, Hope A. et al. **Heat transport in novel nanostructured materials and their thermoelectric applications.** *SciMed Central Journal*. Las Cruces, New Mexico, p.2, 9 aug. 2013.

SNYDER, G. Jeffrey; TOBERER, Eric S. **Complex Thermoelectric Materials.** Pasadena: Nature, v. 7, fev. 2008.

SWARTWOUT, Michael. CubeSat Database. **Saint Louis University.** 2016. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/slu.edu/swartwout/home/cubesat-database>>. Acesso em: 27 set. 2016.

UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. **The FloripaSat Project.** 2017. Disponível em: <<https://www.gitbook.com/book/tuliogomesp/floripasat-technical-manual/details>> Acesso em: 13 maio 2017.

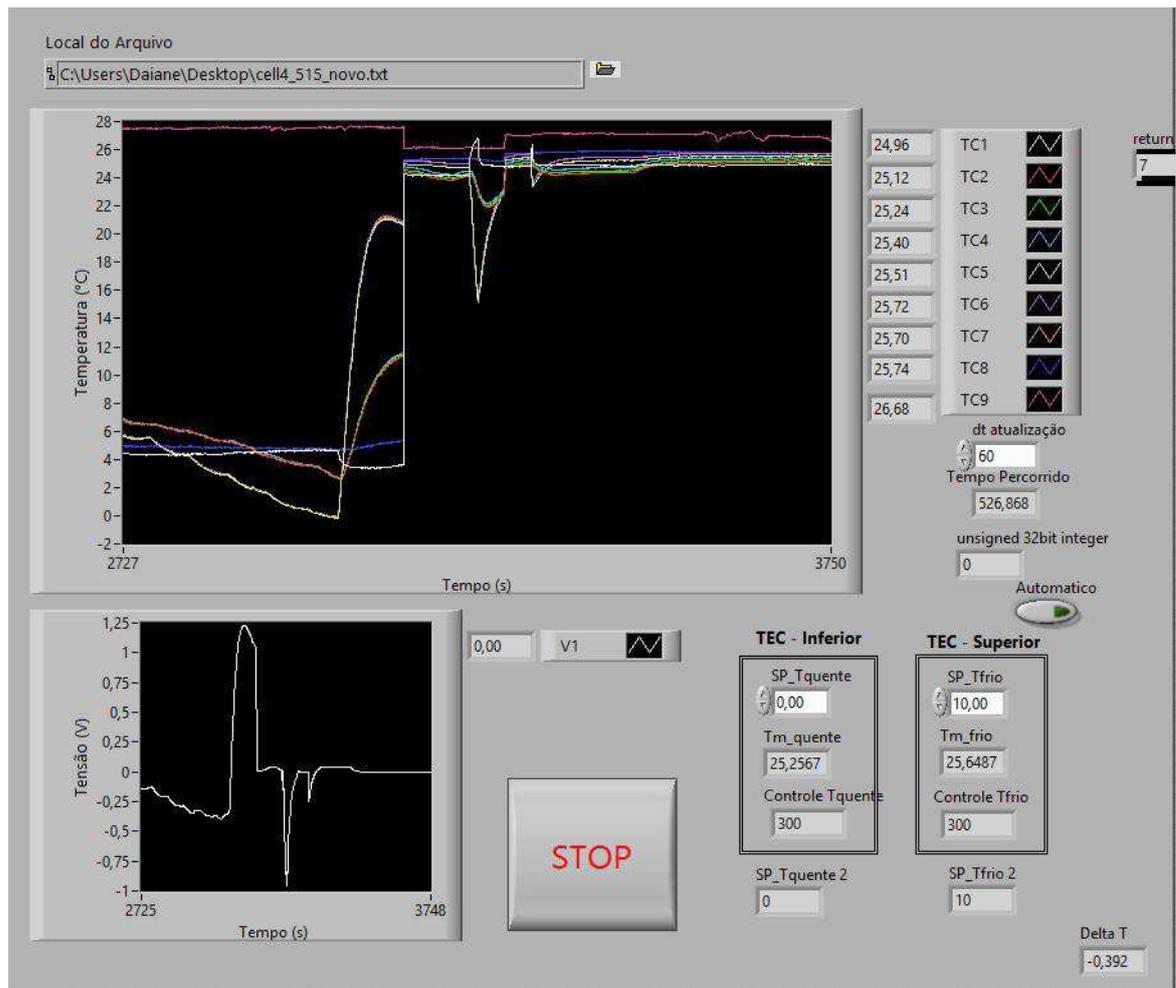
WAYDO, Stephen et al. CubeSat Design for LEO-Based Earth Science Missions. **IEEE Aerospace Conference Journal**, Washington D.C., set. 2002.

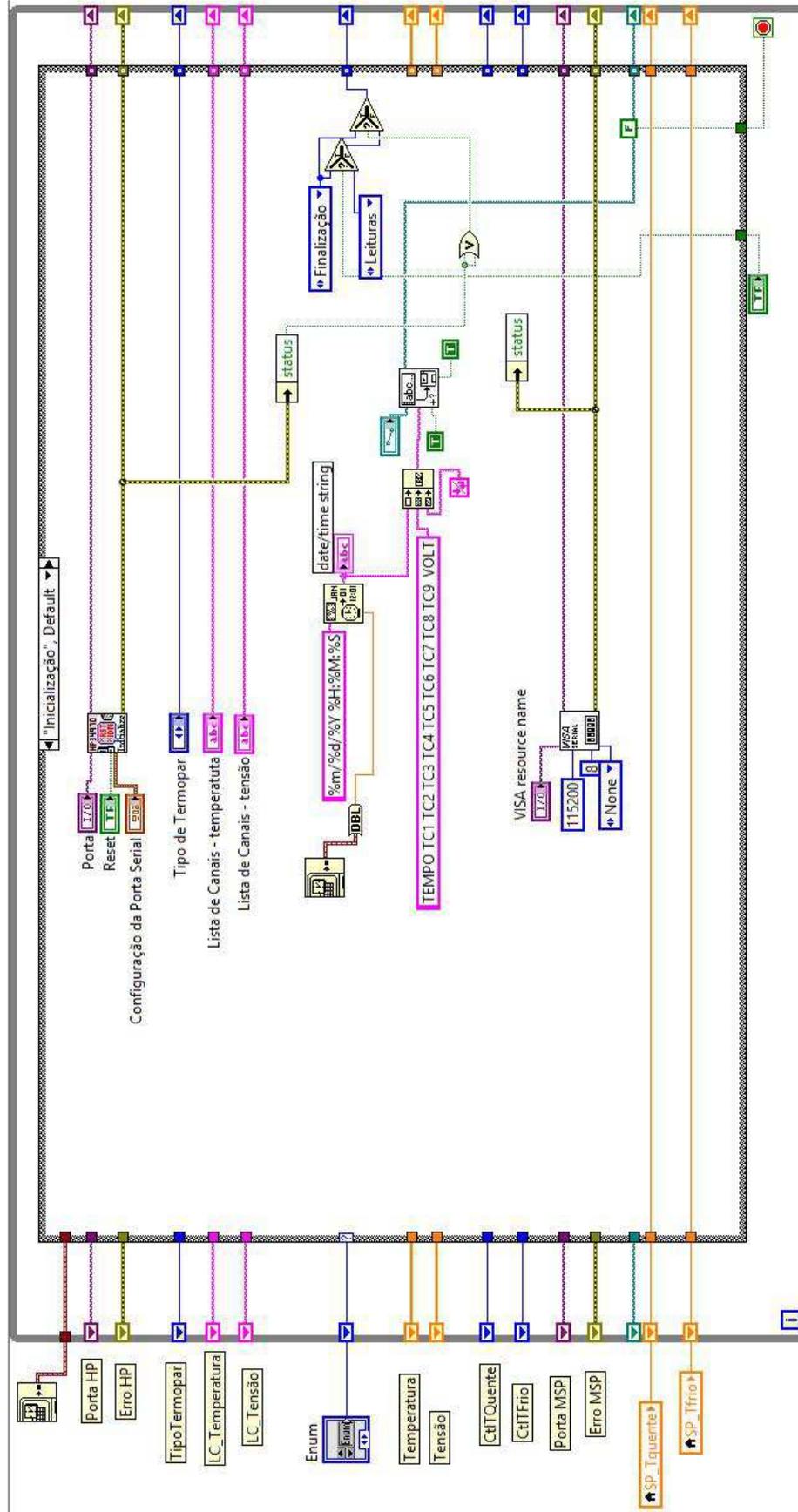
WEISSE, Jeffrey M. **Thermoelectric Generators.** 2010. Disponível em: <<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/weisse1/>> Acesso em: 12 maio 2017.

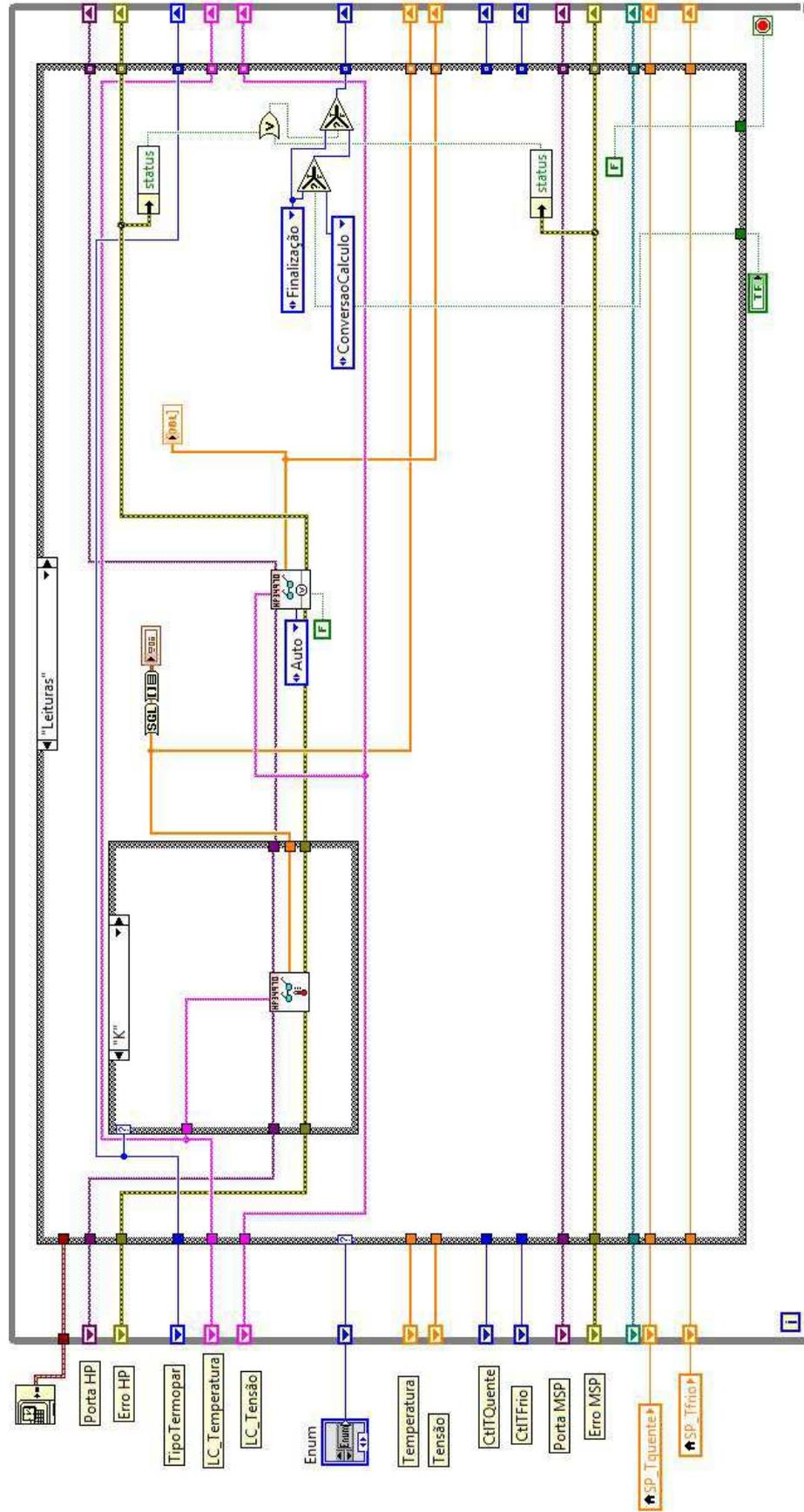
APÊNDICE A – Tabela de temperaturas de cada painel solar para um ângulo de inclinação de 51.5°

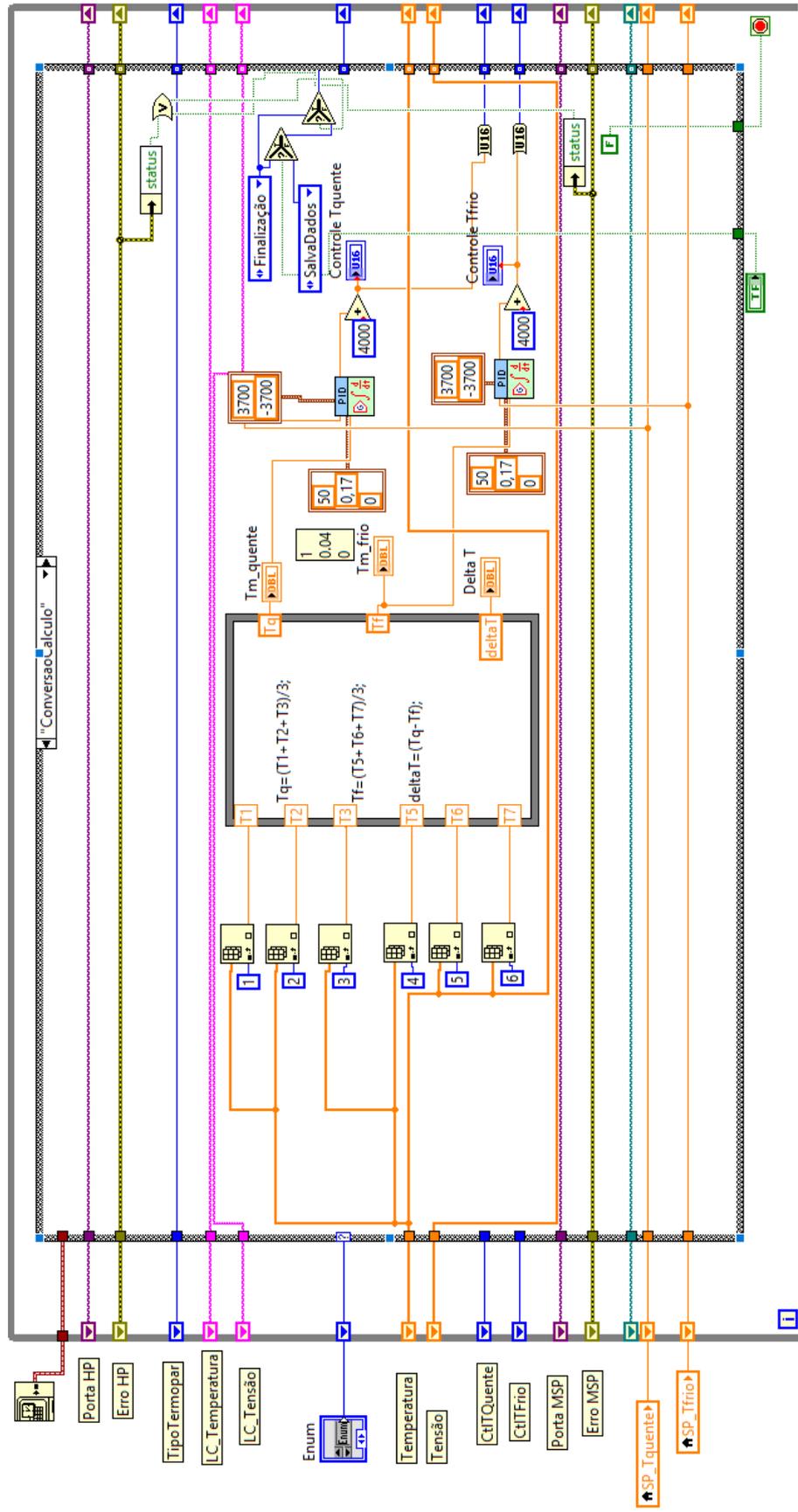
Dados Edemar - 125 segundos													
tempo	Solar cell 1	Solar cell 2	Solar cell 3	Solar cell 4	Solar cell 5	Solar cell 6		tempo	30°	51.5°	70°	90°	113.5°
0	294.049	264.015	263.888	299.07	285.277	277.596		0	271.518	277.268	279.183	283.436	272.1
125	289.154	265.121	265.944	300.363	286.204	278.39		125	272.253	278.078	279.915	283.773	272.1
250	285.17	266.132	269.473	301.5	287.069	279.23		250	273.029	278.881	280.603	284.086	272.1
375	282.037	267.031	274.249	302.479	287.854	280.11		375	273.863	279.731	281.316	284.416	272.1
500	279.617	267.815	279.956	303.31	288.512	281.015		500	274.739	280.622	282.063	284.767	272.1
625	277.756	268.487	286.251	304.004	288.998	281.922		625	275.634	281.535	282.833	285.133	272.1
750	276.317	269.046	292.803	304.568	289.299	282.805		750	276.519	282.448	283.61	285.505	272.1
875	275.18	269.491	299.313	305.006	289.378	283.639		875	277.365	283.335	284.374	285.872	272.1
1000	274.252	269.816	305.516	305.319	289.222	284.395		1000	278.139	284.167	285.104	286.22	272.1
1125	273.457	270.017	311.185	305.505	288.805	285.049		1125	278.812	284.919	285.78	286.539	272.1
1250	272.735	270.089	316.126	305.562	288.138	285.575		1250	279.355	285.564	286.38	286.817	272.1
1375	272.04	270.026	320.19	305.487	287.202	285.949		1375	279.739	286.075	286.884	287.041	272.1
1500	271.395	269.889	323.33	305.342	286.355	286.39		1500	280.019	286.442	287.275	287.201	272.1
1625	270.85	269.748	325.521	305.199	285.816	286.95		1625	280.393	286.821	287.594	287.322	272.1
1750	270.387	269.607	325.419	304.309	285.457	287.264		1750	280.674	287.299	287.979	287.482	272.1
1875	270.006	269.479	315.705	298.192	283.932	286.422		1875	279.995	287.43	288.437	287.687	272.1
2000	269.686	269.346	306.598	292.512	282.249	285.399		2000	279.078	286.579	288.868	287.927	272.1
2125	269.346	269.129	298.594	287.49	280.661	284.299		2125	278.089	285.529	288.174	288.193	272.1
2250	268.924	268.784	291.892	283.213	279.169	283.154		2250	277.061	284.408	287.121	288.471	272.1
2375	268.402	268.312	286.375	279.612	277.759	281.985		2375	276.011	283.247	285.981	288.748	272.1
2500	267.792	267.735	281.835	276.57	276.419	280.806		2500	274.952	282.066	284.798	288.651	272.1
2625	267.108	267.073	278.081	273.981	275.137	279.627		2625	273.891	280.878	283.593	287.632	272.1
2750	266.369	266.349	274.948	271.753	273.907	278.456		2750	272.836	279.691	282.379	286.46	272.1
2875	265.59	265.58	272.297	269.806	272.718	277.296		2875	271.791	278.513	281.167	285.25	272.1
3000	264.783	264.78	270.031	268.087	271.57	276.153		3000	270.76	277.348	279.962	284.023	272.1
3125	263.958	263.959	268.066	266.548	270.457	275.027		3125	269.741	276.201	278.769	282.792	272.1
3250	263.122	263.125	266.341	265.155	269.375	273.92		3250	268.74	275.072	277.592	281.566	272.1
3375	262.282	262.287	264.804	263.877	268.321	272.832		3375	267.757	273.961	276.435	280.361	272.1
3500	261.443	261.447	263.42	262.695	267.298	271.766		3500	266.793	272.871	275.299	280.103	272.1
3625	260.607	260.611	262.158	261.59	266.3	270.722		3625	265.849	271.803	274.184	280.221	272.1
3750	259.777	259.782	260.994	260.55	265.327	269.699		3750	264.919	270.757	273.088	280.376	272.1
3875	264.594	258.96	259.912	262.77	264.816	269.473		3875	264.067	269.732	272.229	280.528	272.1
4000	274.629	258.154	258.9	267.798	265.501	269.671		4000	264.11	269.598	272.398	280.662	272.1
4125	284.093	257.429	257.995	272.436	266.284	269.786		4125	264.258	269.853	272.696	280.766	272.1
4250	292.27	256.897	257.297	276.477	267.233	269.933		4250	264.309	270.038	272.944	280.828	272.1
4375	298.916	256.673	256.924	279.966	268.664	270.273		4375	264.464	270.235	273.141	280.857	272.1
4500	303.971	256.737	256.86	282.972	270.425	270.77		4500	264.784	270.583	273.431	280.937	272.1
4625	307.498	257.06	257.076	285.6	272.383	271.406		4625	265.264	271.086	273.847	281.089	272.1
4750	309.575	257.615	257.547	287.943	274.455	272.162		4750	265.884	271.726	274.378	281.305	272.1
4875	310.308	258.372	258.24	290.077	276.554	273.012		4875	266.619	272.483	275.01	281.58	272.1
5000	309.777	259.294	259.12	292.052	278.608	273.929		5000	267.441	273.329	275.722	281.9	272.1
5125	308.08	260.341	260.145	293.896	280.545	274.879		5125	268.317	274.237	276.491	282.255	272.1
5250	305.298	261.473	261.274	295.623	282.322	275.833		5250	269.214	275.175	277.295	282.63	272.1
5375	301.535	262.645	262.461	297.236	283.876	276.759		5375	270.097	276.113	278.108	283.011	272.1
5500	296.876	263.817	263.665	298.725	285.155	277.625		5500	270.931	277.019	278.906	283.383	272.1

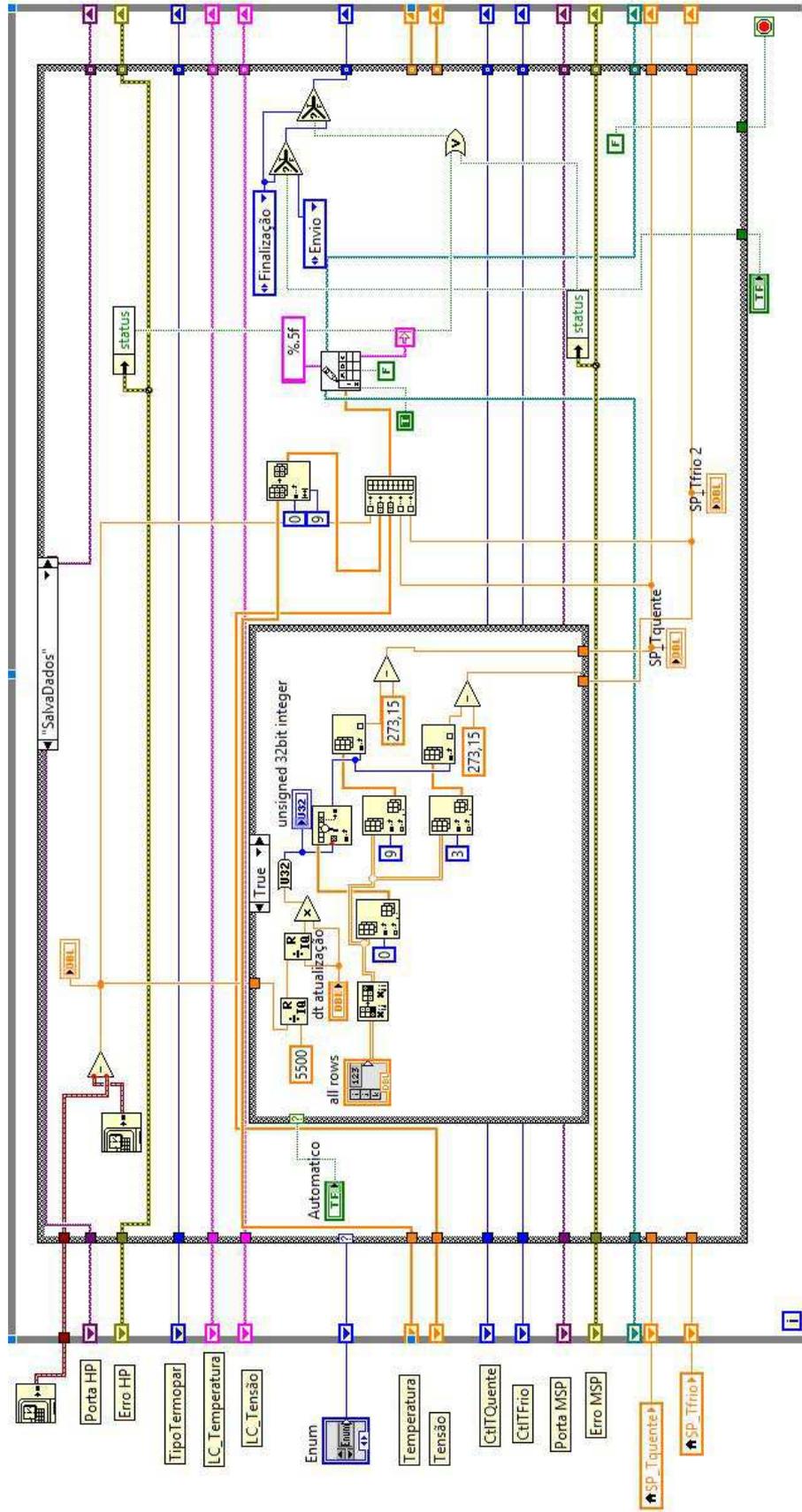
APÊNDICE B – Interface de usuário e páginas de diagrama de bloco em forma de diagrama de estados (Inicialização, Leituras, Conversão & Cálculo, Salva Dados, Envio e Finalização)

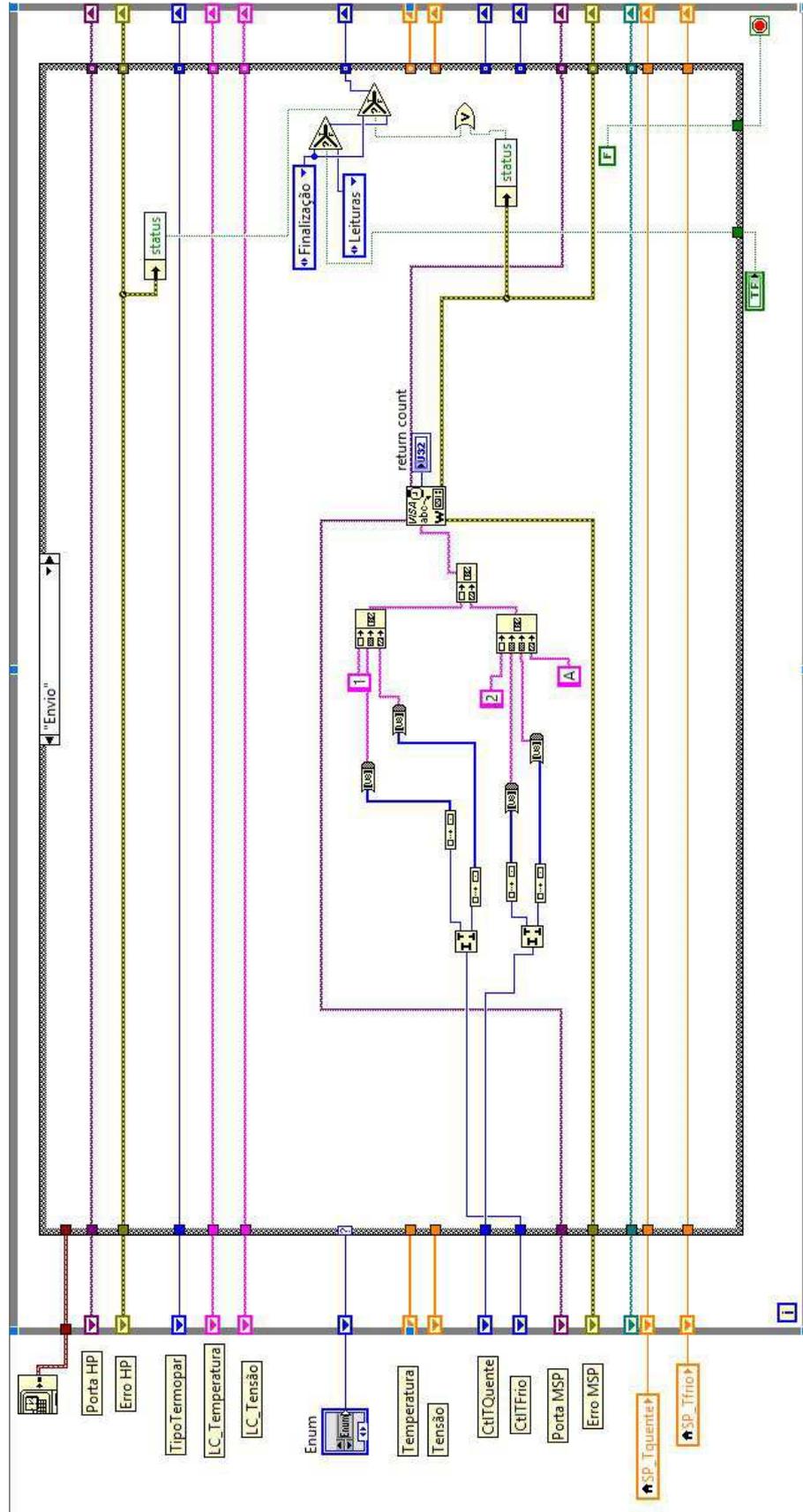


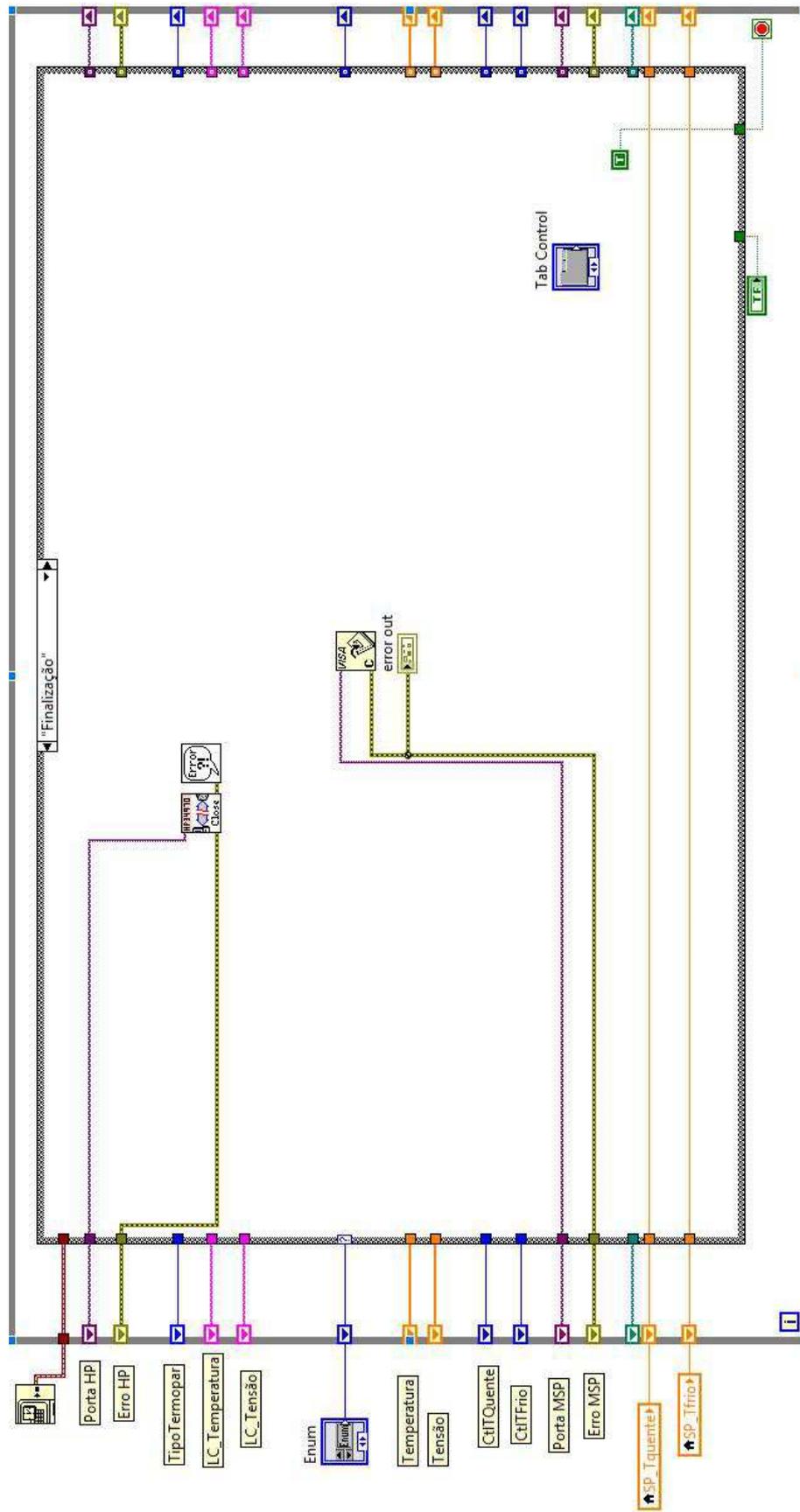












APÊNDICE C – Código implementado no CCS para geração de sinais PWM

```
// <> restricts the search path to only the specified path
// "" the search starts in the project directory

// PRIMEIRA PARTE

#include <stdint.h> // Variable definitions for the C99 standard
#include <stdbool.h> // Boolean definitions for the C99 standard
#include "driverlib/rom.h" // Macros to facilitate calling the functions in ROM
#include "inc/hw_memmap.h" // Macros defining the memory map of the Tiva C Series
device. This includes defines such as peripheral base address locations such as
GPIO_PORTF_BASE.
#include "inc/tm4c123gh6pm.h" // Definitions for the interrupt and register assignments on
the Tiva C Series device on the LaunchPad board
#include "inc/hw_ints.h"
#include "inc/hw_gpio.h" // Defines and macros for the general purpose I/O APIs
#include "inc/hw_types.h" // Defines common types and macros
#include "driverlib/sysctl.h" // Defines and macros for System Control API of DriverLib.
This includes API functions such as SysCtlClockSet and SysCtlClockGet.
#include "driverlib/gpio.h" // Defines and macros for GPIO API of DriverLib. This includes
API functions such as GPIOPinTypePWM and GPIOPinWrite.
#include "driverlib/debug.h"
#include "driverlib/interrupt.h" // Defines and macros for NVIC Controller (Interrupt) API of
driverLib. This includes API functions such as IntEnable and IntPrioritySet.
#include "driverlib/pwm.h"
#include "driverlib/pin_map.h" // The mapping of the peripherals to the pins
#include "driverlib/uart.h"

#define PWM_FREQUENCY 10000 // 10kHz

volatile uint32_t ui32Load;
volatile uint32_t ui32PWMClock;

//VARIABLES PARA COMUNICAÇÃO UART
int posicao = 0;
int valor[7];
int flag = 0;

//VARIABLES DE PORCENTAGEM
uint8_t byte_menos1;
```

```

uint8_t byte_mais1;
uint16_t temp1;
uint16_t val1;
uint8_t byte_menos2;
uint8_t byte_mais2;
uint16_t temp2;
uint16_t val2;

```

```
uint8_t ui8PinData=2;
```

```
uint8_t teste = 0;
```

```
// SEGUNDA PARTE
```

```
//INTERRUPÇÃO UART0 Recebimento do comando
```

```
void UARTIntHandler(void){
```

```

//  GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1, ui8PinData);
//  SysCtlDelay(1000);
//  GPIOPinWrite(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1, 0x00);
//  SysCtlDelay(1000);

```

```
uint32_t ui32Status;
```

```

ui32Status = UARTIntStatus(UART0_BASE, true); // Get the interrupt status.
UARTIntClear(UART0_BASE, ui32Status); // Clear the asserted interrupts.

```

```

if(UARTCharsAvail(UART0_BASE)==true)// Loop while there are
characters in the receive FIFO.

```

```
{
```

```

if(posicao==0){

```

```

    valor[posicao]

```

```
=
```

```

UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na primeira
posição do vetor

```

```

    posicao++;

```

```
}
```

```

else if(posicao==1){

```

```

    valor[posicao]

```

```
=
```

```

UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor

```

```

    posicao++;

```

```
}
```

```

else if(posicao==2){

```

```

    valor[posicao]

```

```
=
```

```

UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor

```

```

    posicao++;

```

```
}
```

```

else if(posicao==3){

```

```

        valor[posicao] =
UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor
        posicao++;
    }
    else if(posicao==4){
        valor[posicao] =
UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor
        posicao++;
    }
    else if(posicao==5){
        valor[posicao] =
UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor
        posicao++;
    }
    else if(posicao==6){
        valor[posicao] =
UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE); // coloca caractere digitado na segunda
posição do vetor
        posicao=0;
    }
    else{
        posicao=0;
    }
}

if (valor[6] == 'A'){ // 65 equivale a 'A' pela tabela ASCII

    // Calcula valor para primeiro valor de PWM
    byte_menos1 = valor[2];
    byte_mais1 = valor[1];

    temp1 = byte_menos1 + (byte_mais1<<8);
    val1 = temp1 & 0x1FFF;

    //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE,byte_menos1);
    //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE,byte_mais1);

    // Calcula valor para segundo valor de PWM
    byte_menos2 = valor[5];
    byte_mais2 = valor[4];

    temp2 = byte_menos2 + (byte_mais2<<8);
    val2 = temp2 & 0x1FFF;

    PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_1, val1);

```

```

        PWM Pulse Width Set(PWM1_BASE, PWM_OUT_0, val2);

        //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE,byte_menos2);
        //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE,byte_mais2);

    }

}

// PARTE TRÊS

int main(void) {

    // INITIALIZATION

    // 1. Frequency configuration

    SysCtlClockSet(SYSCTL_SYSDIV_2_5|SYSCTL_USE_PLL|SYSCTL_OSC_MAIN|SYSCTL_XTAL_16MHZ); // Sets the clocking of the device | PLL Freq is 400MHz | System Freq is 400MHz/2.5/2 = 80MHz
    //(System Clock Divider | Use of PPL | Oscillator Source | External Crystal Frequency)

    SysCtlPWMClockSet(SYSCTL_PWMDIV_1); // Sets the PWM clock configuration
    // This function configures the rate of the clock provided to the pwm module as a ratio of the processor clock.

    // 2. Enable PWM and GPIOD modules

    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_PWM1); // Enables a peripheral
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOD); // At power-up, all peripherals are disabled, they must be enabled in order to operate or respond to register reads/writes.
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA);

    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1);

    // Pins configuration as PWM output
    GPIOPinTypePWM(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_0); // Configures pin for use by the PWM peripheral
    GPIOPinTypePWM(GPIO_PORTD_BASE, GPIO_PIN_1); // (port, pin)
    GPIOPinConfigure(GPIO_PD0_M1PWM0); // Configures the alternate function of a GPIO pin.
    GPIOPinConfigure(GPIO_PD1_M1PWM1); // Configure as PWM function

```

```

ui32PWMClock = SysCtlClockGet(); // Get the processor clock rate
ui32Load = (ui32PWMClock / PWM_FREQUENCY) - 1; // Determine the count to be
loaded into the Load register. PWM position [0 - ui32Load]

PWMGenConfigure(PWM1_BASE, PWM_GEN_0, PWM_GEN_MODE_DOWN);
// Configure PWM register
PWMGenConfigure(PWM1_BASE, PWM_GEN_1, PWM_GEN_MODE_DOWN);
// (Base address of the PWM module, PWM generator to configure, configuration for the PWM
generator)

PWMGenPeriodSet(PWM1_BASE, PWM_GEN_0, ui32Load); // Sets the period of
a PWM generator
PWMGenPeriodSet(PWM1_BASE, PWM_GEN_1, ui32Load); // (Base address of
the PWM module, PWM generator to be modified, specifies the period of PWM generator
output measured in the clock ticks)

PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_0, 3999); // Sets the pulse width
for the specified PWM output
PWMPulseWidthSet(PWM1_BASE, PWM_OUT_1, 3999); // (Base address of the
PWM module, PWM output to modify, specifies the width of the positive portion of the
pulse)

PWMOutputState(PWM1_BASE, PWM_OUT_0_BIT, true); // Enables or disables
PWM outputs
PWMOutputState(PWM1_BASE, PWM_OUT_1_BIT, true); // (Base address of the
PWM module, PWM outputs to be modified, determines if the signal is enabled or disabled)

PWMGenEnable(PWM1_BASE, PWM_GEN_0); // Enables the timer/counter for a
PWM generator block
PWMGenEnable(PWM1_BASE, PWM_GEN_1); // (Base address of the PWM
module, PWM generator to be enabled)

// 3. Configurações UART

SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0); //habilita o clock para a
UART
teste = 10;
GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1);
//configura pinos 0 e 1 do portal A como tipo UART
teste = 2;
GPIOPinConfigure(GPIO_PA0_U0RX); //configura pino A0 como RX
GPIOPinConfigure(GPIO_PA1_U0TX); //configura pino A1 como TX

//configura baud rate para UART0
UARTConfigSetExpClk(UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 115200,
(UART_CONFIG_WLEN_8 | UART_CONFIG_STOP_ONE |
UART_CONFIG_PAR_NONE));

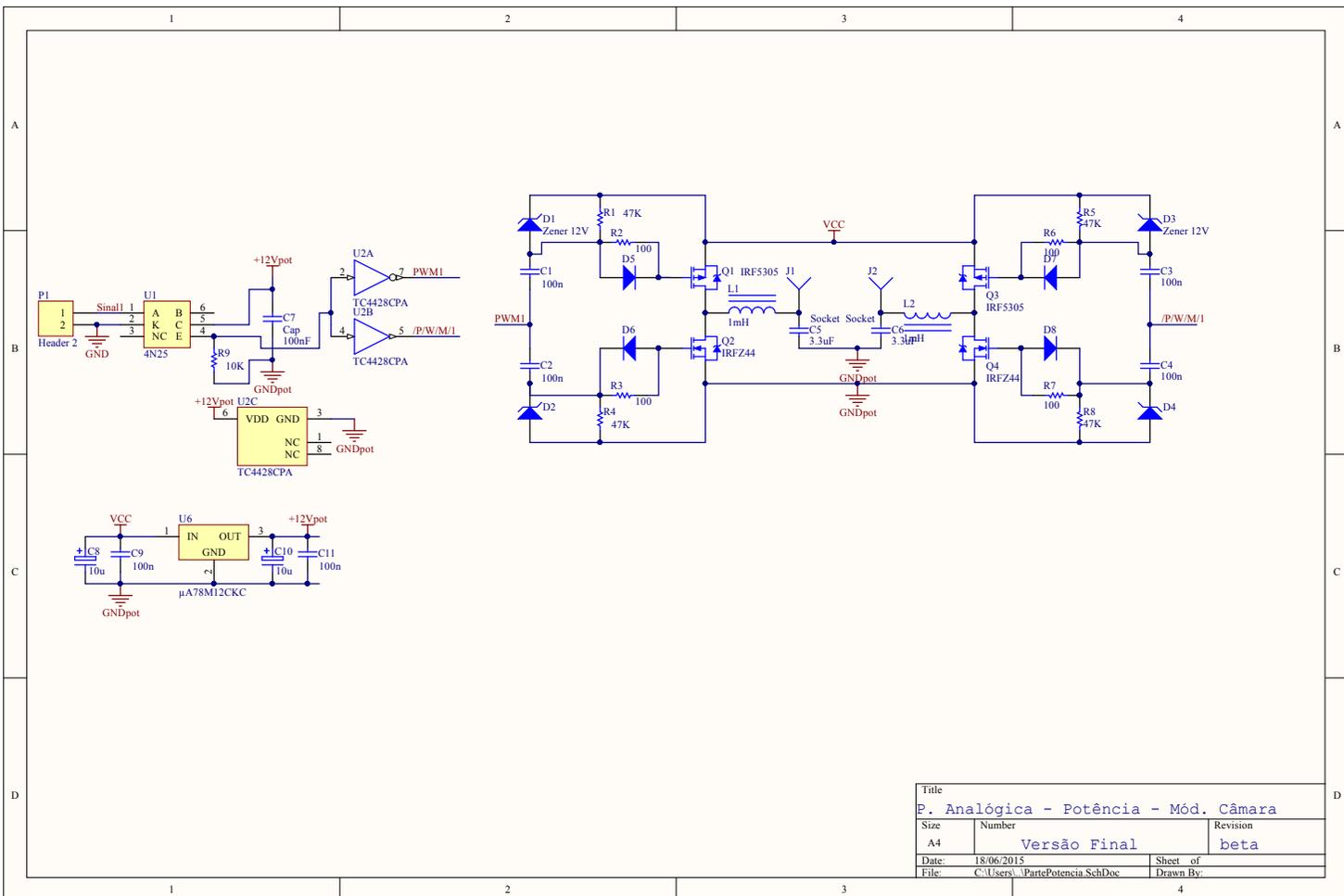
```

```
IntEnable(INT_UART0);
UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX | UART_INT_RT);
UARTEnable(UART0_BASE);
IntMasterEnable();

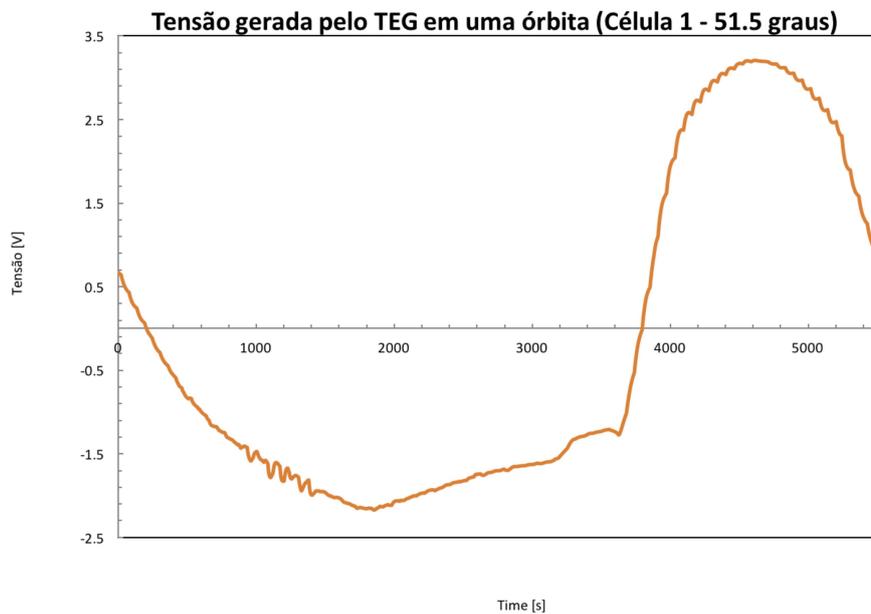
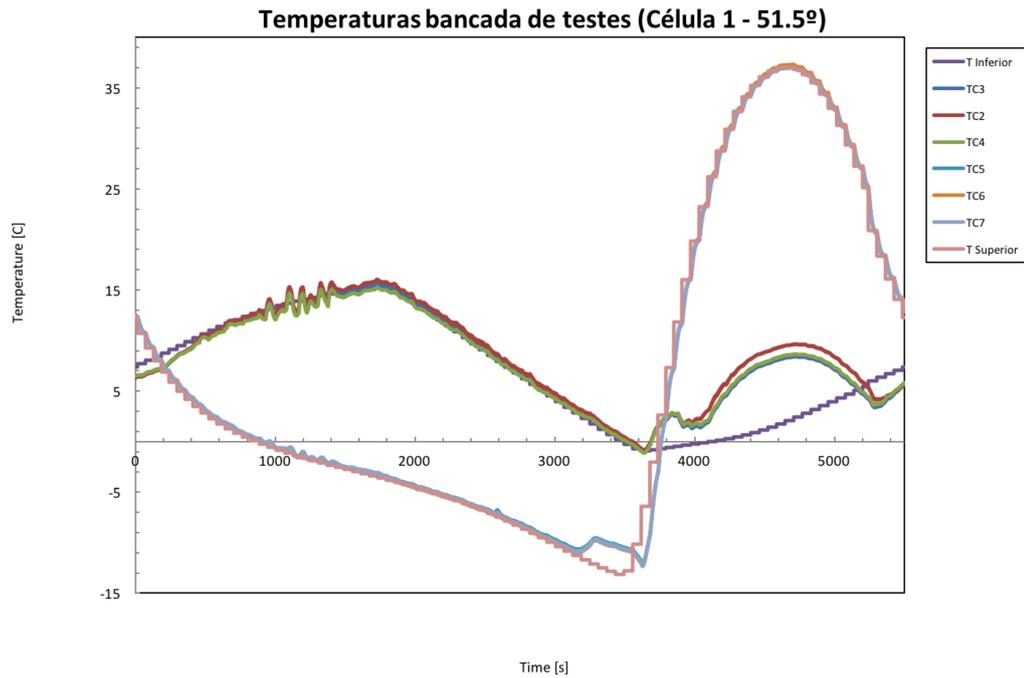
while(1){

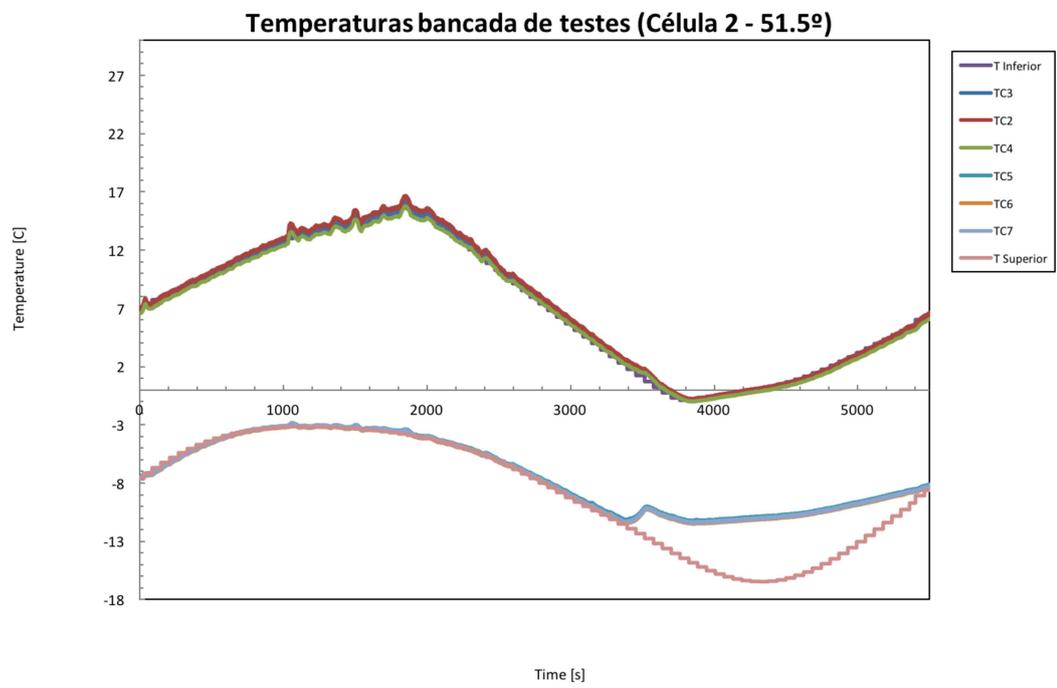
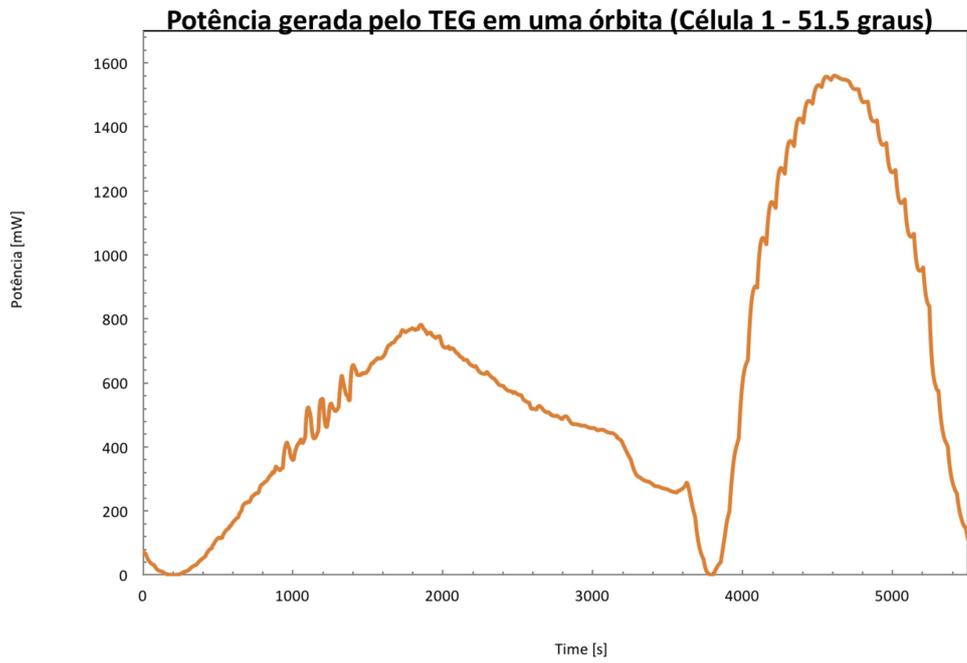
}
}
```

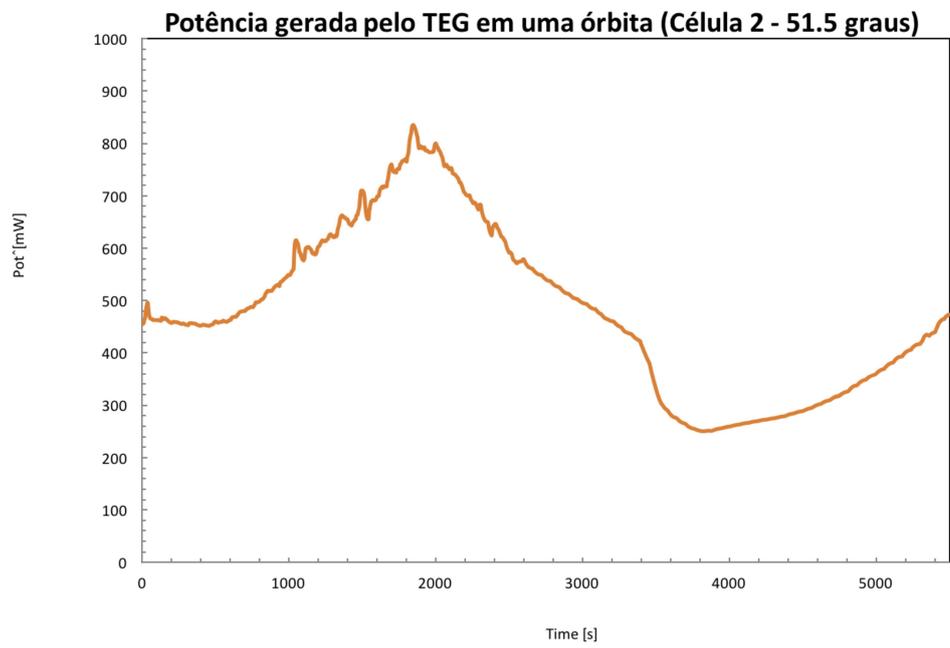
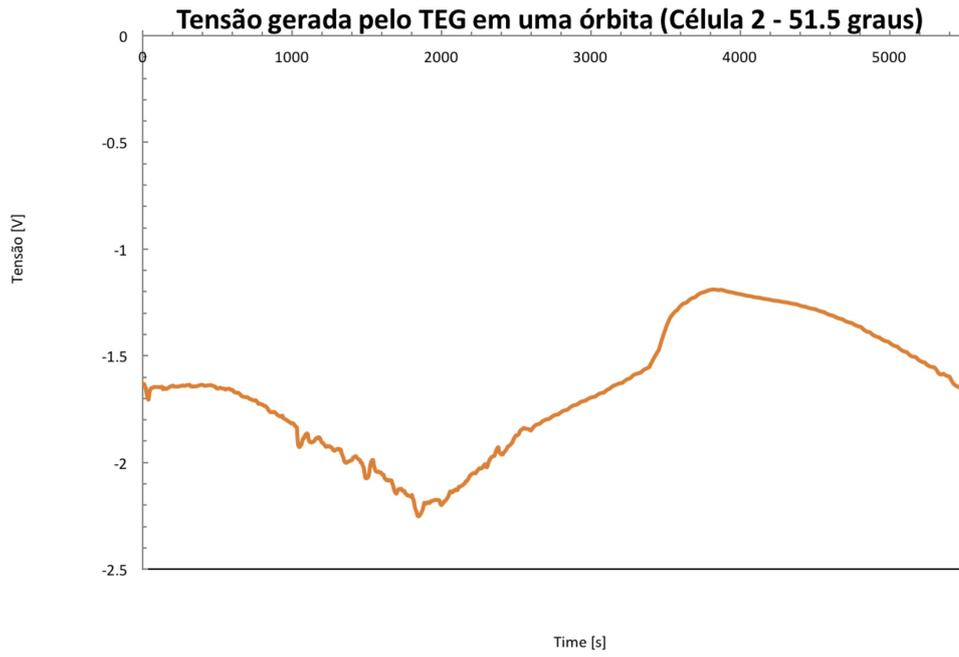
APÊNDICE D – Esquemático do circuito de ponte H

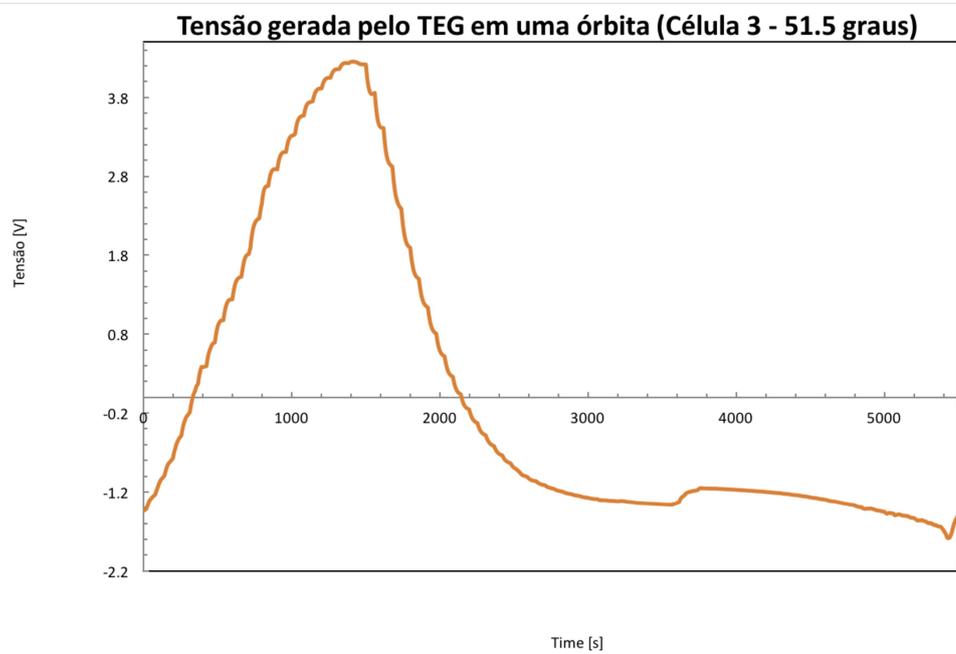
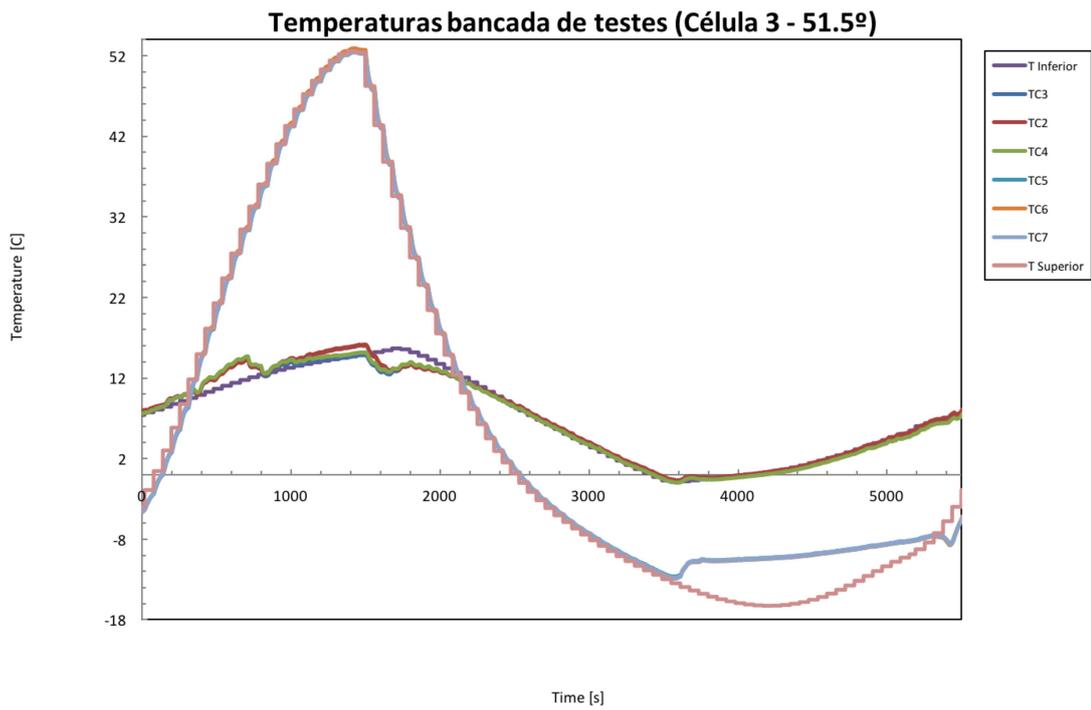


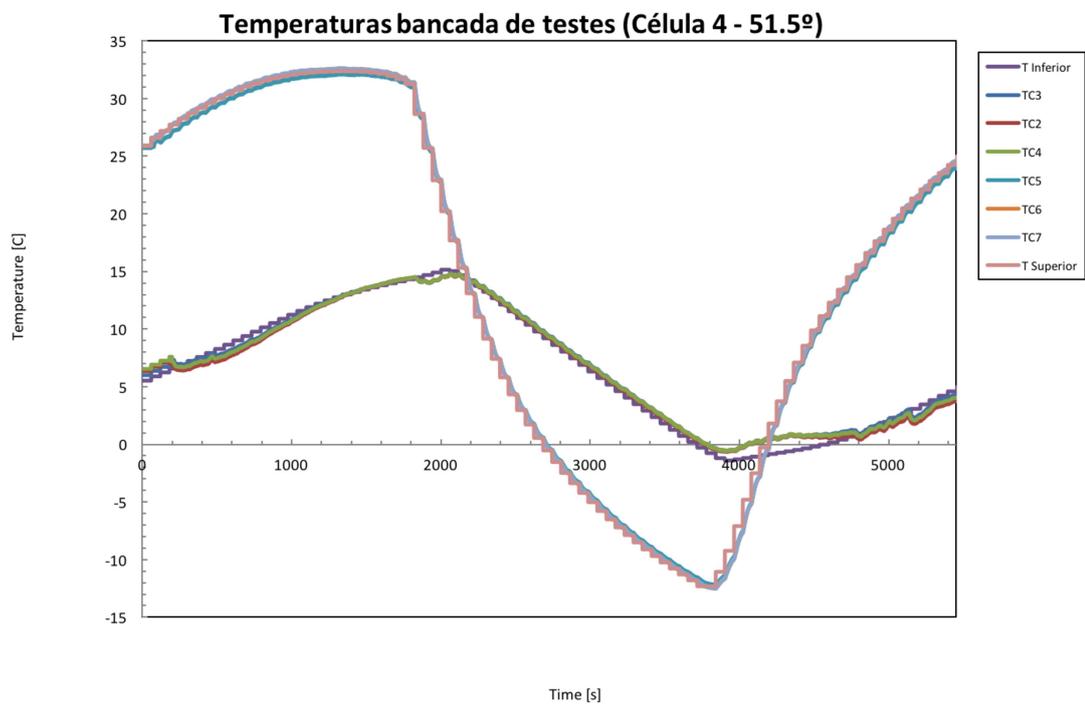
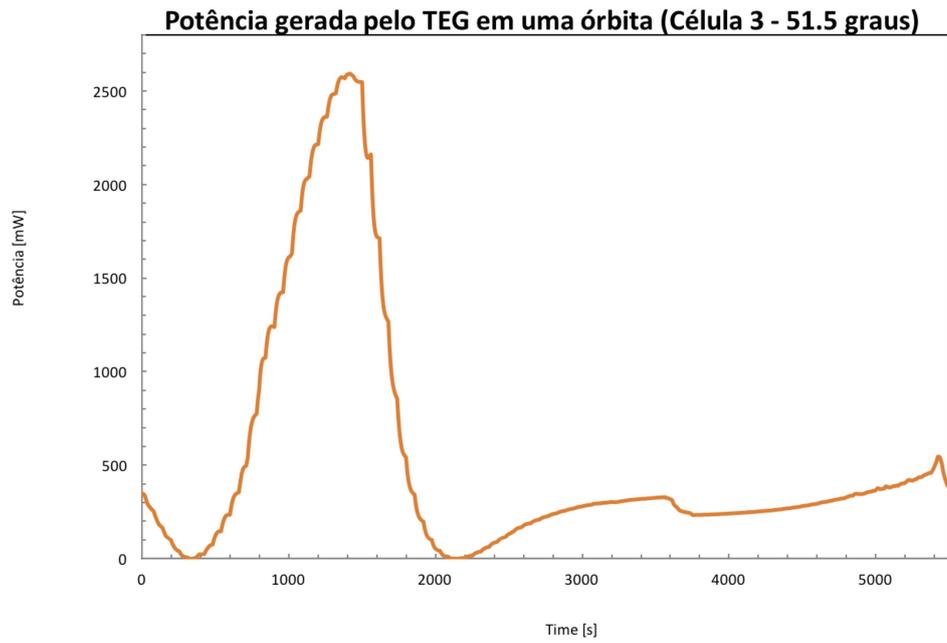
APÊNDICE E – Gráficos de temperatura, tensão e potência gerados a partir dos testes em bancada experimental para as 6 configurações de posição nos painéis solares (Célula 1 – 6)

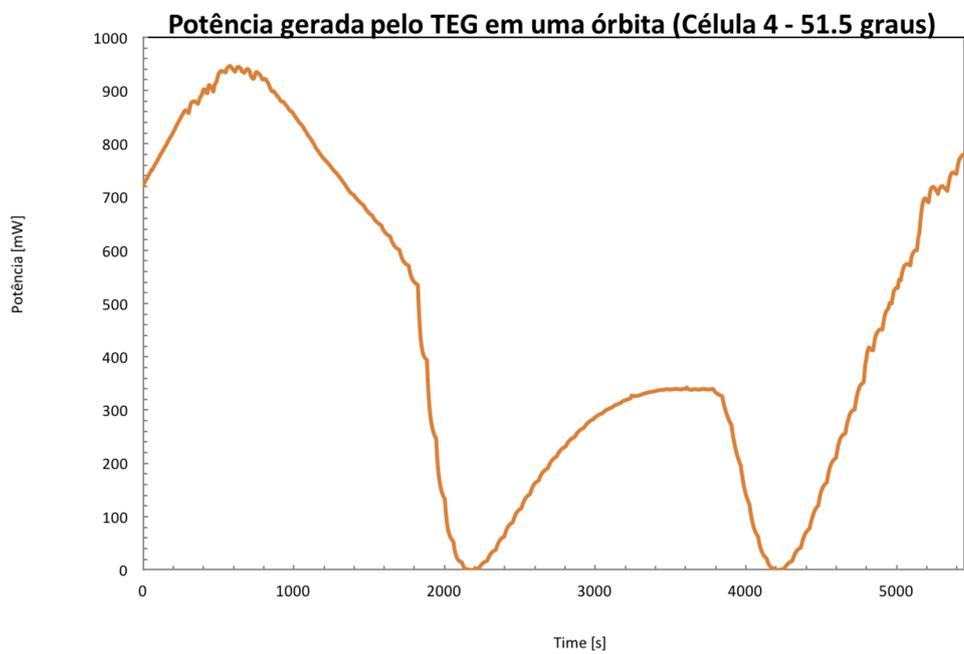
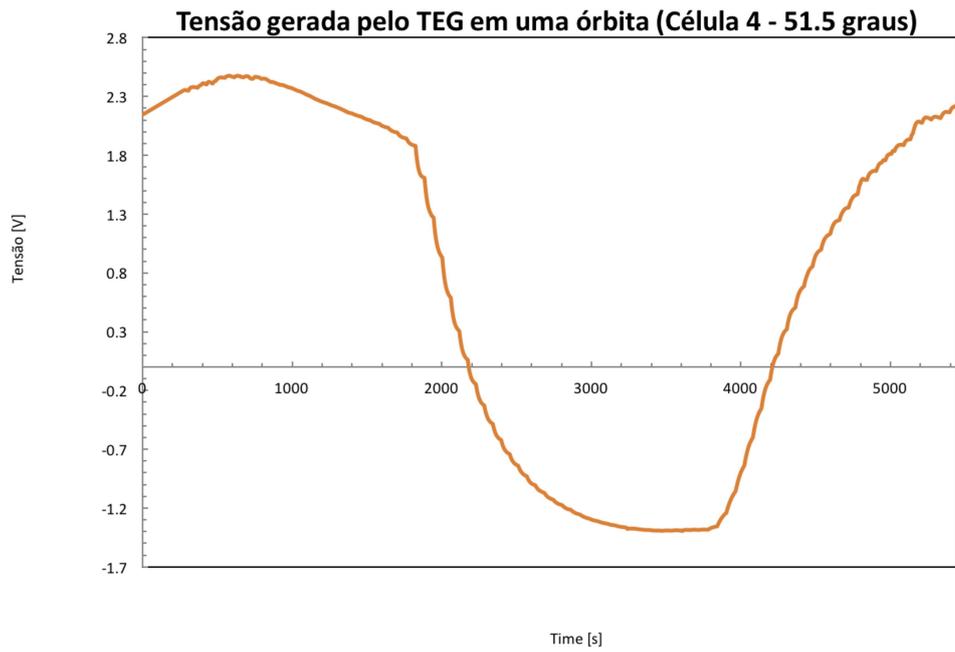




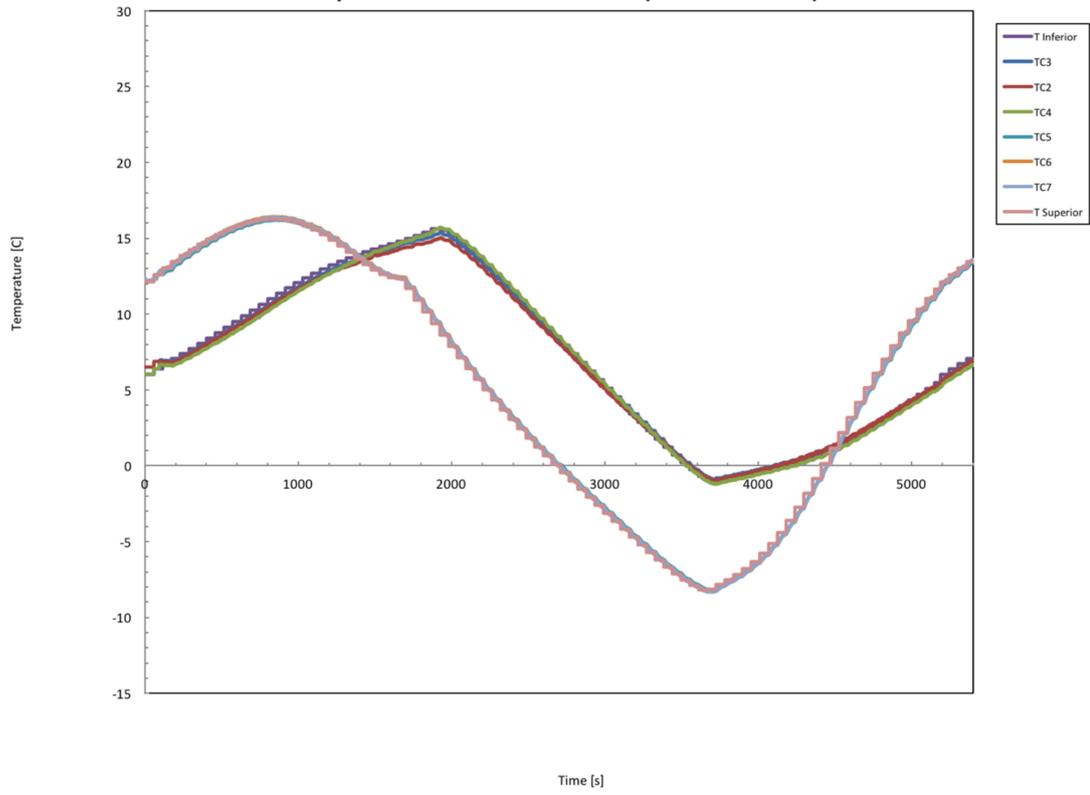








Temperaturas bancada de testes (Célula 5 - 51.5°)



Tensão gerada pelo TEG em uma órbita (Célula 5 - 51.5 graus)

