

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

DIEGO BONKOWSKI DE LA SIERRA AUDIFFRED

**UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM NANOSATÉLITES**

Joinville, 2015

DIEGO BONKOWSKI DE LA SIERRA AUDIFFRED

**UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM NANOSATÉLITES**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Aeroespacial.

Orientador: Dr. Kleber Vieira de Paiva

Joinville, 2015

DIEGO BONKOWSKI DE LA SIERRA AUDIFFRED

**UTILIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM NANOSATÉLITES**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Aeroespacial, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 08 de julho de 2014.

Prof. Juan Pablo de Lima Costa Salazar, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Kleber Vieira de Paiva, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Prof. Cirilo Seppi Bresolin, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha mãe e minhas irmãs

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e assim, tornar tudo isso possível.

Agradeço também à minha família por me apoiar nas minhas decisões, pelo suporte dado nos momentos mais difíceis e pelo amor incondicional.

Aos meus amigos pelos momentos de descontração. Também agradeço pela companhia nesses anos de estudo, ao pessoal do PET, do CEM Asas, à turma 2010/1, aos demais estudantes do curso de Engenharia Aeroespacial da UFSC e também àqueles que tive o prazer de conhecer durante meu intercâmbio na *University of Illinois*.

Ao professor Fabiano Wolf, pela orientação e dedicação em meu primeiro trabalho de pesquisa na universidade.

Gostaria de agradecer também aos professores que sempre se mostraram acessíveis e dispostos a ajudar, em especial aos professores Cristiano Vasconcellos Ferreira e Viviane Lilian Soethe.

Ao meu orientador Kleber Vieira de Paiva pela paciência e dedicação na realização deste trabalho.

Também gostaria de agradecer ao professor Anderson Wedderhoff Spengler pela grande contribuição no desenvolvimento do presente trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente ajudaram na minha formação acadêmica e amadurecimento.

“Deve-se aprender sempre, até mesmo com um inimigo.”
ISAAC NEWTON

RESUMO

O presente trabalho tem como proposta estudar a viabilidade em se utilizar geradores termoelétricos, para alimentar os subsistemas de um satélite. Não existem muitos estudos que tratam especificamente desse tema, no entanto, há um número considerável e crescente de trabalhos que tratam sobre o uso de dispositivos termoelétricos, em outras áreas. Pretende-se através desses trabalhos verificar os principais materiais utilizados na construção desses dispositivos e a influência deles na performance dos mesmos, assim como, estudar as equações desenvolvidas e experimentos já realizados que permitem avaliar o desempenho desses dispositivos para condições de operações pré-determinadas. Em suma, a partir de uma análise teórica sobre as características de desempenho de geradores termoelétricos, é determinada uma configuração de um conjunto de módulos termoelétricos para avaliar experimentalmente o desempenho de um gerador termoelétrico aplicado à nanosatélites. Como resultado obteve-se que é possível gerar uma média de 112,82 mW de energia elétrica a partir de um dispositivo termoelétrico aplicado a condições reais de temperatura de um nanosatélite em específico. Assim como apresenta-se condições de extrapolar a capacidade de geração de energia de um gerador termoelétrico aplicado à outros estados de temperatura.

Palavras-chave: Geradores termoelétricos, Suprimento de Energia de Nanosatélites.

ABSTRACT

The purpose of the present work is to study the viability of using thermoelectric generators to supply electrical power for the subsystems of a nanosatellite. There is not much work done in this specific field of study, however there are an increasing and considerable number of papers about the use of thermoelectric generators. With this work there is the intention of verifying the major materials used on construction of thermoelectric generators and how these materials affect the performance of these modules. In addition to that there is also the intention of studying the equations and experiments developed that make possible the evaluation of the performance of such devices to predetermined condition operations. In sum, from a theoretical analysis about the characteristics of performance of thermoelectric generators it is determined a configuration of a set of thermoelectric modules to experimentally evaluate the performance of a thermoelectric generator. As a result it is shown that the thermoelectric device which is applied to real temperature conditions of a specific nanosatellite may generate an average of 112,82 mW of electrical power. Additionally, it is presented conditions to deduce the energy generation capability of a thermoelectric generator applied to other temperature conditions.

Keywords: Thermoelectric Generators, Energy Supply of Nanosatellites.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultados da aplicação de células Peltier no sistema de exaustão do carro BMW X6 para geração de energia elétrica.....	16
Figura 2. Efeito Seebeck.....	19
Figura 3. Efeito Peltier	20
Figura 4. Funcionamento de resfriadores termoelétricos.	23
Figura 5. Configuração célula Peltier.	23
Figura 6. Representação do efeito Seebeck para uma célula termoelétrica.....	24
Figura 7. Mínima temperatura atingível no lado frio em função da figura de mérito	28
Figura 8. Figura de mérito em função da temperatura para materiais com boas propriedades termoelétricas.	29
Figura 9. Análise da potência de saída do módulo Peltier.....	30
Figura 10. Análise da tensão de saída do módulo Peltier.	30
Figura 11. Análise da corrente de saída do módulo Peltier	31
Figura 12. Temperaturas lado externo do nanosatélite CP3 medidas em 2007.....	33
Figura 13. Temperaturas lado externo do nanosatélite CP3 medidas em 2011.....	34
Figura 14. Orientação do nanosatélite OSIRIS-3U em relação à Terra.	35
Figura 15. Potência de saída obtida para dois TEGs comerciais.	37
Figura 16. Montagem do aparato experimental.....	39
Figura 17. Configuração do aparato experimental	40
Figura 18. Bancada de teste.....	41
Figura 19. Placa intermediária do módulo de teste	42
Figura 20. Gerador termoelétrico utilizado nos experimentos	42
Figura 21. <i>Hardware</i> HP HEWLETT PACKARD 34970A	43
Figura 22. Diagrama das funções executadas pelo programa criado em LabVIEW.....	45
Figura 23. Microcontrolador MSP430F5529	48
Figura 24. Placa de circuito ponte H	49
Figura 25. Gráfico do controle de temperatura das células Peltier.....	50
Figura 26. Localização dos termopares presentes na bancada de testes.....	51
Figura 27. Valores de resistência interna do TEG obtidos experimentalmente	53

Figura 28. Máxima energia elétrica obtida em função da média das temperaturas nas faces do gerador termoelétrico	54
Figura 29. Valores experimentais de tensão de saída em função do gradiente de temperatura presente em um TEG	55
Figura 30. Estimativa da máxima potência de saída fornecida pela gerador termoelétrico em função do gradiente de temperatura.....	56
Figura 31. Aproximação da temperatura externa de um nanosatélite em função do tempo, considerando uma órbita completa	58
Figura 32. Estimativa da potência máxima de saída para uma órbita de um nanosatélite	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre células fotovoltaicas e Peltier.	32
Tabela 2. Média das temperaturas máximas e mínimas dos painéis do OSIRIS-3U para a altitude de 300 km e inclinação de 90°.	36
Tabela 3. Média das temperaturas máximas e mínimas dos painéis do OSIRIS-3U para a altitude de 400km e inclinação de 0°.	36
Tabela 4. Gradiente de temperatura do nanosatélite OSIRIS-3U, para uma órbita de 400 km e inclinação de 0°.	36
Tabela 5. Propriedades dos dispositivos termoelétricos.	37
Tabela 6. Comparação entre dois modelos diferentes de TEG.	38

LISTA DE ABREVIATURAS

PWM	Modulação por largura de pulso (do inglês <i>pulse width modulation</i>)
TEC	Refrigerador termoelétrico (do inglês <i>thermoelectric cooler</i>)
TEG	Gerador Termoelétrico (do inglês <i>thermoelectric generator</i>)
V.I.	Instrumento virtual (do inglês <i>virtual instrument</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

U	Diferença de potencial, tensão	[V]
α	Coefficiente de Seebeck	[V/K]
T	Temperatura	[K]
Q	Quantidade de calor	[w]
π	Coefficiente de Peltier	[w/A]
I	Corrente elétrica	[A]
β	Coefficiente de Thomson	[V/K]
Q _{in}	Energia térmica absorvida	[w]
T _h	Temperatura na face quente da célula Peltier	[K]
T _c	Temperatura na face quente da célula Peltier	[K]
R _{in}	Resistência interna da célula Peltier	[Ω]
Q _{out}	Energia térmica dissipada	[w]
K	Condutividade térmica	[w.m ⁻¹ .k ⁻¹]
P _{pro}	Energia elétrica produzida	[w]
V ₀	Tensão de circuito aberto	[V]
V _{out}	Tensão de saída	[V]
I _{out}	Corrente de saída	[A]
R _{load}	Resistência de carga	[Ω]
M	Razão de carga	[-]
η	Eficiência	[-]
P _{pro} ^{max}	Potência elétrica máxima de saída	[w]
I _p ^{max}	Corrente elétrica para a condição de potência elétrica máxima	[A]
M _{η}	Razão de carga para a condição de eficiência máxima	[-]
T _m	Média entre as temperaturas das faces da célula Peltier	[K]
ρ	Resistividade elétrica	[Ω .m]
Z	Figura de mérito	[K ⁻¹]
ZT	Figura de mérito na forma adimensional	[-]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
2. EFEITO TERMOELÉTRICO	19
3. DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS	22
3.1 DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS	25
3.2 NÚMERO DE MÉRITO	27
3.3 DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS VS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS	29
4. CONDIÇÕES TÉRMICAS EM NANOSATÉLITES	33
5. APARATO EXPERIMENTAL	39
5.1 BANCADA DE TESTES	40
5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO	43
5.3 COMPUTADOR	44
6.3.1 LabVIEW	44
6.3.2 <i>Software Energia</i>	46
5.4 MICROCONTROLADOR	47
5.5 PONTE H.....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6.1 CONTROLE DE TEMPERATURA	50
6.2 RESISTÊNCIA INTERNA DO TEG	52
6.3 POTÊNCIA DE SAÍDA DO GERADOR TERMOELÉTRICO.....	53
6.4 ANÁLISE DE ERROS EXPERIMENTAIS	59
7. CONCLUSÃO	61
7.1 TRABALHO FUTUROS	62
REFERÊNCIAS	63
APÊNDICE A - Programa desenvolvido em LabVIEW: Painel Frontal e Diagrama de blocos na forma de diagrama de estados (Inicialização, Leituras, Cálculos, Gravação de dados, Aplicação Controle e Finalização)	66

APÊNDICE B – Código desenvolvido para o microcontrolador MSP 430F5529 por meio do <i>software</i> Energia	73
APÊNDICE C – Circuito Elétrico da Ponte H	75
ANEXO A – Informações Técnicas do TEC CP60240, fabricante CUI.....	77
ANEXO B – Informações Técnicas do TEC 12708, fabricante Hebei.....	81
ANEXO C – Informações Técnicas do Gerador Termoelétrico Utilizado nos Experimentos	85

1. INTRODUÇÃO

Quando se está no espaço existe grande restrição na obtenção de energia elétrica. Enquanto se está na Terra, existem diversas maneiras de se obter energia elétrica ou então converter algum outro tipo de energia em energia elétrica. O sol é uma fonte de energia poderosa, limpa e bastante conveniente para satélites, necessita-se apenas um modo de converter a energia contida na radiação solar em energia elétrica. Uma das maneiras mais eficientes encontradas atualmente é por meio de painéis compostos de células fotovoltaicas semicondutoras, os quais são comumente conhecidos como painéis solares (ESA, 2003).

No entanto, os painéis solares precisam ter uma área grande para poderem alimentar os diversos subsistemas de um satélite, e isso naturalmente se traduz em uma massa mais elevada do satélite. O custo por quilo para lançar um satélite de órbita baixa (LEO) chega a ser superior a dez mil dólares, podendo ultrapassar o valor de trinta mil dólares, para casos específicos (FUTRON, 2014).

Outro problema que se tem devido a grande área dos painéis solares em satélites de baixa órbita é o aumento do arrasto atmosférico. Este efeito é responsável por reduzir a velocidade do satélite, fazendo com que o mesmo perca altitude. Para uma menor altitude a atmosfera é ainda mais densa, intensificando cada vez mais esse efeito e assim limitando a vida útil do satélite (HQ TRADOC, 2014). Além do mais, o arrasto atmosférico é considerado a principal fonte de erro na determinação de órbitas de satélites (GAPOSCHKIN; COSTER, 1988).

Na busca pela redução dos custos no lançamento de um satélite e também na minimização do arrasto atmosférico, a utilização de geradores termoelétricos mostra-se como uma boa alternativa para auxiliar na alimentação dos subsistemas de um satélite. Essas células são compactas, livres de vibração, baixo peso e de alta confiabilidade (JACQUES, 2014).

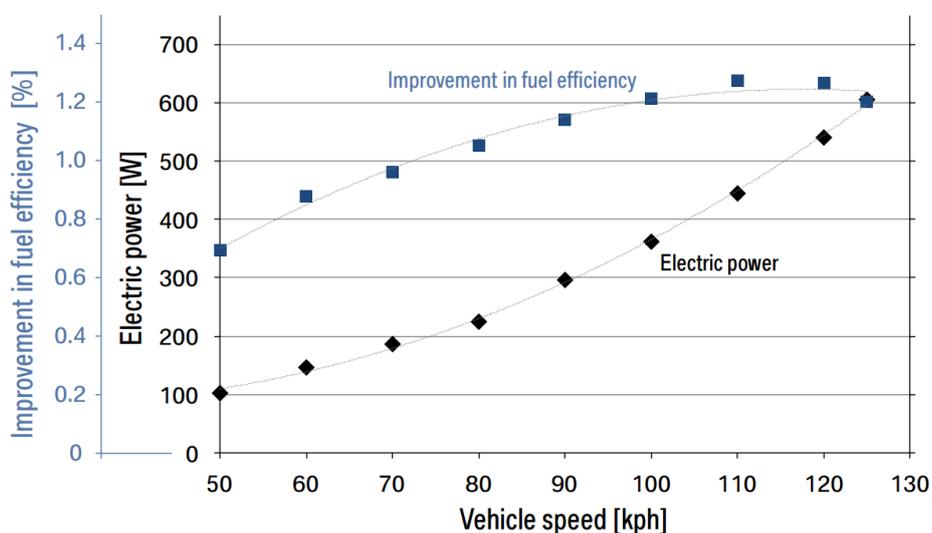
Os geradores termoelétricos, também conhecidos como módulos Peltier são dispositivos que geram corrente elétrica por meio de um gradiente de temperatura. Uma vez que os satélites possuem a superfície exposta ao sol muito quente e a superfície

voltado à sombra, muito fria, este dispositivo pode ser utilizado para captar esta energia térmica e convertê-la em energia elétrica.

Várias empresas tem procurado investir na utilização de dispositivos termoelétricos para a geração de energia elétrica. A empresa BMW, por exemplo, tem estudado dois sistemas alternativos de dispositivos TEG. No qual foi projetada uma unidade para o sistema de exaustão e outra para o sistema de recirculação dos gases de exaustão. Para o sistema de exaustão, a empresa conseguiu em 2008 obter um valor máximo de 200 W na geração de energia elétrica. E com o uso de novos materiais obteve mais tarde o valor de 1000 W, atingindo assim seu objetivo (GREEN CAR CONGRESS, 2011).

A Figura 1 mostra os resultados obtidos com esse sistema aplicado ao carro BMW X6, onde são apresentados a energia gerada e o aumento da eficiência no consumo de combustível em função da velocidade do carro.

Figura 1. Resultados da aplicação de células Peltier no sistema de exaustão do carro BMW X6 para geração de energia elétrica



Fonte: Mazar (2012)

Em 2009, a BMW decidiu integrar um conjunto de geradores termoelétricos no radiador do sistema de recirculação dos gases de exaustão. Com esta configuração foi possível obter a geração de 250 W de energia, reduzindo a emissão de CO₂ e consumo de combustível em 2%.

Neste mesmo sentido, em 2012, por meio do inventor Nathan Hiller, a Boeing Company (2015) desenvolveu um projeto para utilizar células Peltier na fuselagem para geração de energia elétrica. O dispositivo termoelétrico é posicionado entre a camada interna e externa da fuselagem do avião. Assim é capaz de produzir eletricidade por meio da energia potencial que existe entre a cabine aquecida e as baixas temperaturas no lado externo do avião, quando o mesmo estiver em altas altitudes.

E voltado ao mercado consumidor, tem, por exemplo, a empresa TEGMART que desenvolve produtos com esse tipo de tecnologia. Um de seus produtos é um dispositivo termoelétrico para fogão a lenha. Há duas versões desse item, uma oferece uma tensão de saída de 12 V, enquanto outra uma tensão de 5 V. Para o modelo de gerador com saída de 12 V de tensão, pode-se gerar uma energia elétrica superior à 45 W, quando a placa do gerador é aquecida a uma temperatura de 350 °C. (TEGMART, 2013).

Esses módulos, no entanto possuem, baixa eficiência, mas mesmo assim, geradores termoelétricos com eficiência entre 6% e 7% já foram usados em sondas como Voyager, Ulysses e Cassini (NASA, 2009). Vários estudos vêm sendo realizados no intuito de aumentar a eficiência de geradores termoelétricos, assim como na busca de novas aplicações. Estima-se que até 2022 o mercado de geradores termoelétricos será de 750 milhões de dólares (IDTECHEX, 2012).

O método a ser utilizado para o trabalho é baseado no levantamento bibliográfico de teorias sobre células Peltier com aplicações voltadas a geração de energia. E através disso, realizar uma análise experimental das características de desempenho destas células em função das condições térmicas ao qual nanosatélites podem ser expostos.

Os resultados das análises buscam relacionar a capacidade de geração de energia de um dispositivo termoelétrico em função do gradiente de temperatura de suas faces. E assim, utilizar esses dados obtidos para estimar a energia gerada numa aplicação específica de um nanosatélite.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo principal analisar o desempenho de um gerador termoelétrico para aplicação em nanosatélites.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando atingir o objetivo principal, necessita-se cumprir os seguintes objetivos específicos:

- Verificar os gradientes de temperatura que se obtêm em um nanosatélite;
- Analisar experimentalmente o comportamento de dispositivos termoelétricos para diferentes condições de temperatura;
- Avaliar experimentalmente a capacidade de geração de energia de geradores termoelétricos.

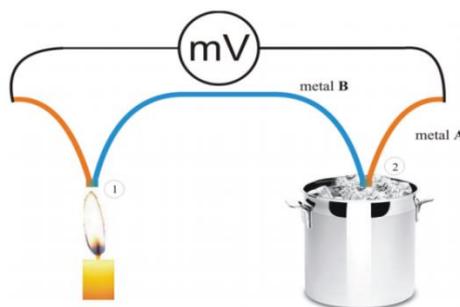
2. EFEITO TERMOELÉTRICO

Dispositivos termoelétricos possuem a capacidade de converter energia térmica, proveniente de um gradiente de temperatura, em energia elétrica, denominado efeito Seebeck, ou então, converter energia elétrica em um gradiente de temperatura, neste caso conhecido como efeito Peltier. O efeito termoelétrico foi primeiramente observado em metais entre o período de 1820 e 1830, mas se mostrou interessante apenas mais tarde, por volta do ano de 1950, com o advento de materiais semicondutores dopados, onde esse efeito possuiu uma eficiência muito maior (FRAISSE; LUO; XI, 2005; HAIDAR; ISAAC; SINGLETON, 2014).

De acordo com Fernandes (2012), Thomas Seebeck, em 1823, notou que unindo dois materiais condutores sujeitos a uma variação de temperatura e ligados aos terminais de um galvanômetro, ocorreria o surgimento de uma diferença de potencial, indicada no galvanômetro. A esse conjunto de elementos ligados e sujeitos a uma variação de temperatura foi dado o nome de Termopar. Treze anos mais tarde, o francês Jean Charles Athanase Peltier verificou o efeito contrário ao de Seebeck, utilizando uma montagem idêntica e invertendo o procedimento. Foi injetada uma corrente elétrica no lugar do galvanômetro e assim verificou que o termopar sofria uma variação de temperatura.

Considere a Figura 2, a qual representa o efeito de Seebeck. O circuito é formado por dois metais diferentes, percebe-se que as junções são mantidas em temperaturas distintas e que uma tensão surge nos terminais do circuito.

Figura 2. Efeito Seebeck



Fonte: Moura (2014)

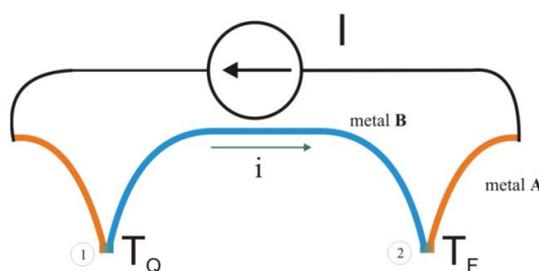
Conforme mostrado por Moura (2010) e Fernandes (2012) a diferença de potencial gerada pelo efeito Seebeck é dada pela equação abaixo:

$$U = \alpha \Delta T \quad (1)$$

onde U é a tensão em volts, ΔT é a diferença de temperatura entre o lado frio e quente dada em Kelvin e α é denominado como coeficiente de Seebeck, este é uma propriedade do material e sua unidade é dada em Volts/Kelvin. Se a corrente flui da junção quente para a junção fria, α é um valor positivo, sendo negativo no caso contrário. De acordo com Fernandes (2012), este coeficiente é quase linear para diferenças pequenas de temperatura.

Como representação do efeito Peltier considere a Figura 3. Ao aplicar uma corrente no circuito uma junção estará aquecida (T_Q) e outra ficará resfriada (T_F), sendo que o sentido da corrente é que determinará qual lado será aquecido e qual será resfriado.

Figura 3. Efeito Peltier



Fonte: Moura (2014)

A relação entre o calor bombeado pela junção em função da corrente aplicada, devido o efeito Peltier é dado pela equação abaixo (MOURA, 2010; FERNANDES, 2012):

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

onde Q é a quantidade de calor dado em watts, I é a corrente dada em ampères e π é o coeficiente de Peltier dado em watts/ampère. Considerando a Figura 2, π tem um valor

positivo se a junção 1 aquece e a junção 2 resfria quando a corrente flui de 1 para 2.

Em 1855, Lord Kelvin (W. Thomson) verificou uma relação entre esses dois coeficientes e adicionalmente observou um terceiro efeito. Thomson percebeu que considerando um material homogêneo, quando uma corrente percorrer este material e no mesmo existe uma diferença de temperatura, além da liberação de calor por efeito Joule haverá uma liberação ou absorção de calor que é proporcional à intensidade de corrente, dada pela equação (3). Esse efeito ficou então conhecido como efeito de Thomson (FERNANDES, 2012).

$$Q = \beta I \Delta T \quad (3)$$

onde Q é a quantidade de calor absorvida ou liberada em watts, I é a intensidade de corrente em ampères, ΔT é a variação de temperatura em kelvin, e β é o coeficiente de Thomson medido em volts/kelvin. O efeito de Thomson não é de principal importância para os dispositivos termoelétricos. A relação encontrada por Thomson entre o efeito Peltier e de Seebeck é dado pela equação mostrada abaixo:

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

onde T é a temperatura absoluta do sistema e α é o coeficiente de Seebeck. A única exceção para esta relação é quando um material não apresenta nenhuma resistência à passagem de corrente elétrica.

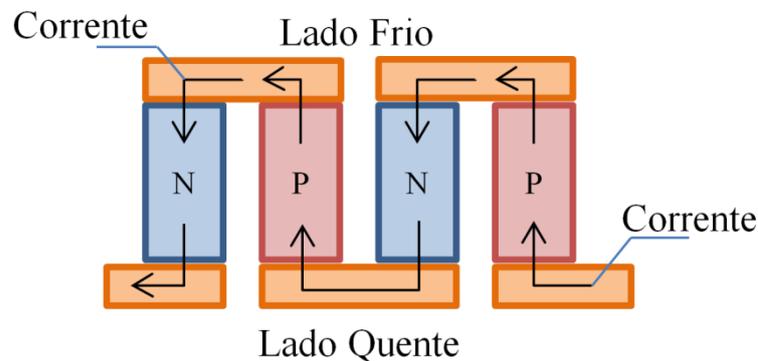
3. DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS

Existem no mercado dois tipos de dispositivos termoelétricos, os que operam pelo efeito Peltier e os que operam pelo efeito Seebeck. O primeiro caso são células utilizadas para aplicações de refrigeração ou aquecimento, sendo assim também chamadas de refrigeradores termoelétricos. Esses refrigeradores termoelétricos também são bastante conhecidos pela sigla TEC, do inglês *thermoelectric cooler*. As células que operam pelo efeito Seebeck são utilizadas para gerar corrente elétrica, por isso são denominadas de geradores termoelétricos. Neste caso elas são também bastante conhecidas pela sigla TEG devido a sua denominação em inglês, *thermoelectric generator* (PINDADO, 2008).

Para as células termoelétricas que operam por meio do efeito Peltier, conforme explicado no capítulo anterior, há um efeito aquecedor ou resfriador quanto uma corrente passa por dois condutores. Aplicar uma tensão nos polos de dois materiais dissimilares gera-se um gradiente de temperatura. Assim, uma célula Peltier é tipicamente formada por uma série de elementos semicondutores do tipo-p (abundância de “lacunas” livres, ou seja, ausência de elétrons) e tipo-n (abundância de elétrons livres), agrupados em pares que funcionam como condutores distintos.

Conforme Souza (2007) cita em seu trabalho, quando uma corrente contínua passa por pares de elementos de tipo-n para o tipo-p, a temperatura da junta fria é reduzida resultando assim em uma absorção do calor do ambiente. Este calor é transferido pela placa por transporte de elétrons e emitido no lado quente por meio de elétrons que se movem de um estado de alta energia para um estado de baixa energia. Ao inverter o sentido da corrente esse processo também é invertido. Desta forma, o lado que estava quente passa a ser refrigerado, enquanto que o lado que estava sendo refrigerado passa então a ser aquecido. A Figura 4 mostra esquematicamente esse processo.

Figura 4. Funcionamento de resfriadores termoelétricos.

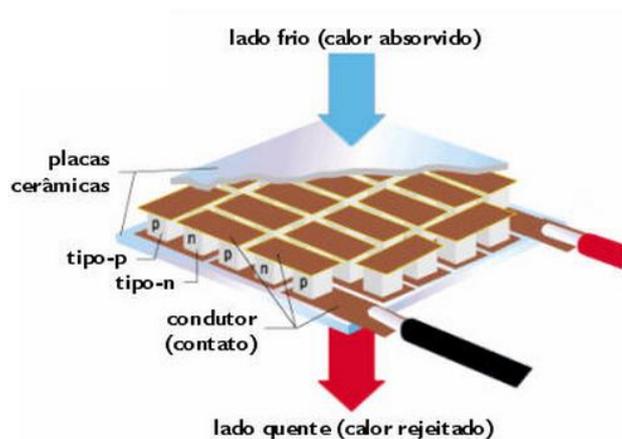


Fonte: Autor

De acordo com Silverio (2012), os elementos semicondutores são soldados entre duas placas cerâmicas, que possuem a função de proteger mecanicamente o módulo e também prover isolamento elétrico. Tais elementos são dispostos eletricamente em série e termicamente em paralelo. Essa configuração faz com que a transmissão de calor de cada um deles ocorra para uma mesma direção. Pindado (2008), acrescenta que esse arranjo também permite o aumento da tensão elétrica a ser aplicada.

A configuração de um dispositivo termoelétrico é mostrado por meio da Figura 5, mostrada abaixo.

Figura 5. Configuração célula Peltier.



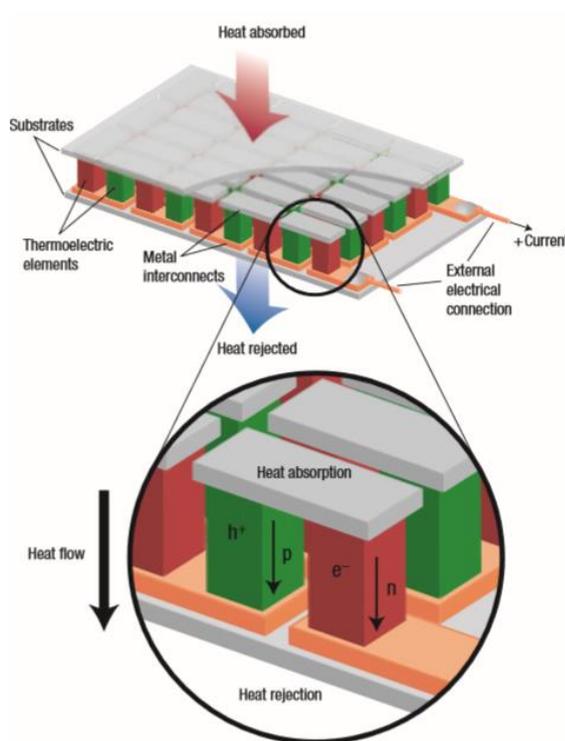
Fonte: Danvic (2015)

Da Figura 5, entende-se que para este caso específico a corrente flui do polo negativo para o polo positivo.

O princípio de funcionamento e configuração dos geradores termoelétricos é bastante semelhante aos TECs. Conforme mostrado por Snyder e Toberer (2008), no caso de geradores termoelétricos quando um gradiente de temperatura é aplicado ao material, os portadores de cargas livres presentes na face quente do módulo tendem a se difundir em direção a face fria. Esse processo resulta numa carga elétrica no lado frio gerando uma diferença de potencial. A carga elétrica será positiva se as cargas livres citadas acima forem “lacunas” e negativa quando estas forem elétrons. A representação desse processo pode ser visto através da Figura 6.

Na Figura 6, considera-se então uma fonte de calor na parte superior da placa e um sumidouro no lado inferior. Cria-se assim uma diferença de temperatura entre os dois lados, gerando corrente elétrica. O símbolo h^+ mostrada nesta figura representa a abundância de “lacunas” no material tipo-p, enquanto que e^- representa a abundância de elétrons presentes no material tipo-n.

Figura 6. Representação do efeito Seebeck para uma célula termoelétrica



Fonte: Snyder e Toberer (2008)

3.1 DESEMPENHO DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS

A avaliação de desempenho de um dispositivo termoelétrico, juntamente com a avaliação do ambiente espacial permite determinar a viabilidade em se utilizar células Peltier como geradores de energia para alimentar os subsistemas de um satélite. Neste quesito, Goupil et al. (2011) cita uma série de relações que permitem calcular a potência gerada por uma célula Peltier por meio das propriedades elétricas e termoelétricas dos materiais utilizados e também das condições de temperatura ao qual a célula está submetida. Essas equações são mostradas na sequência.

Energia térmica absorvida pela célula Peltier:

$$Q_{in} = \alpha T_h I - \frac{1}{2} R_{in} I^2 + K(T_h - T_c) \quad (5)$$

onde α é o coeficiente de Seebeck em volts/Kelvin, T_h é a temperatura no lado quente do dispositivo termoelétrico em Kelvin, T_c é a temperatura no lado frio em Kelvin, I é a corrente elétrica dada em ampères, R_{in} é a resistência interna do TEG em ohms e K é a condutividade térmica do material dada em watts/(metro. Kelvin).

Energia térmica dissipada:

$$Q_{out} = \alpha T_c I + \frac{1}{2} R_{in} I^2 + K(T_h - T_c) \quad (6)$$

Energia elétrica produzida:

$$P_{pro} = Q_{in} - Q_{out} = \alpha I(T_h - T_c) - R_{in} I^2 \quad (7)$$

Tensão de circuito aberto:

$$V_0 = \alpha(T_h - T_c) \quad (8)$$

Este mesmo autor considera a existência de uma resistência R_{load} conectada ao TEG e então define a razão $M = R_{load}/R_{in}$ como sendo uma razão de carga, e por fim expressa a corrente e tensão de saída em função dessa razão:

$$V_{out} = V_0 \frac{M}{1+M} \quad (9)$$

$$I_{out} = \frac{V_0}{R_{in}(1+M)} \quad (10)$$

Além dessas equações de desempenho citadas acima, o autor também mostra algumas equações que permitem calcular alguns parâmetros de eficiência para um conjunto de células Peltier, as mesmas são apresentadas a seguir.

Eficiência:

$$\eta = \frac{P_{pro}}{Q_{in}} \quad (11)$$

Potência elétrica máxima de saída

$$P_{pro}^{max} = \frac{\alpha^2 \Delta T^2}{4R_{in}} \quad (12)$$

Na condição apresentada pela equação (12), tem-se que a corrente elétrica pode ser obtida pela expressão mostrada abaixo:

$$I_P^{max} = \frac{V_0}{2R_{in}} \quad (13)$$

A equação (13) em comparação à equação (10) indica que a máxima potência de saída se obtém quando a resistência de carga elétrica R_{load} tem mesmo valor que a resistência interna do gerador termoelétrico. No entanto, a condição de máxima eficiência se dá para o caso em que a razão de carga M obedece a condição mostrada na equação (14).

$$M_{\eta} = \sqrt{1 + ZT_m} \quad (14)$$

onde o índice η indica que a razão de carga está na condição de máxima eficiência, e T_m se refere à média entre as temperaturas nas faces do dispositivo termoelétrico. Por meio de adição de calor, maior potência pode ser obtida através de uma configuração de máxima eficiência. Porém, para o desenvolvimento de um dispositivo termoelétrico deve ser considerado a condição de maior eficiência, pois assim a potência produzida é maximizada para um dado estado de temperaturas na qual o dispositivo termoelétrico está submetido.

3.2 NÚMERO DE MÉRITO

De acordo com Fernandes (2012), número de mérito é uma dimensão utilizada para quantificar o efeito termoelétrico de certo material, ou seja, é uma medida da capacidade em transformar energia térmica em energia elétrica. Tal dimensão relaciona três tipos de propriedades do material, propriedades elétricas, propriedades de transporte térmico e sua temperatura absoluta de funcionamento. O número de mérito é representado pela letra Z e pode ser obtida como função do coeficiente de Seebeck α , da resistividade elétrica ρ e a condutividade térmica k , como mostra a equação abaixo. A unidade da figura de mérito é K^{-1} .

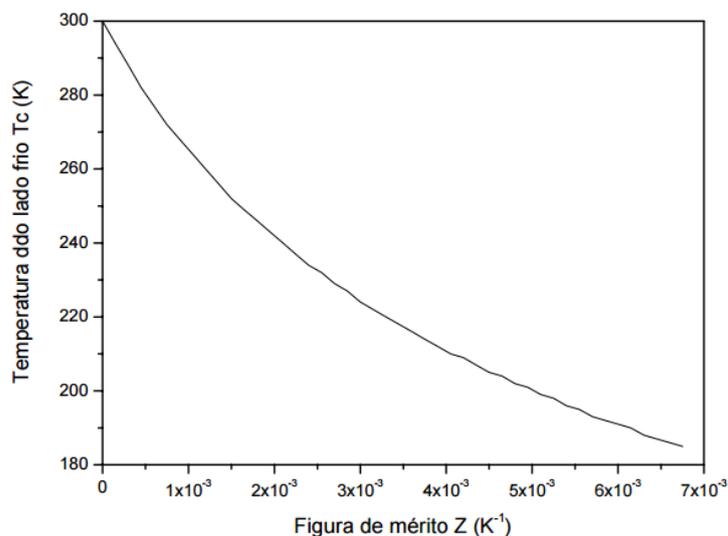
$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k} \quad (15)$$

O número de mérito varia em função da temperatura, é escrito na forma adimensional, representado por ZT , onde o material é caracterizado para uma determinada temperatura de referência. Neste caso, o número de mérito é calculado pela seguinte equação.

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho k} T \quad (16)$$

onde T é a temperatura para qual se deseja calcular o número de mérito. Através da Figura 7 pode-se observar o significado do valor do número de mérito de um material para dispositivos termoelétricos.

Figura 7. Mínima temperatura atingível no lado frio em função da figura de mérito

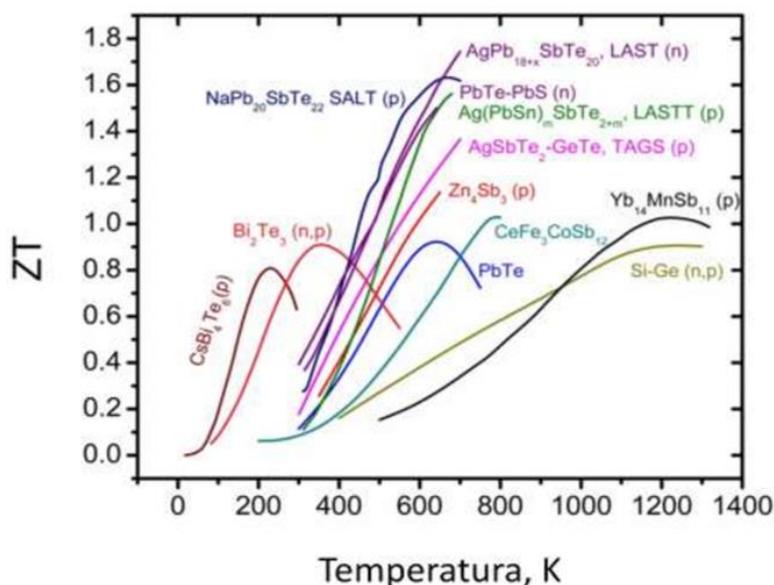


Fonte: Gonçalves (2008)

A Figura 7 retrata a capacidade de resfriamento de um dispositivo termoelétrico, em função do número de mérito, onde o lado quente possui uma temperatura fixa de 300 K. Percebe-se que o efeito termoelétrico aumenta com o aumento do valor do número de mérito.

Do ponto de vista termoelétrico, um material é considerado bom se o mesmo apresenta um alto coeficiente de Seebeck com condutividade térmica e resistividade elétrica baixa. No entanto, geralmente materiais de baixa resistividade elétrica apresentam alta condutividade térmica, sendo difícil encontrar num mesmo material essas três características. É comum observar em diferentes materiais, valores de número de mérito inferiores à unidade, sendo considerados bons materiais termoelétricos aqueles com número de mérito a partir de uma unidade. A Figura 8 mostra um gráfico com diversos materiais que podem apresentar valores de número de mérito considerados relativamente altos.

Figura 8. Figura de mérito em função da temperatura para materiais com boas propriedades termoelétricas.



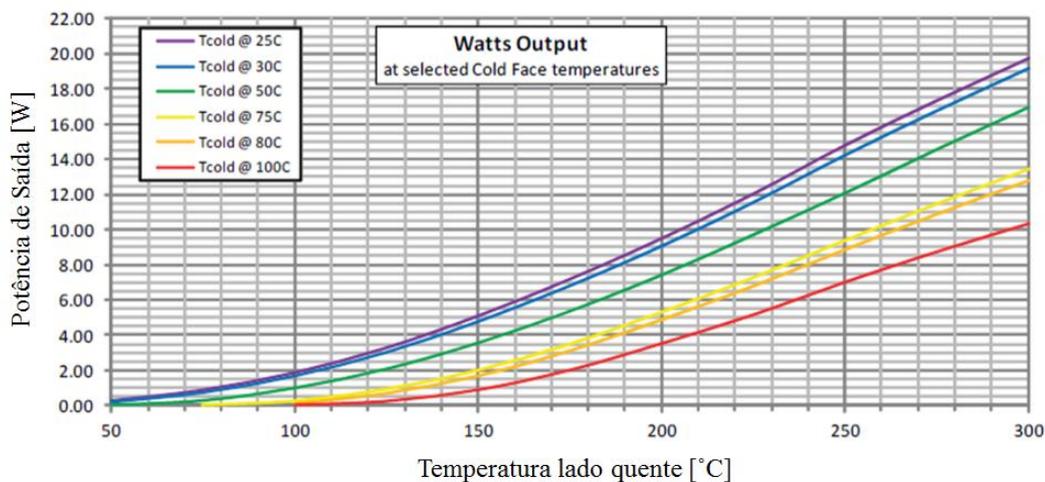
Fonte: Fernandes (2012)

Na figura acima são mostrados alguns dos materiais que apresentam os melhores valores de número de mérito. Fica claro nesta figura a dependência desse parâmetro com a temperatura. Além disso, percebe-se que há um ponto ótimo de operação, assim para diferentes temperaturas de operação, diferentes materiais podem ser recomendados.

3.3 DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS VS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Yildiz, Coogler e Crockford (2013) realizaram um estudo comparativo entre as células fotovoltaicas e Peltier, onde avaliaram a aptidão e capacidade de gerar energia, dimensões, custos e potenciais aplicações. O módulo TEG utilizado no experimento foi adquirido da empresa Custom Thermoelectric e possui capacidade para operar a uma temperatura máxima constante de 300 °C no lado quente e uma temperatura máxima de 180 °C no lado frio. Alguns testes foram conduzidos pelos autores para verificar o desempenho do módulo Peltier em função das diferenças de temperaturas entre os lados frio e quente do dispositivo, sendo variadas as temperaturas de ambos os lados. Da Figura 9 à Figura 11 são mostrados os resultados obtidos nesta análise.

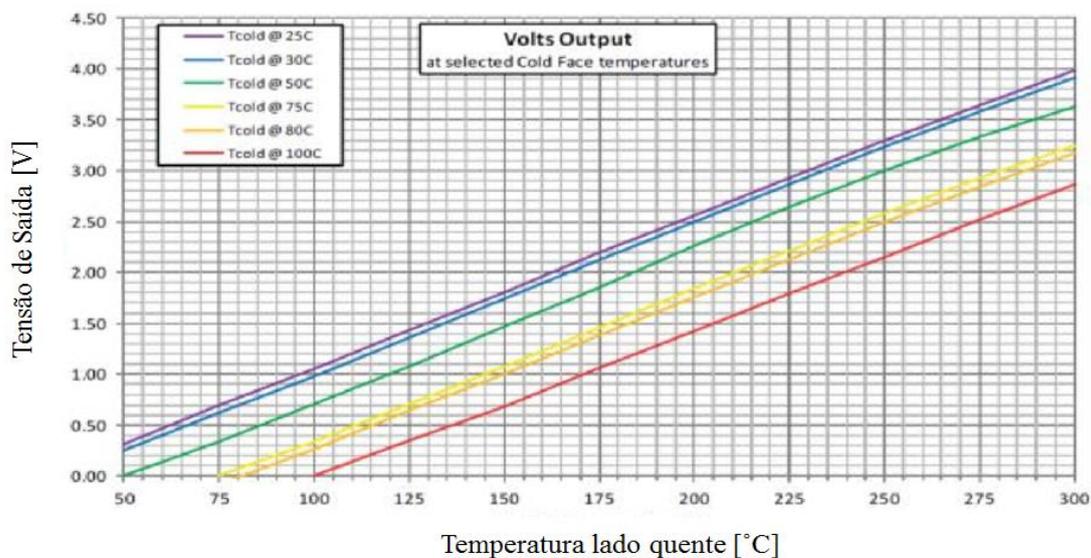
Figura 9. Análise da potência de saída do módulo Peltier.



Fonte: Yildiz, Coogler e Crockford (2013)

Na Figura 9 se observa a energia gerada pelo módulo Peltier para diferentes temperaturas nos lados quente e frio desse dispositivo, onde cada curva representa uma temperatura diferente do lado frio do módulo. Percebe-se que o aumento na diferença de temperatura entre os dois lados do módulo permite maior geração de energia. Foi observada neste caso, uma capacidade de geração de 20 W de energia, quando se mantém o lado frio à 25 °C e o lado quente à 300 °C.

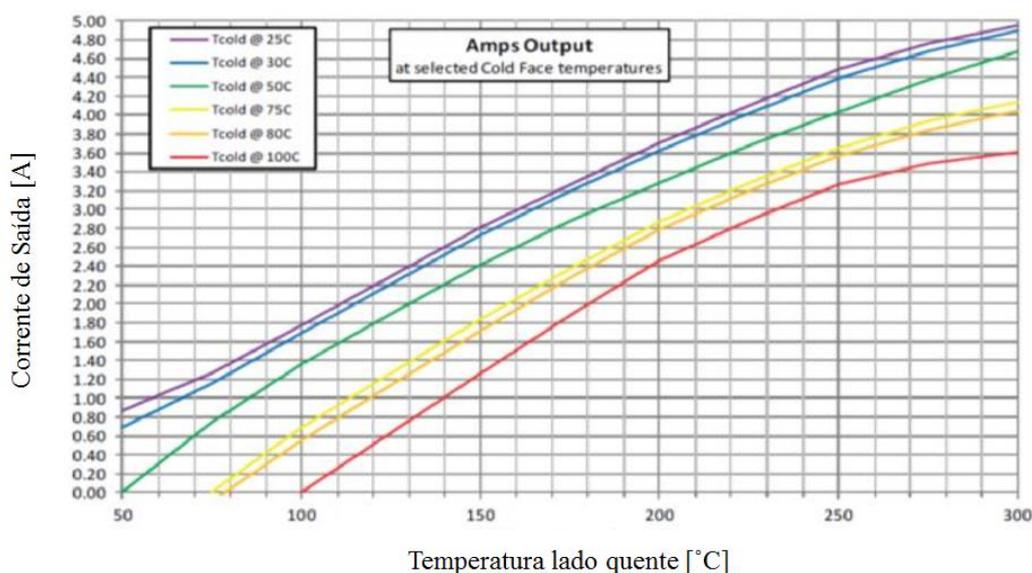
Figura 10. Análise da tensão de saída do módulo Peltier.



Fonte: Yildiz, Coogler e Crockford (2013)

O segundo gráfico desta análise mostra a tensão de saída em função das diferenças de temperatura dos dois lados do dispositivo, sendo observado uma tensão de saída de 4 V para uma diferença de temperatura de 275 °C entre os lados quente e frio do módulo. Percebe-se também um comportamento linear da tensão com a variação da temperatura.

Figura 11. Análise da corrente de saída do módulo Peltier



Fonte: Yildiz, Coogler e Crockford (2013)

A Figura 11 mostra a corrente de saída para as mesmas condições de temperaturas observadas nas duas figuras anteriores. A corrente de saída mostra um comportamento semelhante a tensão e a potência de saída, na qual aumenta conforme o aumento das diferenças de temperatura.

Com relação às células fotovoltaicas, foi utilizado um módulo do fabricante Kyocera, modelo KC65T de 65 W e 12 V. Os testes dos dispositivos termoelétrico e fotovoltaico foram realizados em ambientes diferentes, pois suas características de operação não são similares. Enquanto que o módulo fotovoltaico foi testado sob a luz solar, o módulo TEG foi testado em um condensador de ar condicionado. Esses testes ocorreram de forma simultânea.

De acordo com esses mesmos autores, através de uma simulação numérica determinou-se o que deveria ser uma boa configuração para implantar o módulo TEG no sistema de refrigeração de ar. Porém na prática os resultados não foram muito

positivos, sendo alcançados valores baixos demais de tensão, algo próximo de 435 mV apenas, com uma diferença de temperatura de 29 °F. Acredita-se que a instalação do dispositivo termoelétrico não tenha sido realizada de forma adequada e que isso contribuiu de forma significativa para resultados abaixo da capacidade do dispositivo. Não foram apresentados de forma detalhada os resultados obtidos da análise de desempenho das células fotovoltaicas. Mas de acordo com esses mesmos autores, acredita-se que tendo uma diferença alta de temperatura, resultados muito positivos em relação ao uso de TEGs podem ser alcançados, como sugere a Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre células fotovoltaicas e Peltier.

Dispositivo	Custo [dólar]	Área [pol ²]	Energia [w] p/ $\Delta T = 212 \text{ }^\circ\text{F}$	Energia [w] p/ $\Delta T = 518 \text{ }^\circ\text{F}$
Fotovoltaico	250	760	-	65
TEG	400	20	14,16	76,4

Fonte: Yildiz, Coogler e Crockford (2013)

Considera-se na tabela acima a utilização de uma placa fotovoltaica apenas e quatro módulos Peltier. Assim, para as diferenças de temperatura apresentadas acima, percebe-se que são necessários mais de um módulo Peltier para conseguir gerar uma quantidade de energia semelhante as células fotovoltaicas. Como por exemplo, para uma diferença de 518 °F, são necessários pelo menos quatro módulos TEG para conseguir gerar mais de 65 W, quantidade de energia gerada com um módulo solar apenas. Isso faz com que as células Peltier sejam financeiramente inviáveis para muitas aplicações. No entanto, para valores altos de gradientes de temperatura pode-se gerar a mesma quantidade de energia que seria gerada através de células fotovoltaicas, ocupando-se menor área e com menor massa. Considerando que em termos de aplicações espaciais, massa tem uma forte ligação com custos, eventualmente células Peltier podem ser financeiramente mais viáveis que células fotovoltaicas nesses casos.

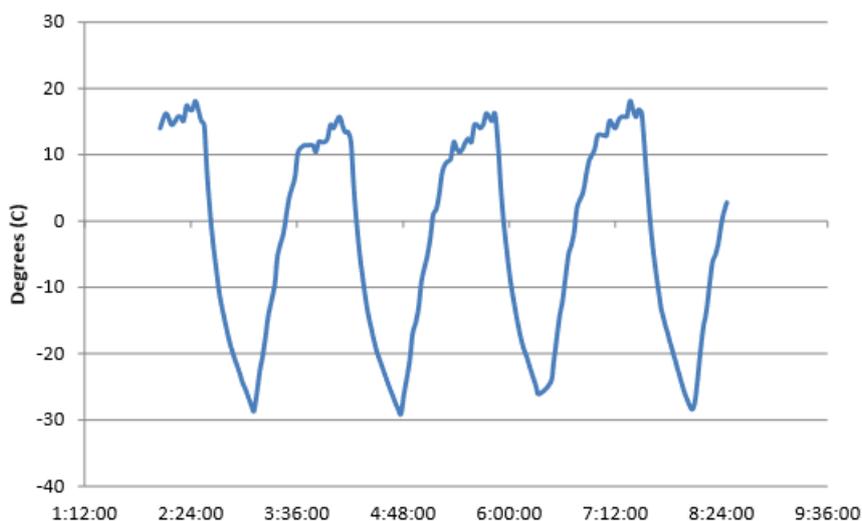
4. CONDIÇÕES TÉRMICAS EM NANOSATÉLITES

Para realizar uma análise do desempenho de um gerador termoelétrico em nanosatélite é fundamental conhecer as condições térmicas nas quais o mesmo está submetido, uma vez que isso influenciará diretamente na quantidade de energia gerada por tais dispositivos. Para isso são descritas neste capítulo condições térmicas em nanosatélite segundo dois diferentes autores.

Friedel e McKibbo (2011) realiza uma análise térmica de um nanosatélite, buscando investigar as causas do aumento de temperatura do mesmo, conforme indicam dados adquiridos entre o ano de 2007 e 2011. O nanosatélite denominado CP3 possui dimensões de 1 dm³ sendo construído pela *California Polytechnic State University*. O satélite foi lançado em uma órbita com inclinação de 97,9° e período de 99,14 minutos.

A Figura 12 mostra os dados de temperaturas no lado externo do satélite coletados no ano de 2007 em função do tempo

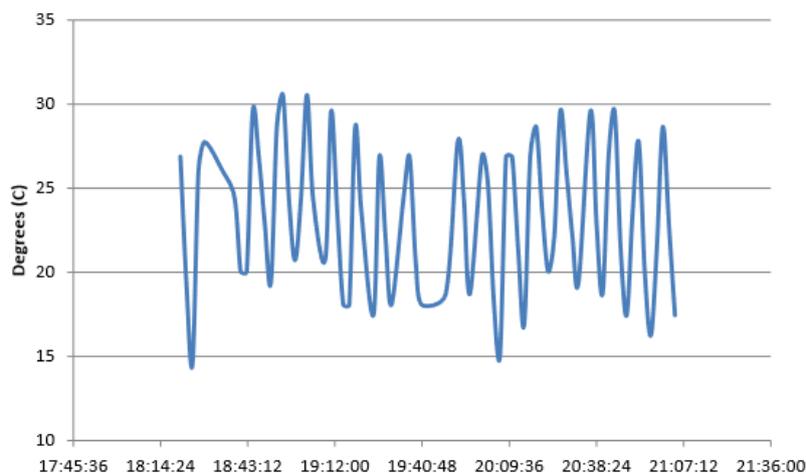
Figura 12. Temperaturas lado externo do nanosatélite CP3 medidas em 2007



Fonte: Friedel e Mckibbon (2011)

De acordo com os mesmos autores, novos dados foram obtidos em 2011, e os resultados dessas novas medições são mostradas na Figura 13.

Figura 13. Temperaturas lado externo do nanosatélite CP3 medidas em 2011



Fonte: Friedel e Mckibbon (2011)

Através das figuras mostradas acima, percebe-se que houve de fato um aumento da temperatura externa média do satélite, assim como no padrão do comportamento dessas temperaturas em função de sua órbita. Para verificar as possíveis causas desse comportamento novas medições da temperatura externa do satélite foram realizadas. De acordo com os autores, também foram obtidos dados de temperaturas de alguns de seus componentes, além de serem avaliadas as tensões de saída de componentes internos e das células fotovoltaicas. No entanto, os resultados mostraram que os equipamentos estavam em conformidade.

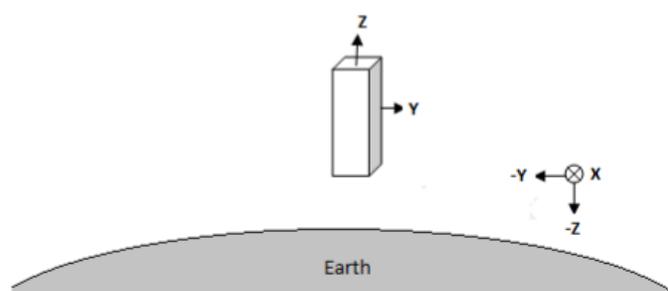
A inclinação da órbita do satélite faz com que o mesmo esteja quase sempre exposto ao sol, percebeu-se então que essas variações de temperatura em datas distintas poderiam se dar simplesmente por influência do albedo da Terra. E de fato, foi constatado que essas diferenças na temperatura externa do satélite devem-se aos diferentes valores de albedo sob os quais o satélite esteve sujeito durante esse período em que os dados foram obtidos. Portanto, os valores de temperaturas apresentadas acima são condizentes para um nanosatélite em condições adequadas de funcionamento. Assim, tais valores são levados em consideração para a análise de desempenho de um gerador termoelétrico realizada neste trabalho.

Garzon (2012) também descreve em seu trabalho uma análise térmica de um nanosatélite, neste caso a respeito do satélite OSIRIS-3U, o qual foi desenvolvido pelo programa espacial da *Pennsylvania State University*. Esta análise é feita principalmente

por meio de um modelamento numérico realizado com o auxílio do *software* COMSOL Multiphysics.

Segundo o mesmo autor, as condições térmicas de um satélite são essencialmente dependentes dos parâmetros de órbita e orientação do mesmo. Devido essas incertezas são identificadas as condições orbitais que estabelecem os limites de temperatura no qual o satélite estará exposto. Assumiu-se uma órbita circular com altitudes entre 300 km e 400 km, as quais possuem um período de 90,5 minutos e 92,5 minutos, respectivamente. Além do mais foi considerado que sua menor face estaria sempre voltada para a Terra e a face $-Y$ sempre voltada para a direção de movimento do satélite. Conforme é representado na Figura 14.

Figura 14. Orientação do nanosatélite OSIRIS-3U em relação à Terra.



Fonte: Garzon (2012)

Por meio das considerações acima, feitas pelo autor, a condição em que o satélite está sujeito à condição de máximas temperaturas correspondem a uma inclinação de 90° com valores máximos de geração de calor por parte dos equipamentos do satélite, sendo que haverá uma situação de temperatura máxima em uma posição da órbita em que o satélite não está em eclipse. Enquanto que a situação de temperaturas mínimas ocorre para uma altitude de 400 km com valores mínimos de geração de calor por parte dos dispositivos do satélite. Neste caso considera-se uma órbita com inclinação de 0° , sendo o caso extremo de temperatura mínima uma região em que o satélite estará em eclipse com a Terra.

Através de um cálculo analítico e preliminar, foram obtidos os valores extremos de temperatura no qual o satélite estaria sujeito, sendo 113°C o valor de temperatura máxima e -54°C seu valor mínimo. Para a análise numérica realizada considerou-se a

variação da temperatura durante vinte órbitas. Os resultados obtidos são mostrados nas tabelas abaixo.

Tabela 2. Média das temperaturas máximas e mínimas dos painéis do OSIRIS-3U para a altitude de 300 km e inclinação de 90°.

Painéis	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
Temperatura Máxima [°C]	43	110	52	53	43	63
Temperatura Mínima [°C]	-1,1	7,6	-0,86	-0,79	-4,1	0,51

Fonte: Garzon (2012)

Tabela 3. Média das temperaturas máximas e mínimas dos painéis do OSIRIS-3U para a altitude de 400km e inclinação de 0°.

Painéis	+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
Temperatura Mínima [°C]	-10	-10	-8	-11	-12	-6,5
Temperatura Máxima [°C]	-0,86	-0,86	29	24	25	9,9

Fonte: Garzon (2012)

Adicionalmente a esta análise, este mesmo autor buscou verificar a aplicação de células Peltier para geração de energia neste satélite, através do gradiente de temperatura existente entre os painéis solares e a região interna do satélite. Esses gradientes foram obtidos durante períodos de exposição ao Sol para a altitude de 400 km e inclinação de 0°. Através da análise térmica do satélite foi verificado que a temperatura média interna deveria ser de 275 K, a qual foi considerada como sendo a temperatura do lado frio do dispositivo termoelétrico. E a temperatura média do painel +Y foi determinado como sendo a temperatura do lado quente do TEG. Assim, o valor médio, mínimo e máximo foi calculado para 20 órbitas, os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Gradiente de temperatura do nanosatélite OSIRIS-3U, para uma órbita de 400 km e inclinação de 0°.

ΔT_{\min} [K]	ΔT_{\max} [K]	$\Delta T_{\text{médio}}$ [K]
0,0034	28	13

Fonte: Garzon (2012)

Considerou-se que os TEGs seriam instalados na parte de trás das células fotovoltaicas, aproveitando assim o calor que é absorvido por elas e não são utilizadas na geração de energia elétrica. Dois tipos diferentes de dispositivos termoelétricos foram utilizados, o primeiro sendo um modelo tradicional, enquanto outro sendo um filme fino da empresa Nextreme Thermal Solutions. As propriedades de ambos são apresentadas na Tabela 5.

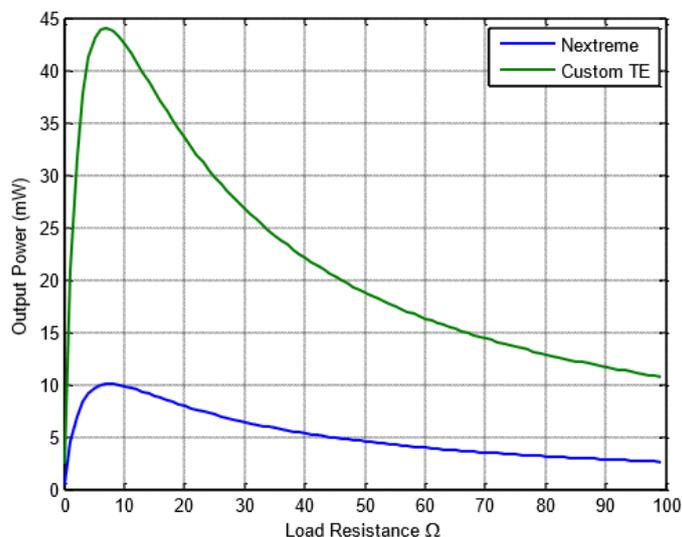
Tabela 5. Propriedades dos dispositivos termoelétricos.

Propriedades	Modelo Tradicional	Filme fino (Nextreme)
Altura [mm]	2	0,07
Espessura [mm]	1	0,1
Figura de mérito (ZT)	0,73	0,36
Condutividade térmica [W/(mK)]	1,4	0,75
Coef. médio de Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$]	220	293
Número de pares	254	144

Fonte: Garzon (2012)

Assim, considerando o valor médio de gradiente de temperatura obtido da análise térmica do nanosatélite OSIRIS-3U, determinou-se a energia gerada pelos TEGs em função da resistência de carga. Este resultado é mostrado na Figura 15.

Figura 15. Potência de saída obtida para dois TEGs comerciais.



Fonte: Garzon (2012)

Como pode ser observado acima, o módulo termoelétrico tradicional fornece maiores valores de saída de energia. No entanto, segundo Garzon (2012), isso ocorre, pois a resistência do dispositivo termoelétrico de filme fino é muito baixa. Para uma situação em que este dispositivo alimenta uma carga com resistência igualmente baixa, e para condições com maior gradiente de temperatura ele oferece uma densidade de carga superior ao TEG tradicional. Conforme sugere a Tabela 6, apresentada abaixo.

Tabela 6. Comparação entre dois modelos diferentes de TEG

	Área [cm ²]	Massa/ unidade [g]	Custo/unidade [dólar]	Máx. densidade de energia [mW/cm ²]
TEG Tradicional	9	11	49	4,9
Filme fino Nextreme	0,1	0,016	90	97

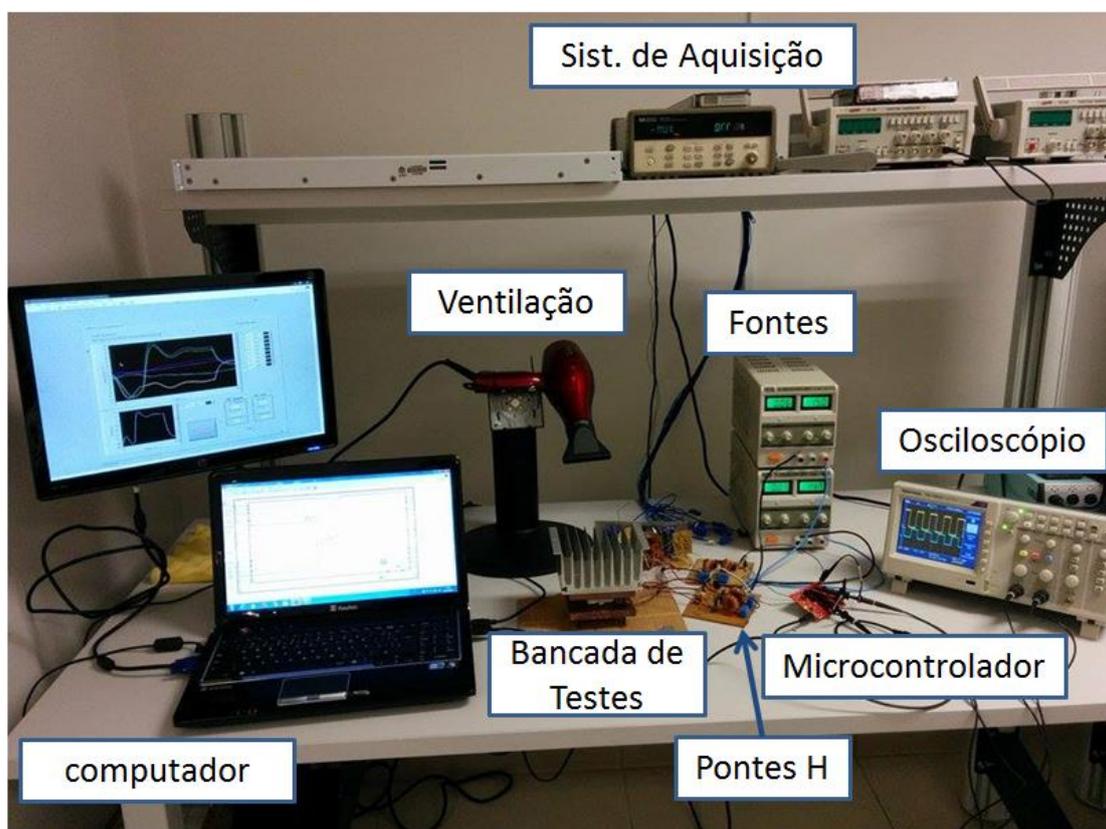
Fonte: Garzon (2012)

Assim considerando a área de um nanosatélite do tipo 3U, em condições máximas de desempenho seria possível obter uma geração de energia de apenas 0,79 W por meio de um TEG tradicional, enquanto que o TEG de filme fino possibilitaria uma geração de energia de 29 W para as condições acima consideradas na análise térmica do satélite. No entanto, de acordo com o próprio autor, tais condições para um desempenho ideal dos TEGs não são encontradas para o nanosatélite OSIRIS-3U fazendo com que a aplicação dos mesmos seja inviável.

5. APARATO EXPERIMENTAL

Para a verificação do possível emprego do dispositivo TEG em nanosatélites, uma análise experimental de um módulo termoeétrico foi realizada. Em termos gerais, foi construída uma bancada experimental para a avaliação da potência elétrica de saída do TEG como função da diferença de temperaturas em suas faces. Uma imagem do aparato experimental montado é mostrado na Figura 16.

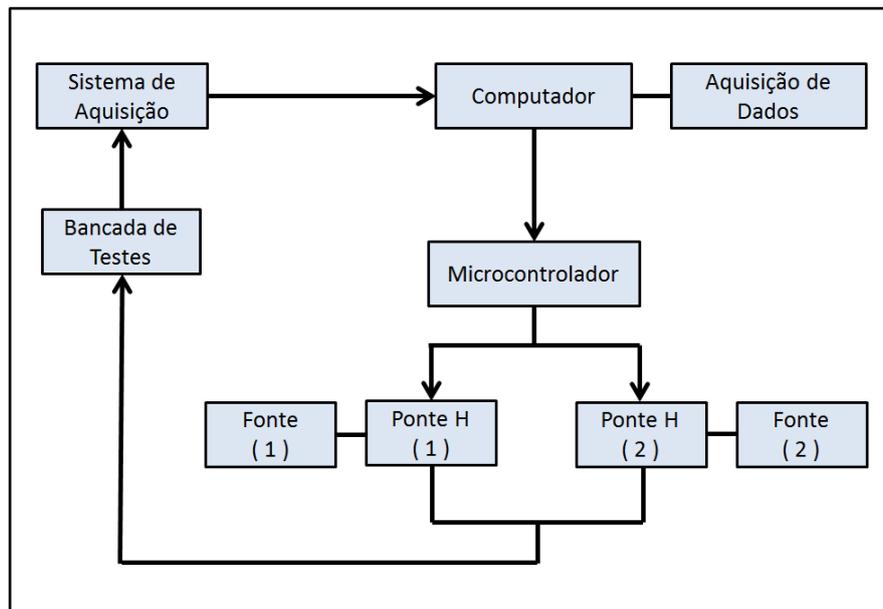
Figura 16. Montagem do aparato experimental



Fonte: Autor

Na Figura 17, mostrada a seguir, pode ser visto a configuração dos equipamentos utilizados para o teste do TEG.

Figura 17. Configuração do aparato experimental



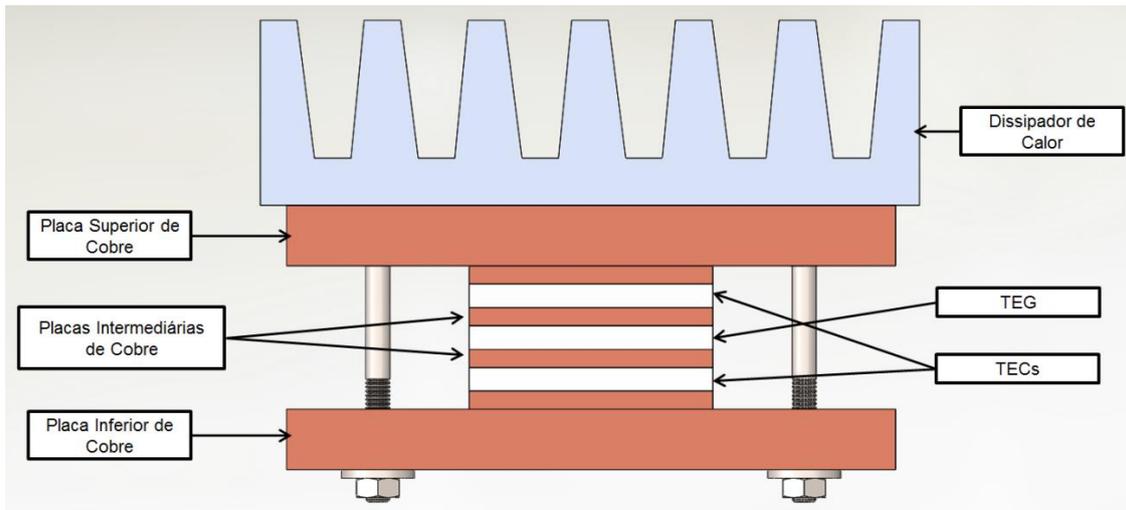
Fonte: Autor

De modo geral, o sistema de aquisição realiza a leitura de temperaturas dos dispositivos TEG e TECs presentes na bancada de teste, estes dados são então enviados ao computador que além de armazenar essas informações, verifica se os valores de temperaturas estão dentro dos valores esperados. Essas informações são então passadas ao microcontrolador que envia a intensidade necessária de sinal para as duas Pontes H. Estas por sua vez retiram da fonte a quantidade de corrente necessária para enviar aos TECs de modo a manter as temperaturas nos valores desejados.

5.1 BANCADA DE TESTES

A configuração da bancada de testes utilizada neste trabalho foi elaborada com base no experimento desenvolvido por Spengler (2010). A Figura 18 mostra os principais componentes presentes neste módulo e a forma que os mesmos estão posicionados. Como pode ser visto, o TEG se encontra posicionado entre dois TECs, que possuem a função de gerar um gradiente de temperatura controlado.

Figura 18. Bancada de teste



Fonte: Autor

Na superfície superior, foi instalado um dissipador aletado de alumínio que está em contato com uma placa de cobre. Este conjunto tem a função de dissipar o calor gerado pela célula Peltier que está em contato com a placa superior de cobre. A dissipação de calor das aletas para o ambiente foi realizada por convecção forçada, aplicada através de um ventilador. Esta placa além de servir como estrutura para todo o conjunto também auxilia na dissipação de calor do dispositivo termoelétrico logo abaixo dela. A placa superior de cobre, assim como a inferior, possui uma ranhura em seu ressalto de forma a permitir o alojamento do termopar. Nesta placa também são alojadas quatro buchas de teflon onde são assentados os parafusos, de forma a reduzir o calor transmitido aos parafusos à placa inferior. A placa inferior está em contato com a face fria do Peltier, assim serve apenas como estrutura para o conjunto.

As placas intermediárias tem a função de transmitir o calor entre os TEC e o TEG. Além disso, elas alojam os termopares responsáveis pelas medições de temperatura do gerador termoelétrico. A Figura 19 mostra uma dessas placas com os termopares soldados nas mesmas.

Figura 19. Placa intermediária do módulo de teste



Fonte: Autor

Para melhorar o contato térmico entre as partes, foi aplicado uma camada de pasta térmica.

Dos dois TECs utilizados, um é do fabricante CUI, modelo CP60240 e o outro pertence ao fabricante Hebei, modelo 12708. As informações técnicas desses dispositivos são encontradas respectivamente no Anexo A e no Anexo B.

O TEC localizado na parte superior da bancada de testes é responsável por refrigerar o lado frio do TEG, assim o calor da outra face é dissipado através de convecção forçada pelas aletas. Da mesma maneira, porém em sentido oposto, o TEC é utilizado no aquecimento do TEG, e o seu lado frio está em contato com a placa inferior de cobre.

Quanto ao TEG utilizado, este é do fabricante EVERREDtronics, modelo TEG241-1.4-1.2. As informações técnicas deste dispositivo são apresentadas no Anexo C. O gerador termoelétrico utilizado no trabalho é mostrado na Figura 20.

Figura 20. Gerador termoelétrico utilizado nos experimentos



Fonte: Autor

5.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

O sistema de aquisição é composto basicamente pelo *hardware* HP HEWLETT PACKARD, modelo 34970A e também por termopares. O *hardware* HP HEWLETT PACKARD é um dispositivo para aquisição de dados e é mostrado na Figura 21. Ele permite medição direta de termopares, termistores, medições de corrente e tensão alternada e contínua, entre outros tipos de dados. Na parte de trás do dispositivo são montados 3 slots de módulos, onde cada canal presente nesses slots pode ler 600 dados por segundo. É possível realizar a leitura de 250 canais por segundo com este modelo (HEWLETT-PACKARD, 1997). Para o presente trabalho este equipamento realiza leitura de temperaturas através de nove termopares, além de medir a tensão de saída no dispositivo termoelétrico.

Figura 21. *Hardware* HP HEWLETT PACKARD 34970A



Fonte: Autor

Quanto aos termopares, estes são os tipos de sensores de temperatura mais utilizados nas indústrias. Um termopar é constituído por fios elétricos de diferentes materiais que são ligados um ao outro numa extremidade formando o que se conhece por junção quente ou de detecção. A outra extremidade é ligada a um instrumento de medição e é denominada de junção fria. A possibilidade de se medir temperatura através desse tipo de configuração dos fios se dá pelo efeito Seebeck (IOPE, 2015).

De acordo com o mesmo autor, cada metal possui certa densidade de elétrons livres que varia com a temperatura, assim ao alterar a temperatura na junção quente cria-se uma diferença de temperatura entre as junções fazendo percorrer uma corrente no circuito. São geradas dessa forma uma diferença de tensão entre as junções, sua relação com a temperatura não é linear. A equação que relaciona a tensão com a temperatura é um polinômio cuja ordem pode chegar até o 9º grau, dependendo da precisão desejada.

Por questões de disponibilidade, para o trabalho proposto utiliza-se um termopar do tipo T, neste caso a composição do termopar é de cobre e cobre-níquel, esta liga é conhecida comercialmente como Constantan. Este tipo de termopar pode ler uma faixa de temperatura de -200 °C à 350 °C, não possui assim restrição nas medições de temperaturas necessárias para este trabalho.

5.3 COMPUTADOR

Através do computador foi realizado a programação que permite a aquisição de dados, assim como a troca de informações entre os diversos dispositivos. Esta programação foi realizada principalmente por meio do *software* LabVIEW. Utilizou-se também o *software* Energia para programar as atividades a serem executadas pelo microcontrolador. Uma descrição mais detalhada sobre esses *softwares* e o trabalho realizado através deles é apresentada na sequência.

6.3.1 LabVIEW

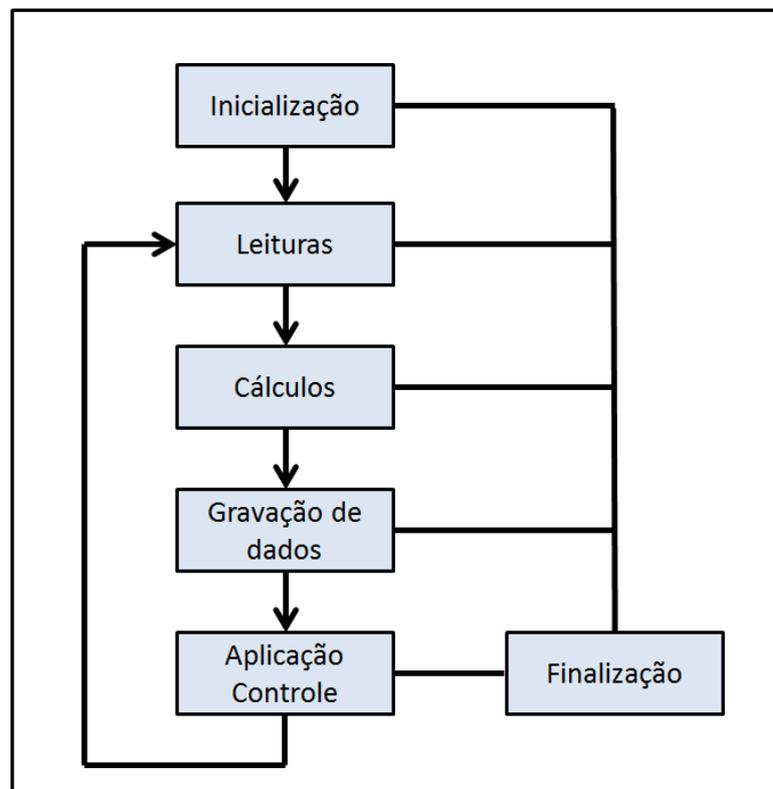
O LabVIEW é um *software* de linguagem de programação gráfica desenvolvida pela empresa National Instruments que permite a integração de vários dispositivos de *hardware*. Sua primeira versão foi desenvolvida em 1986, na época aplicável apenas ao sistema operacional Macintosh. Os programas criados por meio do LabVIEW são denominados de instrumentos virtuais, do inglês *virtual instruments*, de forma

simplificada, V.I.. Este nome se dá pelo fato de que a aparência e operação desses programas imitam instrumentos físicos (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010, 2015).

O LabVIEW contém vários conjuntos de ferramentas para aquisição, análise, visualização e armazenamento de dados, assim como ferramentas para realizar testes automatizados, permitir controle de sistemas embarcados, entre outras. Este *software* também oferece uma infinidade de módulos add-on que fornecem bibliotecas adicionais e ferramentas de programação. Como exemplo, tem-se o NI – VISA, este módulo foi essencial para o presente trabalho, pois permitiu a comunicação com o microcontrolador utilizado (NATIONAL INSTRUMENTS, 2010, 2015).

O programa em LabVIEW criado para este trabalho pode ser dividido basicamente em seis partes, de acordo com a função que o mesmo está executando. O diagrama apresentado pela Figura 22 mostra sequencialmente as principais funções executadas pelo programa.

Figura 22. Diagrama das funções executadas pelo programa criado em LabVIEW



Fonte: Autor

Conforme mostrado acima, a primeira parte do programa corresponde à fase de inicialização. De forma geral, nesta etapa são estabelecidas as configurações que permitem a comunicação com os *hardwares* e também são definidos os dados a serem obtidos e organizado a forma que os mesmo serão salvos.

Na sequência o programa comunica com o sistema de aquisição, realizando a leitura dos dados obtidos por tal sistema, além também de permitir a visualização dos valores de temperaturas e tensão por meio de uma interface gráfica.

No módulo TEG são realizados medições de temperaturas em três pontos, sendo que na etapa de cálculos o programa em LabVIEW determina a média das temperaturas. Estes termopares são utilizados para verificar se os valores das temperaturas sobre as faces do TEG estão conforme desejados. A partir disso aplica-se então um controle PID a cada um dos TECs para correção dos valores caso necessário. Os parâmetros desse controle foram determinados por tentativa e erro, levando-se em consideração o tempo de estabilização dos valores, flutuações e *overshoot*. Os dados que haviam sido obtidos do sistema de aquisição são então salvos na memória do computador.

Os valores obtidos a partir do controle PID são passados ao microcontrolador, tal etapa se refere ao bloco de Aplicação Controle, mostrado na Figura 22. Na verdade três informações sobre cada face do módulo TEG são repassadas ao microcontrolador, cada uma possuindo o tamanho de um byte. O primeiro dado indica a face da célula Peltier a qual se refere o próximo byte a ser recebido, enquanto que a segunda informação repassada se refere de fato ao controle de temperatura a ser aplicado. O terceiro byte é apenas para verificar se os dados foram lidos com sucesso pelo microcontrolador.

O programa é finalizado se o mesmo for requisitado por um comando do usuário, ou caso ocorra algum erro em alguma das etapas anteriormente citadas. Imagens do programa criado são mostradas no Apêndice A.

6.3.2 Software Energia

Como mencionado anteriormente, Energia foi o *software* utilizado para programar as atividades a serem executadas pelo microcontrolador. Energia é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, iniciada por Robert Wessels em

2012 com o objetivo de trazer a estrutura de programação dos *softwares* Wiring e Arduino para os microcontroladores LaunchPads MSP430 da empresa Texas Instruments. As versões mais atuais deste *software* também permitem programar outros tipos de microcontroladores (ENERGIA, 2015).

O código criado para este trabalho a partir do *software* Energia é apresentado no Apêndice B. Duas funções muito importantes presentes neste código são as funções UART e PWM. A sigla UART vem de *Universal Asynchronous Receiver and Transmitter* que em português significa receptor-transmissor universal assíncrono. Esta é uma forma de transmissão de dados permitindo comunicação serial, neste caso entre o computador e o microcontrolador. É um protocolo de baixa velocidade, bidirecional que requer um pino para transmissão e outro para recepção e dados. No caso deste trabalho, no que se refere à comunicação serial, utiliza-se apenas um pino que é para recepção de dados (ENERGIA, 2015).

A sigla PWM vem de *Pulse-Width Modulation* que em português significa modulação por largura de pulso. PWM é uma técnica que permite obter resultados analógicos através de um meio digital. Utiliza-se controle digital para criar um sinal de onda quadrada que alterna entre ligado e desligado. Desta maneira, alterando a porção de tempo em que o sinal fica ligado e desligado, é possível simular diferentes intensidades de sinais que estão entre totalmente ligados e totalmente desligados. A duração em que o sinal permanece ligado é denominada de largura de pulso. No microcontrolador utilizado, os pinos PWM podem emitir um sinal de oito bits, ou seja, um valor numa escala de 0 à 255, sendo a largura de pulso proporcional a este valor.

5.4 MICROCONTROLADOR

O controle da temperatura dos dispositivos TEC se deu por meio da variação da tensão aplicada sobre estes dispositivos, isto realizado a partir de um microcontrolador. O microcontrolador utilizado foi do tipo MSP430 modelo F5529, da empresa Texas Instruments. Tal dispositivo apresenta emulação on-board, ou seja, é possível programar e depurar os projetos sem a necessidade de ferramentas adicionais.

A comunicação desde microcontrolador com o computador se dá por meio de um cabo USB. Assim, o microcontrolador recebe os valores de controle do computador por meio do *software* labVIEW e repassa eles para as duas Pontes H. A Figura 23 mostra uma imagem do microcontrolador utilizado.

Figura 23. Microcontrolador MSP430F5529



Fonte: Autor

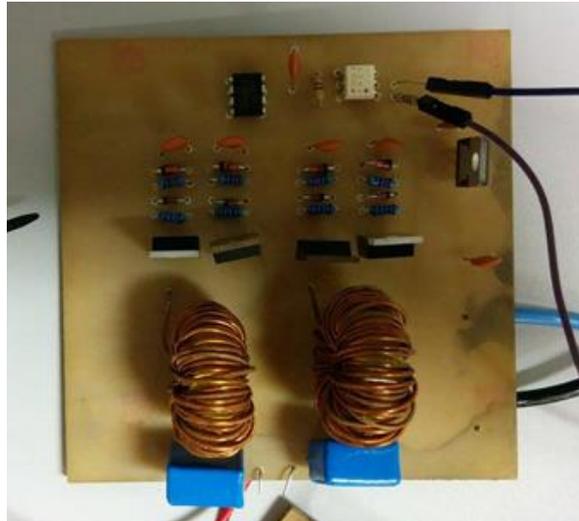
Embora não esteja mostrado no diagrama do aparato experimental, apresentado na Figura 17, os valores enviados do microcontrolador para as Pontes H são inspecionados por meio de um osciloscópio. Porém isto não é fundamental para o trabalho.

5.5 PONTE H

De acordo com Patsko (2006), ponte H é um dos circuitos mais importantes para sistemas automatizados e normalmente é utilizado para controlar um motor de corrente contínua a partir de um microcontrolador. Neste caso, a ponte H permite controlar o sentido de sua rotação do motor, invertendo a polaridade sobre seus terminais. A mesma lógica se aplica aos TECs, dentro do contexto do trabalho a ponte H permite controlar o sentido da corrente sobre eles. Adicionalmente, a ponte H retira da fonte a intensidade de corrente necessária para controlar adequadamente as temperaturas sobre o TEG. Isto é realizado em função do valor de PWM enviado pelo microcontrolador.

As duas pontes H utilizadas nos experimentos realizados foram desenvolvidas pelo professor coorientador do presente trabalho, Anderson Wedderhoff Spengler. Na Figura 24 é mostrada uma delas.

Figura 24. Placa de circuito ponte H



Fonte: Autor

O desenho esquemático do circuito elétrico desta placa é apresentado no Apêndice C.

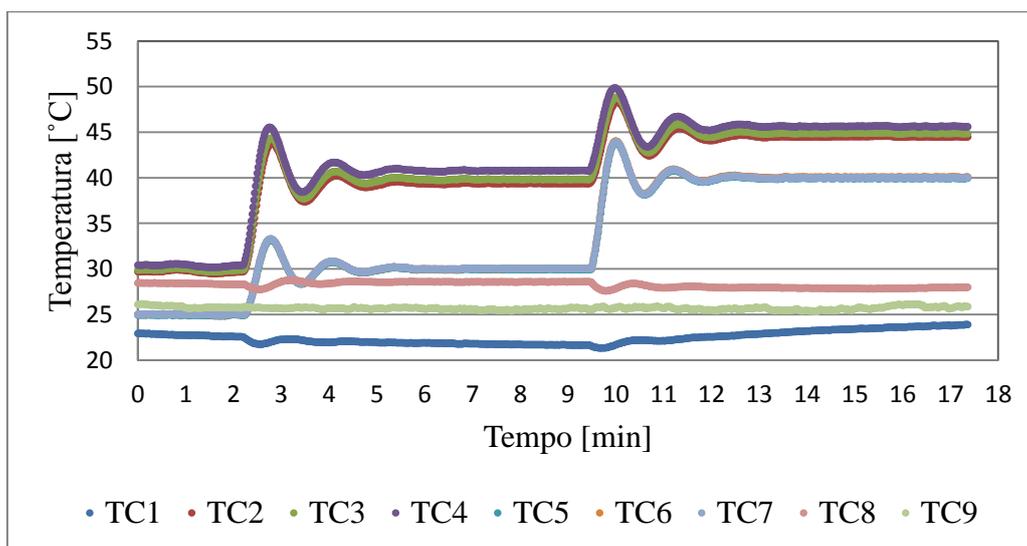
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os testes com a bancada experimental. Os gráficos gerados e os cálculos realizados que são descritos neste capítulo foram feitos por meio do *software* Excel.

6.1 CONTROLE DE TEMPERATURA

Primeiramente é importante constatar que todo o sistema para o controle de temperatura funciona apropriadamente, de modo que as temperaturas pré-estabelecidas no programa LabVIEW sejam de fato obtidas nas faces do módulo TEG. Neste sentido, a Figura 25 mostra um exemplo em que inicialmente a face fria e a face quente do dispositivo termoeletrico estão a uma temperatura de 25 °C e 30 °C, respectivamente. Em seguida, através do LabVIEW por meio do controle PID, as temperaturas são programadas para manterem seus valores em 30 °C e 40 °C e após alguns minutos, 40 °C e 45 °C.

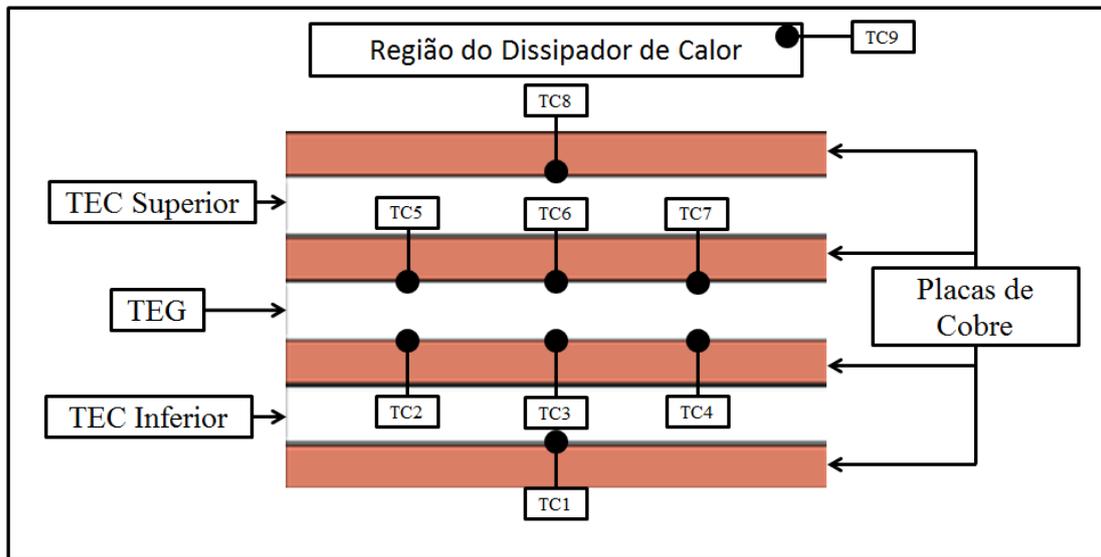
Figura 25. Gráfico do controle de temperatura das células Peltier



Fonte: Autor

Para melhor entendimento a respeito da legenda mostrada na Figura 25, considere a Figura 26, na qual mostra-se esquematicamente a localização dos termopares na bancada de testes.

Figura 26. Localização dos termopares presentes na bancada de testes



Fonte: Autor

Assim, TC1 se refere ao termopar em contato com o TEC que controla o lado quente do TEG, sendo ele instalado no lado oposto à face voltada para o gerador termoelétrico. O termopar do TEC que está em contato com o lado frio do TEG foi instalado com uma configuração semelhante, sendo os valores de temperaturas obtidos por meio desse termopar indicados na legenda da Figura 25 como sendo TC8. Os valores de TC2, TC3 e TC4 se referem às temperaturas no lado quente do TEG, medidas simultaneamente em três pontos distintos. Percebe-se que embora esses valores deveriam ser os mesmos em cada ponto do gráfico há uma diferença entre eles. Não se sabe exatamente qual a causa desta disparidade, no entanto, essa diferença não é muito grande e a média dessas temperaturas tende ao valor desejado. Na sequência, TC5, TC6 e TC7 são relativos aos valores de temperatura no lado frio do TEG, neste caso eles apresentam praticamente os mesmos valores entre si, conforme se espera idealmente. Por fim, TC9 se refere à temperatura próxima a uma das extremidades do dissipador de calor, sendo praticamente a temperatura ambiente da bancada de testes. Há pequenas variações devido a convecção forçada sobre a mesma.

Ainda com relação à Figura 25, nota-se que após um comando para alteração de temperatura, em um tempo de aproximadamente três minutos os valores pré-estabelecidos são de fato obtidos experimentalmente e se estabilizam, permitindo assim a coleta de informações para condições específicas de temperatura. Do controle aplicado ainda pode-se observar que há pouca oscilação até a estabilização das temperaturas.

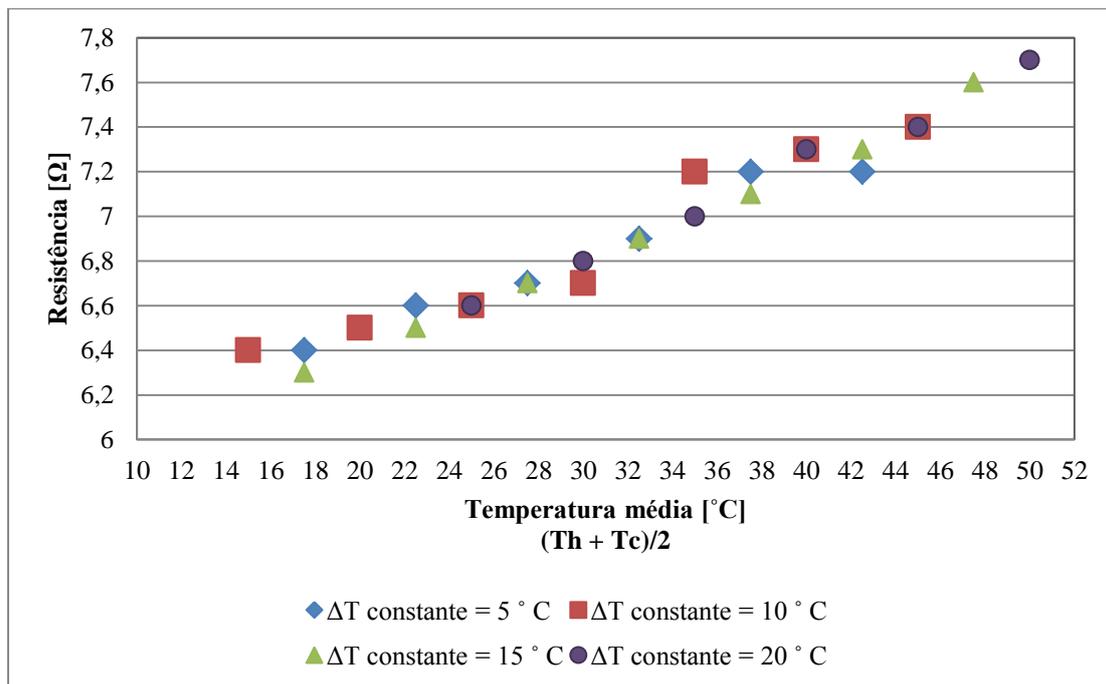
6.2 RESISTÊNCIA INTERNA DO TEG

No trabalho apresentado por Yildiz, Coogler e Crockford (2013) é mostrado que os valores de resistência de um módulo Peltier variam em função da temperatura. Assim para determinar a energia gerada para diferentes condições de temperatura nas faces do TEG se faz necessário primeiramente conhecer os valores da resistência do TEG para as faixas de temperaturas consideradas no trabalho.

Medições diretas não podem ser realizadas enquanto o TEG apresenta uma tensão de saída, pois geram valores inconsistentes. Deste modo, para determinar a resistência do gerador termoelétrico foram primeiramente obtidos os dados de tensão aberta para diferentes condições de temperaturas. Em seguida, utilizou-se um potenciômetro ligado em paralelo com o módulo do gerador termoelétrico, onde o mesmo foi regulado em cada caso para que a tensão sobre ele tivesse metade do valor de tensão aberta para as mesmas condições de temperatura. Pois para esta condição, a resistência do potenciômetro se iguala à resistência interna do TEG. Assim, retirava-se o potenciômetro do circuito e media-se a sua resistência através de um multímetro, tal valor era admitido como sendo a resistência do próprio gerador termoelétrico. Além do mais, conforme visto na revisão bibliográfica deste trabalho, ao se igualar a resistência de carga com a resistência do TEG obtém-se a condição de maior potência gerada pelo dispositivo para um mesmo estado de temperatura em suas faces.

Mediu-se então os valores de resistência do TEG para quatro condições diferentes de gradiente de temperatura entre o lado quente e o lado frio do dispositivo. Para o lado frio, considerou-se um valor mínimo de 10°C e para o lado quente, um valor máximo de 60 °C. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 27.

Figura 27. Valores de resistência interna do TEG obtidos experimentalmente



Fonte: Autor

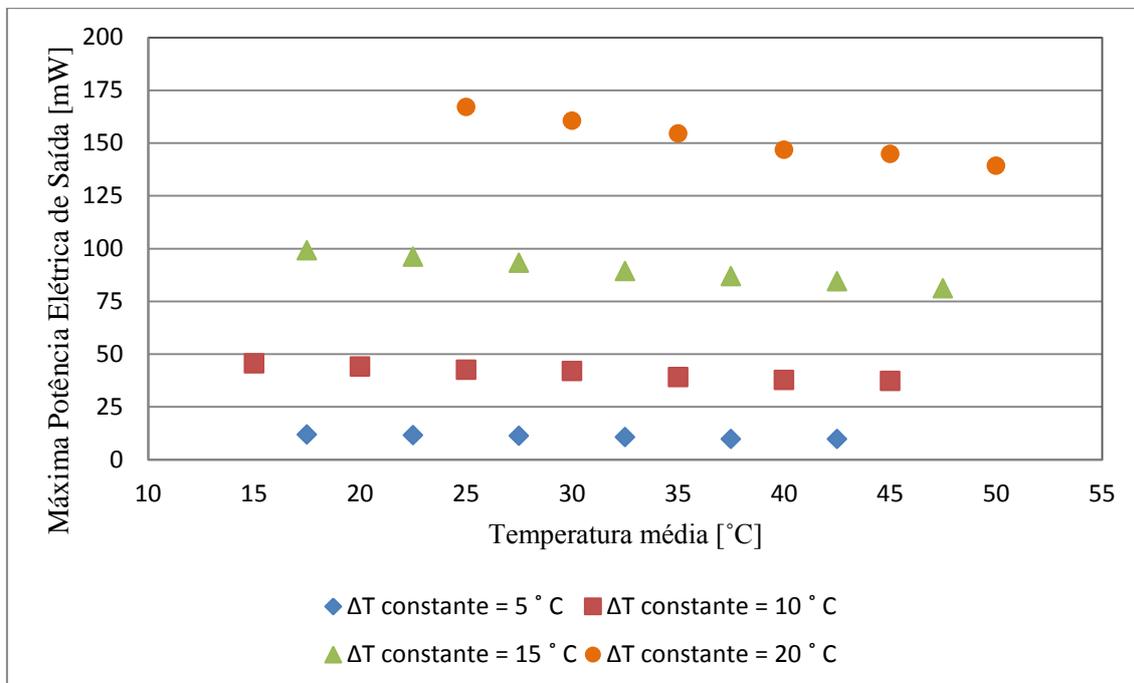
Para a faixa de temperaturas consideradas nos testes realizados, percebe-se que a resistência interna do TEG cresce em função da temperatura, num comportamento praticamente linear. O valor mínimo de resistência observado foi 6,3 ohms e o valor máximo foi de 7,7 ohms, sendo 6,9 ohms o valor médio obtido entre as medições feitas.

6.3 POTÊNCIA DE SAÍDA DO GERADOR TERMOELÉTRICO

Ter conhecimento da potência gerada em função das condições de temperatura sobre o gerador termoelétrico foi um dos objetivos propostos para o trabalho. Assim, para os mesmos pontos que foram obtidos os valores de resistência interna do TEG também foram determinados a máxima potência de saída para tais condições. Os valores de tensão de saída são obtidos diretamente por meio dos dados gerados pelo programa em LabVIEW, e as temperaturas foram inicialmente pré-estabelecidas, sendo com isso valores também conhecidos. Desta forma, por meio da equação (8) obtém-se o coeficiente de Seebeck para cada ponto analisado. E assim, calculou-se a máxima

potência de saída para os mesmos pontos através da equação (12). Os resultados são então expressos em função da temperatura média do TEG, mostrados na Figura 28.

Figura 28. Máxima energia elétrica obtida em função da média das temperaturas nas faces do gerador termoelétrico



Fonte: Autor

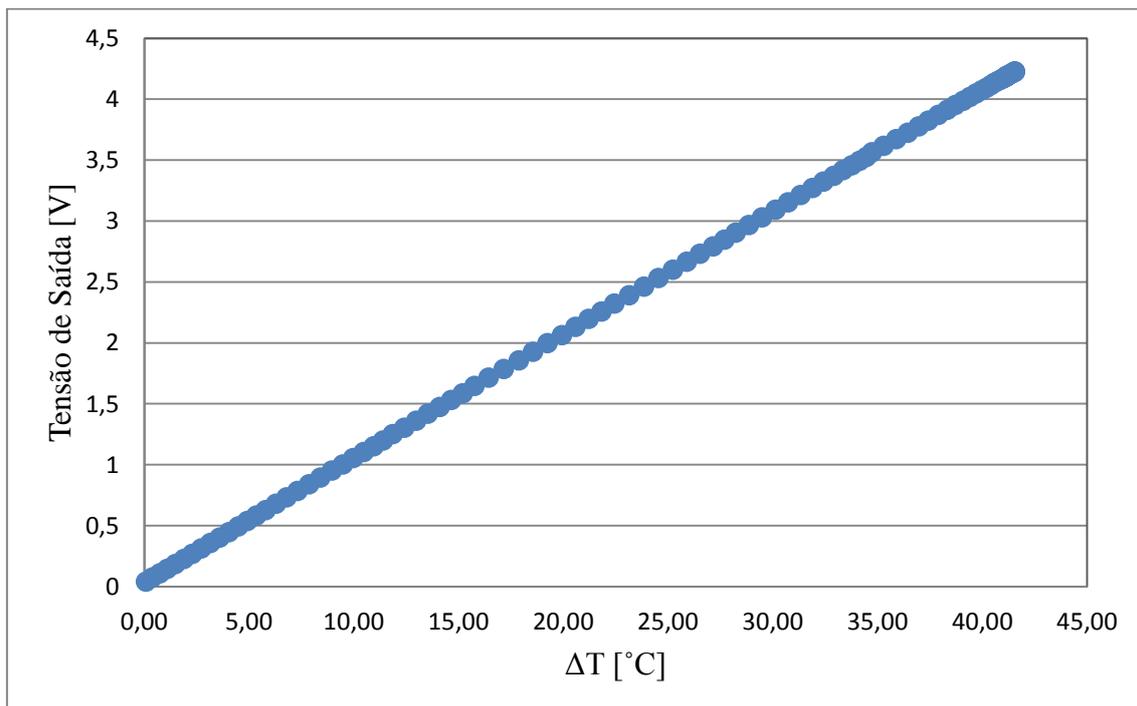
Pode-se perceber que conforme aumenta-se o gradiente de temperatura entre a face fria e quente do dispositivo termoelétrico, a potência produzida cresce consideravelmente. Nota-se também que para um mesmo valor de gradiente de temperatura há uma diminuição da potência de saída. Observa-se que mais energia é gerada para temperaturas mais baixas, pois a resistência elétrica interna do TEG aumenta em função da temperatura, conforme é mostrado na Figura 27. Durante os testes, observou-se também que o aumento da temperatura faz a tensão de saída decrescer, porém de forma não muito significativa. Muito provavelmente uma característica do efeito Seebeck do material. Para as faixas de temperaturas consideradas neste experimento o coeficiente de Seebeck variou entre 0,104 V/K e 0,108 V/K.

Condições com maiores valores de gradiente de temperatura são encontrados em satélites, da mesma forma os mesmos estão sujeitos a temperaturas mais baixas do que analisadas. No entanto, o aparato experimental desenvolvido e montado para este

trabalho não permite avaliar todas essas situações, fontes de energia mais potentes seriam necessárias, assim como um dissipador de calor mais eficiente.

Embora tenha sido difícil obter gradientes de temperaturas entre as faces, superiores a aproximadamente 25 °C, de forma a manter os valores estáveis em regime permanente, foi possível conseguir gradientes de temperaturas maiores em regime transiente, possibilitando a obtenção dos dados de tensão de saída e assim estimar a potência gerada para estas condições. Com este intuito procurou-se manter a temperatura do lado frio o mais próximo possível de 10 °C e variou-se assim a temperatura do lado quente entre aproximadamente 10 °C até um valor próximo de 60 °C. Através deste método foi possível obter um gradiente de temperatura superior a 40 °C em regime transiente. Os resultados da tensão de saída em função do gradiente de temperatura é mostrado na Figura 29.

Figura 29. Valores experimentais de tensão de saída em função do gradiente de temperatura presente em um TEG



Fonte: Autor

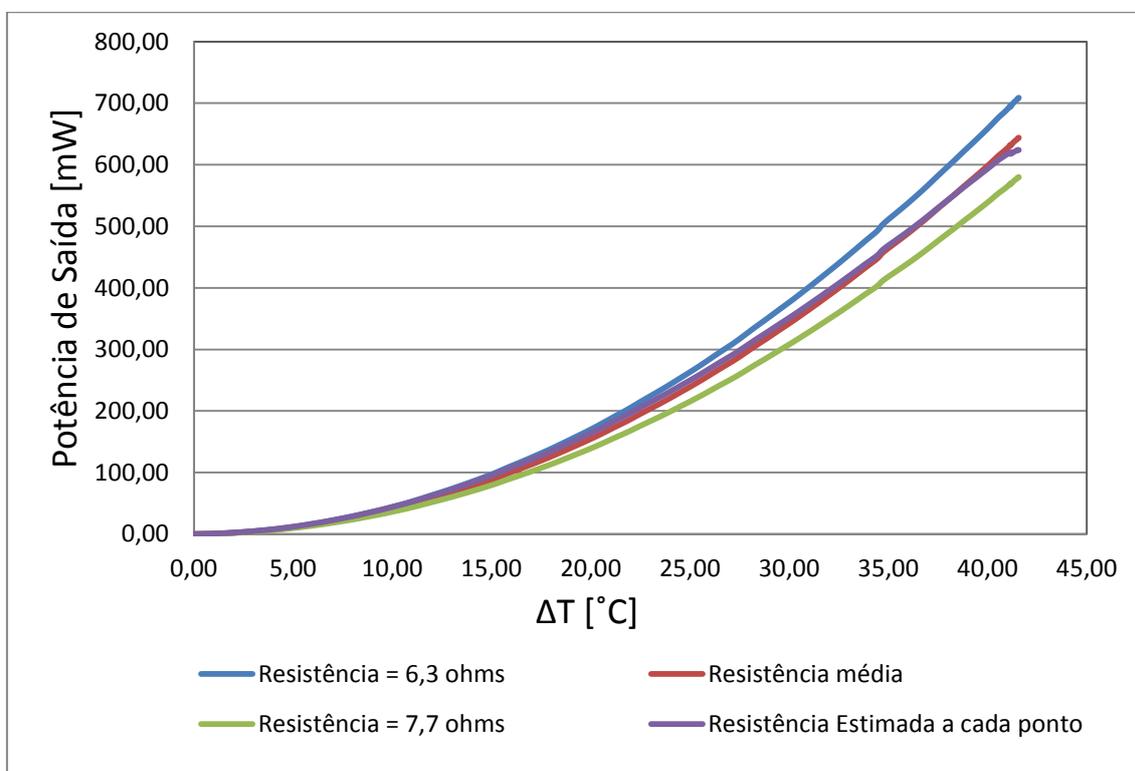
Pela figura acima nota-se que foi possível obter uma tensão acima de 4 volts para um gradiente de aproximadamente 40 °C. Observa-se também que a tensão de saída do módulo termoelétrico apresenta um comportamento linear com o gradiente de

temperatura, sendo desta forma possível extrapolar valores de tensão para condições de temperatura não avaliadas experimentalmente.

Demandaria um tempo demasiado para obter experimentalmente a resistência interna do TEG para cada ponto considerado no gráfico acima. Devido a isso, buscou-se estimar a potência máxima de saída para os gradientes de temperatura apresentados na Figura 29, considerando os valores para a resistência interna do gerador termoelétrico de quatro maneiras diferentes.

Com base nos resultados apresentados na Figura 27, primeiramente considera-se a resistência como sendo simplesmente o valor mínimo obtido e constante, do mesmo modo calcula-se a potência máxima utilizando o valor máximo obtido de resistência. Também considera-se a resistência como sendo a média dos valores obtidos experimentalmente e por último a partir do comportamento da resistência em função da temperatura média observado na Figura 27, extrapola-se valores de resistências para as demais condições observadas neste caso. O resultado destas estimativas é apresentado na Figura 30.

Figura 30. Estimativa da máxima potência de saída fornecida pelo gerador termoelétrico em função do gradiente de temperatura



Fonte: Autor

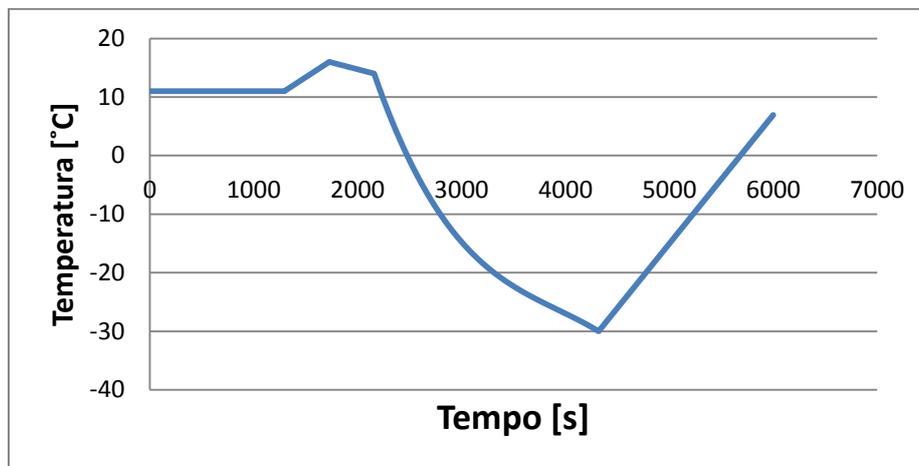
Da Figura 30, percebe-se que a potência de saída cresce de forma bastante significativa com o aumento do gradiente de temperatura, podendo atingir cerca de 700 mW para uma diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio de aproximadamente 40 °C, e com uma resistência de 6,3 ohms. Porém este resultado não seria muito realista, uma vez que foi observado um comportamento crescente da resistência em função da temperatura. Embora a resistência interna do TEG possa ter um comportamento diferente para temperaturas mais altas analisadas, os valores da média das temperaturas entre o lado quente e o lado frio considerados neste gráfico estão dentro da faixa de valores considerados nas medições de resistência interna do TEG.

Pensando de forma mais conservadora, ainda pode-se dizer que é possível conseguir gerar um pouco acima de 550 mW para a diferença de temperatura de 40 °C. Observa-se também que o valor da resistência interna do TEG torna-se mais significativo para gradientes de temperatura mais altos. Nota-se ainda que a consideração de resistência média gerou valores próximos da resistência estimada a cada ponto, os quais representam resultados mais consistentes.

Por fim, considerou-se os resultados obtidos até então para estimar a energia gerada em um nanosatélite. Para isto, tomou-se como base os dados de temperatura apresentados na Figura 12, os quais representam um caso real. Foi utilizado, no entanto, um intervalo de tempo para apenas uma órbita. Então o gráfico foi dividido em cinco segmentos, de forma a aproximar a variação da temperatura externa do satélite a um conjunto de equações.

O resultado desta aproximação é mostrado na Figura 31, onde os valores apresentados graficamente representam a temperatura no lado externo do satélite e por isso foram considerados como a temperatura no lado quente do TEG. O lado frio do TEG foi considerado como sendo a temperatura interna do satélite, estimada como a média da temperatura externa do nanosatélite. Assim a temperatura do lado frio foi de -4,28 °C, o qual aparenta ser coerente, uma vez que o autor Garzon (2012) obteve um valor semelhante de temperatura interna de um nanosatélite por meio de simulações numéricas.

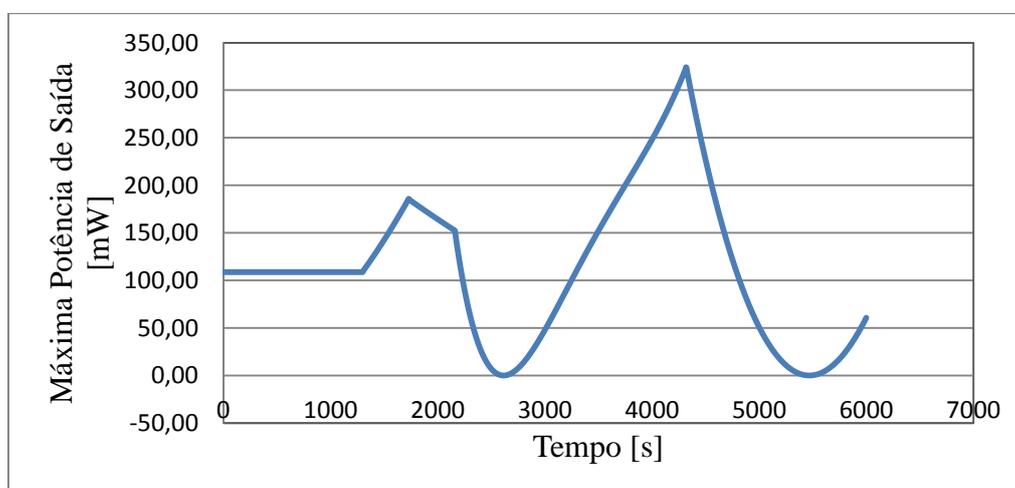
Figura 31. Aproximação da temperatura externa de um nanosatélite em função do tempo, considerando uma órbita completa



Fonte: Autor

Com tais considerações feitas a respeito das temperaturas no lado quente e no lado frio de um nanosatélite, calculou-se o gradiente de temperatura em função do tempo para uma órbita. Em seguida foram obtidos os valores de tensão de saída com base nos resultados obtidos anteriormente que são mostrados na Figura 29. A partir disso novamente obtiveram-se os valores do coeficiente de Seebeck utilizando a equação (8). Os valores de resistência interna do TEG foram extrapolados por meio do comportamento observado na Figura 27. E então foram calculadas as máximas potências de saída para uma órbita por meio da equação (12). O resultado dessas estimativas é mostrado na Figura 32, mostrada abaixo.

Figura 32. Estimativa da potência máxima de saída para uma órbita de um nanosatélite



Fonte: Autor

Para este caso específico, com os maiores gradientes de temperaturas na qual o nanosatélite está exposto é possível obter uma potência instantânea superior à 300 mW. Na média, a máxima potência de saída foi de 112,82 mW. Sendo assim, o gerador termoelétrico analisado possui uma capacidade de geração de energia de 0,188 W-h para este caso em particular.

6.4 ANÁLISE DE ERROS EXPERIMENTAIS

De acordo com o Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria (2015), incertezas em medições experimentais provêm basicamente de dois tipos de erros, sendo eles denominados erros sistemáticos e erros aleatórios. Erros sistemáticos são aqueles de causas identificáveis e a princípio podem ser eliminados, enquanto que erros aleatórios são de modo geral imprevisíveis e está principalmente relacionado a flutuações das condições ambientais e erro humano.

Erros sistemáticos relacionados à precisão dos instrumentos são fáceis de quantificar. Para o sistema de aquisição utilizado, o hardware HP HEWLETT PACKARD, modelo 34970A, apresenta em suas leituras de temperatura uma precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$, na utilização e termopares do tipo T. E nas leituras de tensão para a faixa de temperaturas consideradas no trabalho, este mesmo hardware pode apresentar um erro máximo de até 13,9 mV. Com relação ao multímetro utilizado nas medições das resistências, sua precisão é de $\pm 0,05$ ohms.

No que se refere ainda às medições das resistências interna do TEG, além da resolução do multímetro utilizado não ser considerada muito boa, é difícil a regulagem do potenciômetro para um valor específico de resistência, o mesmo é bastante sensível fazendo que qualquer manuseio do mesmo haja uma alteração significativa no valor da resistência. Assim, eventualmente com equipamentos de maior precisão se observaria um comportamento mais linear da resistência interna do TEG em função da temperatura média. Podendo assim ser realizadas estimativas mais precisas quanto à máxima energia elétrica gerada pelo dispositivo termoelétrico.

Com relação às diferenças nos valores de temperaturas nas medições do lado quente do TEG e apresentadas na Figura 26, conforme já comentado anteriormente, não

foi investigado a causa dessa disparidade. Possíveis causas são: termopares não devidamente calibrados, defeito em um dos TECs utilizados, ou não havia um contato adequado entre as superfícies da placa intermediária de cobre e um dos dispositivos termoelétricos.

7. CONCLUSÃO

Por meio de testes experimentais e algumas estimativas, o trabalho conseguiu demonstrar a quanto o magnitude de energia elétrica que se pode gerar por meio de um dispositivo termoelétrico quando o mesmo for aplicado a nanosatélites.

Claramente pode-se notar que conforme aumenta-se os gradientes de temperaturas entre a face quente e a face fria do TEG, a potência de saída aumenta consideravelmente, no entanto, para o caso particular observado, o nanosatélite é exposto à gradientes de temperatura relativamente baixos.

Um dos maiores gradientes de temperatura observados para o nanosatélite analisado foi de 25,72 °C, com temperaturas de -30 °C e -4,28 °C. No entanto, conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho é possível obter temperaturas mais extremas que essas. Porém, idealmente os satélites são projetados para possuírem o mínimo possível de variação de temperatura, ou seja, eventualmente pode ser interessante projetar ao menos algumas partes dos satélites para sofrerem maior variação de temperatura e então ter um aproveitamento melhor da capacidade de geração de energia elétrica através de um dispositivo termoelétrico.

Conforme já apresentado neste trabalho, geradores termoelétricos, de modo geral, são conhecidos como sendo dispositivos de baixa eficiência na conversão de energia térmica em elétrica. No entanto, vários estudos vêm sendo realizados em busca do aumento da eficiência dos TEGs e resultados positivos já vem sendo alcançados. Assim, acredito que muitas aplicações em que a utilização de dispositivos termoelétricos pareçam inviáveis atualmente, em um futuro próximo podem ser a melhor solução. E levantar as possíveis aplicações desses dispositivos nas mais diversas áreas, principalmente setores de alta tecnologia, certamente motivarão ainda mais pesquisas para o desenvolvimento de dispositivos termoelétricos mais eficientes.

Enfim, embora o foco deste trabalho esteja voltado na geração de energia elétrica por meio de dispositivos termoelétricos aplicados a nanosatélites, os resultados intermediários obtidos neste trabalho também podem ser utilizados para diferentes áreas. Muitos são os casos em que energia na forma de calor é desperdiçada e

eventualmente poderiam ser convertidas em energia elétrica por meio de um dispositivo termoelétrico, de modo que seja financeiramente viável.

7.1 TRABALHO FUTUROS

Pensando em trabalhos futuros dentro do contexto deste estudo realizado, seria interessante avaliar experimentalmente condições de temperaturas mais baixas, que representem de fato condições reais nas quais os satélites estão sujeitos. Considerando o aparato experimental utilizado para este trabalho seria necessário basicamente aumentar a capacidade de dissipação do calor gerado pelos TECs e também utilizar fontes com capacidade de fornecer maiores valores de corrente. Também seria importante utilizar algum outro método para a medição da resistência interna do TEG, uma vez que a forma usada neste trabalho não permite determinar esses valores com muita precisão e eficiência. Sugere-se neste caso a utilização de uma ponte RLC ou um multímetro de bancada, assim como a utilização de algum sistema que permita variar a resistência de modo digital.

Também torna-se interessante estudar configurações de nanosatélites que permitiriam o aumento do gradiente de temperatura onde os TEGs seriam montados, amplificando desta forma a capacidade de geração de energia elétrica de dispositivos termoelétricos.

REFERÊNCIAS

BOEING COMPANY. Nathan D. Hiller. **Thermoelectric power generation using aircraft fuselage temperature differential**. US nº 8973377, 09 mar. 2012, 10 mar. 2015. Disponível em: <<http://patents.justia.com/patent/8973377#history>>. Acesso em: 19 maio 2015.

DANVIC. FAQ. Disponível em: <<http://www.peltier.com.br/index.php?url=faq>>. Acesso em: 29 maio 2015.

ENERGIA. **Prototyping Software to Make Things Easy**. Disponível em: <<http://energia.nu/>>. Acesso em: 18 maio 2015.

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: 22 set. 2003.

FERNANDES, Alberto Emanuel Simões dos Santos. **Conversão de Energia com Células de Peltier**. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica – Sistemas de Potência), Faculdade de Ciência e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Caparica, 2012. Disponível em: http://run.unl.pt/bitstream/10362/8084/1/Fernandes_2012.pdf. Acesso em: 19 set. 2014.

FRIEDEL, Jonas; MCKIBBON, Sean. **Thermal Analysis of the CubeSat CP3 Satellite**. 2011. 23 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeroespacial, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2011.

FUTRON. **Space Transportation Costs: Trends in Price Per Pound to Orbit**. 2002. Disponível em: <http://www.futron.com/upload/wysiwyg/Resources/Whitepapers/Space_Transportation_Costs_Trends_0902.pdf>. Acesso em: 22 set. 2014.

GARZON, Maria M.. **Development and Analysis of the Thermal Design for the OSIRIS-3U Cubesat**. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeroespacial, The Pennsylvania State University, University Park, 2012.

GOUPIL, Christophe et al. **Thermodynamics of Thermoelectric Phenomena and Applications**. Entropy, Basel, v. 22, n. 22, p.1481-1517, 15 ago. 2011. Diário. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1099-4300/13/8/1481>>. Acesso em: 30 set. 2014.

GREEN CAR CONGRESS. **BMW PROVIDES AN UPDATE ON WASTE HEAT RECOVERY PROJECTS: Turbosteamer and the Thermoelectric Generator**. 2011. Disponível em: <<http://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>>. Acesso em: 18 maio 2015.

GRUPO DE ENSINO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (Rio Grande do Sul). **Erros Experimentais**. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/Cinematica/cinema08.pdf>>. Acesso em: 21 jul. 2015.

Haidar, S.; Isaac, I.; Singleton, T.. **Thermoelectric Cooling Using Peltier Cells in Cascade**, Edmonton. Disponível em: <http://www.geocities.ws/haidarsajjad/AAPTHandout2.pdf>. Acesso em: 19 set. 2014.

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

HQ TRADOC, Space Division. **Space Environment and Orbital Mechanics**. Disponível em: <http://fas.org/spp/military/docops/army/ref_text/chap5im.htm>. Acesso em: 30 set. 2014.

GAPOSCHKIN, E. M.; COSTER, A. J.. **Analysis of Satellite Drag**. 1988. Disponível em: <http://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol01_no2/1.2.6.satellitedrag.pdf>. Acesso em: 30 set. 2014.

IDTECHEX. **Thermoelectric Generators**. 2012. Disponível em: <<http://www.idtechex.com/research/articles/thermoelectric-generators-a-750-million-market-by-2022-00004631.asp>>. Acesso em: 01 out. 2014.

IOPE. **Termopares**. Disponível em: <http://www.iope.com.br/3ia1_termopares.htm>. Acesso em: 29 maio 2015.

JACQUES, Lionel. **Spacecraft Thermal Control**. 2013. Disponível em: <<http://www.ltas-vis.ulg.ac.be/>>. Acesso em: 30 set. 2014.

MAZAR, Boris. **State of the Art Prototype Vehicle with a Thermoelectric Generator**. 2012. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/mazar.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2015.

MOURA, José Américo de Sousa. **Filmes nanométricos de FeN e AlN crescidos por Sputtering e aplicações do efeito Peltier**. [124 f]. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010. Disponível em: http://www.univasf.edu.br/~joseamerico.moura/index_arquivos/Cap6.pdf. Acesso em: 19 set. 2014.

NASA. **Thermoelectric Devices Cool, Power Electronics**. 2009. Disponível em: <http://spinoff.nasa.gov/Spinoff2009/ip_4.html>. Acesso em: 01 out. 2014.

PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial Montagem da Ponte H**. 2006. Disponível em: <http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_montagem_de_uma_ponte_h.pdf> Acesso em: 14 jun. 2015.

PINDADO, Rocío Herranz. **Climatización Mediante Células Peltier**. 2008. 237 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2008. Disponível em:

<<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/48c66604d0038.pdf>>. Acesso em: 29 maio 2015.

SILVERIO, Leticia Borges. **Análise de um Condicionador de Ar Automotivo Utilizando o Efeito Termoelétrico**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012. Disponível em:

<http://www.bdtd.unitau.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=577>. Acesso em: 29 maio 2015.

SNYDER, G. Jeffrey; TOBERER, Eric S. **COMPLEX THERMOELECTRIC MATERIALS**. Pasadena: Nature, v. 7, fev. 2008.

SOUZA, Diego Henrique Cunha de. **Otimização do Uso de Refrigeradores Termoelétricos em Processos de Refrigeração**. 2007. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

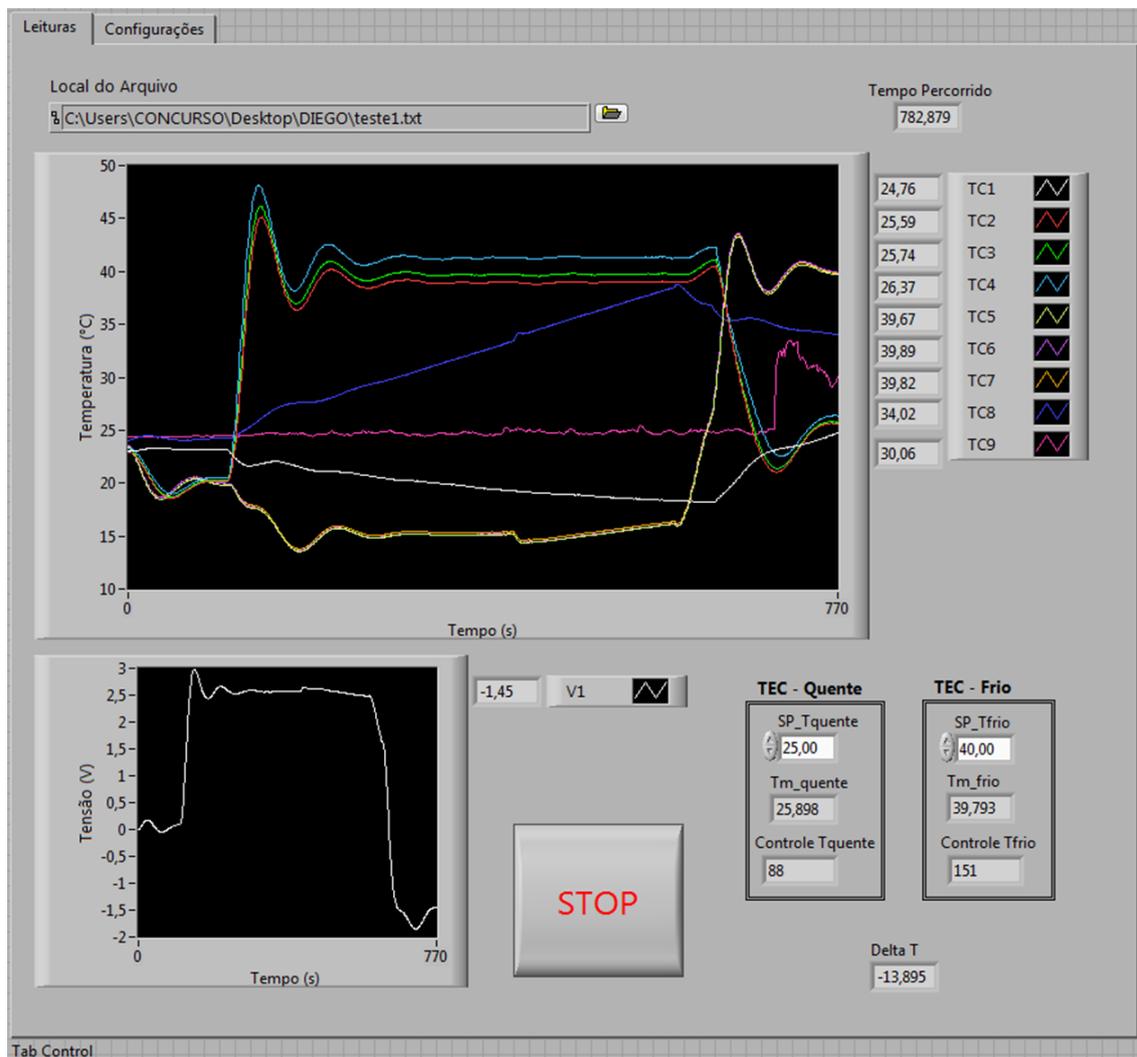
SPENGLER, Anderson Wedderhoff. **Sistema Automático para caracterização de sensores a fibra óptica para alta tensão**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

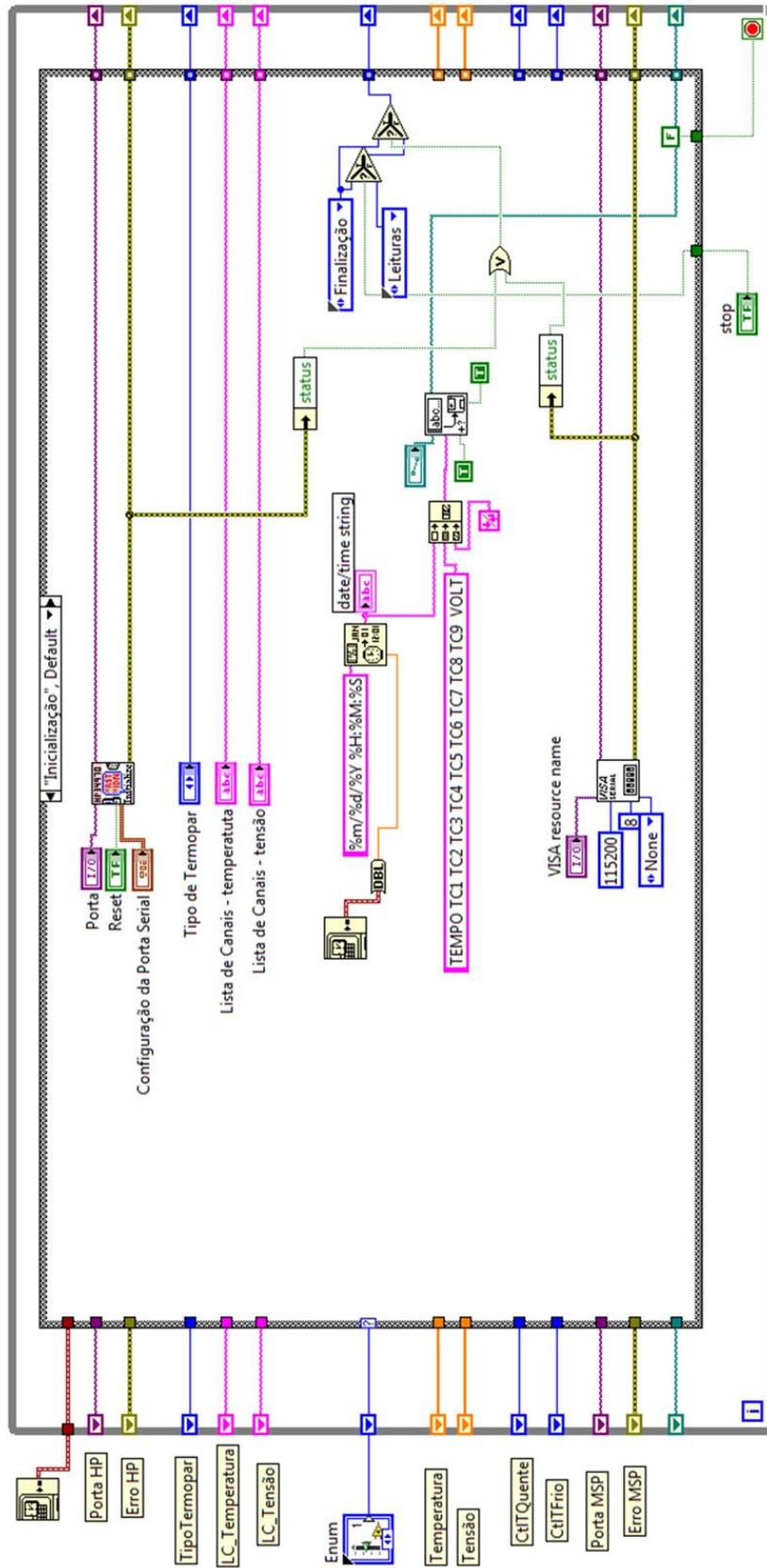
TEGMART. **Devil Watt**. 2013. Disponível em:

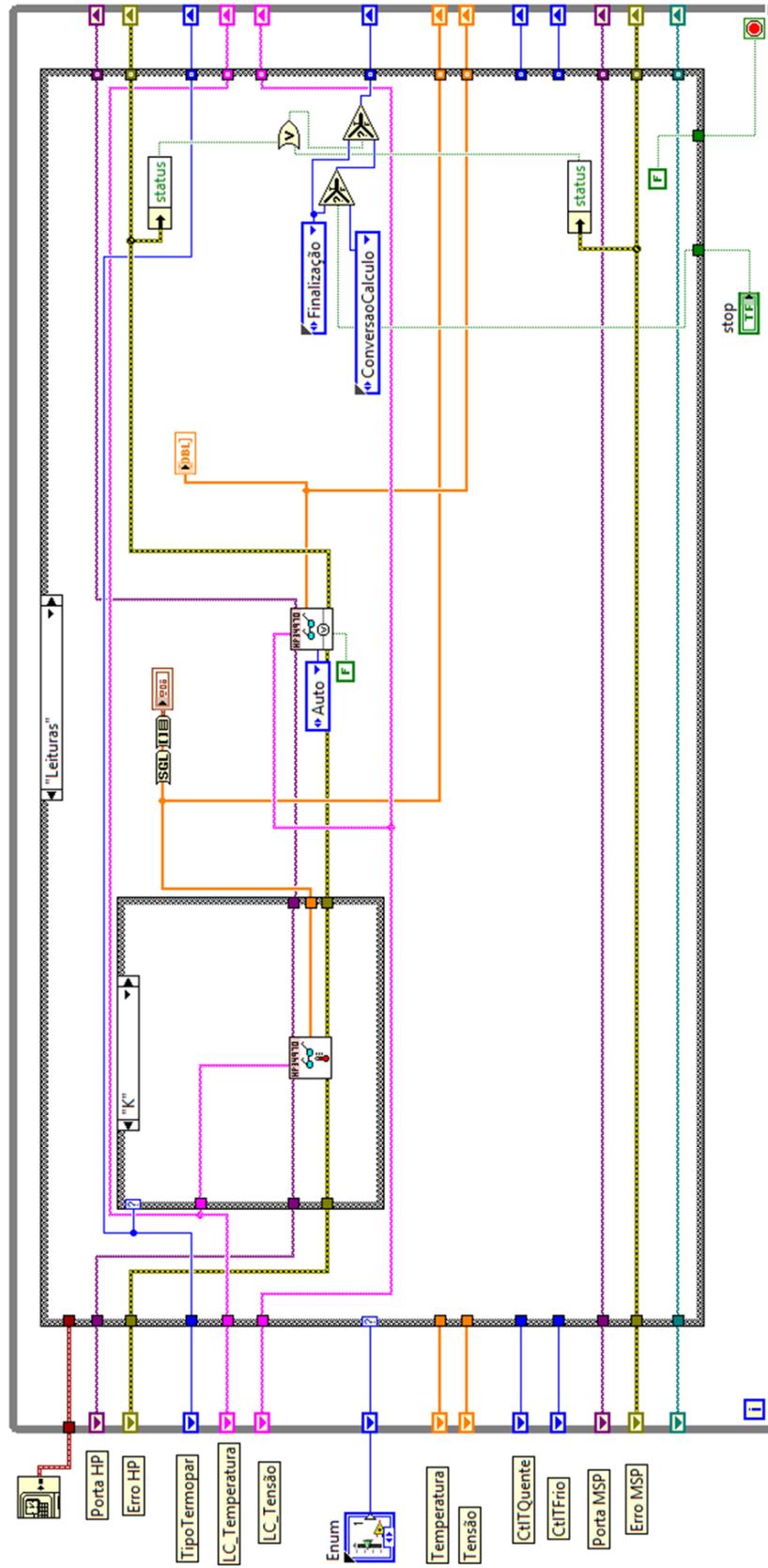
<<http://www.tegmart.com/datasheets/DW-SM-45W.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2015.

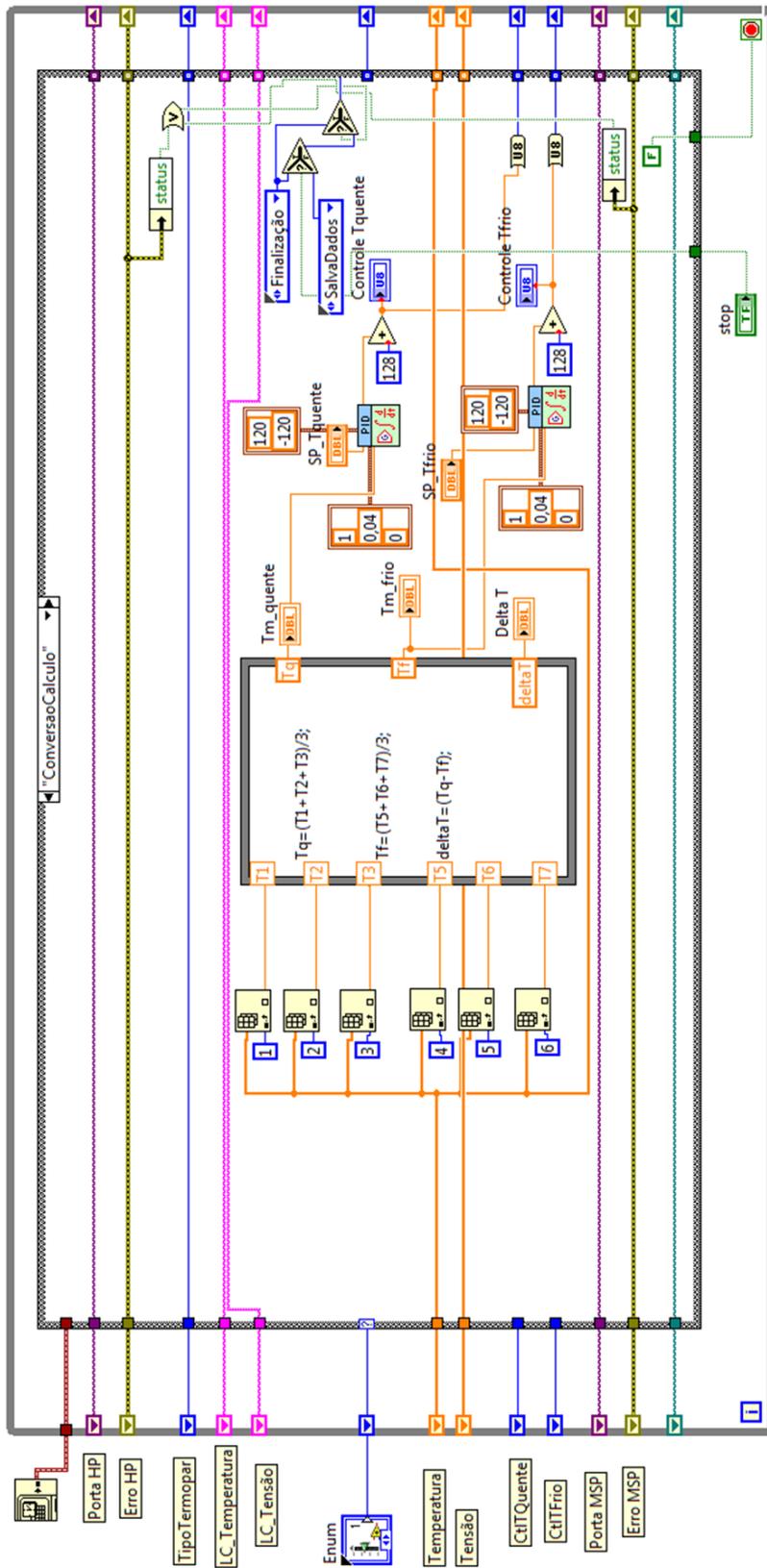
XI, Hongxia; LUO, Lingai; FRAISSE, Gilles. **Development and applications of solar-based thermoelectric technologies**, Guangdong, jun. 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000663>. Acesso em: 19 set. 2014.

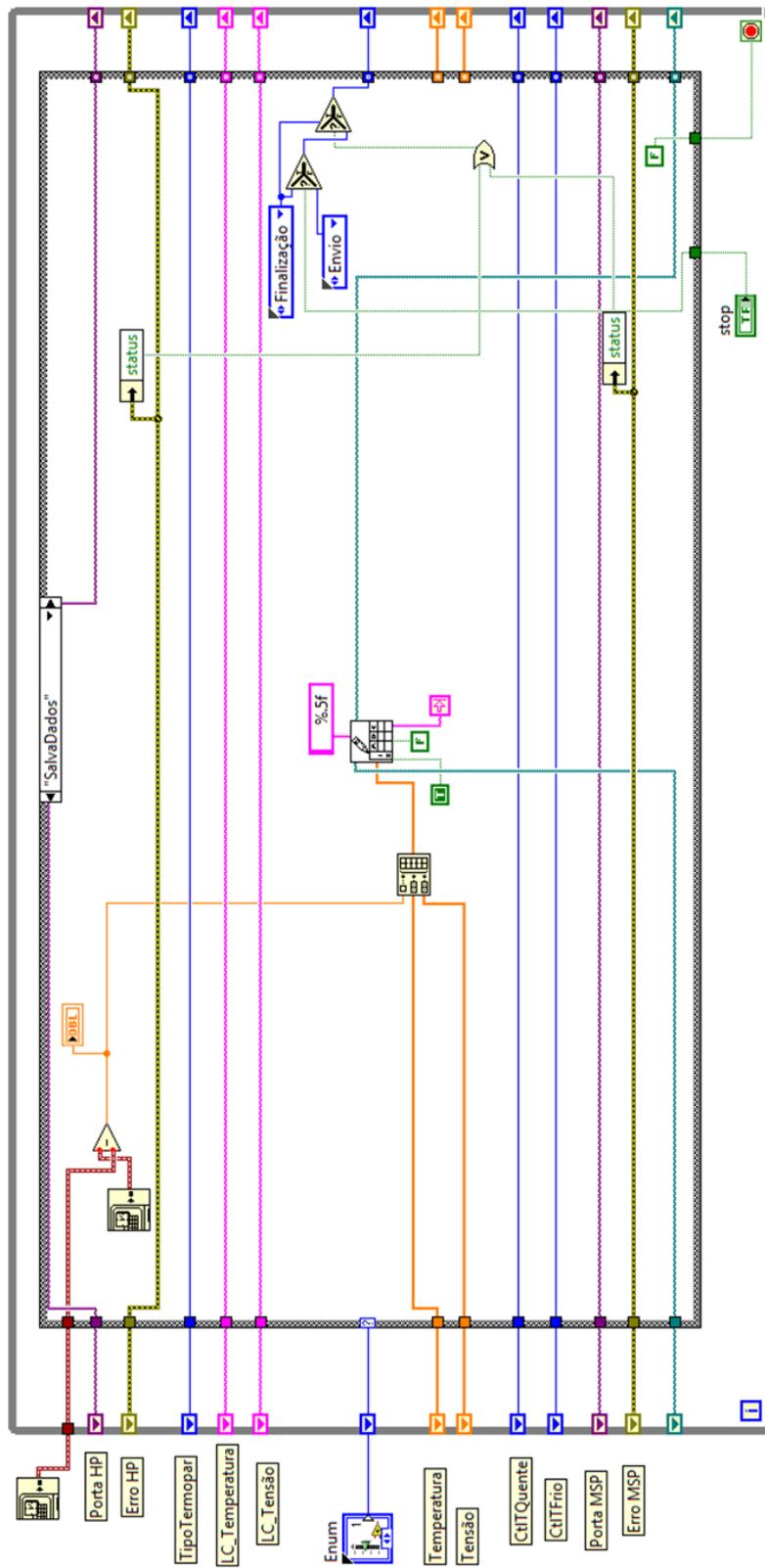
APÊNDICE A - Programa desenvolvido em LabVIEW: Painel Frontal e Diagrama de blocos na forma de diagrama de estados (Inicialização, Leituras, Cálculos, Gravação de dados, Aplicação Controle e Finalização)

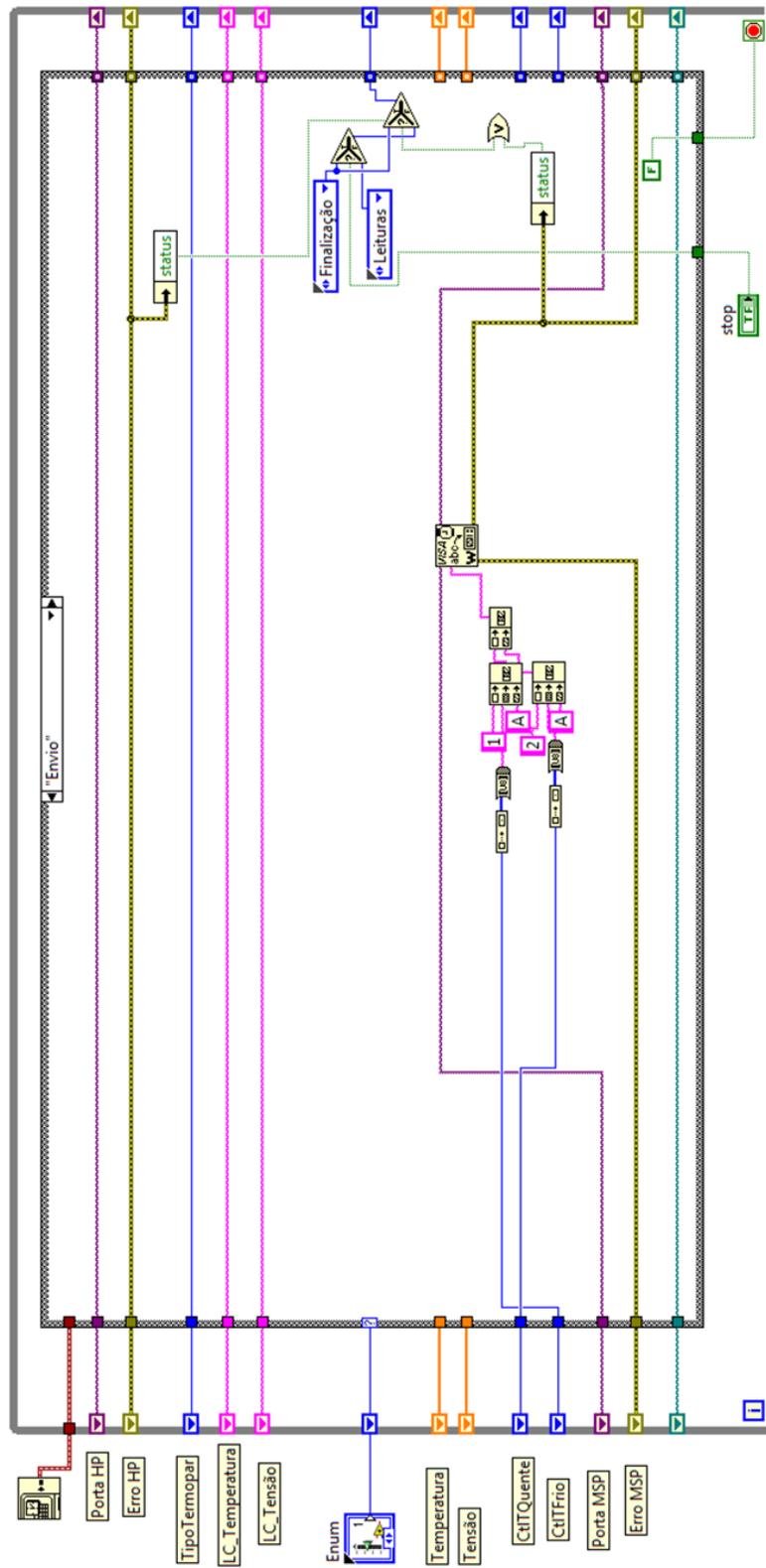


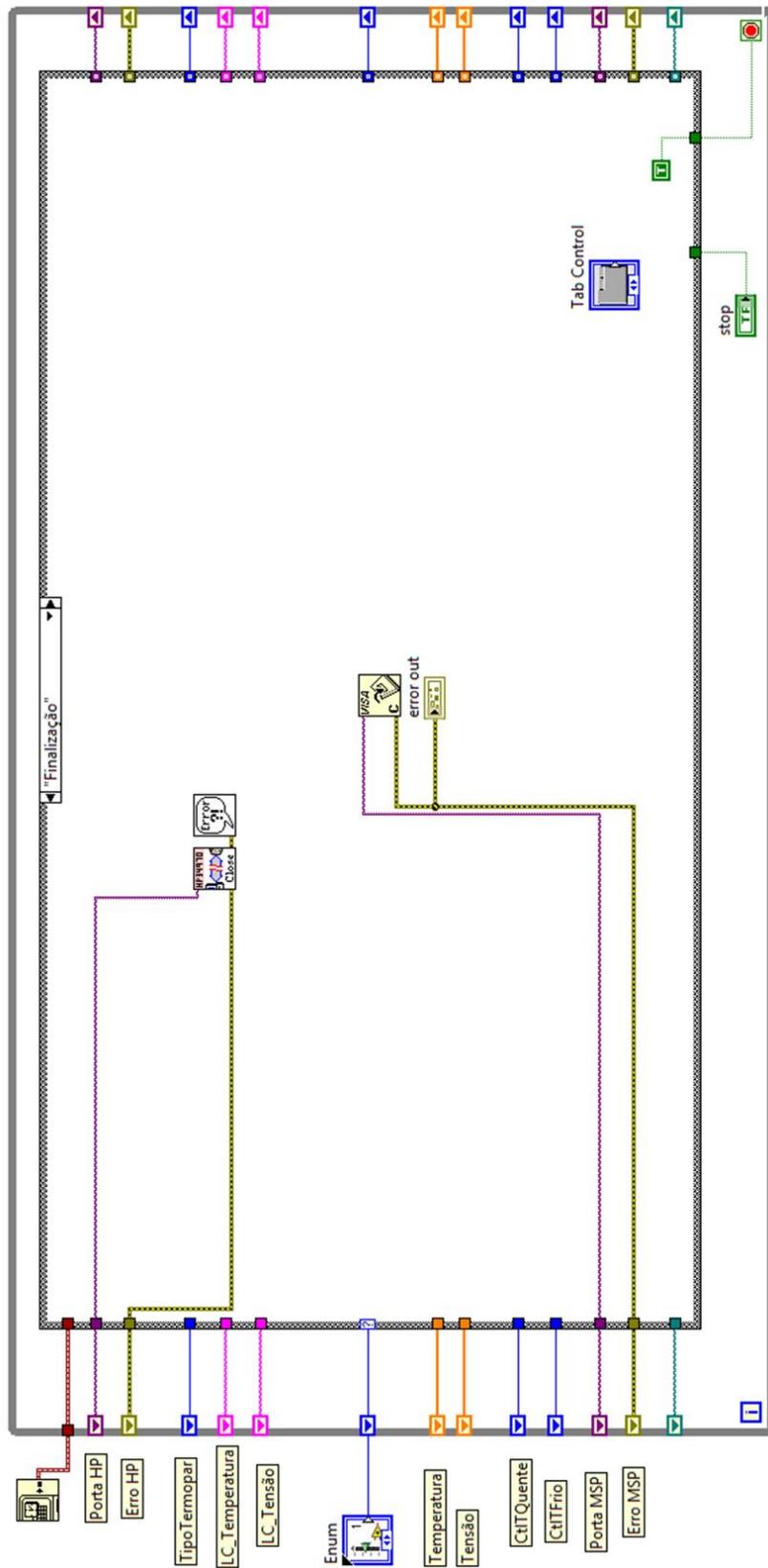










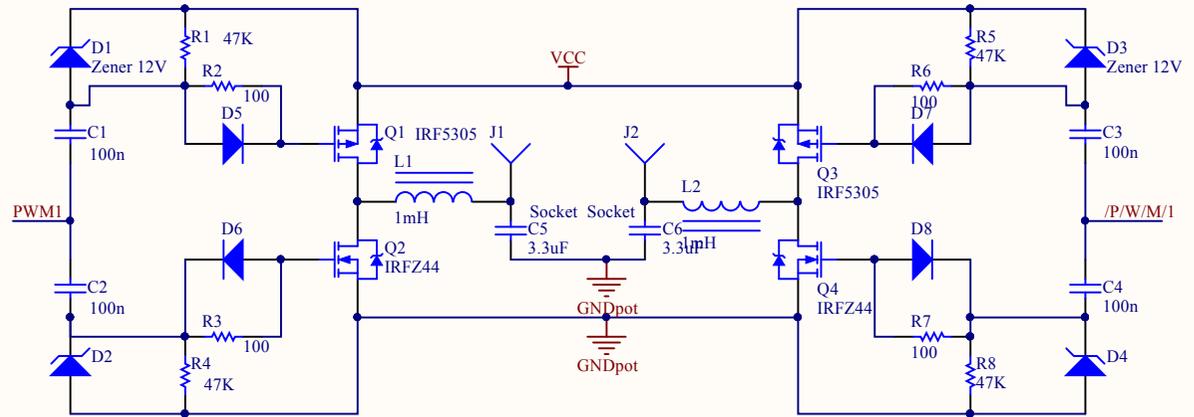
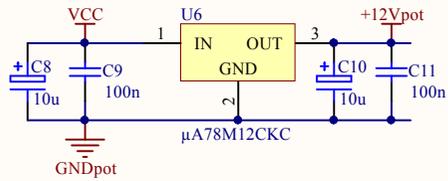
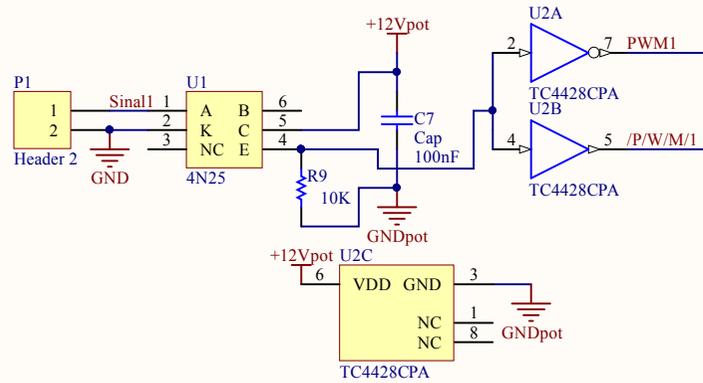


APÊNDICE B – Código desenvolvido para o microcontrolador MSP 430F5529 por meio do *software* Energia

```
int posicao = 1;
int endereco = 0;
int valor = 0;
int flag = 0;
void setup()
{
  // inicialização:
  analogFrequency(9000);
  Serial.begin (115200);
  pinMode(P1_4,OUTPUT);
  pinMode(P2_5,OUTPUT);
  analogWrite(P1_4, 127);
  analogWrite(P2_5, 127);
}
void loop()
{
  // loop principal:
  if (Serial.available()){
    if (posicao == 1){
      endereco = Serial.read();
      posicao++;
    }
    else if (posicao == 2){
      valor = Serial.read();
      posicao++;
    }
    else {
      if (Serial.read() == 'A') {
```

```
    flag = 1;
  }
  else {
    flag = 0;
  }
  posicao = 1;
}
}
if (flag == 1){
  if (endereco == '1'){
    analogWrite(P1_4, valor);
  }
  else if (endereco == '2'){
    analogWrite(P2_5, valor);
  }
  flag = 0;
}
}
```

APÊNDICE C – Circuito Elétrico da Ponte H



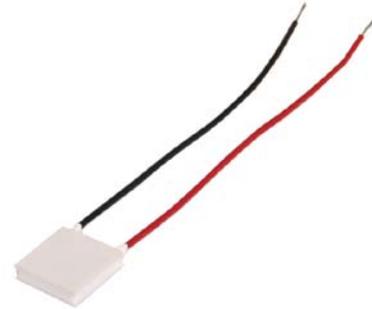
Title			
P. Analógica - Potência - Mód. Câmara			
Size	Number	Revision	
A4	Versão Final	beta	
Date:	18/06/2015	Sheet of	
File:	C:\Users\...\PartePotencia.SchDoc	Drawn By:	

ANEXO A – Informações Técnicas do TEC CP60240, fabricante CUI

SERIES: CP60 | **DESCRIPTION:** 6.0 A PELTIER MODULE

FEATURES

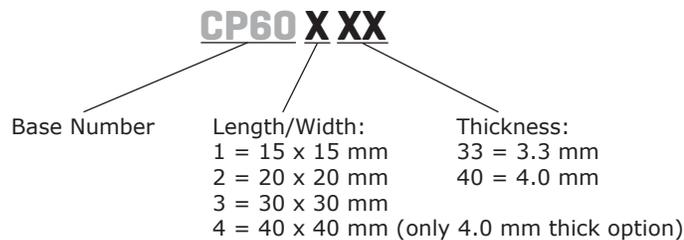
- solid state device
- small and lightweight
- precise temperature control
- quiet operation



MODEL	input voltage max (V)	input current max (A)	output Qmax ¹		output ΔTmax ²	
			T _h =27°C (W)	T _h =50°C (W)	T _h =27°C (°C)	T _h =50°C (°C)
CP60140	2.1	6	7.1	7.9	68	75
CP60133	3.8	6	12.2	13.6	66	72
CP60240	3.8	6	13.0	14.5	68	75
CP60233	8.6	6	27.9	31.2	66	72
CP60340	8.6	6	29.0	32.4	68	75
CP60333	15.4	6	50.5	56.5	66	72
CP60440	15.4	6	53.0	59.3	68	75

Notes: 1. maximum cooling capacity at I_{max}, V_{max}, and ΔT=0°C
 2. maximum temperature difference at I_{max}, V_{max}, and Q=0W (maximum parameters are measured in a vacuum)

PART NUMBER KEY



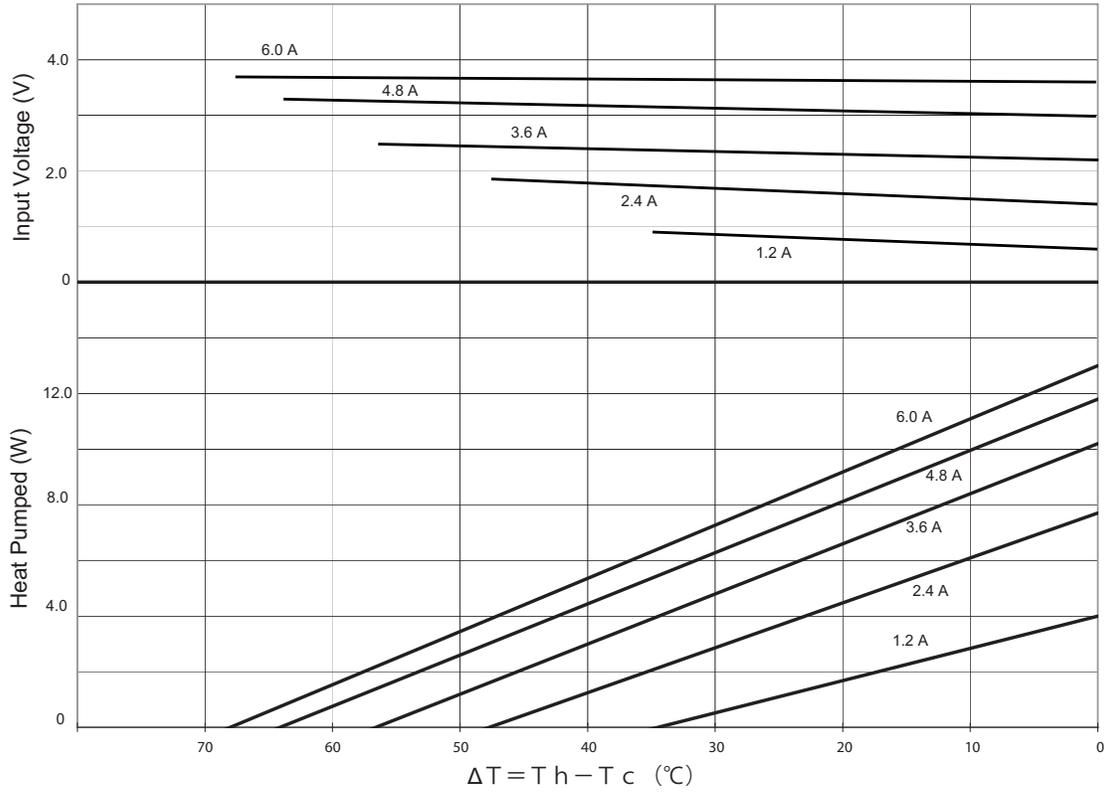
GENERAL

parameter	conditions/description	min	typ	max	units
internal resistance ³	CP60140	0.261	0.290	0.319	Ω
	CP60133	0.45	0.50	0.55	Ω
	CP60240	0.477	0.530	0.583	Ω
	CP60233	1.08	1.2	1.32	Ω
	CP60340	1.089	1.210	1.331	Ω
	CP60333	1.98	2.2	2.42	Ω
	CP60440	1.953	2.170	2.387	Ω
solder melting temperature	connection between thermoelectric pairs			138	°C
assembly compression				98.07	N/cm ²
				10	kgf/cm ²
hot side plate				80	°C
MTBF				200,000	hours

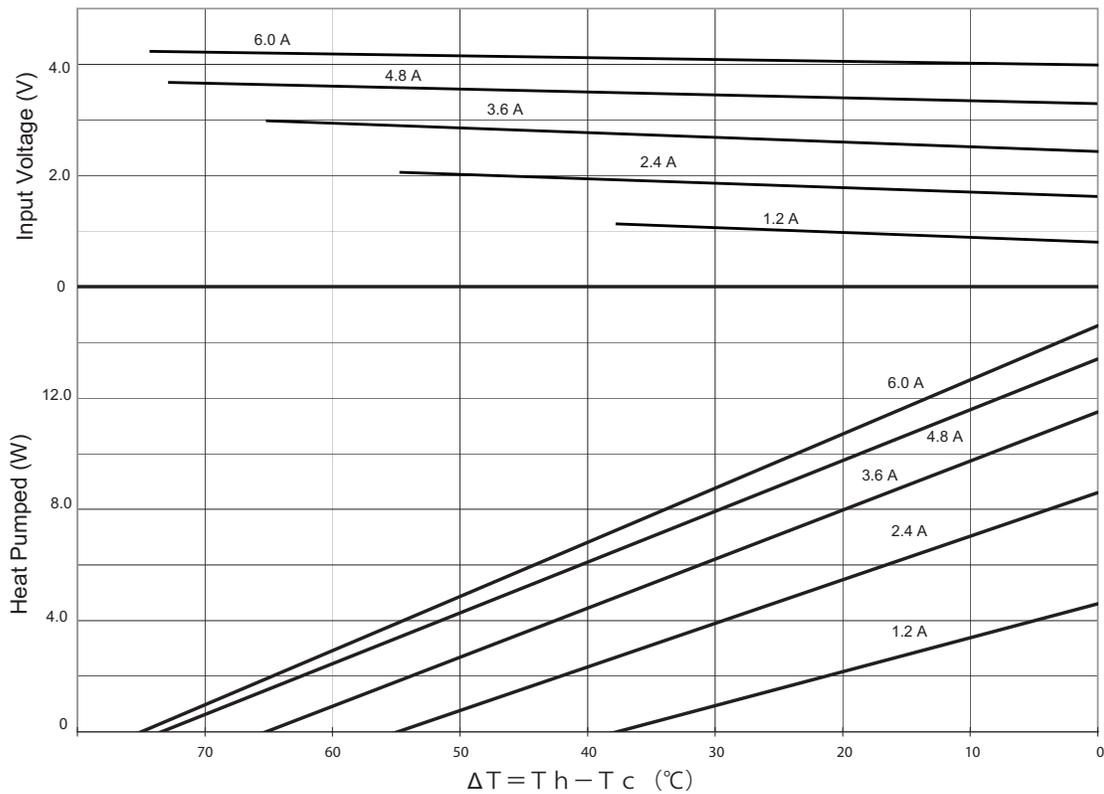
Notes: 3. measured by AC 4-terminal method at 25°C

For further information and product selection refer to peltier applicaftion notes.pdf

CP60240 PERFORMANCE (Th=27°C)

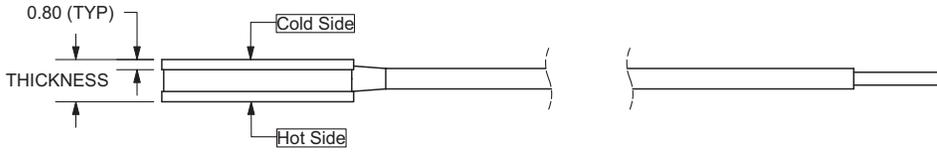


CP60240 PERFORMANCE (Th=50°C)

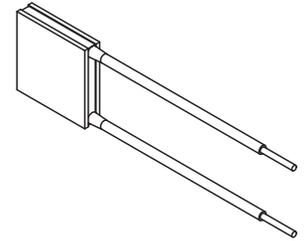
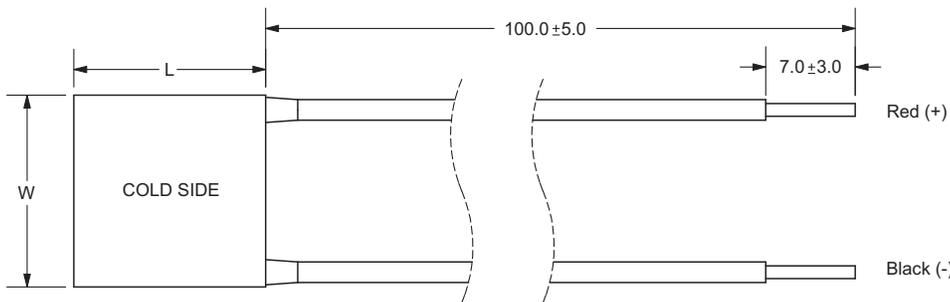


MECHANICAL DRAWING

units: mm



	MATERIAL	PLATING
ceramic plate	Al ₂ O ₃ (Alumina)	
sealer	silicon rubber RTV	
lead wire (3.3 mm thick)	UL1430 (22AWG)	tin
lead wire (4.0 mm thick)	UL1674 (20AWG)	tin
joint cover	silicon rubber RTV	



MODEL	LENGTH x WIDTH (mm)	THICKNESS (mm)
CP60140	15 x 15 ± 0.3	4.0 ± 0.1
CP60133	15 x 15 ± 0.3	3.3 ± 0.1
CP60240	20 x 20 ± 0.3	4.0 ± 0.1
CP60233	20 x 20 ± 0.3	3.3 ± 0.1
CP60340	30 x 30 ± 0.3	4.0 ± 0.1
CP60333	30 x 30 ± 0.3	3.3 ± 0.1
CP60440	40 x 40 ± 0.3	4.0 ± 0.1

REVISION HISTORY

rev.	description	date
1.0	initial release	09/03/2009
1.01	applied new template	05/08/2012

The revision history provided is for informational purposes only and is believed to be accurate.



Headquarters
20050 SW 112th Ave.
Tualatin, OR 97062
800.275.4899

Fax 503.612.2383
cui.com
techsupport@cui.com

CUI offers a one (1) year limited warranty. Complete warranty information is listed on our website.

CUI reserves the right to make changes to the product at any time without notice. Information provided by CUI is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by CUI for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.

CUI products are not authorized or warranted for use as critical components in equipment that requires an extremely high level of reliability. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

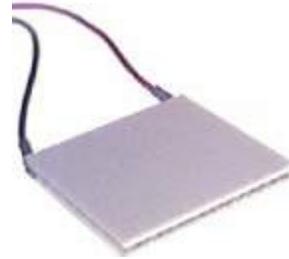
ANEXO B – Informações Técnicas do TEC 12708, fabricante Hebei



TEC1-12708

Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	71	79
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	8.5	8.4
V _{max} (Volts)	15.4	17.5
Module Resistance (Ohms)	1.50	1.80



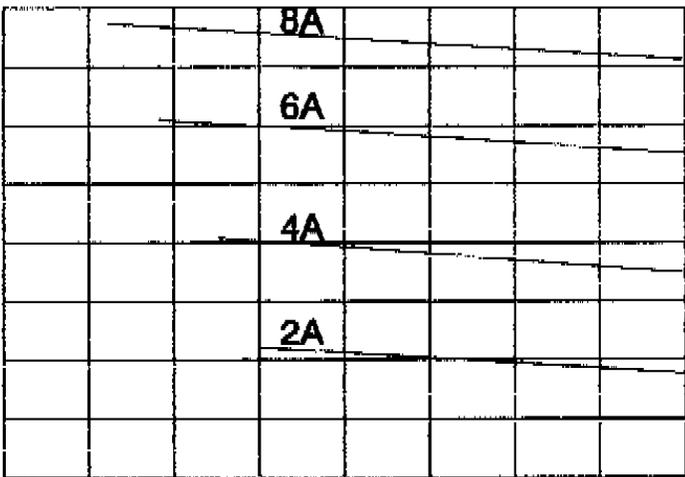
Performance curves on page 2



TEC1-12708

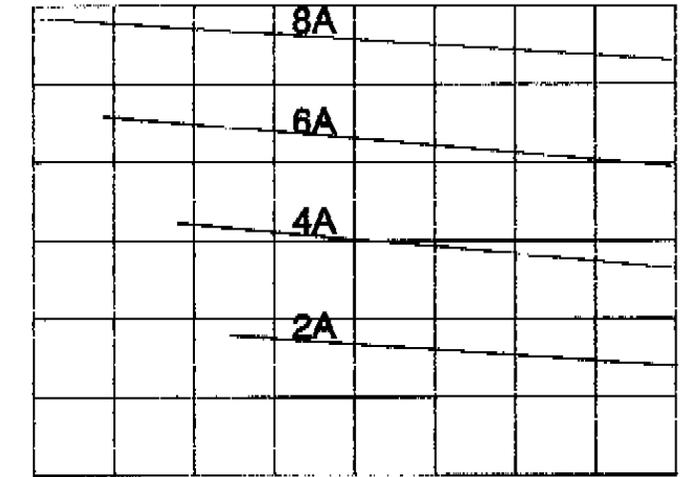
Th = 25 C

V(v)



Th = 50 C

V(v)



30 70 60 50 40 30 20 10 0

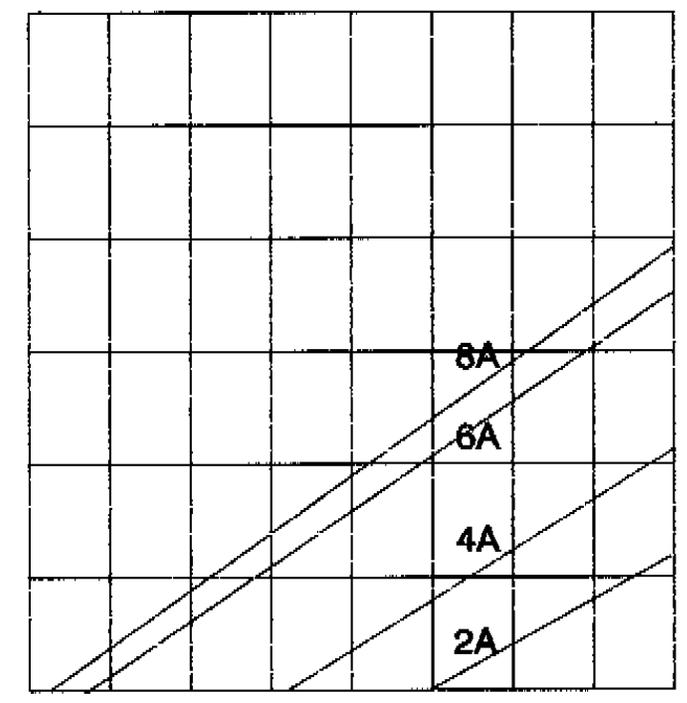
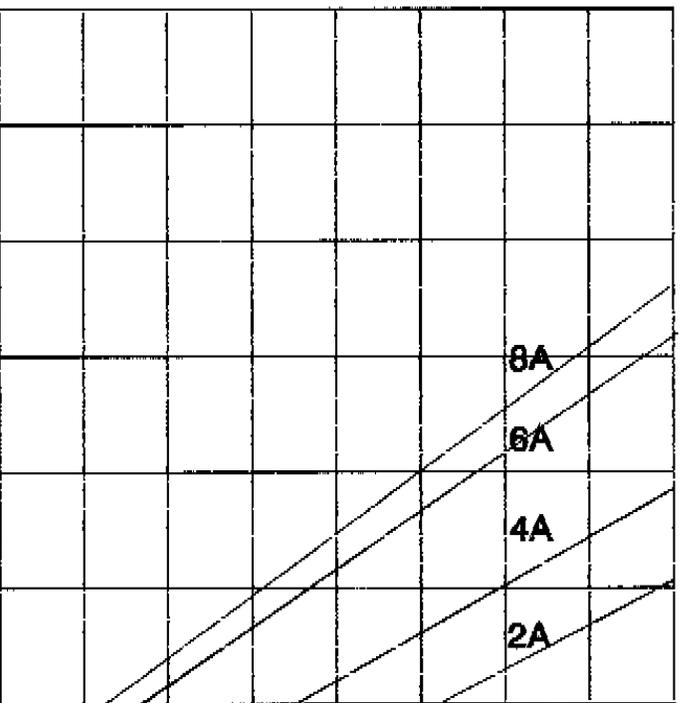
80 70 60 50 40 30 20 10 0

Delta T (C)

Delta T (C)

Qc(w)

Qc(w)

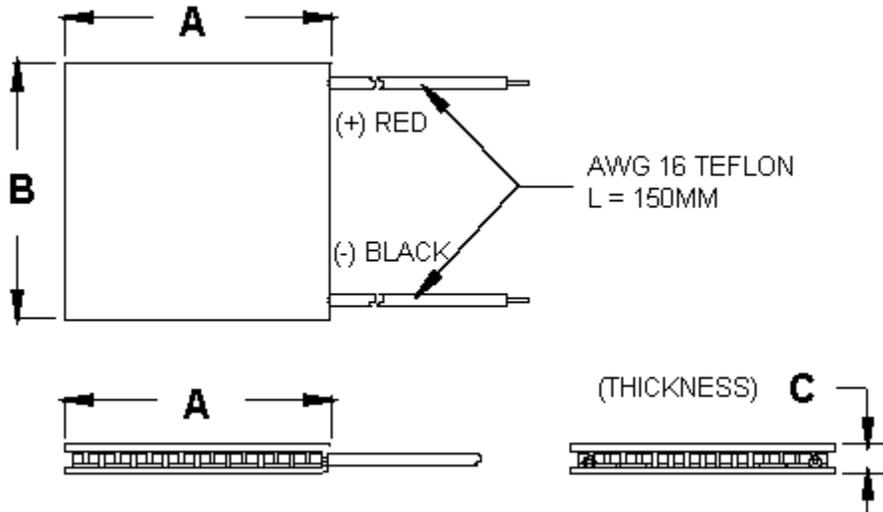


80 70 60 50 40 30 20 10 0

80 70 60 50 40 30 20 10 0

Delta T (C)

Delta T (C)



Ceramic Material: Alumina (Al_2O_3)
 Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

Size table:

A	B	C			
40	40	3.5			

Operating Tips

- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed I_{max} or V_{max} when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
-
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

ANEXO C – Informações Técnicas do Gerador Termoelétrico Utilizado nos Experimentos



EVERRED Thermoelectric Module

PRODUCTS

TECHNICAL INFO

FAQ

CONTACTS

PRODUCT NAVIGATION

- ▶ Thermoelectric Peltier TES
- ▶ Thermoelectric Peltier TEC 1
- ▶ Thermoelectric Peltier TEC 2
- ▶ Max. 200C Peltier module
- ▶ Thermoelectric Seebeck TEG
- ▶ Thermoelectric P & N Type
- ▶ Heatsinks & Fans
- ▶ Thermal Grease
- ▶ CONTACT US

GUARANTEE



All our Products are RoHS compliant

- ▶ TE Mounting Procedure
- ▶ Heatsink Selection
- ▶ TE Power in Japan
- ▶ Related Essay 1

EVERREDTRONICS LTD.
2# Building, No.89 Julian Road, Shanghai, 201907, China
Tel: +86 (21)6049 5160
Fax: +86 (21)6531 1544
sales@everredtronics.com

>> Thermoelectric Seebeck Generator-TEG

A thermoelectric generator relies on the "thermoelectric effect" to convert heat directly into electricity. It is a solid state device with no moving parts and so it is completely silent and extremely reliable. Due to the high reliability of thermoelectric power supplies they have been used for years to provide electrical power in space missions where solar power is not available. Two examples of the many space missions that have relied on thermoelectric power supplies are the "Voyager" that was sent into deep space and has operated successfully for more the 20 years and the "Apollo" lunar missions where thermoelectric power supplies powered equipment that was left behind for more than a decade.

-----Hi-Z Technology

Everredtronics starts Thermoelectric generator/Seebeck module developing since 2005, and we have a independant team special created from our conventional TEM dept and joined by materials & thermal-electricity field professors from Fudan University and Central South University. After years exploring, we become the professional manufacturer in the thermoelectric generators industry our TEGs are grouped by 2 categories by max. operating temperature/max. Th temperature:

- Max. 210 Celsius Degree/ 410F / 483.15K / 869.67Ra
- Max. 320 Celsius Degree/ 608F / 593.15K / 1067.67Ra
- Thermoelectric Generator USE & Application Instructions

- Max. 210 Celsius Degree/ 410F / 483.15K / 869.67Ra

Now we could supply the thermoelectric generator modules with Aluminium plates instead of traditional ceramic plates(Al₂O₃) .

Left image is the TEG254-1.4-1.6, and right is the same model but delivered with Aluminium plates (thickness 1.2mm, +/- 0.1mm), which could help improve the output by 10%-20% than ceramic TEG.
For customized size of aluminium pad modules, Click.

The following specification are based on that the hot side temperature is at 160°C and cold side at 50°C.

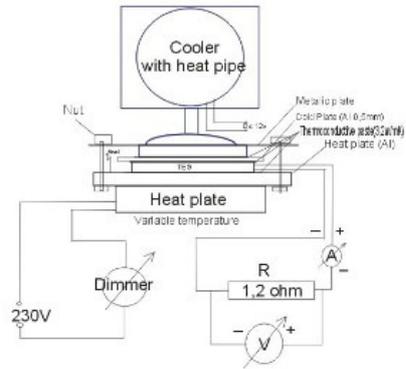
TEG P/N	Dimensions(mm)		V/K	Open circuit V	Matched load Ohm	Matched output Voltage	Matched output Power W	A-W/°C	Heat Flo through module W
	Hot side	Cold							
TEG31-2.8-1.2	30×30	30×30	0.02273	2.5	0.3	0.84	6.5	1	154.8
TEG49-4.5-2.0	62×62	62×62	0.03091	3.4	2	1.33	13	1.3	220.3
TEG49-4.5-2.5	62×62	62×62	0.03091	3.4	0.24	1.33	12.2	1	200.0
TEG71-1.4-1.6	30×30	30×30	0.04636	5.1	1.9	1.92	3.9	0.5	84.8
TEG127-1.4-1.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	1.8	3.2	5.2	2	104.0
TEG127-2.0-1.3	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.3	3.2	7.9	2.02	143.6
TEG127-2.0-1.6	50×50	50×54	0.05818	6.4	1.6	3.2	6.4	1.62	114.3
TEG161-1.2-2.0	40×40	40×40	0.05818	6.4	6.8	4.04	3.7	0.85	77.1
TEG161-1.2-4.0	40×40	40×40	0.05727	6.3	13.4	4.04	3	0.6	54.5
TEG241-1.0-1.2	40×40	40×40	0.11000	12.1	10	6	3.6	1	72.0
TEG241-1.4-1.2	54×54	54×57	0.10455	11.5	4.5	7	7	2.18	120.7
TEG254-1.4-1.2	40×80	44×80	0.10455	11.5	4.8	7	7	2.3	125.0
TEG254-1.4-1.6	40×80	44×80	0.11636	12.8	7.2	6.7	6.2	1.6	101.6
TEG450-0.8-1.0	54×54	54×57	0.19091	21	28	12	5	1.45	83.3

- Max. 320 Celsius Degree/ 608F / 593.15K / 1067.67Ra

The following specification are based on that the hot side temperature is at 300°C and cold side at 50°C.

TEG P/N	Length	Width	V/K	Open circuit V	Matched output Ohm	Matched output Voltage	Matched output current A	Matched output power W	Heat flo through module W
TEG126-30A	30	30	0.03963	9.91	5.3	5.1	0.97	4.9	120.4
TEG126-40A	40	40	0.03963	9.91	5.3	5.2	0.98	5	120.4
TEG126-60A	56	56	0.03111	7.78	1.6	4	3.36	13.2	338.0
TEG241-60A	56	56	0.06519	16.30	4.1	8.5	1.96	16.5	362.0
TEG126-30B	30	30	0.03333	8.33	2.5	4.4	1.52	6.7	144.4
TEG126-40B	40	40	0.02667	6.67	1.7	3.58	1.9	6.8	137.0
TEG126-60B	56	56	0.03111	7.78	0.8	4.12	4.4	18	357.4
TEG241-60B	56	56	0.05333	13.33	2.3	7	2.84	19.7	387.0

Customer Testing Images



Important

Test indicates that the TEGs share the same characteristics with batteries, when connected in series, $V_{output} = V_{TEG1} + V_{TEG2}$ when in Parallel, $V_{TEG1} = V_{TEG2}$ (Note: Connect the same TEG under the same circumstance) so, to achieve higher Output Voltage or current, you could use such features or DC-DC converter.

Contact our representative or use the ***Inquiry Form***

EVERRED Lighting

EVERRED Thermoelectric Module

PRODUCTS

Copyright © 2006-2016 EVERREDtronics Ltd. All rights reserved.

Any copying, distribution, re-transmission or publication is strictly prohibited without the written consent of the Company.