

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Mayara Pereira Becker

**AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA CARACTERIZADOR
DE DISPOSITIVOS TERMOELÉTRICOS**

Joinville, 2016

Mayara Pereira Becker

**AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA CARACTERIZADOR DE DISPOSITIVOS
TERMOELÉTRICOS**

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

Orientador: Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville, 2016

AGRADECIMENTOS

À Deus por estar presente em toda a vida e circunstância

Aos meus pais Joanes V. N. Becker e Denise O. P. Becker e ao meu irmão Rodrigo P. Becker, que são meus exemplos, cujo apoio e incentivo foram essenciais para a conclusão desta etapa e são fundamentais para o meu aprendizado diário.

À minha família que me acompanhou durante todos os anos, em especial ao meu vô Arlindo Pereira que até hoje diz “estuda filha, estuda! ”.

À Benjamin Grando, pelo companheirismo diário, pela paciência e conselhos, acompanhando meu progresso e minhas decisões.

Aos meus amigos que a faculdade trouxe, em especial a Alfredo Morillo, Bruno Backes, Edemar Morsch Filho, Eurico Laydner Quinteiro Neto, João Luiz Francisco, Rafaela Locatelli, Raphael Odebrecht de Souza. Sou muito grata de termos nos encontrado em Joinville!

Aos meus amigos que foram essenciais durante o período na *Michigan Technological University*. Que a vida nos proporcione mais momentos e histórias!

Aos meus colegas que fizeram parte do meu período acadêmico, passando através dos desafios proporcionado por ser primeira turma e também aos corajosos alunos de Mecatrônica que optaram por este curso que proporciona conhecimentos ímpares.

Aos professores Anderson W. Spengler, Carlos Sacchelli, Cristiano Vasconcellos Ferreira, Tatiana Renata Garcia pela transmissão de conhecimentos acadêmicos, profissionais e pessoais. As técnicas em assuntos educacionais, Luciana Reginato Dias e Milehna Guarido por todos os anos ajudando os acadêmicos. A todos os professores que ajudaram a construir meu conhecimento e de meus colegas. Em especial aos que estão construindo, com empenho, os cursos da UFSC-Joinville.

Aos meus colegas de trabalho no período de estágio, por todo ensinamento, paciência e risadas.

À vó Karla Olschowsky Pereira, vó Claudina Becker e ao amigo Douglas Bruch: “Diante da vastidão do tempo e do universo, foi um imenso prazer dividir um planeta e uma época com vocês! ”. (Carl Sagan)

O crescimento interno se realiza quando se dá espaço para algo novo. (Bert Hellinger)

RESUMO

A busca globalmente existente para se obter energia através de fonte alternativa e limpa demanda investimento, pesquisa, desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias. A obtenção de energia a partir de fontes do meio ambiente é uma forma de se aproveitar as condições pré-existentes que um dispositivo ou sistema está submetido. Dentre várias frentes, existe a geração de energia elétrica através de dispositivos termoelétricos, cuja premissa é transformar diferença de temperatura em energia elétrica. Com objetivo de obter energia da melhor forma, é desejado colocar o dispositivo no estado que lhe confere maior potência, entretanto, para isto existem algumas fontes de variáveis como a temperatura a qual está submetido. Este trabalho propõe a automatização de um sistema caracterizador de dispositivos termoelétricos, identificando o ponto de maior potência do dispositivo para determinada temperatura média e também pela diferença de temperatura. O sistema permite a obtenção de forma sistemática da tensão que resulta na maior potência ao igualar a resistência de carga com a resistência interna do dispositivo. A equivalência de resistência neste trabalho ocorreu através de alterações de resistência realizada por chaveamento, juntamente com alterações no valor de um transistor de efeito de campo que, como mostrado no trabalho, pode ser utilizado como um resistor ôhmico. Como principal resultado, foi comprovada a viabilidade de técnica sendo necessário ajustes no conjunto software, firmware e hardware para a ampla aplicação do sistema caracterizador.

Palavras chave: Dispositivo Termoelétrico, TEG, Caracterizador, Energia elétrica, *Energy Harvesting*.

ABSTRACT

The globally search that exists to obtain energy through alternative and clean source demands investment, research and development of technologies. Extract energy from the environment is a way to use the preconditions that a device or system is subject. Through the options, there is power generation through thermoelectric devices, which has as premise to transform temperature difference into power electric. The device can be used in the way to extract the higher power and then obtain energy in the best form, but the conditions that allow this status is dependent of some variables that can be changed, for example the temperature that the device is subject. The purpose of this work is to automate a system to characterize thermoelectric devices, identifying the point with the highest power as function of the average temperature. The system allows to obtain voltage with highest power in a systematic form, making the load resistance to match the internal device's resistance. The equivalent resistance was done by switching relays in order to change the active resistor and also changing the value of Junction Gate Field-Effect Transistor to actuate as ohmic resistor. As main result, it was showed the technical viability of the device, being necessary some hardware and software adjust for the large application of the thermoelectric characterization.

Key-words: Thermoelectric device, TEG, Power Source, Energy Harvesting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração típica de um dispositivo termoelétrico	21
Figura 2 - Configuração de par termoelétrico.....	21
Figura 3 - Eficiência de gerador termoelétrico em função da diferença de temperatura	25
Figura 4 - Progresso de materiais termoelétricos em função da figura de mérito (ZT)	27
Figura 5 - Figura de mérito de materiais disponível comercialmente ou em desenvolvimento.....	27
Figura 6 - Área de aplicação dos TEGs comercializados	28
Figura 7 - Função do gerador termoelétrico aplicado a veicular	29
Figura 8 - Evolução de potência entregue por veículos com o decorrer dos anos.....	29
Figura 9 - Disposição de um dispositivo caracterizado	31
Figura 10 - Montagem do experimento	33
Figura 11 - Configuração do aparato experimental	34
Figura 12 - Configuração do sistema verificado - bancada de teste	35
Figura 13 - Aparato experimental.....	35
Figura 14 - Circuito de aquisição e controle em conjunto com o microcontrolador	36
Figura 15 - Tiva	37
Figura 16 - Diagrama das funções executadas pelo programa criado em LabVIEW ...	39
Figura 17 - Ponte H utilizada no experimento	40
Figura 18 - Curvas características de JFET	41
Figura 19 - Gerador termoelétrico utilizado nos experimentos	42
Figura 20 - Interface com o Microsoft Excel para verificar a resistência equivalente a partir de entradas do usuário.....	49
Figura 21 - Software descrevendo etapas - utilizado no experimento.....	51
Figura 22 - Esquematização da função para procurar o valor de JFET.....	52
Figura 23 - Fluxo da função realizar leitura de tensão aberta.....	53
Figura 24 - Exemplificação da localização dos termopares	57
Figura 25 - Tensão medida no decorrer do tempo nas condições 1,2,3.....	58
Figura 26 - Variação da tensão medida ao variar o valor do JFET e alterar os resistores atuantes	59

Figura 27 - Gráfico tensão de máxima potência e tensão encontrada no caracterizador	60
Figura 28 - Comparação tensão medida e tensão target encontrada – Erro %	61
Figura 29 - Valores digitais do JFET em relação à temperatura	62
Figura 30 - Valores de resistência interna do TEG obtidos experimentalmente por Audiffred (2015).....	64
Figura 31 - Valores digitais do JFET obtidos experimentalmente	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Investimento global na tecnologia de termoeletricos - novembro 2012 - previsão de 4 anos	30
Tabela 2 - Valores assumidos pelo JFET.....	47
Tabela 3 - Valores obtidos para as resistências 7,5 Ω ; 9,1 Ω ; 10 Ω	48
Tabela 4 - Protocolo de comunicação: sistema caracterizador e LabVIEW.....	54
Tabela 5 - Definições do byte <i>Status</i> no protocolo de comunicação.....	55
Tabela 6 - <i>Status</i> válidos encontrados durante experimentos realizados.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor analógico digital (<i>Analog Digital Converter</i>)
CCS	<i>Code Composer Studio</i>
DAC	Conversor digital analógico (<i>Digital Analog Converter</i>)
JFET	Transistor de efeito de campo de junção (<i>Junction gate Field-Effect Transistor</i>)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
MOSFET	Transistor de efeito de campo metal - óxido - semicondutor (<i>Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor</i>)
PID	Proporcional, integral e derivativo
PWM	Modulação por largura de pulso (<i>pulse width modulation</i>)
SPI	Interface serial (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
TE	Termoelétrico
TEC	Refrigerador termoelétrico (<i>Thermoelectric Cooler</i>)
TEG	Gerador Termoelétrico (<i>Thermoelectric Generator</i>)
TEH	Aquecedor termoelétrico (<i>Thermoelectric Heater</i>)

UART	Receptor/ Transmissor Universal Assíncrono (<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>)
USB	Porta universal (<i>Universal Serial Bus</i>)
VBA	<i>Visual Basic for Application</i>

LISTA DE SIMBOLOS

P	Coeficiente de Peltier	[V/K]
S	Coeficiente de Seebeck	[V/K]
κ	Condutividade térmica	[Wm ⁻¹ k ⁻¹]
i	Corrente elétrica	[A]
I	Corrente elétrica	[A]
I_p^{max}	Corrente elétrica máxima de saída	[A]
V	Diferença de potencial, tensão	[V]
ΔT	Diferença de temperatura	[K]
η	Eficiência	[-]
Q_{in}	Energia térmica absorvida	[W]
ZT	Figura de mérito de dispositivos	[-]
zT	Figura de mérito de materiais	[-]
Z	Número de mérito	[K ⁻¹]
P_r	Potência produzida	[W]
P_{pro}^{max}	Potência produzida máxima	[W]
M	Razão de carga	[-]
M_η	Razão de carga que condiciona a máxima eficiência	[-]
R_{JFET}	Resistência do JFET	[Ω]
R_{eq}	Resistência equivalente	[Ω]
R_{in}	Resistência interna da célula Seebeck	[Ω]

ρ	Resistividade elétrica	[Ω]
T	Temperatura	[K]
T _c	Temperatura no lado frio	[K]
T _h	Temperatura no lado quente	[K]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Efeito Seebeck, Peltier e Thomson	19
2.2 Dispositivos Termoelétricos	20
2.2.2 Figura de Mérito	24
2.4 TEG Aplicação	25
2.5 Trabalhos similares	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Aparato experimental.....	34
3.2 Circuito de aquisição e controle.....	36
3.3 Microcontrolador	37
3.4 Code Composer Studio (CSS) Integrated Development Environment (IDE)	38
3.5 LabVIEW	38
3.6 PONTE H.....	40
3.7 Transistor de efeito de campo	40
3.8 ADC	41
3.9 DAC	42
3.10 TEG.....	42
3.11 TEC	42
3.12 Sistema de aquisição de temperatura	43
3.15 Computador	43
3.16 Resistência	43
3.17 Firmware	49
3.17.1 Protocolo de comunicação	53
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	57
4.1 Controle da temperatura.....	57
4.2 JFET como resistor	57
4.3 Testes no módulo de geração termoelétrica.....	60
4.4 Tensão	60

5. CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS	69
APÊNCIE A – Circuito elétrico do dispositivo automatizador.....	73
APÊNCIE B – Código desenvolvido para a automatização da medição e envio do controle de temperatura.	74
APÊNDICE D – Visualização do software LabVIEW utilizado no experimento.	98

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente de refrigeração nos anos recentes como, por exemplo, o ar condicionado, preservação de comida, serviços médicos e armazenamento de vacinas levam a maior produção de eletricidade e conseqüentemente maiores emissões de CO₂ sobre o mundo (XI, LUO e FRAISSE, 2007). No cotidiano, são utilizados diversos tipos de equipamentos que necessitam de energia, incluindo equipamentos doméstico, industriais, de transporte e comunicação.

A utilização de energia está aumentando com o progresso das tecnologias e em contrapartida existe a conscientização cada vez forte pelo uso de energias alternativas ou limpas, além de ocorrer investimento em pesquisas para exploração de novas fontes ou formas de melhorar a eficiência energética dos modelos de obtenção existentes. Como fonte de obtenção de energia, é utilizado o termo *harvesting* para explicar o processo de extração de energia a partir do meio ambiente, existindo em diversas formas, podendo ser obtido, por exemplo, de maneira mecânica, solar e termal (CHALASANI, 2008). Este modo de encontrar energia, também continua em desenvolvimento, sendo possível a utilização em diversos meios e uma aplicação de grande interesse é na parte de sistemas embarcados (RAGHUNATHAN, 2006).

Em sistemas embarcados, o consumo de energia é um aspecto importante e determinante ao projeto. É de conhecimento que dispositivos podem operar com uma fonte limitada de energia, assim a longevidade deles e do sistema é dependente da potência consumida de sua bateria ou fonte de energia, sendo que em projeto de sistemas embarcados o consumo se torna uma métrica de qualidade (SLONGO, 2013; SILVA, 2011).

Estão sendo desenvolvidas e otimizadas novas maneiras de se obter energia através de *harvesting* que atendem as necessidades de sistemas embarcados modernos (RAGHUNATHAN, 2006). A miniaturização de componentes eletrônicos, dispositivos *wireless* e o desejo/necessidade de se obter dispositivos auto-alimentados, indicam o potencial de aplicação e crescimento no campo de *harvesting* de energia. (SILVA, 2011).

Quando se refere à disponibilidade de energia elétrica no cotidiano urbano, pode-se dizer que é de fácil acesso, pois existem diversas formas de obtenção de maneira prática. Porém, ao se referir de energia à disponibilidade necessária no espaço sideral, as restrições aumentam e as possíveis formas de obtenção são consideravelmente reduzidas. Os satélites necessitam da energia e a obtenção quando estão em órbita é realizada basicamente pelo

aproveitamento da energia do solar. A utilização da energia solar se enquadra em energia limpa e a sua fonte é abundante no espaço.

Um modo de obter energia elétrica para os satélites é através de células fotovoltaicas, porém, o volume necessário para a utilização de placas solares pode ser prejudicial aos satélites, pois significa aumento da massa e do arrasto atmosférico. Assim torna-se necessário a pesquisa por outros modos de obtenção de energia a partir da fonte solar. Uma alternativa que está sendo estudada para este tipo de aplicação é a utilização de dispositivo termoelétrico como gerador de energia. Este método é de alta confiabilidade e seu funcionamento consiste em, a partir de um gradiente de temperatura no dispositivo, gerar energia elétrica.

De acordo com Oliveira (2014), o emprego da energia obtida por dispositivos termoelétricos ocorre, entre outros, quando existe restrição de espaço e é requerido um produto de alta confiabilidade e durabilidade. Apesar de hoje possuir nichos de aplicações restritos (Oliveira, 2014), este modo pode ser adaptável em várias áreas, desde militar, espacial à automóvel e uso cotidiano (HE *et al.*, 2015). Um emprego possível da tecnologia pode ser em estruturas aeroespaciais, como consta em Von Lukowicz (2015). Nestas estruturas aeroespaciais uma quantidade grande de calor é gerada pelas condições ambientais ou operacionais e emitida para o espaço e este calor poderia ser convertido em energia elétrica por um gerador termoelétrico (TEG).

Os TEGs são recomendáveis para aplicação espacial, pois não são constituídos de partes móveis para poderem converter diferença de temperatura em energia elétrica. Nesta parte, vale referenciar a aplicação em satélites, onde ocorre diferença de temperatura necessária para o TEG, pois normalmente uma de suas faces apresenta temperatura elevada tendo em vista que está voltada para o sol, enquanto que outra superfície está mais fria, voltada para a sombra.

Para o desenvolvimento da tecnologia e verificação de suas aplicações pode-se dizer que é necessário investimento e análises experimentais, a fim de se obter validações de resultado e analisar a viabilidade do uso. Com o intuito de analisar o desempenho do uso de dispositivos termoelétricos aplicado à área espacial, Audiffred (2015) propôs analisar experimentalmente o uso de células termoelétrica em função de temperaturas as quais nanosatélites podem ser expostos. Seus resultados relacionaram a capacidade de geração elétrica em uma aplicação específica de um nanosatélite.

O presente trabalho tem como premissa a continuação do proposto por Audiffred (2015), considerando um dos pontos de sugestão para trabalhos futuros que consiste em utilizar outro método para realizar a medição da resistência interna do gerador termoelétrico, variando de modo digital a resistência a fim de atingir o ponto de maior potência.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo:

1.1.1 Objetivo Geral

Automatização de um sistema de medição aplicado a dispositivos termoelétricos, alternando a resistência digitalmente.

1.1.2 Objetivos específicos

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

- Projetar o sistema de hardware, software, firmware e controle.
- Desenvolver o sistema e integrá-lo ao dispositivo termoelétrico.
- Testar e avaliar o sistema desenvolvido.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Efeito Seebeck, Peltier e Thomson

Efeitos termoelétricos foram observados na década de XIX, porém o desenvolvimento da tecnologia aplicada ocorreu de forma expressiva com o surgimento de novos materiais possuindo alta performance termoelétrica em 1950s (XI, LUO, FRAISSE, 2007). Pode-se citar três efeitos termoelétricos principais: Seebeck, Peltier e Thomson.

Apesar de possuir o nome de efeito Seebeck, o pioneirismo no campo termoelétrico pode ser atribuído ao italiano Alessandro Volta (ANATYCHUK, 2004), que realizou experimentos em torno de 1794, tendo como premissa descobrir a força termoelétrica gerada sob a influência de uma diferença de temperatura. Thomas Johann Seebeck, por sua vez, percebeu o efeito ao fazer uma experiência, entretanto atribuiu o fato ao magnetismo induzido pela diferença de temperatura em 1821 (CALTECH, 2016) e posteriormente concluiu que a corrente induzida era originária da força termoelétrica.

A principal aplicação relacionada à tensão de Seebeck e sua dependência é que, se a junção de referência é mantida a uma temperatura fixa (em geral denominada temperatura de referência), a tensão de Seebeck é unicamente função da outra junção e, portanto, medindo-se a tensão de Seebeck nessa junção é possível determinar a temperatura (desde que se tenha levantado experimentalmente a função relativa à temperatura de referência (BALBINOT, 2010)). Esta diferença de potencial está relacionada com o fato de que elétrons na junção mais quente do material tem mais energia térmica do que aqueles na junção mais fria e com isso tendendo a se deslocar (*drift*) para a junção mais fria. Este *drift* varia para diferentes metais para uma mesma temperatura devido as diferenças na condutividade térmicas deles e se o circuito é fechado, uma corrente pode ser encontrada no circuito. Além disso, a força eletromotriz produzida é proporcional a diferença de temperaturas nas duas junções (Curtis, 2014). Devido a estas características, uma aplicação relevante e que está sendo explorada é a utilização deste efeito para produzir energia elétrica através da diferença de temperatura entre as junções ou face do dispositivo termoelétrico.

Uma extensão das mesmas propriedades do efeito termoelétrico corre quando o reverso do efeito Seebeck é considerado. A aplicação de um diferencial de tensão externo em um circuito fechado composto de dois materiais diferentes faz com que uma das junções esfrie, enquanto a outra esquente devido as diferentes propriedades eletrotérmicas de transporte dos materiais. Esse efeito é conhecido como efeito de Peltier (CURTIS, 2014). O

efeito de Peltier foi descoberto em 1834 por Jean C. A. Peltier que especificou o efeito como "a mudança no conteúdo de calor quando uma quantidade de carga (1 coulomb) atravessa a junção". Esse efeito é reversível e não depende da forma ou das dimensões dos condutores, portanto, depende apenas da composição das junções e da temperatura (BALBINOT, 2010). Tempo depois, em 1851, Lord Kelvin (Sir William Thomson Kelvin) verificou que um gradiente de temperatura em um condutor metálico é acompanhado de um gradiente de tensão, mesmo que pequeno, cuja magnitude e direção dependem do tipo de metal utilizado. Esse efeito passou a ser conhecido como efeito Thomson (BALBINOT, 2010). Para o efeito Thomson, quando a fonte de calor está parada ocorre um deslocamento aleatório dos elétrons e o fluxo médio de elétrons é nulo. No entanto, ao deslocar a fonte de calor são gerados (no sentido do deslocamento) elétrons livres que se deslocam majoritariamente, gerando a polarização do sistema e um fluxo de corrente. Esse fenômeno é causado pelo gradiente térmico no condutor e, desde que ocorra uma diferença térmica nesse condutor haverá fluxo de corrente (BALBINOT, 2010).

Abaixo é apresentado definições resumidas dos efeitos em questão, como consta em Garzon (2009):

- **Efeito Seebeck:** conversão direta de calor (diferença de temperatura) em eletricidade através de geradores termoelétricos.
- **Efeito Peltier:** conversão direta de eletricidade em calor através de uma junção eletrificada entre dois metais.

2.2 Dispositivos Termoelétricos

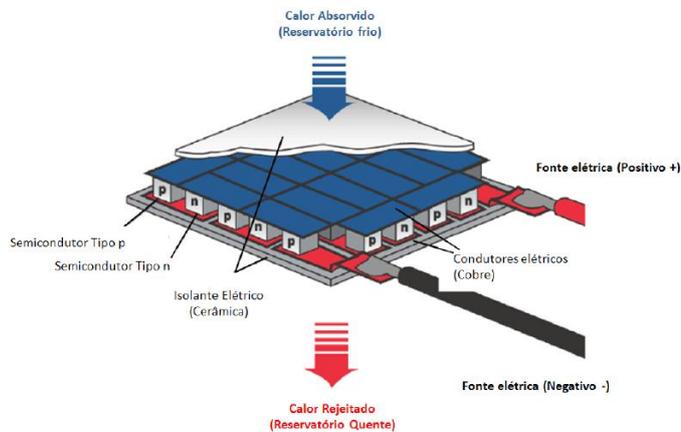
Os dispositivos que podem converter energia elétrica em gradiente de temperatura, ou de modo contrário, produzir energia elétrica a partir de um gradiente de temperatura, são chamados de dispositivos termoelétrico.

Com o efeito termoelétrico conhecido, em torno de 1885 a possibilidade de utilizá-lo para a geração de eletricidade foi considerada por Rayleigh, sendo o primeiro a calcular a eficiência, porém os cálculos foram considerados incorretos. Altenkirch desenvolveu, corretamente o equacionamento para a teoria de refrigeração e geração termoelétrica (ROWE, 1995), o que mais tarde resultaria no desenvolvimento da chamada teoria moderna da termoeletricidade (CALTECH, 2016). Esta teoria considera a Figura de mérito que consta que

bons materiais termoelétricos devem possuir alto coeficiente de Seebeck, alta condutividade elétrica e baixa condutividade térmica a fim de minimizar perdas por aquecimento.

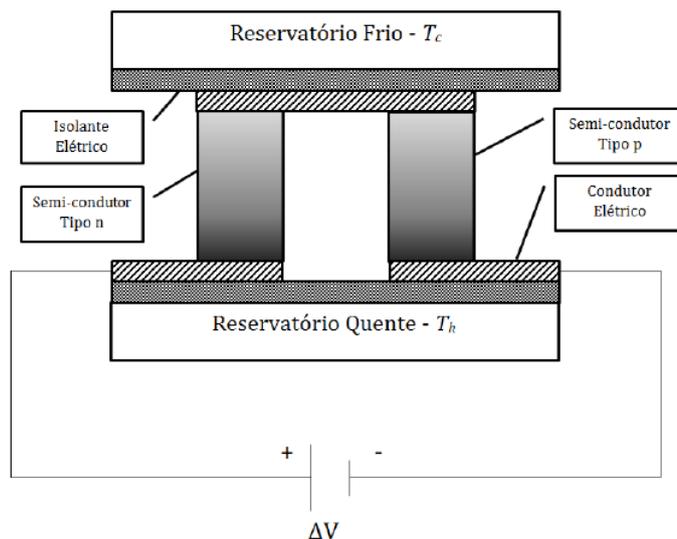
Os dispositivos termoelétricos são feitos de materiais condutivos térmicos e com junções semicondutoras p-n (GARZON, 2012). Os materiais são colocados a pares sucessivos no dispositivo, como mostrado na Figura 1 e mais detalhadamente na Figura 2, sendo eletricamente conectados em série e termicamente em paralelo.

Figura 1 - Configuração típica de um dispositivo termoelétrico



Fonte: Oliveira (2014).

Figura 2 - Configuração de par termoelétrico



Fonte: Oliveira (2014).

O material do tipo “n” é dopado positivamente, contendo “buracos livres” enquanto que o do tipo “p” é dopado negativamente (n), estes são os responsáveis majoritariamente para geração de energia (pelo efeito Seebeck) ou no caso de efeito Peltier, pelo resfriamento/aquecimento. (SNYDER 2008; OLIVEIRA 2014).

Na Figura 2 é mostrado as duas faces com as chamadas temperaturas fria (T_c) e quente (T_h) e o ΔV representa a tensão aplicada para o caso de dispositivos termoelétrico do tipo Peltier (TEC - *Thermoelectric Cooler*) ou gerada, que é o caso dos que funcionam pelo efeito Seebeck. Como consta no trabalho de Gazon (2012), é causado um carregamento na junção semicondutora quando é aplicado uma diferença de temperatura em um dispositivo termoelétrico gerador (TEG – *Thermoelectric Generator*), produzindo uma tensão que é dependente do coeficiente Seebeck.

O coeficiente de Seebeck mensura a magnitude à qual uma tensão termoelétrica é ocasionada por uma diferença de temperatura (ROWE, 1995). Simplificando, pode-se dizer que a tensão de saída gerada pelo TEG corresponde à equação 1, onde S corresponde ao coeficiente de Seebeck do TEG e T_2 e T_1 à temperatura do lado quente e do lado frio nas faces do gerador.

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

Sobre este assunto, é possível encontrar na bibliografia diversas relações e deduções matemáticas e físicas, que explicam o comportamento dos dispositivos. Com foco no trabalho, pode-se citar as seguintes, como consta em Goupil et al. (2011), Garzon (2012) e Audiffred (2015), tendo em vista que os autores (GOUPIL et al., 2011) considera que existe uma resistência (R_{load}) conectada ao TEG, definindo a razão de carga (M) e expressando a tensão e corrente diante desta função.

Potência elétrica produzida:

$$P_r = SI\Delta T - R_{in}I^2 \quad (2)$$

Onde,

S: Coeficiente de Seebeck [V/K]

I: Corrente elétrica [A]

R_{in} : Resistência interna do TEG [Ω]

Razão de carga:

$$M = \frac{R_{load}}{R_{in}} \quad (3)$$

Tensão (V_{out}) e corrente (I_{out}) em função da razão de carga:

$$V_{out} = V_0 \frac{M}{1 + M} \quad (4)$$

$$I_{out} = \frac{V_0}{R_{in}(1 + M)} \quad (5)$$

Eficiência:

$$\eta = \frac{P_{pr}}{Q_{in}} \quad (6)$$

Potencia elétrica máxima de saída:

$$P_{pr}^{max} = \frac{S^2 \Delta T^2}{4R_{in}} \quad (7)$$

Reescrevendo a equação 7, tem-se que a corrente para a potência máxima pode ser escrita como:

$$I_p^{max} = \frac{V_0}{2R_{in}} \quad (8)$$

A condição para a máxima eficiência ocorre quando a razão de carga (M) se iguala a seguinte expressão:

$$M_\eta = \sqrt{1 + ZT_m} \quad (9)$$

Onde,

T_m : temperatura média [K]

Z : figura de mérito (característica do material / conjunto) [K⁻¹]

Nota-se que para dispositivos termoeletricos, a condição de maior potência e maior eficiência obedecem a requisitos diferentes. No caso da maior eficiência, a razão de carga deve ser em função da figura de mérito e temperatura média, enquanto que para a maior

potência, pode-se reduzir a tensão inicial pela metade, considerando que a resistência interna do dispositivo não ocorra modificação, relação que pode ser verificada pelas Equações 5 e 8.

Vale citar que o efeito Peltier e o Seebeck foram relacionados por Thomson, sendo em função da temperatura como segue (Garzon, 2009):

$$P = ST \quad (10)$$

Onde,

P: Efeito Peltier [V]

S: Efeito Seebeck [V/K]

T: Temperatura [K]

2.2.2 Figura de Mérito

Como dito anteriormente, a figura de mérito é considerada na teoria moderna da termoeletricidade, sendo uma característica fundamental para a máxima eficiência termoelétrica de um material. É relacionado o coeficiente de Seebeck (S) a resistividade elétrica (ρ) e a condutividade térmica (κ) (SNYDER, 2008):

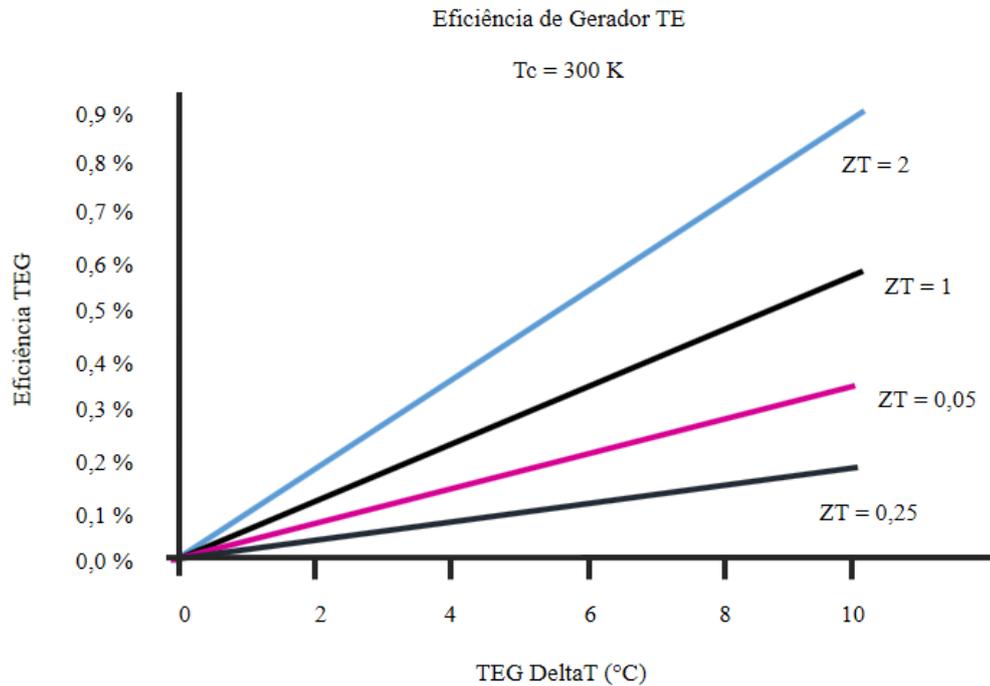
$$Z = \frac{S^2}{\rho\kappa} [K^{-1}] \quad (11)$$

Tendo em vista que as propriedades do número de mérito dependem da temperatura, os materiais são caracterizados em determinadas condições onde se estabelece a temperatura. Assim é descrito a figura de mérito adimensional como:

$$ZT = \frac{S^2}{\rho\kappa} T \quad (12)$$

Ao se referir sobre a figura de mérito, é comum representar como “zT” a figura de mérito do material e “ZT” do dispositivo (SNYDER, 2008). Na Figura 3 é exemplificado que a eficiência do TEG aumenta conforme o aumento da temperatura e do incremento da figura de mérito do dispositivo (GARZON, 2012).

Figura 3 - Eficiência de gerador termoelétrico em função da diferença de temperatura



Fonte: Garzon (2012).

2.4 TEG Aplicação

A utilização de dispositivo termoelétrico é uma forma de aproveitar calor perdido em diversas formas para a geração de energia elétrica. De acordo com Rowe (1995), a aplicação de geradores termoelétricos é ampla. O autor destaca o uso destes dispositivos pela simplicidade de operação comparado a dispositivos termomecânicos além de se ter pouca manutenção, podendo operar continuamente por mais de 8000 horas e com mínimo de ajustes colocá-lo em operação por mais tempo. É de conhecimento que TEGs em serviço desde o início dos anos 60, passaram por vistoria e atualização de sistemas eletrônicos e de abastecimento apenas em 1990, voltando a operar (ROWE, 1995).

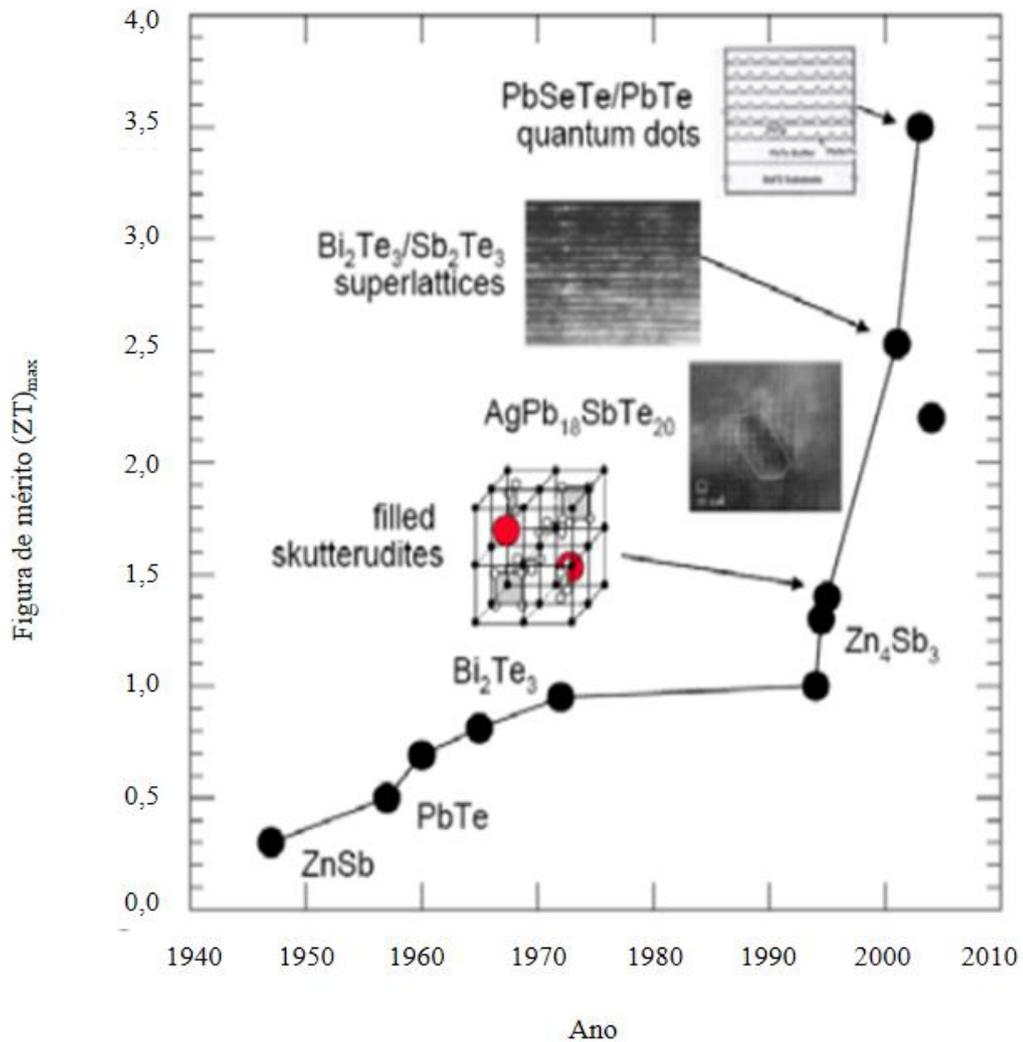
Tem-se registro do uso de dispositivos termoelétricos como geradores, como consta em Fairbanks (2008), no início da 2ª Guerra Mundial, quando o cientista russo Abram Ioffe desenvolveu dispositivo para produzir energia com o objetivo de alimentar rádios rudimentares. Os dispositivos operavam com eficiência de no máximo 3%, porém, mesmo com a baixa eficiência em porcentagem, foram dispersados em zona rurais da Rússia para manter comunicação com a capital Moscou.

Como dito anteriormente, a eficiência e os resultados e aplicações da geração de energia através de TEGs depende do material utilizado sendo que este, por sua vez, deve ter propriedades eletromagnéticas. Assim a pesquisa ocorreu de forma mais proeminente com a evolução destas propriedades em materiais, visto pelo número de mérito (ZT). A Figura 4, mostra esta evolução de materiais com o passar dos anos (até 2008). Apesar deste avanço, os dispositivos disponíveis comercialmente possuem número de mérito limitado, não chegando a ser igual a 2 (BELL, 2008). É mostrado na Figura 5, a figura de mérito de materiais em uso ou em desenvolvimento pela NASA (SNYDER, 2008). Pesquisas estão em desenvolvimento para os materiais possuírem maior número de mérito ou maior abrangência de sua faixa ótima de uso.

Os dispositivos comerciais estão disponíveis desde 1960 quando, além do avanço de materiais, ocorreu a necessidade de fontes autônomas para a geração de energia na exploração do espaço, além de avanços na medicina e na necessidade de geração de energia em ambientes hostis e de difícil acesso (ROWE, 1995).

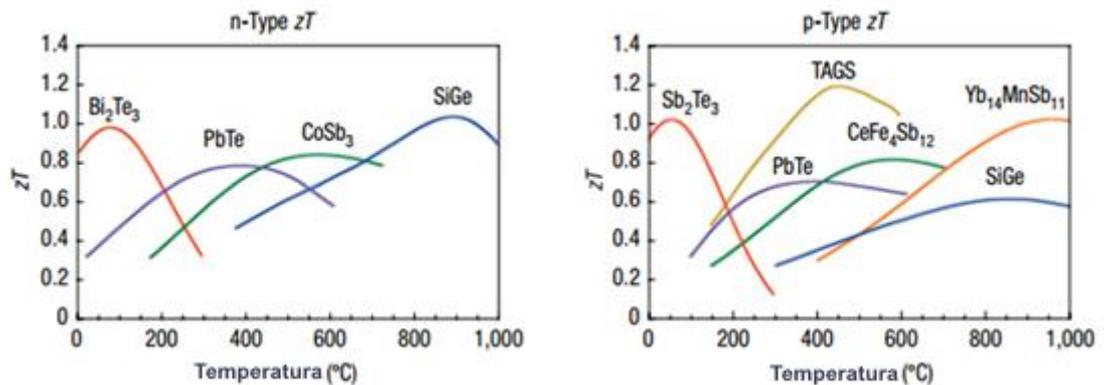
Alimentação de equipamentos de aquisição de dados é uma área comum de utilização de TEGs e está em crescimento, sendo que a energia necessária para esta finalidade é usualmente 100W. É válido mencionar que se tem usado os dispositivos para alimentar sistemas de comunicação por microondas, VHF (*Very High Frequency*), celulares, televisão. (ROWE, 1995). Referindo-se a aplicação majoritária de TEGs, o uso destes dispositivos como proteção catódica (método de combate à corrosão) é citado no ano de 1995, tendo como saída em média 60W (ROWE, 1995).

Figura 4 - Progresso de materiais termoelétricos em função da figura de mérito (ZT)



Fonte: Fairbanks (2008).

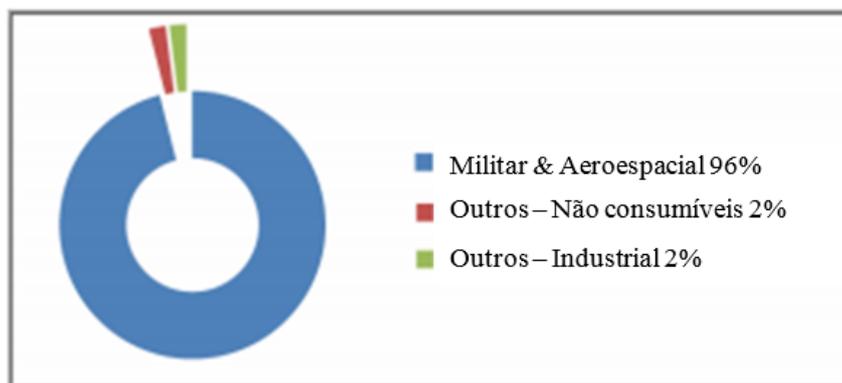
Figura 5 - Figura de mérito de materiais disponível comercialmente ou em desenvolvimento



Fonte: Snyder (2008).

Como foi impulsionado inicialmente por volta de 1960, hoje o desenvolvimento e aplicação da tecnologia está voltada para a área aeroespacial. A Figura 6 mostra a distribuição predominante da área militar e aeroespacial contando os TEGs comercializados.

Figura 6 - Área de aplicação dos TEGs comercializados



Fonte: Zervos, 2012 (*apud* Polozine, 2013).

Datado de 1993, tem-se a informação que os Estados Unidos lançaram 42 RTGs (*Radioisotope Thermoelectric Generators* – Gerador Termoelétrico Radioisótopos) e um reator para prover energia a 25 sistemas espaciais, incluindo Apollo 12, 14, 15,16,17, sonda Voyage 2,1. A antiga União Soviética lançou em sua maioria geradores termoelétricos enquanto que os Estados Unidos lançaram somente conversores termoelétricos tendo em vista a durabilidade, confiabilidade e a falta de requerimentos para prover tensão de saída. (ROWE, 1995). Outro exemplo de aplicação de geradores termoelétricos é a Curiosity, veículo aéreo não tripulado em missão em Marte que produz 110W de potência (LAMONICA, 2012).

Como é necessário basicamente apenas um diferencial de temperatura, o dispositivo pode ser aproveitado em situações onde naturalmente existe esta diferença. Com isto em mente, Hiller (2015) desenvolveu uma patente para utilizar geradores termoelétricos aproveitando a diferença de temperatura existente em aeronaves entre a cabine e a superfície externa posicionando entre a fuselagem do avião. Uma outra área que está desenvolvendo aplicações notáveis quanto ao uso de TEGs é a automotiva, reaproveitando diferenças de temperaturas existentes em automóveis. Na Figura 7 é mostrado uma modelagem simplificada da aplicação destes dispositivos em veículos. Empresas como a GM e a BMW implementaram protótipos em seus carros tendo outras empresas de tecnologia como parceiras

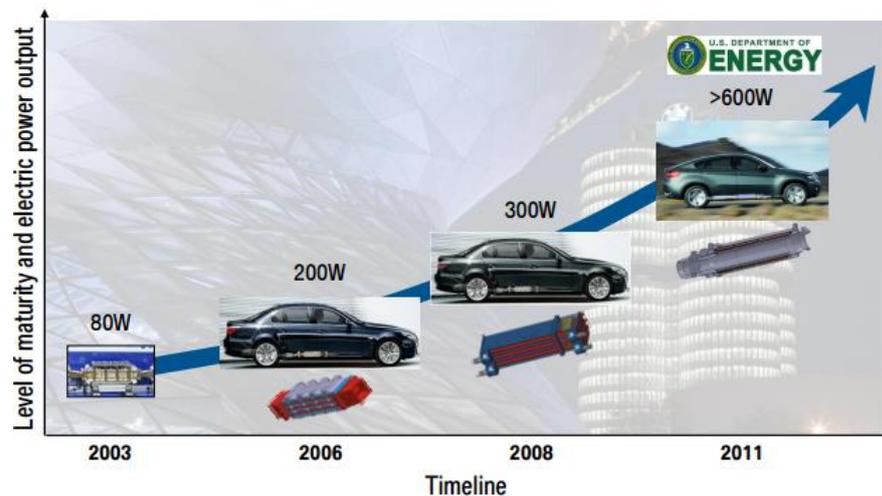
além de incentivo governamentais, na Figura 8, é visualizado a evolução da potência entregue por veículos com este sistema.

Figura 7 - Função do gerador termoelétrico aplicado a veicular



Fonte: Adaptado de Stabler (2009).

Figura 8 - Evolução de potência entregue por veículos com o decorrer dos anos



Fonte: Mazar (2012).

Como já dito, aumentando o número de mérito dos materiais é possível aumentar a gama de aplicações dos geradores termoelétricos. Caso este número atinja 2 em dispositivos comerciais será possível utilizar o dispositivo para substituir aplicações com o gás R-134A, utilizando em aquecimento, refrigeração e ventilação sem emissão de CO₂ (BELL, 2008). O mesmo autor afirma que possivelmente será viável no futuro (aumentando o número de mérito) substituir pequenos motores de combustão interna por motores de combustão externa a partir de geradores termoelétricos. O mercado de termoelétrico está crescendo tendo em vista as respectivas projeções de uso e vantagens de se empregar a tecnologia, para isto, também é necessário investimento. Fairbanks (2012) mostra, na Tabela 1, o investimento global na tecnologia de termoelétricos (TE) em aproximadamente 4 anos.

Tabela 1 - Investimento global na tecnologia de termoeletrônicos - novembro 2012 - previsão de 4 anos

Região	Total gasto (USD)	Total de fundos governamentais (USD)
EU	\$ 145.732.370	\$ 97.336.809
América do Norte	\$ 53.923.007	37.250.000
Rússia	\$ 40.000.000	\$ 20.000.000
Japão	\$ 22.600.000	\$ 21.700.000
China	\$ 15.100.000	\$ 15.100.000
Total mundial	\$ 277.355.447	\$ 191.386.809

Fonte: Fairbanks (2013)

De acordo com HE *et al.* (2015), a crise energética e a deterioração do meio ambiente são os dois maiores problemas do século 21 e o dispositivo termoeletrônico é uma solução promissora para estes dois problemas. Esta tecnologia está sendo aperfeiçoada e seu uso estendido, pois é possível obter energia regenerada de uma condição pré-existente, usando um dispositivo estático e não poluente além de não produzir ruído ou vibração.

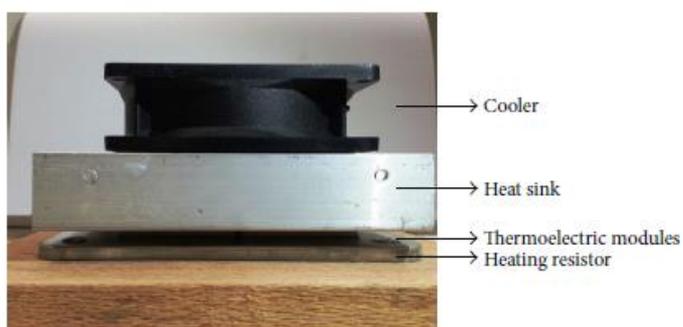
O mercado termoeletrônico em geral está projetado para \$950 milhões para 2024 de acordo com a IDTechEx (ZERVOS, 2014), sendo que o mercado global estimado será de \$720 milhões em 2021 (WOOD, 2016) para o mercado de gerador termoeletrônico (TEG), como consta no relatório lançado pela *Research and Markets*, intitulado "*Global Thermoelectric Generators Market - Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2014 – 2021*".

2.5 Trabalhos similares

Ando Jr. *et al.* (2015) apresentou um sistema de aquisição e monitoramento para dispositivos termoeletrônicos, utilizando um sistema integrado para a recepção de dados de temperatura, tensão e corrente. Na Figura 9, é mostrado a disposição do dispositivo caracterizado pelo autor, possuindo dois TEG em série (inbC1-127.08HTS) em contato com uma face quente e outra fria. No experimento, foram caracterizados dados entre as temperaturas de 5°C e 80°C com incrementos de 5°C. Para garantir a temperatura, foi utilizado

um controlador PID (proporcional, integral e derivativo), sendo enviados sinais PWM (*Pulse Width Modulation* – Modulação por largura de pulso) para as placas de temperaturas. Foram realizados 32 testes, sendo que em 16 deles uma carga resistiva estava presente na saída do TEG.

Figura 9 - Disposição de um dispositivo caracterizado



Fonte: Ando Jr *et al.* (2015)

Em termos gerais, é encontrado na bibliografia caracterização de dispositivos termoelétrico para diferentes materiais, condições e temperaturas. Almeida (2015), por exemplo, caracterizou uma célula termoelétrica com a finalidade de geração de energia elétrica. Para encontrar o ponto de máxima transferência de potência, onde a tensão deve ser metade da tensão em aberto, foi determinado uma resistência de carga que resultaria nesta condição.

O trabalho de Ando Jr. *Et al.*, (2015) é semelhante ao presente neste experimento, em termos de monitoramento onde é possível caracterizar geradores termoelétricos utilizando sistema automatizado. Almeida (2015) por sua vez abrange outro ponto, verificando qual a carga para atingir o ponto de maior potência. Audiffred (2015) em seu trabalho, encontrou este ponto para cada tensão testado utilizando um potenciômetro em paralelo com o módulo gerador termoelétrico. No presente trabalho é proposto um sistema de monitoramento, encontrando o ponto de maior potência de maneira automatizada e neste quesito, não foi encontrado trabalhos similares até o momento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Em Audiffred (2015), foi caracterizado um TEG considerando o ponto de máxima potência tendo em vista a aplicação aeroespacial. Para isto, foi utilizado um potenciômetro em paralelo com o módulo de geração termoelétrica, assim media-se a tensão em aberta do módulo de geração termoelétrica e para as mesmas condições de temperatura regulava-se o potenciômetro de modo que se obtivesse a metade da tensão em estado aberta. Neste estado, é admitido que o módulo se encontra no ponto de maior potência gerada pelo dispositivo. Ao ser encontrado a tensão, a resistência do potenciômetro se iguala a resistência interna do TEG e após isto, o autor retirava o potenciômetro do circuito e utilizava um multímetro para medir a sua resistência que era admitida como sendo a resistência do TEG. Este modo foi utilizado de forma que foi encontrado 26 pontos entre 14°C e 50°C.

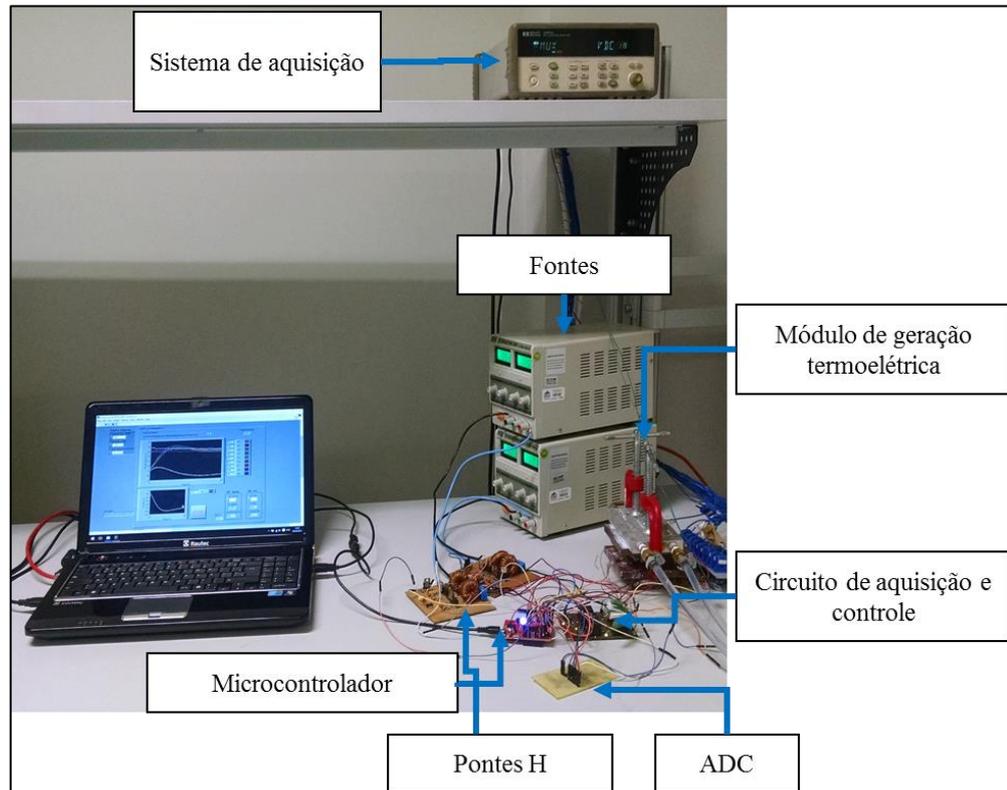
O presente trabalho tem como premissa a sugestão do autor de utilizar outro método para medição interna do TEG e otimizar o a forma de se obter o ponto maior potência possível do dispositivo. Assim planeja-se automatizar o modo de se obter o ponto de maior potência, possibilitando maior número de amostras, garantindo a metade da tensão em aberto para diferentes temperaturas e como resultado melhor caracterização de dispositivos. Para isto é proposto utilizar um circuito composto de relés e transistor de efeito de campo para alterar a resistência de carga a ser colocada junto com o módulo termoelétrico.

O experimento consiste em um sistema de monitoramento e aquisição de dados para a caracterização de TEGs envoltos em temperaturas controladas através de software. É desejado encontrar o ponto de eficiência máxima do conjunto para obter a geração de energia. O sistema é composto por um módulo de geração termoelétrica, dispositivo para a leitura de temperatura e tensão, circuito a fim de automatizar a medição e definir o ponto de melhor operação (máxima eficiência), além do computador que recebe, através do *software* LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), os dados do circuito caracterizador, temperaturas e tensão, fazendo um controle (PID) da temperatura através de cálculo PWM.

É necessário ter controle da temperatura pois faz parte do requisito se ter uma diferença de temperatura definida durante a caracterização, para isto foi utilizado um controlador PID que como saída possui valores PWM enviados através do microcontrolador ARM para as pontes H, responsáveis por controlar a temperatura das faces que estão em

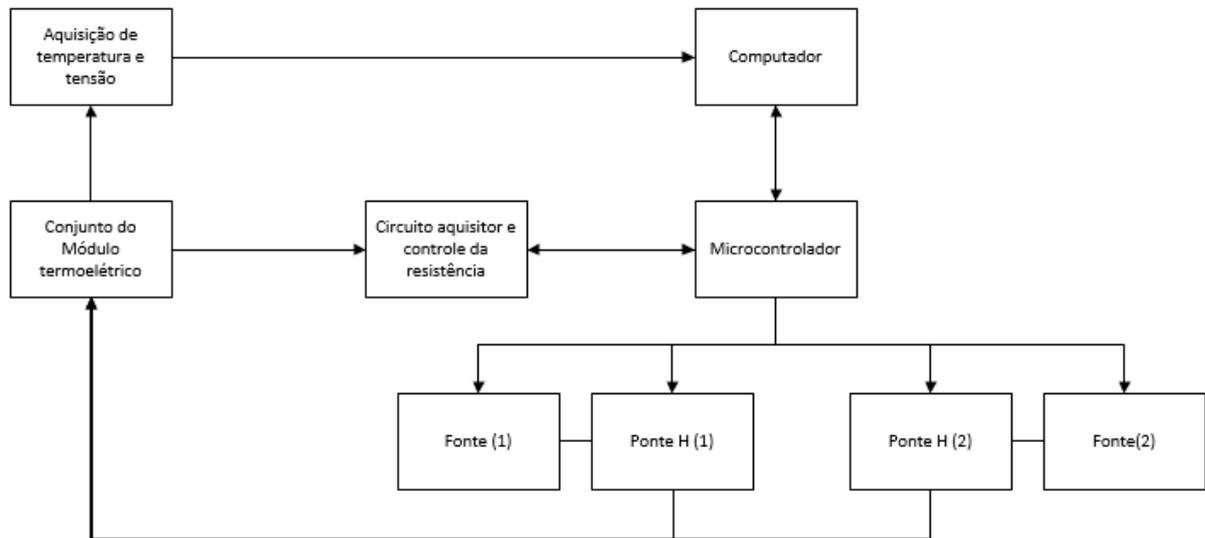
contato com o gerador termoeletrico, ou seja para os dois TECs. Na Figura 10 é mostrado a montagem do experimento e na Figura 11 é apresentado o diagrama de blocos do sistema.

Figura 10 - Montagem do experimento



Fonte: Autor

Figura 11 - Configuração do aparato experimental



Fonte: Autor

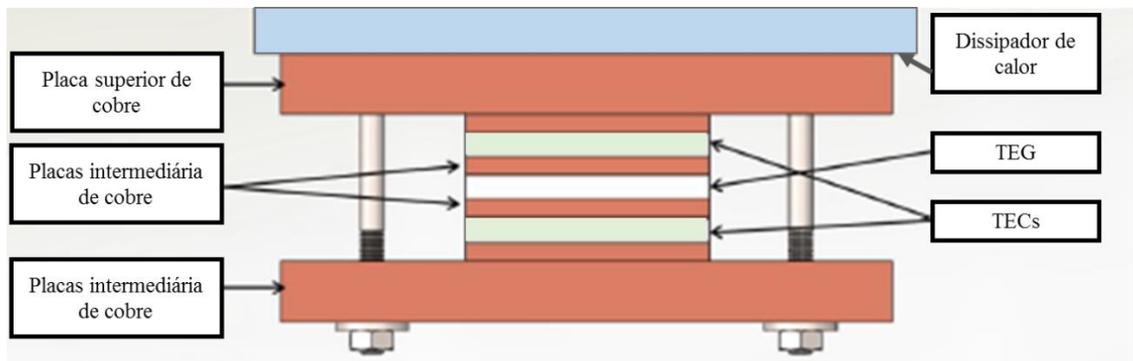
Através do computador, é enviado o valor do sinal PWM para o microcontrolador, este por sua vez envia para as pontes H, que controlam as temperaturas. O microcontrolador se comunica com o circuito de aquisição de dados da tensão e controle da resistência, enviando comandos e recebendo informações. O envio de comandos se trata de alterar a resistência do circuito acoplado ao TEG, enquanto que o recebimento é referente aos dados obtidos do módulo, como por exemplo a tensão obtida em conjunto com o circuito acoplado e se foi possível encontrar o ponto de máxima tensão. O microcontrolador ao término do ciclo de busca da melhor resistência (tendo em consideração a potência), retorna ao computador os dados obtidos. Em paralelo, o sistema de aquisição de temperatura e tensão realiza leituras dos TECs que indicam as temperaturas das faces as quais o TEG está submetido e envia ao computador. Ao receber as informações, no computador é realizado o cálculo do controle PWM e enviado ao microcontrolador, reiniciando a sequência.

3.1 Aparato experimental

Como dito anteriormente, o experimento é baseado no trabalho realizado por Audiffred (2015), assim o módulo termoelétrico utilizado foi melhorado do experimento anterior, sendo acrescentado o sistema de caracterização que anteriormente era feito manualmente. O TEG está posicionado conforme mostra a Figura 12. Existe placas intermediárias de cobres que transmitem o calor às faces fria e quente do gerador

termoelétrico a partir dos TECs posicionados. Foi aplicado uma camada de pasta térmica entre elas para melhorar o contato térmico..

Figura 12 - Configuração do sistema verificado - bancada de teste

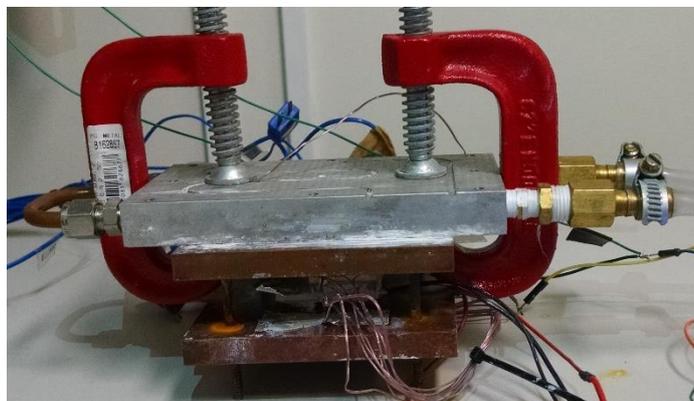


Fonte: adaptado de Audiffred (2015).

O TEC inferior é responsável pela parte com maior temperatura no TEG, enquanto que o superior é responsável pelo lado frio do TEG, assim um lado seu está direcionado para o gerador enquanto que o outro para a placa superior de cobre e em sequência o dissipador de calor. Diferente do trabalho de Audiffred, que utilizou um dissipador aletado por convecção forçada, utilizando um ventilador, o dissipador utilizado neste experimento está conectado a um banho térmico, resfriando assim a placa de cobre e aumentando a capacidade de dissipação do calor gerado pelos TECs. A melhoria da dissipação também foi sugerida por Audiffred (2015).

Na Figura 13 é mostrado o aparato experimental onde contém a placa de refrigeração, os TECs e o TEG, juntamente com os termopares.

Figura 13 - Aparato experimental



Fonte: Autor.

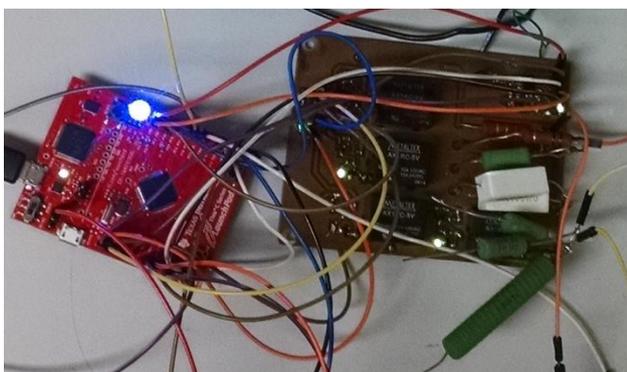
3.2 Circuito de aquisição e controle

O circuito tem como objetivo fazer de forma automatizada a alteração da resistência acoplada no módulo do gerador termoelétrico de modo a atingir a mesma resistência, assim medindo metade da tensão em aberto, obtendo o ponto de maior potência para o dispositivo sendo caracterizado na temperatura de operação. O circuito foi desenvolvido pelo orientador do trabalho, sendo necessário definir os resistores a serem colocados, de acordo com os cálculos apresentados posteriormente. A placa é constituída de 4 relés (METALTEX – AX1RC – 5V), conversor digital analógico (Texas Instruments TLV5616), transistor de efeito de campo por junção (JFET) e resistores. Uma imagem do dispositivo é vista na Figura 14, onde se encontra o microcontrolador e o circuito de aquisição.

O JFET é conectado ao conversor digital analógico, recebendo a saída analógica. Um dos resistores (R1) está posicionado em série com o transistor e os outros estão posicionados de modo a formarem um circuito em paralelo com o JFET e R1. Estes resistores em paralelo são acionados através dos relés, e tem como função alterar o intervalo resultante da tensão. É proposto que em uma excursão nos três relés seja possível obter uma faixa contínua de valores de tensão. Existe um relé de controle e serve para acoplar o circuito aos terminais do módulo do gerador ou deixar em circuito aberto.

Para realizar medição dos terminais do módulo do gerador termoelétrico sem o circuito, ou seja, medição da tensão é aberta, é necessário desativar o relé de controle e adquirir a medida. Para alterar a tensão utilizando o circuito, é necessário fechar este relé, acionar um dos resistores através de outro relé e enviar valores ao JFET.

Figura 14 - Circuito de aquisição e controle em conjunto com o microcontrolador



Fonte: Autor.

3.3 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado no trabalho foi um ARM Cortex-M4F, o TM4C123GH6PM, integrado no *launchpad* TM4C123G da Texas Instruments (Figura 15). A comunicação com o computador ocorre através da porta USB 2.0. Possui, dentre outros, os seguintes recursos de acordo com o fabricante:

- Processador: 80MHz 32-bit ARM Cortex-M4F CPU
- 256KB Flash, 32KB SRAM, 2KB EEPROM
- Dual 12-bit 2MSPS ADCs, motion control PWMs
- 8 UART, 6 I2C, 4 SPI

Figura 15 - Tiva



Fonte: Autor.

No experimento, o microcontrolador tem a função de realizar a busca do ponto de potência máxima do TEG. Para isto é necessário enviar sinais ao JFET (através de um DAC), controlar o chaveamento e realizar leituras de tensão (através do ADC). Outra funcionalidade é enviar o sinal de controle PWM, calculado pelo LabVIEW, para as pontes H.

Os recursos utilizados no decorrer do trabalho foram: um módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), dois módulos SPI, 2 PWM. Seguem a definição dos recursos:

- Módulo SPI 1: implementado para enviar valores previamente definidos para o controle da resistência interna ao DAC (Conversor Digital Analógico).
- Módulo SPI 2: utilizado para receber dados da tensão através do ADC (Conversor Analógico Digital).
- UART: transmissão de dados entre o microcontrolador e computador e vice-versa, utilizando de interrupções para permitir exclusividade ao tratamento de dados.

- PWM: utilizados para enviar o controle aos TECs a fim de manter a temperatura desejada.

3.4 Code Composer Studio (CSS) Integrated Development Environment (IDE)

O Code Composer Studio (CSS) Integrated Development Environment (IDE), sendo referido apenas como CSS, é um software de desenvolvimento que suporta a os processadores embarcados e microcontroladores da Texas Instruments. Inclui um compilador otimizado na linguagem C/C++, como também um depurador (*debugger*) que permite ao desenvolvedor verificar o passo a passo do software, os registradores, alocações e eventuais falhas. O software é gratuito, necessitando realizar o download e seguir orientações de instalações. É disponibilizado online exemplos e *workshops* para facilitar o aprendizado no uso do software e do hardware.

3.5 LabVIEW

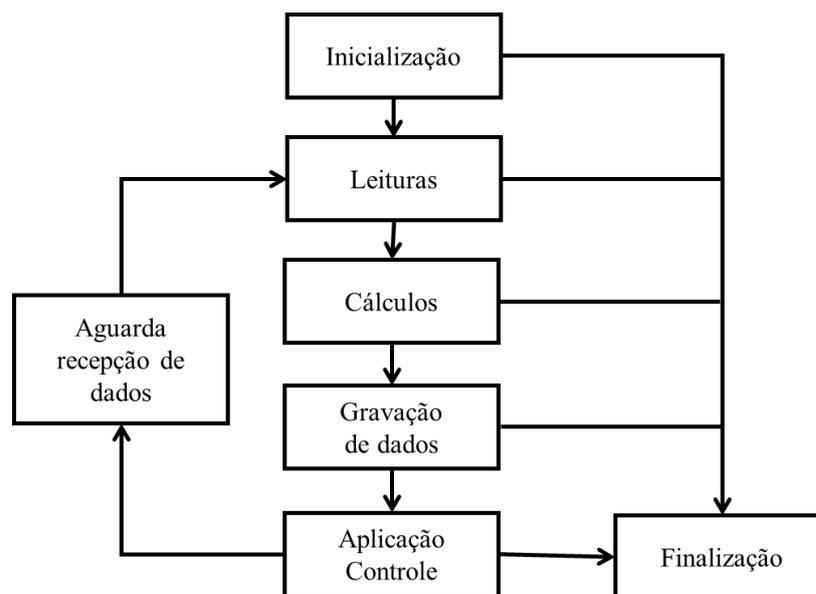
Com o intuito de caracterizar o gerador termoelétrico, existe a necessidade de controlar a temperatura das duas junções do módulo nos valores específicos desejados, tendo em vista que o coeficiente depende da temperatura e o potencial elétrico de saída muda não apenas com a diferença de temperatura (DALOLA, 2009). No experimento, para simular temperaturas diferentes, foram utilizados dois módulos termoelétricos (TEC) no lado frio e quente do TEG a ser utilizado. Para manter a temperatura desejada, optou-se por utilizar um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) através do programa LabVIEW, tendo como saída duas ondas independentes utilizando a técnica. Foi criada uma interface com o usuário a fim de definir as temperaturas desejadas.

LabVIEW é um software de programação gráfica da *National Instruments*, cuja primeira versão foi lançada em 1986 (SOUZA, 2006) e que tem se tornado um ambiente de programação popular para aquisição de dados tanto no meio acadêmico quanto industrial (HIGA, 2002). Os programas neste software são chamados de instrumentos virtuais, ou comumente como VI (*Virtual Instrument*).

No trabalho, esta parte foi utilizado no realizado por Audiffred com alterações. A programação no LabVIEW pode ser dividida em sete partes (Figura 16). Na primeira parte, inicialização, são configuradas as propriedades e requisitos que permite a comunicação com os *hardwares* (sistema de aquisição de temperatura e microcontrolador Tiva), além de serem

definidos os dados a serem armazenados e mostrados. Na parte da leitura, ocorre o recebimento das temperaturas medidas pelo sistema de aquisição de temperatura, como também o recebimento dos dados obtidos na parte experimental do microcontrolador Tiva para encontrar o ponto de maior potência. Na sequência, utilizando os valores das temperaturas, é realizado cálculos para o controle PID (cálculos) e são enviados ao microcontrolador Tiva (aplicação de controle), responsável por enviar aos TECs. A parte de gravação de dados armazena a leitura de temperaturas e a diferença de tensão obtidas no experimento através do *data logger* HP HEWLETT. Por fim, é aguardado a recepção de dados enviados pelo microcontrolador como resultado do experimento antes de inicializar uma nova leitura.

Figura 16 - Diagrama das funções executadas pelo programa criado em LabVIEW



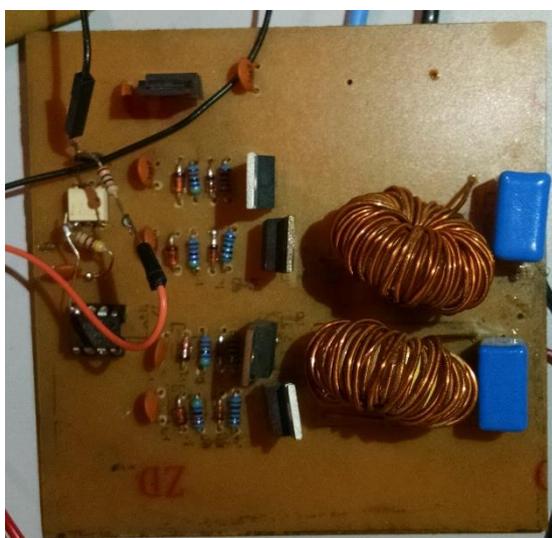
Fonte: Autor.

A finalização ocorre por parte do usuário ou caso ocorra algum erro durante as etapas. Os VIs utilizados neste trabalho, foram os utilizados por Audiffred (2015) com pequenas alterações como por exemplo a parte de aguardar a recepção dos dados do microcontrolador.

3.6 PONTE H

No experimento são utilizadas duas pontes H (Figura 18) para controlar a temperatura dos TEC. Este tipo de circuito é amplamente utilizado e a intensidade da corrente necessária para enviar aos dispositivos termoelétricos depende do valor do PWM enviado pelo microcontrolador, calculado pelo software LabVIEW. Os circuitos utilizados foram desenvolvidos pelo orientador do presente trabalho, sendo que o esquemático do circuito elétrico se encontra no Apêndice.

Figura 17 - Ponte H utilizada no experimento



Fonte: Autor.

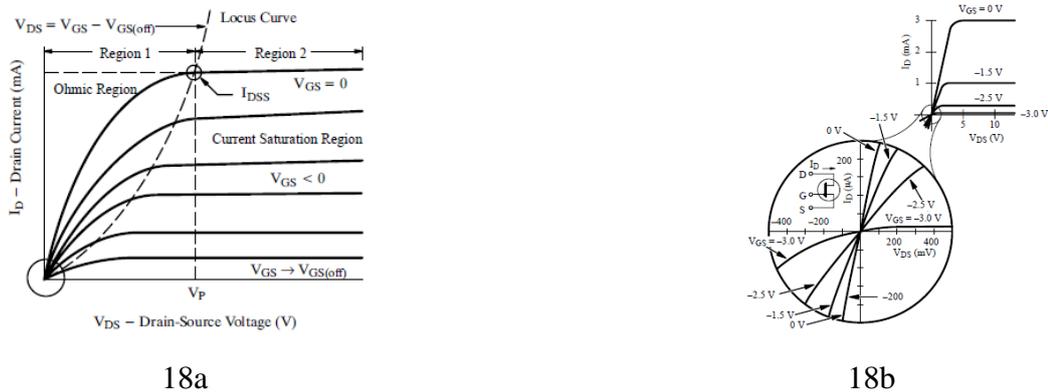
3.7 Transistor de efeito de campo

Basicamente, o transistor de efeito de campo é um componente que controla uma corrente principal, chamada de corrente de dreno a partir de uma tensão. Estes componentes podem ser divididos em transistor de efeito de campo de porta isolada, chamados de MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ou IGFET, e transistor de efeito de campo de junção, conhecido como JFET (*Junction Field Effect Transistor*).

O primeiro JFET fabricado nos Estados Unidos foi produzido em 1960 (SILVA, 2012) e o transistor de efeito de campo tratado no trabalho é deste tipo, por junção (JFET) e tem como função ser utilizado como resistor. Existe uma região na curva característica do FET para pequenos valores do *drain* para a fonte de tensão V_{ds} onde a corrente drenada I_d varia linearmente com V_{ds} . Esta relação linear, permite que o FET possa ser utilizado como um resistor variável para tensão controlada. (MAOZ, 1989).

Tensão controlada por resistor (VCR – *Voltage-controlled resistor*) pode ser definida como resistor variável de três terminais onde o valor da resistência entre dois terminais é controlado pelo potencial da tensão aplicado ao terceiro (AN-115). O JFET pode se comportar como um resistor ôhmico, na Figura 18a tem-se uma curva característica de um JFET e na Figura 18b mostra a região do canto esquerdo inferior, detalhando a região que pode ser utilizada como resistor.

Figura 18 - Curvas características de JFET



Fonte: Siliconix (1997).

O modelo escolhido foi o J111 (ON Semiconductor) tendo em vista o intervalo de resistências desejado a ser utilizado. Na aplicação do trabalho, pretende-se alterar o valor do JFET para controlar a tensão entre os terminais do TEG a fim de se obter a tensão com mais eficiência para a geração de energia elétrica.

3.8 ADC

Conversor analógico digital, usualmente chamado de ADC (*Analog to Digital Converter*), como o próprio nome diz, tem a função obter saída digital de entradas proveniente de circuitos analógicos. No experimento é necessário seu uso para converter a tensão lida (analógica) em dados a serem tratados pelo hardware Tiva e pelo computador.

Durante o trabalho, foi implementado o dispositivo no conversor analógico digital presente no hardware Tiva, entretanto, tem-se como restrição este ADC suportar apenas 3.3V. Após observar inconsistência nos dados obtidos experimentalmente, verificou-se que a tensão de saída eventualmente ultrapassava o limite e por isso ocorria divergência nos dados. Assim, optou-se por utilizar o conversor analógico digital MAX1301 da empresa Maxim integrated.

O dispositivo, que tem como característica 16 bits, entrada de +5V e medição em modo comum ou diferencial utilizando os quatro canais de entrada. O intervalo de medição de entrada é programável e pode ser variável em até $12 \times V_{ref}$ no caso de medição diferencial. Para compor o trabalho, foi utilizado entrada diferencial, no modo bipolar $(-3 \times V_{ref}) / 2$ a $(+3 \times V_{ref}) / 2$, utilizando *Clock* externo do Tiva.

3.9 DAC

O conversor digital analógico (DAC – *Digital to Analog Converter*) foi utilizado para converter os sinais enviados pelo hardware Tiva para o transistor. O implementado no trabalho foi o TLV5616 da *Texas Instruments*, possuindo 12 bits para dados e 4 bits de controle.

3.10 TEG

O TEG utilizado no trabalho é o TEG241-1.0-1.2 da marca Everredtronics. Como característica pode-se citar seu tamanho de 40x40 mm e o $V/K = 0,011$ (lado quente: 160°C ; lado frio: 50°C) podendo operar em temperaturas de até 240°C . O dispositivo utilizado é o mesmo de Audiffred (2015) e é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Gerador termoelétrico utilizado nos experimentos



Fonte: Audiffred (2015).

3.11 TEC

Os TECs utilizados, também são os mesmos de Audiffred (2015), sendo o da marca CUI modelo CP60240 para o lado frio e o do fabricante Hebei, modelo 12708 no lado quente.

Estes componentes são utilizados para manter a diferença de temperatura desejada, juntamente com o controle PID enviado pelo LabVIEW através de PWM

3.12 Sistema de aquisição de temperatura

A fim de realizar o controle da temperatura, foi utilizado um sistema de aquisição, de modo semelhante ao utilizado pelo Audiffred (2015), uma vez que o trabalho em questão se refere a uma sugestão do autor. O sistema é composto pelo *datalogger* de aquisição HP HEWLETT PACKARD, modelo 34970A e por termopares. No experimento são utilizados nove termopares conectados neste hardware que realiza a leitura e envia os dados ao LabVIEW, além de medir também a tensão de saída do TEG.

Os termopares são classificados de acordo com o tipo de material, tendo como diferença principal a linearidade e a faixa de medição. Por questão de disponibilidade, foi utilizado por Audiffred (2015) termopar do tipo T, cuja composição é conhecida comercialmente como Constatan e é feita de cobre e cobre-níquel. De acordo com o autor, a faixa de medição deste tipo de termopar não apresenta restrições ao experimento, pois abrange de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.15 Computador

Para o trabalho, foi utilizado computador para desenvolver a programação da busca do ponto de máxima potência, incluindo as configurações iniciais dos hardwares, leitura de tensão e programação do envio do valor do PWM aos TECs. Esta programação foi desenvolvida através do CCS para ser implementada no microcontrolador Tiva. Foi realizado também modificações no programa LabVIEW previamente utilizado por Audiffred (2015).

3.16 Resistência

Com o intuito de caracterizar o comportamento do JFET como resistor ôhmico para a aplicação, e definir qual a carga do circuito, mediu-se a tensão entre os terminais com a chave de controle aberta e fechada, alterando o valor enviado ao transistor do mínimo para o máximo. Nesta parte do experimento, o JFET está montado em série com um resistor de $2,7\ \Omega$, e em paralelo com um de $8,3\ \Omega$. Ao aplicar uma tensão de $3,5\ \text{V}$ no terminal positivo do TEG, foram obtidos valores da tensão máxima e mínima obtida para as duas situações (chave aberta e fechada). Conhecida a resistência total e a tensão aplicada, foi possível determinar a

resistência que o transistor assumiu em um circuito serial e paralelo. Abaixo, segue como foi determinado as resistências:

Chave aberta- Transistor em série com 2,7 Ω :

Tensão mínima medida: 2,8 V

Tensão aplicada nos terminais: 3,5V

Resistor: 8,26 Ω

$$i = \Delta V / R \quad (13)$$

$$i_1 = \frac{3,5 - 2,8}{8,26} = 0,08475 \text{ A} \quad (14)$$

$$V = IR_{eq} \quad (15)$$

$$R_{eq} = \frac{2,8}{0,08475} = 33,038 \Omega \quad (16)$$

$$R_{req} = R_1 + R_{jFET} \quad (17)$$

$$R_{jFET} = R_{eq} - R_{jFET} = 33,038 - 2,7 \quad (18)$$

$$R_{jFET} = 30,338 \Omega \quad (19)$$

Tensão máxima: 3,05 V

Tensão aplicada nos terminais: 3,5V

Resistor: 8,26 Ω

$$i_1 = \frac{3,5 - 3,05}{8,26} = 0,0545 \text{ A} \quad (20)$$

$$V = IR_{eq} \quad (21)$$

$$R_{req} = 3,05 / 0,0545 = 55,98 \Omega \quad (22)$$

$$R_{req} = R_1 + R_{jFET} = 2,7 + R_{jFET} \quad (23)$$

$$R_{jFET} = 53,28 \Omega \quad (24)$$

Chave fechada- Transistor em série com 2,7 Ω e paralelo com 8,3 Ω :

Tensão mínima: 1,48 V

Tensão aplicada nos terminais: 3,5V

Resistor considerado: 8,26 Ω

$$\Delta V = iR \quad (25)$$

$$i_1 = \frac{3,5 - 1,48}{8,26} \quad (26)$$

$$i_1 = 0,24455 \quad (27)$$

$$R_{eq} = \frac{1,48}{0,24455} = 6,0519 \quad (28)$$

$$R_{eq} = (R_1 R_{jFET} // R_{17}) \quad (29)$$

$$R_{req} = \frac{(R_1 + R_{jfet})R_{17}}{R_1 + R_{jfet} + R_{17}} \quad (30)$$

$$R_j = \frac{R_{eq}(R_1 + R_{17}) - R_1 R_{17}}{R_{17} - R_{req}} \quad (31)$$

$$R_{eq} = 6,0519 \, \Omega, R_1 = 2,7 \, \Omega, R_{17} = 8,3 \, \Omega \quad (32)$$

$$R_j = 19,643 \, \Omega \quad (33)$$

Tensão máxima: 1,55 V

Tensão aplicada nos terminais: 3,5V

Resistor: 8,26 Ω

$$i_1 = \frac{3,5 - 1,55}{8,26} \quad (34)$$

$$i_1 = 0,2360 \quad (35)$$

$$R_{eq} = \frac{1,55}{0,2360} = 6,5656 \quad (36)$$

$$R_{eq} = (R_1 R_{jfet}) // R_{17} \quad (37)$$

$$R_j = \frac{R_{eq}(R_j + R_j) - R_j R_j}{R_{17} - R_{eq}} \quad (38)$$

$$R_{eq} = 6,5656 \, \Omega, R_1 = 2,7 \, \Omega, R_{17} = 8,3 \, \Omega \quad (39)$$

$$R_j = 28,72 \quad (40)$$

A partir destas equações, tem-se os seguintes resultados ao aplicar tensão de 3,5V (Tabela 2):

Tabela 2 - Valores assumidos pelo JFET

Chave	Tensão [V]	$R_{eq}[\Omega]$	JFET [Ω]
Aberta	2,70	33,04	30,34
Aberta	3,05	55,98	53,28
Fechada	1,48	6,052	19,64
Fechada	1,55	6,566	28,72

Fonte: Autor.

Assumindo o transistor como um resistor ôhmico, nota-se que a tensão de saída foi alterada significativamente ao utilizar em conjunto com as resistências, mostrando que os resultados em conjunto com o JFET e resistores em paralelo geram valores de tensão mais próximos da tensão de máxima potência. Ao utilizar desta disposição (em paralelo) pode-se utilizar chaveamento para alterar os valores da resistência total de acordo com o resistor ativo em cada chave e encontrar de forma mais efetiva a tensão desejada, permitindo maior intervalo de aplicação.

Tendo em vista que o experimento será verificado de acordo com os resultados obtidos por Audiffred (2015), considerou-se que a resistência obtida pelo dispositivo deve abranger a resistência interna máxima e mínima obtida pelos experimentos do autor a fim de modelar os resistores para cada chave com o intuito de integrar o dispositivo. A resistência máxima foi de 7,7 Ω e a mínima 6,3 Ω . É proposto utilizar as chaves para cobrir o intervalo entre 5,3 Ω e 8,7 Ω , assumidos valores encontrados em dispositivos comerciais (R_x) para realizar os cálculos e definir quais seriam sugeridos para a integração juntamente com o hardware.

Utilizou-se o software Microsoft Excel para extrapolar os dados e estabelecer os resistores considerando que o transistor estará em paralelo com o resistor chamado de R_1 de 2,18 Ω , assim utilizou-se o cálculo da resistência total em paralelo, variando os valores da resistência comercial e o valor a ser assumido pelo transistor:

$$R_{eq} = R_1 R_{JFET} // R_x$$

Onde:

R_{eq} = resistência a ser encontrada utilizando o R_x

$R_1 = 2,18 \Omega$

R_{JFET} = resistência a ser assumida pelo transistor JFET.

R_x = resistência a ser definida para integrar o hardware.

Os dados obtidos foram analisados e definiu-se os seguintes resultados e resistências (Tabela 3):

Tabela 3 - Valores obtidos para as resistências 7,5 Ω ; 9,1 Ω ; 10 Ω .

R1	Rj	R16 – 7,5	Req
2,18	16	7,5	5,31
2,18	37	7,5	6,29

R1	Rj	R16 – 9,1	Req
2,18	18	9,1	6,27
2,18	48	9,1	7,70

R1	Rj	R17 – 10	Req
2,18	25	10	7,31
2,18	65	10	8,70

Fonte: Autor.

Assim ao acionar a respectiva chave, a resistência será alterada e o hardware será composto por:

Chave 1: 7,5 Ω

Chave 2: 9,1 Ω

Chave 3: 10 Ω

Com o intuito de verificar quais os valores possíveis para a resistência equivalente de acordo com o resistor escolhido e valor do JFET, foi elaborado no software Microsoft Excel um programa no *Visual Basic for Application (VBA)*, onde a partir de dados de uma tabela, são escritos os valores de resistência equivalente, considerando que R_1 está em série com o transistor (JFET) e que eles estão em paralelo com o resistor R_x . Exemplificação está na Figura 20.

Figura 20 - Interface com o Microsoft Excel para verificar a resistência equivalente a partir de entradas do usuário.

Tabela 1 - Dados		Rx	JFET VALUE	REQ VALUE
R1	2.18	33	40	18.515
Rx	33.00	33	41	18.705
Rjmax	64.00	33	42	18.890
Rjmin	40.00	33	43	19.071
<input type="button" value="Calcular REQ"/>		33	44	19.247

Fonte: Autor

A partir disto, é possível colocar valores de resistores comerciais e analisar junto a variação do JFET, podendo selecionar outros resistores para a abrangência do intervalo desejado de resistores.

3.17 Firmware

O firmware implementado no microcontrolador, tem dois objetivos:

- Receber o sinal calculado pelo LabVIEW (controle PID) e enviar através de PWM para as pontes H a fim de controlar as temperaturas dos TECS.
- Encontrar o ponto de melhor potência, baseando-se na medição do sistema em aberto e alterando a resistência total através de resistores fixos e um transistor de efeito de campo.

No primeiro objetivo, é necessário configurar a UART e dois PWM do microcontrolador. Pela UART é recebido o sinal de controle e os valores dos sinais PWM são enviados às pontes H. O sinal é recebido pelo microcontrolador através de uma interrupção do módulo UART ou seja, é forçado a processar sempre que acontece, entretanto, por causa da rotina desenvolvida na programação e também na realizada no software LabVIEW, não ocorrerá este tipo de interrupção no decorrer da realização da rotina sendo que caso ocorra a influência não terá resultado, uma vez que o programa verifica o resultado da interrupção apenas em uma parte do escopo.

No segundo objetivo, foi necessária a configuração para habilitar as portas e ocorrer a comunicação com os periféricos conectados ao microcontrolador citados anteriormente. O firmware inicializa configurando as variáveis iniciais e os periféricos.

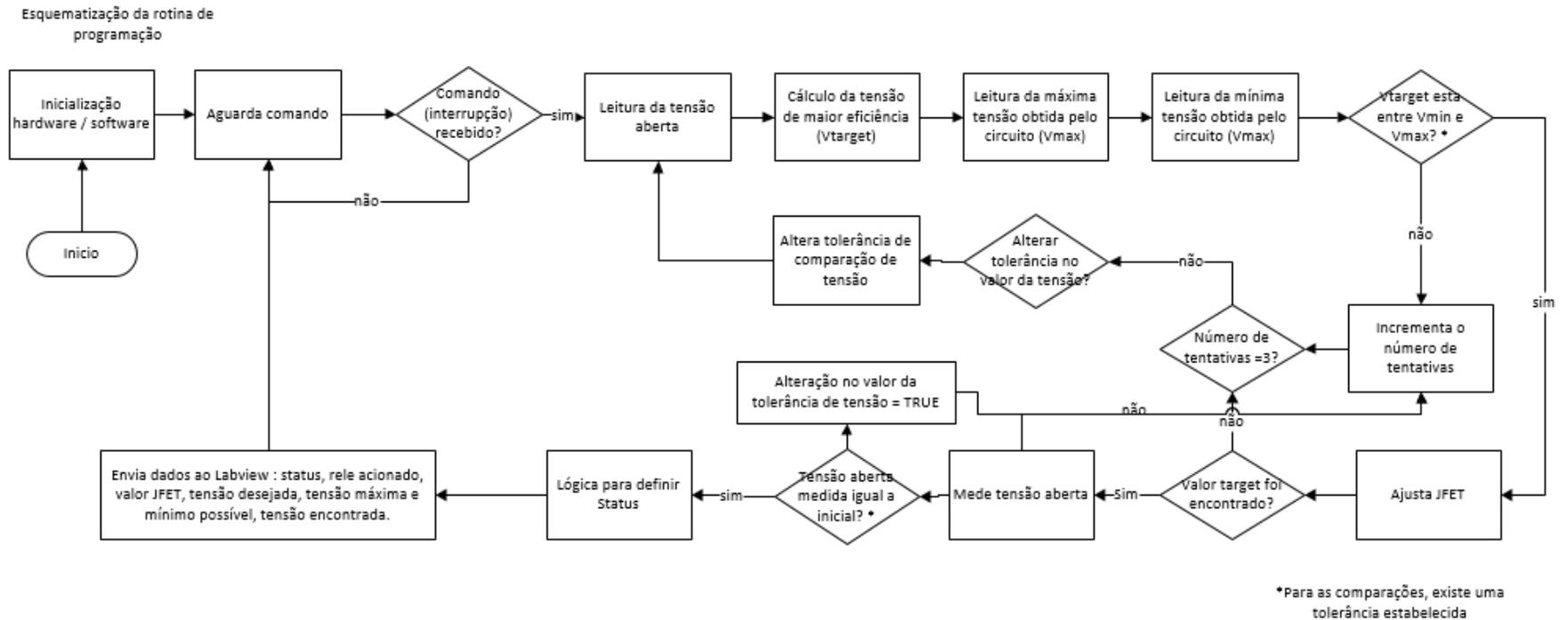
Em termos gerais o programa realiza a busca pela resistência adequada de acordo com o hardware desenvolvido. Para se atingir o objetivo, é necessário a leitura da tensão aberta e com carga, envio de sinal ao JFET, acionar/desativar relé específico

A leitura da tensão é realizada por um conversor ADC, podendo ser apenas do gerador termoelétrico, chamada de tensão aberta, ou com carga acoplada. É definido o tipo de medição a partir do hardware, sendo que existe um resistor de controle encarregado de definir a configuração e comandado pelo firmware. Para o envio do valor do JFET, é utilizado um conversor DAC. Assim, o software por meio de indicadores e variáveis de controle, realiza a busca comparando a tensão aberta medida inicialmente com a tensão resultando ao se aplicar a ação da resistência.

A busca pode ocorrer em três tentativas, sendo que é estabelecida uma tentativa ao se verificar todo o intervalo de abrangência das resistências. Caso o valor de tensão seja encontrado, é verificado se a tensão em aberto foi modificada além da tolerância estabelecida. Caso tenha, é necessário realizar a busca novamente e é contabilizado como uma nova tentativa. Ao atingir três tentativas ou encontrar a tensão desejada (sem alteração significativa da tensão em aberto), são enviados dados de tensão, valor JFET, relé e status que será explicado posteriormente. A Figura 21, mostra como foi desenvolvido o programa implementado no microcontrolador e executado nos experimentos.

No início do programa é utilizado um incremento do JFET. Caso seja verificado que em uma tentativa não foi encontrado a tensão *target*, o incremento é reduzido. Como resultado, um ciclo completo será completado em maior tempo, porém mais pontos serão testados para verificar o resultado final. Existe uma tolerância para a comparação de tensão aberta, tendo em vista que como o sistema é dinâmico, alterações na temperatura podem ocorrer. Caso seja detectado que ocorreu variação na tensão aberta inicial e final, é aumentado o valor desta tolerância e executado a rotina novamente.

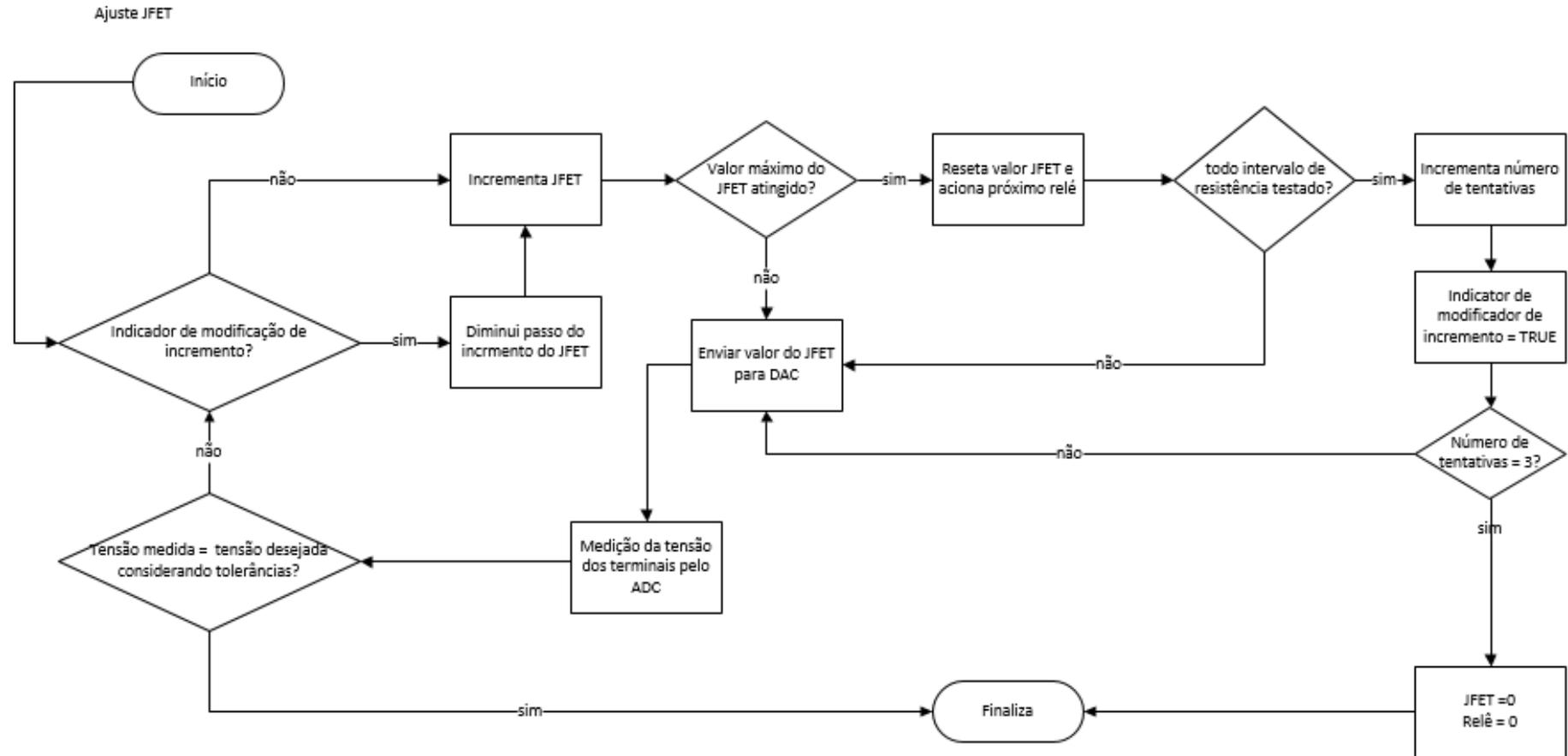
Figura 21 - Software descrevendo etapas - utilizado no experimento



Fonte: Autor.

A parte de ajustar o JFET, chamado de “Ajusta JFET”, é detalhada na Figura 22, assim como a parte de realizar medições da tensão aberta na imagem seguinte (Figura 23).

Figura 22 - Esquemática da função para procurar o valor de JFET



Fonte: Autor.

Figura 23 - Fluxo da função realizar leitura de tensão aberta



Fonte: Autor.

Durante os experimentos, foi observado que ocorre saturação do JFET ao atingir valores próximos do limite, assim na programação não são enviados todos os valores possíveis (0xFFFF), apenas até o valor onde ocorre a máxima resistência, verificado experimentalmente. Notável mencionar que na leitura da tensão (aberta ou fechada) é feito primeiramente medições para serem descartadas e depois feitas medições a fim de fazer média. Optou-se desta forma tendo em vista que durante os ensaios verificou-se que as primeiras leituras não apresentavam valores coerentes ao variar a tensão.

3.17.1 Protocolo de comunicação

O microcontrolador realiza a busca pela tensão de maior potência, situação em que a resistência do circuito se iguala a resistência interna e como visto, resulta na metade da tensão aberta dos terminais.

Para verificar qual foi o resultado desta busca, estabeleceu-se um protocolo de comunicação com o LabVIEW (Tabela 4), uma vez que os dados são enviados para o software onde é mostrado ao usuário. Este protocolo informa a o *status* da busca, o valor do JFET e os valores de tensão e possui 12 bytes como segue:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Tabela 4 - Protocolo de comunicação: sistema caracterizador e LabVIEW

Byte	Representação
1	Flag - não utilizado
2	<i>Status</i>
3	Relé e valor JFET
4	Valor de tensão desejado (MSB)
5	Valor de tensão desejado (LSB)
6	Valor máximo de tensão alcançado pelo circuito (MSB)
7	Valor máximo de tensão alcançado pelo circuito (LSB)
8	Valor mínimo de tensão alcançado pelo circuito (MSB)
9	Valor mínimo de tensão alcançado pelo circuito (LSB)
10	Valor de tensão encontrado (MSB)
11	Valor de tensão encontrado (LSB)

Fonte: Autor.

Status

Representa o que aconteceu durante a busca pela condição de máxima potência. Caso a tensão tenha sido encontrada, é possível verificar em qual tentativa e se não for na primeira, quais erros aconteceram anteriormente. Se a tensão não for encontrada, é possível verificar se o circuito não abrange o intervalo nas configurações atuais ou se o valor da tensão do módulo do gerador termoeletrico foi alterado, fato que pode ter acontecido devido a variação de temperatura por exemplo. Abaixo seguem definições adotadas:

Estado de maior potência não encontrado

Primeiro bit: 0 – não foi encontrado a tensão desejada

Bits seguintes:

0 - Tensão medida inicialmente e após as buscas divergem (erro na tensão aberta).

1 - Não foi possível encontrar o valor de tensão desejada, através do circuito (erro JFET)

Segundo bit: 1ª tentativa

Terceiro bit: 2ª tentativa

Quarto bit: 3ª tentativa

Exemplo:

0100 – Tensão desejada não encontrada (1º bit = 0), tensão desejada não está na abrangência do sistema caracterizador na primeira tentativa (2º bit=1), 2ª e 3ª tentativa os valores de medição aberta inicial e final são diferentes.

Estado de maior potência encontrado

Primeiro bit: 1 – encontrado a tensão desejada

Segundo bit: indica de qual erro aconteceu que está representado nos próximos bits (1-JFET, 0-Tensão inicial e tensão final.

Terceiro e quarto bit: 01 – aconteceu 1 vez o erro

10 – Aconteceu 1 vez o erro em questão, na primeira tentativa e o outro erro na segunda.

11 – Aconteceu 2 vezes o erro.

Exemplo:

1010 – Aconteceu erro JFET (Segundo bit 0) na primeira tentativa e o erro de tensão aberta na segunda (10), sendo o valor desejado encontrado na terceira tentativa.

1101 – Aconteceu o erro de tensão inicial/final (segundo bit 1) na primeira tentativa e encontrado o valor desejado na segunda (01).

Na Tabela 5 tem-se as definições do *status*, explicadas anteriormente.

Tabela 5 - Definições do byte *Status* no protocolo de comunicação

<i>Status</i> (Hexadecimal)	<i>Status</i> (Binário)	<i>TARGET</i> encontrado	Tentativa Encontrada	Erro JFET na Tentativa	Tensão aberta - tentativa
8	1000	Sim	1	-	-
B	1011	Sim	3	1,2	-
9	1001	Sim	2	1	-
A	1010	Sim	3	1	2
F	1111	Sim	3	-	1,2
D	1101	Sim	2	-	1
E	1110	Sim	3	2	1
0	0000	Não	-	-	1,2,3
1	0001	Não	-	3	1,2
2	0010	Não	-	2	1,3
3	0011	Não	-	2,3	1
4	0100	Não	-	1	2,3

<i>Status</i> (Hexadecimal)	<i>Status</i> (Binário)	<i>TARGET</i> encontrado	Tentativa Encontrada	Erro JFET na Tentativa	Tensão aberta - tentativa
5	0101	Não	-	1,3	2
6	0110	Não	-	1,2	3
7	0111	Não	-	1,2,3	-
C	1100	Sim	Indefinido	Indefinido	Indefinido

Fonte: Autor.

Relé e valor JFET

Este byte representa qual relé foi encontrado durante a busca (MSB) e qual o valor do JFET atingiu esta condição (3 bits subsequentes). Caso não tenha sido encontrado o valor desejado, é retornado valor nulo para as duas variáveis.

Valor de tensão desejado

Representa a metade do valor medido em aberto. O microcontrolador realiza a medição em aberto, mantendo o relé de controle aberto e então é calculado qual a tensão que atinge o ponto de máxima potência. Válido notar que o cálculo e o resultado envolvem as especificações e configurações do conversor analógico digital sendo que neste experimento o valor máximo medido é 6V (0xFFFF) e valor nulo (0V) é representado por 0x8000.

Valor máximo de tensão alcançado pelo circuito

Este valor é o resultado da maior tensão possível utilizando os resistores e JFET que estão no circuito. Para retorna-lo, é acionado o relé que abrange a maior tensão enviado ao JFET valor máximo e feito leitura da tensão a partir de médias de amostras previamente definidas no código.

Valor mínimo de tensão alcançado pelo circuito

Como no caso do valor máximo, é o mínimo medido, assim é enviado ao JFET um valor pequeno ao acionar o relé que abrange o menos intervalo de tensão.

Valor de tensão encontrado

Retorna o valor encontrado ao atingir o ponto de maior potência. Relevante notar que foi considerado uma tolerância para aceitar este valor. Caso não tenha sido encontrado, este valor será enviado como sendo o último medido pelo microcontrolador.

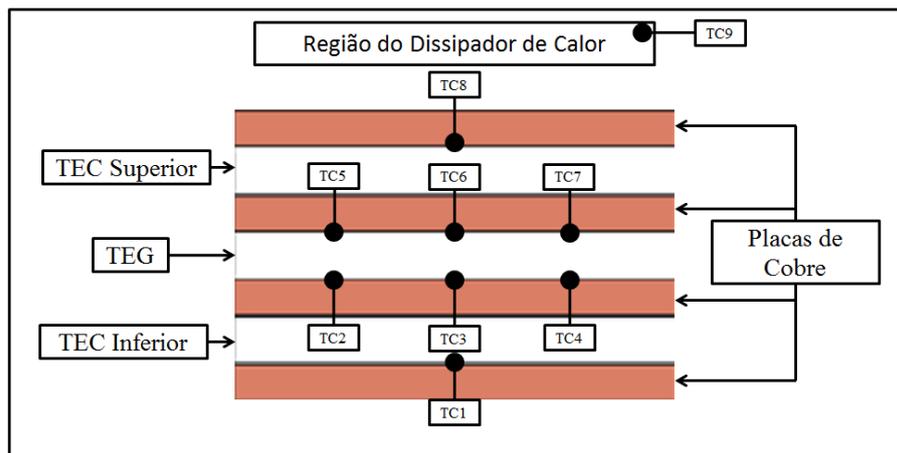
4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Esta seção aborda os resultados obtidos durante os testes experimentais e considerações realizadas. Para manipulação dos dados recebidos do caracterizador e a geração de gráficos foi utilizado o software Microsoft Excel enquanto que a visualização durante os experimentos foi realizada pelo software LabVIEW.

4.1 Controle da temperatura

O controle de temperatura utilizado foi baseado no utilizado por Audiffred, como consta, funciona adequadamente. O sistema é composto por 9 canais de medições, sendo 4 na face fria, 4 na face quente e 1 medindo a temperatura ambiente. Estes canais estão distribuídos conforme mostrado na Figura 24:

Figura 24 - Exemplificação da localização dos termopares



Fonte: Audiffred (2015).

No trabalho foi verificado que para temperaturas elevadas, leva-se mais tempo para o dispositivo encontrar a tensão *target*, assim, o próximo sinal de controle não é enviado no tempo adequado e como resultado não se obtém um controle apropriado da temperatura. Nos demais casos, o controle corresponde ao esperado.

4.2 JFET como resistor

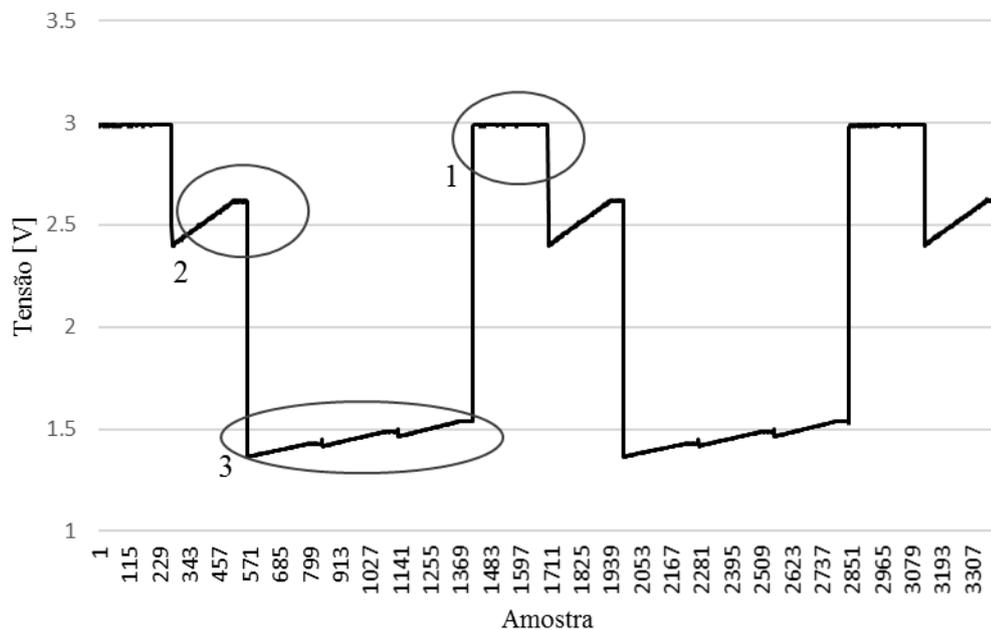
Como premissa do dispositivo caracterizador, foi considerado o comportamento do JFET como sendo de um resistor variável. Assim, a fim de verificar o funcionamento do

conjunto, foi colocado diferentes valores de tensão nos terminais, através de uma fonte, para verificar o comportamento nas seguintes situações:

- 1-Medindo apenas a tensão nos terminais.
- 2-Medindo a tensão nos terminais, com atuação apenas do JFET.
- 3-Medindo a tensão nos terminais, com atuação do JFET alterando as resistências em paralelo.

A Figura 25, apresenta uma exemplificação ao aplicar 3V com uma fonte nos terminais. É possível verificar que ao acionar a chave de controle, tendo influencia apenas da ação do JFET, ocorre uma queda de tensão e o resultante medido varia linearmente, como uma resistência ôhmica. Os resistores atuam alterando a tensão final de uma forma sequencial. É possível notar na figura uma faixa de saturação como consequência do transistor de efeito de campo, além de picos ao realizar o chaveamento. Estes pontos foram posteriormente otimizados, sendo que não é enviado o intervalo total possível ao JFET e foi acrescido um atraso para realizar o chaveamento.

Figura 25 - Tensão medida no decorrer do tempo nas condições 1,2,3



Fonte: Autor.

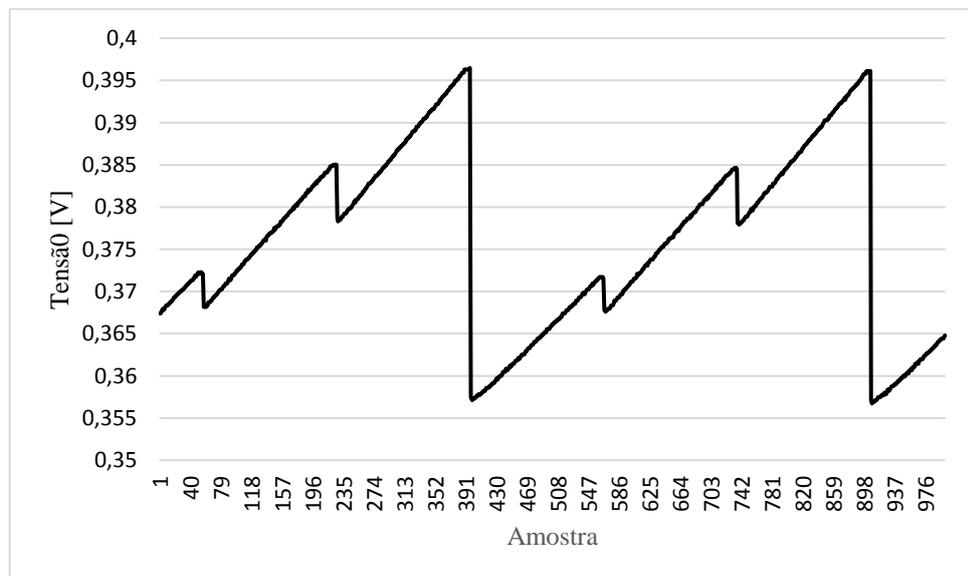
- 1- Medição da tensão aplicada entre os terminais.
- 2- Medição da tensão com ação apenas do JFET.

3- Medição da tensão com ação do JFET, e alterando a resistência em paralelo através de chaveamento.

O caracterizador foi colocado juntamente com o conjunto de geração de energia ao invés da fonte de tensão, realizando medições no sistema. Na Figura 26 é mostrado exemplificação do resultado neste tipo de conjuntura. Variando os resistores atuantes através do chaveamento e incrementando o valor do JFET, pode-se notar faixa continua de abrangência, sem picos elevados ao trocar os relés ou saturações no limite possível de cada resistor. Durante o experimento foi notado que as primeiras medições, lidas através do conversor analógico digital, foram divergentes do esperado. Assim, optou-se pelo descarte de uma amostra inicial e utilizar média de pontos seguintes. Nesta aquisição, para cada ponto, foram descartadas as 6 primeiras medições, e feito a média dos próximos 12 seguintes, porém a quantidade de medições descartadas ou utilizadas para a média foi incrementada ao realizar os experimentos envolvendo a busca pelo ponto de maior potência.

O transistor de efeito de campo, como visto anteriormente se comporta como um resistor ao incrementar seus valores, alterando o resultado final, sendo exemplificado na Figura 26. Assim pode-se dizer que é possível encontrar o melhor ponto de resistência através de modelagem dos resistores para abranger determinados valores.

Figura 26 - Variação da tensão medida ao variar o valor do JFET e alterar os resistores atuantes



Fonte: Autor.

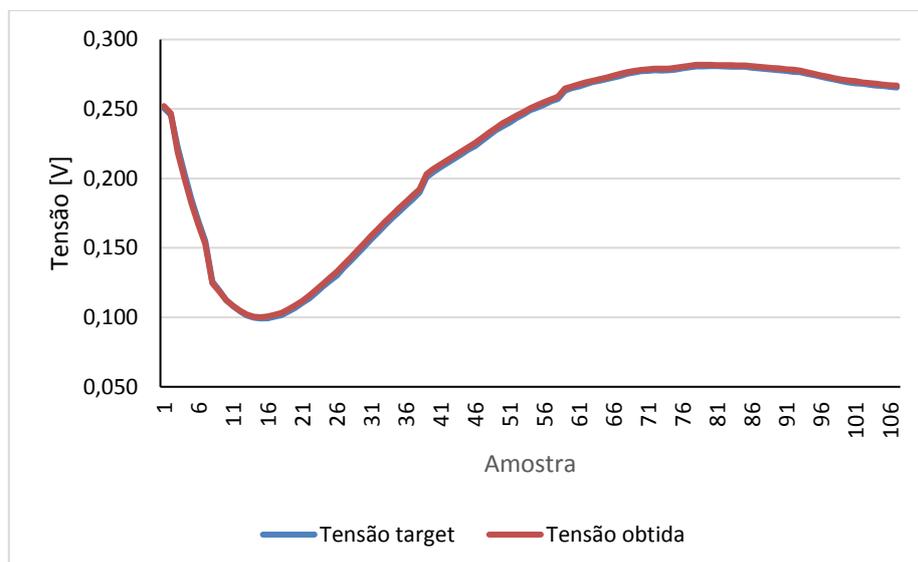
4.3 Testes no módulo de geração termoelétrica

Foram realizados experimentos utilizando fonte de tensão e foi verificado o correto funcionamento do firmware, identificando o histórico da busca pela tensão desejada, dos valores encontrados, além do envio do valor PWM. Então o caracterizador foi incluído ao gerador termoelétrico e às pontes H. Foram realizados testes para apurar o sistema como um todo e após analisado os dados obtidos e confirmado o funcionamento iniciou-se os testes.

4.4 Tensão

Para maior potência, a resistência deve-se igualar a resistência do módulo, assim a tensão nos terminais se torna a metade da tensão medida em aberto. A tensão em aberto é medida pelo caracterizador, que também realiza o cálculo da tensão a ser encontrada considerando as configurações adotadas em relação ao conversor ADC. Posteriormente aos cálculos, é realizado a busca pela tensão. Ao comparar experimentalmente, a tensão medida em relação à tensão de maior potência, pode-se dizer que a tensão encontrada atende as exigências do experimento, levando em conta que foi previsto uma tolerância aceitável dentro da programação. A Figura 27 representa uma exemplificação deste resultado. Notou-se durante experimentos que a tensão *target* e a tensão obtida apresentaram maior diferença ao ocorrer variação brusca de valores de tensão.

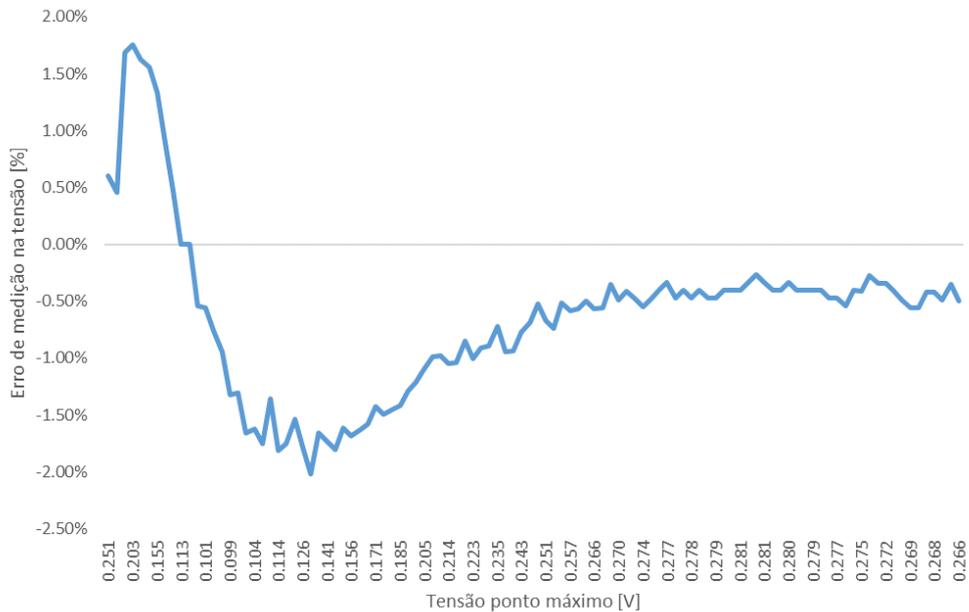
Figura 27 - Gráfico tensão de máxima potência e tensão encontrada no caracterizador



Fonte: Autor.

Na Figura 28, é apresentado a diferença em porcentagem da tensão medida e a tensão desejada para o ponto de maior potência, sendo que no caso de maior diferença (%) foi obtido uma variação de 0,003V.

Figura 28 - Comparação tensão medida e tensão *target* encontrada – Erro %



Fonte: Autor.

Para os testes, variou-se a temperatura de duas maneiras diferentes: alterando a diferença entre as faces fria e quente e também alterando a média de temperaturas.

A obtenção dos dados ocorre de forma rápida, sendo que a maior restrição no experimento envolvendo o tempo é a mudança de temperatura. Para ocorrer alteração, é necessário enviar valor PWM calculado no controlador PID realizado no LabVIEW, entretanto na forma como foi estabelecido a rotina, apenas é enviado novo valor de controle calculado após ter sido encontrado a tensão desejada ou ter ocorrido três tentativas. Esta espera provoca demora no incremento/decremento de temperatura e também é responsável por restrições na temperatura atingida durante os testes. Durante o desenvolvimento do experimento, tentou-se alterar a programação para enviar o sinal PWM com menos espera, porém ocorreram erros de compilação e depuração que precisam ser analisados com mais profundidade.

Os testes realizados envolveram diferentes tipos de temperatura. Foi notado que para situações onde a temperatura da face fria é baixa, sendo menor que 0°C, a modelagem dos

resistores não abrange a tensão *target*, necessitando remodelar os resistores utilizados para abranger caso seja desejado caracterizar dispositivos nessa temperatura.

Na Figura 29 abaixo é colocado gráfico obtido durante experimentos sendo que para encontrar a tensão desejada foram utilizados todos os resistores, com maior ocorrência do resistor que resulta na menor tensão.

Neste experimento foi modificada a temperatura nas duas maneiras (média e diferença), tendo:

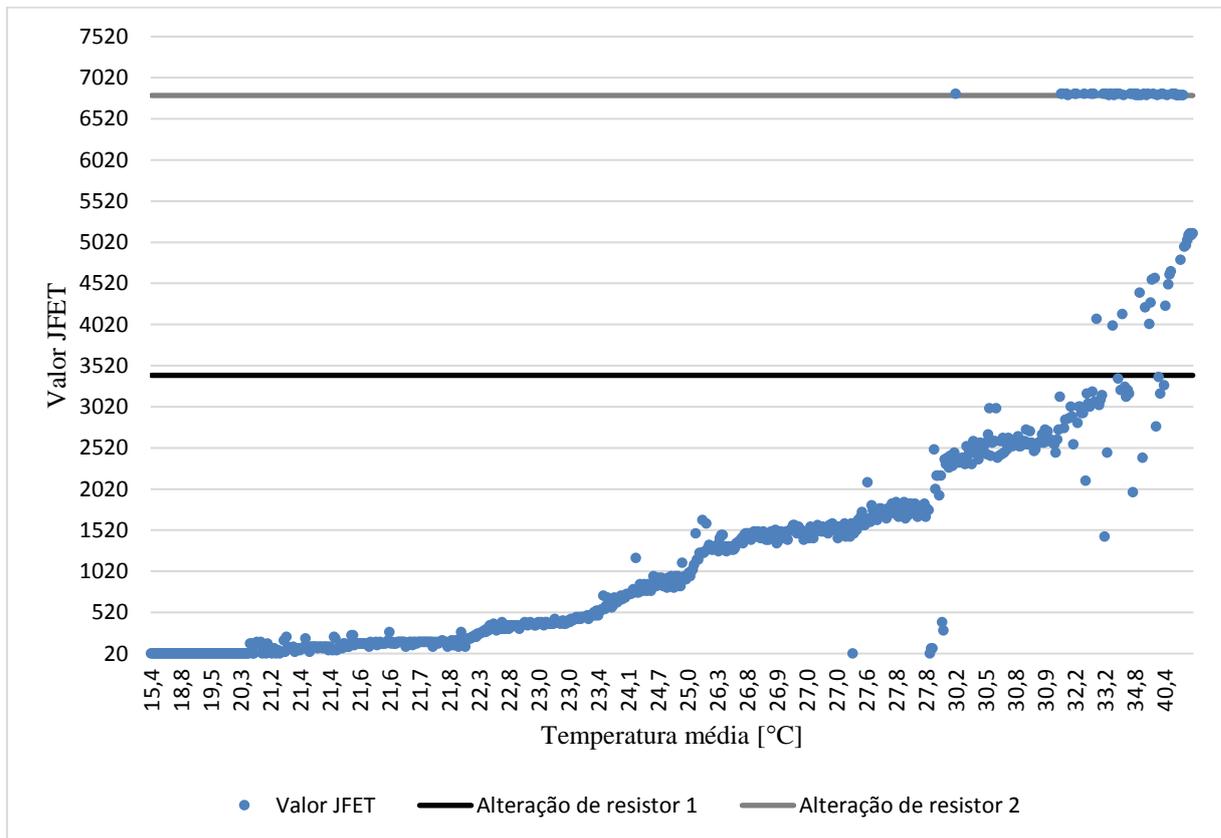
Média máxima: 43,896 °C

Diferença de temperatura máxima: 17,549 °C

Média mínima: 15,436 °C

Diferença de temperatura mínima: 1,007 °C

Figura 29 - Valores digitais do JFET em relação à temperatura



Fonte: Autor.

Na amostragem de dados (Figura 29), foram recebidos os *status* válidos conforme consta na Tabela 6.

Tabela 6 - *Status* válidos encontrados durante experimentos realizados

<i>Status</i> (Hexadecimal)	<i>Status</i> (Binário)	<i>TARGET</i> encontrado	Tentativa Encontrada	Erro JFET na Tentativa	Tensão aberta - tentativa
8	1000	Sim	1	-	-
F	1111	Sim	3	-	1,2
D	1101	Sim	2	-	1
0	0000	Não	-	-	1,2,3
3	0011	Não	-	2,3	1
5	0101	Não	-	1,3	2
6	0110	Não	-	1,2	3
7	0111	Não	-	1,2,3	-

Fonte: Autor.

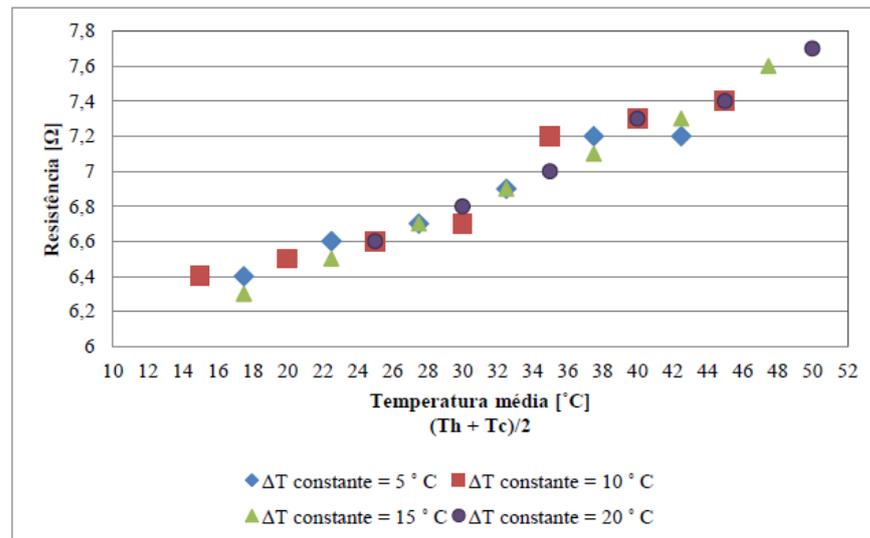
Obteve-se pontos cujos valores desejados não foram encontrados por causa apenas da tensão medida inicial e final, ou seja, variação dos valores ao se realizar a busca (0x0) e nos outros pontos foram encontrados os valores desejado, seja na primeira, segunda ou terceira tentativa. Como fator de maior influência, ocorre a variação da tensão medida em aberto ocasionada pela variação da temperatura entre as duas faces. Isto é explicado devido ao tempo levado para reenviar as informações de controle, podendo induzir variação indesejada no sistema. Nas condições aplicadas, não ocorreu erro ao encontrar a resistência através do JFET e resistores utilizados, podendo dizer que a modelagem atende a esta configuração. É válido notar que não foi possível manter a temperatura em maiores valores devido à restrição citada anteriormente sobre o controle, assim não foi obtido uma quantidade adequada de resultados para os resistores que abrangem tensões mais elevadas.

Nos dados mostrados, foram manipulados os dados de acordo com o relé acionado, ou seja, de acordo com a resistência utilizada em paralelo, levando em conta a faixa de abrangência dos valores digitais. Por software, estipulou-se o ponto de corte do valor enviado ao transistor de efeito de campo em 3402, tendo em vista a saturação ocorrida após este valor. Isto indica a necessidade de alterar a chave acionada ou reiniciar o ciclo. Assim assumiu-se que nos resultados da resistência seria acrescido o valor de ponto de corte de acordo com o chaveamento. É indicado no gráfico em qual faixa de medição esta, teoricamente, o valor correspondente ao resistor que resulta na menor tensão, seguido pelo intermediário e superior.

Pretendia-se verificar as leituras medindo em condições semelhantes feitas por Audiffred (2015), mostrado na Figura 30. É verificado no trabalho do autor que ocorre o aumento da resistência total ao aumentar a temperatura média sendo que o resultado também é em função da diferença de temperatura. Em decorrência do controle de temperatura em

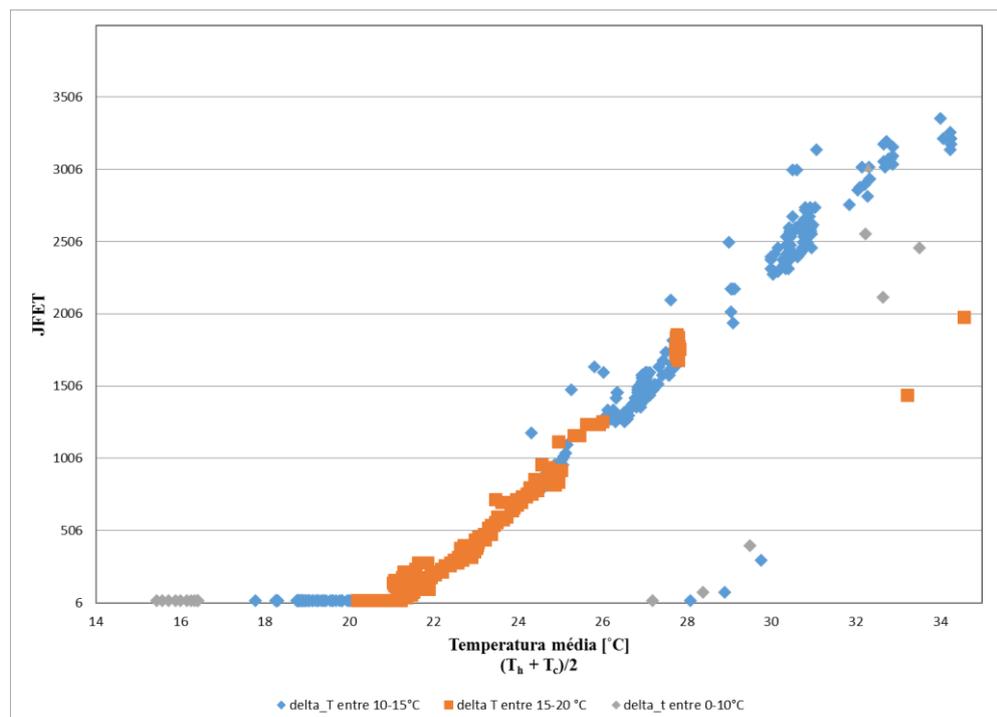
conjunto com a rotina do software, não foi possível manter a temperatura constante para diferentes valores de temperatura, sendo então optado por distinguir as faixas de medição dependendo do intervalo da diferença de temperatura, como mostra na Figura 30.

Figura 30 - Valores de resistência interna do TEG obtidos experimentalmente por Audiffred (2015)



Fonte: Audiffred (2015).

Figura 31 - Valores digitais do JFET obtidos experimentalmente



Fonte: Autor.

Na Figura 31, tem-se o valor da resistência total em função da temperatura média para diferentes variações de temperaturas. Nota-se diferentes resultados para o valor digital do JFET para os intervalos de temperaturas em torno de 34°C. Outras diferenças são percebidas, porém não são significativas. É necessária uma análise mais detalhada do motivo pelo qual para uma temperatura apresenta diferentes valores de JFET sendo que o aumento do valor não é sequencial de acordo com o intervalo.

Percebe-se a tendência de aumento do valor do JFET ao incrementar a temperatura média (Figura 31). É observado no gráfico que os valores encontrados pelo chaveamento que resulta em maiores tensões estão no limite do relé intermediário e superior. Os dados recebidos foram analisados e notou-se que as condições de média e diferença de temperatura eram semelhantes. Ao verificar o *status* é possível notar que quando o chaveamento superior é acionado não se obtêm resultado (valor *target*) na primeira tentativa devido ao acontecimento de erro. O *status* indica que o motivo por não ter encontrado foi divergência na tensão inicial e final. Agregando esta informação com o fato de ter sido encontrado para temperaturas com média elevada, pode-se dizer que isto ocorreu devido ao controle de temperatura. Vale ressaltar que ao não encontrar o valor *target* devido à tensão inicial e final, é aumentado o intervalo de tolerância que será considerado para a próxima tentativa e por outro lado, se não encontra o valor a ser enviado ao JFET para atingir a temperatura, é diminuído o incremento, para fazer uma busca mais detalhada.

5. CONCLUSÃO

No trabalho foi proposto automatizar um sistema caracterizador, utilizando um circuito elétrico e através de variações digitais, conseguir encontrar o ponto de maior potência. Por meio de testes experimentais utilizando tanto fonte de tensão como o próprio caracterizador, foi possível encontrar valores que atendam a premissa da tensão de maior potência, aplicando diferentes tipos de temperaturas nas faces em contato com o TEG.

A modelagem dos resistores permitiu um ponto de partida para a execução dos testes, e os utilizados foram adequados para os valores de temperatura (intervalo e média) aos quais foram submetidos. Os resistores, em conjunto com o JFET, abrangeram quase todo o intervalo de resistência total encontrada por Audiffred (2015), tendo como base a temperatura média nos experimentos realizados pelo autor. É provável que o dispositivo atendesse os valores mais elevados, tendo em vista a tendência, porém não foi possível realizar nesta condição por causa do controle PID em conjunto com o código desenvolvido, demorando mais que o aceitável para enviar o próximo sinal do controle. No experimento foi possível atingir uma faixa de abrangência maior de temperaturas por causa do modo de resfriamento, resultando em temperaturas diferentes da utilizada nos testes de Audiffred (2015), neste caso foi verificado que a tensão *target* não é encontrada para temperaturas médias menores. É necessário utilizar outros resistores para abranger temperaturas mais baixas. O valor do resistor pode ser encontrado utilizando a planilha que está nos apêndices.

Nos dados obtidos, foram notados eventuais erros de comunicação entre o microcontrolador e o LabVIEW, não enviando todos os bytes previstos. Foi verificado que o protocolo estabelecido foi adequado para as informações necessárias a serem utilizadas do caracterizador e que está funcionando corretamente. O *status* se mostrou fundamental para verificar qual foi a situação de determinado teste e se o resultado desejado foi atingido ou não. Caso não tenha sido, foi possível identificar qual o fator que provocou falha nas três tentativas.

O transistor de efeito de campo comportou-se de maneira linear, como considerado no início do trabalho e foi fundamental para o desenvolvimento dos testes. Através do JFET foi possível encontrar diferentes valores de resistência equivalente que correspondem à resistência do dispositivo gerador termoelétrico, obtendo a tensão desejada de uma maneira sistemática. Uma das vantagens da utilização do sistema é a possibilidade de se obter um

maior número de amostra em comparação ao processo manual, permitindo caracterizar para diferentes condições em diferentes dispositivos. Pode-se comparar, por exemplo, com o resultado de Audiffred (2015) onde foram obtidos 26 pontos de máxima potência entre temperatura média de 14°C à 50°C de modo manual (potenciômetro, multímetro), sendo que no presente trabalho pode-se obter de forma automática, alterando os valores de temperatura através no LabVIEW, 738 amostras válidas entre 15°C e 37°C, possibilitando uma melhor caracterização.

Pode-se concluir que dispositivos tendo como base a configuração do experimento, utilizando o transistor de efeito de campo e alternância de resistências, são adequados para realizar a caracterização de dispositivos termoeletricos, tendo a liberdade da aplicação de temperatura das faces em contato com o TEG, e podendo abranger uma faixa contínua de valores.

Tendo como continuação do trabalho, a caracterização do circuito automatizador torna-se necessária para verificar o comportamento do circuito como um todo ao invés do transistor de efeito de campo somente. Esta caracterização pode ser feita com um circuito RLC ou utilizando estimar através dos dados apresentados das figuras 25 e 26. Assim, seria possível caracterizar o módulo termoeletrico propriamente dito.

Como sugestão para trabalhos futuros, é proposto otimizar a programação do microcontrolador, em conjunto com o controle de temperatura PID para conseguir manter ou alterar a temperatura de forma eficiente. Tentou-se colocar a parte da comunicação inteiramente como resposta a uma interrupção, porém houve problema na execução de código, chegando invariavelmente em uma condição de exceção.

Ainda com propósito de trabalhos futuros, pode ser citado que uma melhoria na forma de encontrar o valor digital do JFET, implementando um controle para identificar qual resistor deve ser acionado e o valor. Acredita-se que ao aperfeiçoar a interface do código com o controle, diminui-se o intervalo de envio de um novo dado de controle, sendo possível realizar experimentos para médias mais altas e assim, utilizar os resistores modelados. Este controle pode utilizar as informações contidas no byte de *status* para gerar informações sobre a confiabilidade dos dados obtidos.

Nos experimentos, foi verificado que os resistores utilizados não atendem temperaturas mais baixas que as testadas no trabalho de Audiffred, e agora conseguidas

utilizando o banho térmico, assim, sugere-se remodelar o circuito, utilizando mais resistores que abrangeriam um intervalo maior de temperaturas, para cima e para baixo.

Uma outra proposta é integrar a leitura dos termopares no microcontrolador, de forma a não haver a necessidade de um equipamento externo para este fim, inclusive tornando o controle da temperatura feito pelo software em LabVIEW dispensável. Contudo seria necessário avaliar a precisão obtida nestas medições, já que teriam erros inerentes superiores ao do equipamento utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANATYCHUK, L. I. On the discovery of thermoelectricity by Volta Journal of Thermoelectricity. *Journal of Thermoelectricity*, v. 2, p. 5-10, 2004. Disponível em: <http://bookbootusers.co.uk/Anat_P2.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

ALMEIDA, C. H. A. *Caracterização de célula termoelétrica para geração de energia elétrica*. 2015. Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/7554/2/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

ANDO Jr., O. H., *et al.* Acquisition and monitoring system for TEG characterization. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/531516/>>. Acesso em: 17/07/2016.

AUDIFFRED, D. B. S. Utilização de dispositivos termoelétricos para geração de energia elétrica em nanosatélites. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/133965>>. Acesso em: 17/07/2016.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. vol. 1, 2a edição. LTC: 2010.

BELL, L. E. Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems. *Science*, p. 1457-1461, 2008. Disponível em: <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/Science%203_1.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

CALTECH. Brief History of Thermoelectrics. 2016. Disponível em: <<http://thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>>. Acesso em: 17/07/2016.

CHALASANI, S.; CONRAD, J. M. A survey of energy harvesting sources for embedded systems. Proceedings of IEEE SoutheastCon 2008, Huntsville, AL, 2008, pp. 442-447. doi: 10.1109/SECON.2008.4494336. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsptp=&arnumber=4494336&isnumber=4494235>>. Acesso em: 17/07/2016.

CURTIS, D. J. *Process Control Instrumentation*. Pearson: 2014.

DALOLA, S., *et al.* Characterization of thermoelectric modules for powering autonomous sensors. *Instrumentation and Measurement*, v. 58, p. 99-107, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4599589>>. Acesso em: 17/07/2016.

FAIRBANKS, J., Automotive Thermoelectric Generators and HVAC, 2013 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. 2013. Disponível em: <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace00e_fairbanks_2013_o.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

FAIRBANKS, J. Thermoelectric applications in vehicles status 2008. *US Department of Energy*. 2008. Disponível em: <<http://ect2008.icmpe.cnrs.fr/Contributions/0-PL-00-Fairbanks.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

GARZON, M M. Development and Analysis of the Thermal Design for the OSIRIS-3U Cubesat. 2012. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeroespacial, The Pennsylvania State University, University Park, 2012. Disponível em <<https://etda.libraries.psu.edu/catalog/15404>>. Acesso em: 17/07/2016.

GOUPIL, C. et al. Thermodynamics of thermoelectric phenomena and applications. *Entropy* 13.8 (2011): 1481-1517.

HE, W. *et al.* Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, v. 143, p. 1-25, 2015. Disponível em: <http://ac.els-cdn.com/S0306261914013324/1-s2.0-S0306261914013324-main.pdf?_tid=15b919f8-20df-11e6-9db5-00000aacb35d&acdnat=1464005499_268072fcaef2edca67f663cdb03f1fb7>. Acesso em: 17/07/2016.

HIGA, M. L.; DALIA M. T.; LORD, S. M. An introduction to LabVIEW exercise for an electronics class. *Frontiers in Education*, v. 1, 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1157905>>. Acesso em: 17/07/2016.

HILLER, N. D. Thermoelectric power generation using aircraft fuselage temperature differential. U.S. Patent No. 8,973,377. 2015. Disponível em: <<http://patents.justia.com/patent/8973377#history>>. Acesso em: 17/07/2016.

LAMONICA, M. Nuclear generator powers Curiosity Mars mission. 2012. Disponível em: <<https://www.technologyreview.com/s/428751/nuclear-generator-powers-curiosity-mars-mission/>>. Acesso em: 17/07/2016.

MAOZ, B. Voltage variable FET resistor with chosen resistance-voltage relationship. U.S. Patent No. 4,864,162. 05/09/1989. Disponível em: <<https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4864162.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

MAXIM INTEGRATE. MAX1300/MAX1301 8- and 4-Channel, $\pm 3 \times V_{REF}$ Multirange Inputs, Serial 16-Bit ADCs. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1300-MAX1301.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

MAZAR, B. "State of the art prototype vehicle with a thermoelectric generator." TE Application Workshop, Baltimore, March. 2012. Disponível em: <<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/mazar.pdf>> . Acesso em: 19/07/2016.

OLIVEIRA, K. S. M. *Avaliação numérica do desempenho termodinâmico de células termoelétricas*. 2014. Disponível em: <

http://www.pgmeec.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_149_klaudio_santos_marcondes_de_oliveira.pdf >. Acesso em: 17/07/2016.

RAGHUNATHAN, V.; CHOU, P. H. Design and Power Management of Energy Harvesting Embedded Systems. Proceedings of International Symposium on Low Power Electronics and Design, Tegernsee, 2006, pp. 369-374. doi: 10.1109/LPE.2006.4271870. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4271870&isnumber=4271789>>. Acesso em: 17/07/2016.

ROWE, D. M. *Handbook of thermoelectrics*. CRC press: 1995.

SILVA, S. F. C. *Aplicação de novos materiais em transistores de efeito de campo ferroelétricos*. 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/3651>>. Acesso em: 17/07/2016.

SILVA, F. C. Estimador e caracterizador de consumo de energia para software embarcado. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, 2011. Disponível em: <http://www.ppgee.ufam.edu.br/attachments/article/8/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Francisco_Silva.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

SLONGO, L. K. Circuitos coletores de energia solar para sistemas embarcados de baixo consumo. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/122917/323183.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17/07/2016.

SNYDER, G.; JEFFREY; TOBERER, E. S. Complex thermoelectric materials. *Nature materials*, v. 7, p. 105-114, 2008. Disponível em: <<http://www.nature.com/nmat/journal/v7/n2/pdf/nmat2090.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

SOUZA, V. A. *Artigo sobre o LabVIEW*. 2006. Disponível em: <http://www.cerne-tec.com.br/artigo_labview.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

STABLER, F. Automotive thermoelectric generator design issues. *Thermoelectric applications workshop*, Future Tech LLC. 2009. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2009/wednesday/stabler.pdf>. Acesso em: 17/07/2016.

TEXAS INSTRUMENTS. *Tiva TM4C123GH6PM Microcontroller*. 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

VISHAY SILICONIX. *FETS As Voltage-Controlled Resistors*. 1997. Disponível em: <<http://www.vishay.com/docs/70598/70598.pdf>>. Acesso em: 17/07/2016.

VON LUKOWICZ, M., et al. "Characterisation of TEGs Under Extreme Environments and Integration Efforts Onto Satellites." *Journal of Electronic Materials* 44.1 (2015): 362-370. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11664-014-3206-2>>. Acesso em 17/07/2016.

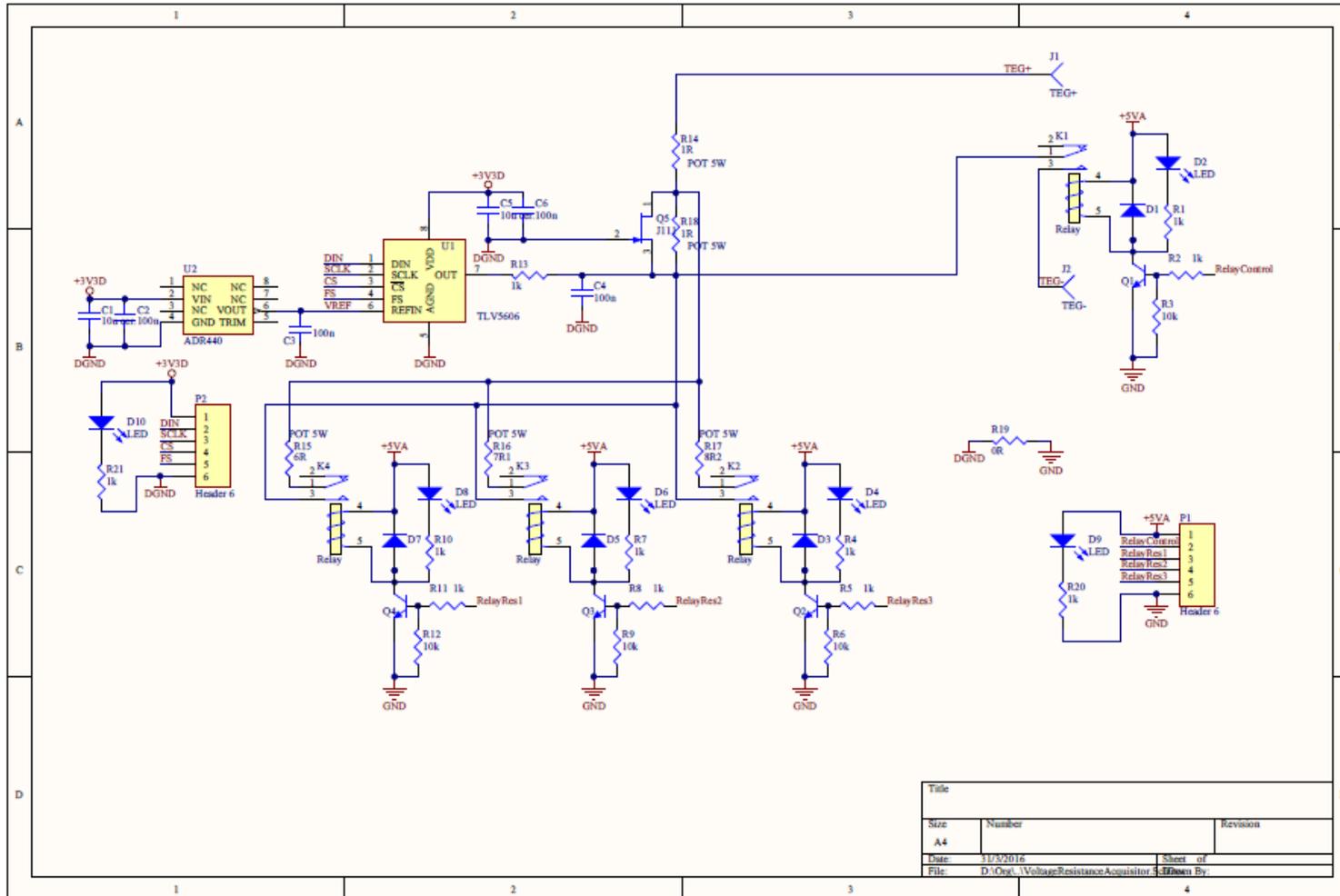
WOOD, L. Global Thermoelectric Generator Market Worth US\$ 720 Million by 2021 - Breakthrough Properties like Scalability, Zero Maintenance & Absence of Moving Parts - Research and Markets. 2016. Disponível em: <<http://www.businesswire.com/news/home/20160509005855/en/Global-Thermoelectric-Generator-Market-Worth-720-Million>>. Acesso em: 17/07/2016.

XI, H.; LUO L.; FRAISSE G. "Development and applications of solar-based thermoelectric technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11.5 (2007): 923-936. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000663>>. Acesso em: 17/07/2016.

ZERVOS, H. Thermoelectric Energy Harvesting 2014-2024: Devices, Applications, Opportunities. *Energy Harvesting Report*. 2014. Disponível em: <<http://www.prnewswire.com/news-releases/thermoelectric-energy-harvesting-2014-2024-devices-applications-opportunities-300220918.html>>. Acesso em: 17/07/2016.

ZERVOS, H. Thermoelectric Generators: A \$750 Million market by 2022, *Energy Harvesting Journal*. 2012. Disponível em: <<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/thermoelectric-generators-a-750-millionmarket-by-2022-00004631.asp?sessionid=1>>. Acesso em: 17/07/2016.

APÊNCIE A – Circuito elétrico do dispositivo automatizador



APÊNCIE B – Código desenvolvido para a automatização da medição e envio do controle de temperatura.

```

/*Julho, 2016
* Mayara P. Becker
*
*
* Rotina para encontrar o condicao de maior potencia do dispositivo termoeletrico
e enviar valor do PWM
*
*
* Pino #: pino do hardware
*
* CONVERSOR DAC TLV5616
* Pin #    TLV      Tiva
* 1        3v3
* 2        Din      PF1
* 3        SCLK     PF2
* 4        ~CS      Terra
* 5        FS       PB1
* 6        DGND     GND
*
*
* CONVERSOR ADC MAX 1301
* PIN #    Maxi     Tiva
* 1        V+
* 2        V-
* 3        -
* 4        -
* 5        ~CS      PA7
* 6        DIN      PA5
* 7        SSTRB    PA6
* 8        SCLK     PA2
* 9        3V3
* 10       Dout     PA4
* 11       Ground
* 12       5V
*
*
* Reles
* 1 5V
* 2 Rcon  PB2
* 3 Relay1 PB5
* 4 Relay2 PB4
* 5 Relay3 PB3
* 6 GND
*
*
* PWM      Tiva      Tiva
* 1        PB7      M0PWM0

```

```

2      PB6 M0PWM1
*
*/

#include "public.h"
#include "global_variables.h"
//
//

int main(void);
void PWM_send_value(uint16_t channel, uint32_t valuePWM1); //para enviar valor ao
PWM
void iniSystem(void); //inicialização do sistema
void UARTIntHandler(void); //recebe os dados do PWM para ser enviado
void init_measurement(uint8_t modeOperation); //chamado pelo main() para começar a
medição
void GPIOAIntHandler(void); //not used
void UARTIntHandler2(void); //not used
void writeDAC_jfet(uint16_t valor); //escreve o valor do JFET no conversor digital
analógico
void relayOnOff(uint16_t relayNumber, uint16_t relayONOFF); //aciona/desliga o rele
relayOnOff(3,0xFF) indica "ligar, rele 3)

uint8_t setgStatus(void); //caso o valor da tensão tenha sido encontrado, é
chamado esta função para definir qual o status
uint16_t jfet_adjust(uint16_t V_Target1); //chamada pela init_measurement para
encontrar o valor JFET que atingi a tensão desejada
uint16_t read_VA(); //realiza a leitura da tensão em aberto
uint32_t ADC_get_value(void); //função para ADC

int main(void)
{
    //gStatus 0:
    //sem erro ; 1:com erro- Rjfet nao encontrado; 2:com erro-valor inicial
<>valor medido em aberto;
    //ocorrencias de erro na terceira tentativa

    gStatus=0;
    SysCtlClockSet(SYSCTL_SYSDIV_2_5 | SYSCTL_USE_PLL | SYSCTL_XTAL_16MHZ |
SYSCTL_OSC_MAIN); //System clock: 80MHz //NAO MEXER

    iniSystem();
    writeDAC_jfet(2046);

    while(1)
    {

        if(startMedicao)
        {

```

```

    startMedicao=0;
    dataReceiveduartHandler[0]=0; //dados recebidos pelo LabVIEW: lixo
    dataReceiveduartHandler[2]=0; //dados recebidos pelo LabVIEW: lixo

    dataPWM1=dataReceiveduartHandler[0]<<8|dataReceiveduartHandler[1];
    dataPWM2=dataReceiveduartHandler[2]<<8 |dataReceiveduartHandler[3];

    PWM_send_value(1,dataPWM1);
    PWM_send_value(2,dataPWM2);

    FAULTjfet=0;
    FAULTva=0;

    init_measurement(1); //init_measurement(modos)
}

}

}

void writeDAC_jfet(uint16_t valor){
    //envia valor ao conversor DAC

    uint16_t auxiliar;

    auxiliar=valor+0x4000;

    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/3000000)); //10us
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1, 0x00); //FS

    SSIDataPutNonBlocking(SS11_BASE, (auxiliar>>8) );
    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/3000000)); //10us
    SSIDataPutNonBlocking(SS11_BASE, (auxiliar & 0x00FF) );

    while(SSIBusy(SS11_BASE)){
        GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1, 0xFF); //FS
        SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/3000000)); //10us
    }

}

void PWM_send_value(uint16_t channel, uint32_t valuePWM1)
{
    //envia valor do PWM a ponte H

    //channel 1: PB6
    //channel 2: PB7
    uint32_t loadPWM3;

    if ((valuePWM1 > 250)|| (valuePWM1<5))
        loadPWM3 = 2000;
    else
        loadPWM3 = valuePWM1;
}

```

```

if (channel==1)
{
    //PB6 M0PWM0
    //PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, valuePWM1 * loadPWM3 / 1000);
    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, loadPWM3*16);
}

else if(channel==2)
{
    //PB7 M0PWM1
    //PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, valuePWM1 * loadPWM3 / 1000);
    PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, loadPWM3*16);
}
}

void relayOnOff(uint16_t relayNumber,uint16_t relayONOFF)
{
    //primeiro argumento indica qual relé (0,1,2,3) e o segundo indica se estará
    aberto (0) ou fechado (0xFF)
    //relé 0 é o de controle
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[relayNumber], relayONOFF);
    SysCtlDelay((SysCtlClockGet())/300);
}

uint16_t jfet_adjust(uint16_t V_Target1)
{
    //Funcao para incrementar o valor do JFET e verificar se a tensao target foi
    encontrada com a carga
    //caso tenha sido, sai da funcao
    //Caso não tenha sido encontrado, diminui o valor de incremento do JFET.
    //variaveis de controle interno e status são manipulados
    //retorna valor de JFET
    //retorna 0 caso não tenha sido encontrado

    uint16_t jFETvalue;

    uint8_t loopJFET;
    uint8_t changeRelay;
    uint16_t relayNumberON;
    uint16_t relayNumber1OFF;
    uint16_t relayNumber2OFF;
    uint16_t qty_jfet_cycle;

    //function to adjust the jfet value
    jFETvalue=0;
    changeRelay=0;
    relayNumberON=gPosition;
    relayNumber1OFF=gRelayOFF1;
    relayNumber2OFF=gRelayOFF2;
    loopJFET=1;
    qty_jfet_cycle=0;

    sumSamples=0;
    gControlJFETincrement=0; //zera variavel de controle para ajustar o
    incremento. Caso =1, divide o atual incremento por 2

```

```

while (loopJFET)
{
    //entra no loop a fim de encontrar o valor do JFET que se encontra com a
    tensão target. Sai do loop caso tenha sido encontrada, ou atingiu 3 tentativas.

    if(gControlJFETincrement)
    { //gControlJFETincrement=1 indica erro no JFET e irá diminuir o
    incremento

        gJFETincrement=gJFETincrement/2;
        if(gJFETincrement<=0) gJFETincrement=1;

        gControlJFETincrement=0;

    }
    //increment jFET value
    jFETvalue=jFETvalue+gJFETincrement;

    //check if it is over 12bits (DAC)
    //valor 0xD40 definido através de experimentos, após isto, satura
    if (jFETvalue>0xD40)
    {
        //se for maior que o valor máximo do JFET, retorna ao valor do JFET
        inicial, habilita variavel que indica
        //necessidade de alterar rele, verifica se foi realizado ciclo
        completo.
        //nesta configuração, rele com menor valor=rele 2, rele com maior
        valor de resistência=rele 1,
        //e um ciclo representa quando é necessário mudar de rele e o rele
        ligado é o 1.

        jFETvalue=3;
        changeRelay=1;
        if(relayNumberON==1) //rele 1 é o ultimo do ciclo (valores
        crescentes)
        {
            qty_jfet_cycle=1;//alterar nome da variavel e testar
        }
    }

    //if it is over 12bits, change relay //rele 0 = control relay
    if (changeRelay)
    {
        //-----
        -----

        //rotina para troca de reles

        relayNumberON++;
        relayNumber1OFF++;
        relayNumber2OFF++;

        if (relayNumberON>3) relayNumberON=1;
        if (relayNumber1OFF>3) relayNumber1OFF=1;
        if (relayNumber2OFF>3) relayNumber2OFF=1;

        relayOnOff(relayNumber1OFF,0);
    }
}

```

```

relayOnOff(relayNumber2OFF,0);
relayOnOff(relayNumberON,0xFF);
//-----

```

```

changeRelay=0;

```

```

}

```

```

gPosition = relayNumberON;
writeDAC_jfet(jFETvalue);

```

```

//-----

```

```

//descarta primeira amostras
//sumSamples=0;
avgSamples=0;
uint8_t ii5;

```

```

//while(qtySamples!=qtySamplesTarget)
for (ii5=N_amostras_V_out; ii5>0; ii5--)
{
    gV_measured=ADC_get_value();
}

```

```

//utiliza amostras para media
//while(qtySamples!=qtySamplesTarget)
for (ii5=N_amostras_V; ii5>0; ii5--)
{
    gV_measured=ADC_get_value();
    sumSamples+= gV_measured;
}

```

```

//valores medidos
avgSamples=sumSamples/N_amostras_V;
sumSamples=0;

```

```

//verifica se o valor de tensao medido esta dentro do esperado.
//if (V_measured==V_Target1)
if (V_Target1-0x040< avgSamples && V_Target1+0x040>avgSamples)
{
    //valor target encontrado
    loopJFET=0; //sai do loop de procura
    FAULTjfet=0; // FAULTjfet=0 - sem erro
    gV_measured99=avgSamples; //set valor medido
}

```

```

else
{
    //valor não encontrado
    //verifica se atingiu o numero de tentativas
    //loopJFET=1; continua no loop
    gV_measured99=avgSamples;

    if(g_tentatives==N_tentatives)
    {
        //numero de tentativas atingidas
        FAULTjfet=1;
        loopJFET=0; //break the loop
        jFETvalue=0xFFF; //meaning value not found
    }
}

```

```

        gReleError=0;
        gControlJFETincrement=0;
    }

    else if(qty_jfet_cycle)
    { //qty_jfet_cycle indica se um ciclo de varredura foi completado.
      //aumenta o número de tentativas
      //set para 1 a variavel de controle, indicando apra diminuir o
incremento do JFET
      //altera a variavel de status

      //se todos os valores de JFET foram testados (qty_jfet_cycle=1) e
target não encontrado
      //aumenta o numero de tentativas
      g_tentativas++;
      gControlJFETincrement=1; //diminuir o range

      FAULTjfet=1; //valor jfet nao encontrado
      loopJFET=1; //continua no loop

      gReleError=0;
      qty_jfet_cycle=0; //jfetCompletedLoop=0; //todo change variable
name and test

      gStatus=(gStatus<<1)+1;

      gqtyJFETnok++;
      gqualJFETnok=gStatus; //notused now
    }
}

return(jFETvalue);
//alem deste retorno, variaveis globais sao alteradas, de controle e também de
medida.
}

uint16_t read_VA()
{
    //funcao para realizar a leitura da tensão em aberto. Abre o rele de controle
(relayn[0])
    //realiza N_amostrad_V_out para descarte
    //realia N_amostras_VA para realizar a média da tensão aberta
    //fecha o rele de controle
    //retorna o valor de tensão medido.

    uint32_t VA_value_sum;
    uint16_t VA_value;
    uint8_t j1;

    VA_value_sum=0;

    //rele control OFF
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[0], 0x00);
    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/1000));
}

```

```

//realiza leituras da tensão em aberto
for (j1 =N_amostras_V_out; j1 > 0; j1--)
{
    VA_value=ADC_get_value();
}

for (j1 = N_amostras_VA; j1 > 0; j1--)
{
    VA_value=ADC_get_value();
    VA_value_sum+=VA_value;
}

VA_value = VA_value_sum / N_amostras_VA;

GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[0], 0xFF); //rele control on

//rele control OFF
return VA_value;
}

void init_measurement(uint8_t modeOperation)
{
    //chamada pela main()
    //faz a primeira leitura da tensão aberta.
    //verifica se a tensão target esta entre o máximo e o mínimo da abrangência do
hardware (resistores e JFET)
    //caso esteja, entra em JFET_adjust
    //caso não, verifica novamente a tensão.
    //ao retorno do JFET_adjust, verifica a tensão aberta, esteja parecida, fim do
loop. Caso não, aumenta
    //a tolerância desta comparacao e reinicia o ciclo.

    uint16_t VA_initial;
    uint16_t V_target;

    uint16_t VA_actual;
    uint16_t jfetValue;

    uint8_t qty_VA_nok;
    uint8_t i4;

    qty_VA_nok=0;
    modeOperation=1; //todo change to mode one shoot in the protocol

    uint8_t loop_VA;
    loop_VA=1;
    gStatus=0;
    g_tentatives=0;

    uint16_t avgSamples99;
    uint32_t sumSamples99;
    gPosition=2;

    gqtyJFETnok=0;

```

```

gqtyVAnok=0;
gqualJFETnok=0;
gqualVAnok=0;

```

```

gControlVAtolerance=0; //variavel de controle quando se deve aumentar o
intervalo de comparacao entre a tensao inicial/final em aberto. Será =1 quando as
tensas em abertos nao forem parecidas

```

```

gControlJFETincrement=0; //variavel de controle quando se deve diminuir o
incremento do JFET. Ocorrerá =1 quando nao for necontrado JFET que resulte em
tensao parecida

```

```

gJFETincrement=JFETinitialIncrement;
gVAtolerance=VAinitialTolerance;

```

```

while (loop_VA)
{

```

```

    FAULTjfet=0;
    FAULTva=0;

```

```

    sumSamples99=0;
    avgSamples99=0;

```

```

    //DAC //0x000 = -6 //0x7FFF= 0 //0xFFFF =+6
    //Leitura valor aberto inicial
    //mede a tensão em aberta atual
    VA_initial = read_VA();

```

```

    //Define o valor de tensão a ser encontrado (metade do medido em aberto)
    V_target = ((VA_initial-0x8000)/2)+0x8000; //positive values

```

```

    //-----
    //medição no ponto mínimo
    //Configuração atual - liga rele 2

```

```

    relayOnOff(2,0);
    relayOnOff(3,0);
    relayOnOff(1,0);

```

```

    relayOnOff(2,0xFF);
    relayOnOff(3,0);
    relayOnOff(1,0);

```

```

    //envia dado ao JFET
    writeDAC_jfet(0x003); //envia novo valor ao jfet

```

```

    //medições para serem descartadas
    for (i4 = N_amostras_V_out; i4 >0; i4--)
    {
        gV_measured99=ADC_get_value();
        //sumSamples= sumSamples+ gV_measured;
    }

```

```

    //medições para realizar média
    for(i4=N_amostras_Vmin ;i4>0; i4--)
    {
        gV_measured99=ADC_get_value();
        sumSamples99+=gV_measured99;
    }

```

```

}

//valor mínimo encontrado
avgSamples99= sumSamples99/N_amostras_Vmin;
gV_min=avgSamples99;

//zera variáveis
sumSamples99=0;
avgSamples99=0;

//-----
//medição no ponto máximo
//rele 1
relayOnOff(1,0xFF);
relayOnOff(2,0);
relayOnOff(3,0);

writeDAC_jfet(0xD40); ////envia novo valor ao jfet
//medições para serem descartadas
for (i4 = N_amostras_V_out; i4 >0; i4--)
{
    gV_measured99=ADC_get_value();
    //sumSamples= sumSamples+ gV_measured;
}

//medições para realizar a média
for(i4=N_amostras_Vmax ;i4>0; i4--)
{
    gV_measured99=ADC_get_value();
    sumSamples99+=gV_measured99;
}
//valor máximo encontrado
avgSamples99= sumSamples99/N_amostras_Vmax;
gV_max=avgSamples99;

//zera variáveis
avgSamples99=0;
sumSamples99=0;

//-----

//-----
---
sumSamples99=0;
avgSamples99=0;

//aciona o rele que estava ligado, e verifica quais devem estar
desligados.
if(gPosition)
{
    relayOnOff(gPosition,0xFF);
}

if (gPosition==3)
{
    relayOnOff(1,0);
    relayOnOff(2,0);
}

```

```

}

if (gPosition==2)
{
    relayOnOff(1,0);
    relayOnOff(3,0);
}

if (gPosition==1)
{
    relayOnOff(2,0);
    relayOnOff(3,0);
}

else
{
    relayOnOff(2,0);
    relayOnOff(1,0);
    relayOnOff(3,0);

    relayOnOff(2,0xFF);
    relayOnOff(1,0);
    relayOnOff(3,0);
}

//verifica se é necessario alterar o range de comparacao entre as tensoes
abertas (final / inicial)
if(gControlVAtolerance)
{//testa se aconteceu fault no VA (gControlVAtolerance=1) e então aumenta
o intervalo.
    gVAtolerance=gVAtolerance*2;
    gControlVAtolerance=0;
}

//verifica se os valores de tensão na faixa do jfet abrange o desejado.
Caso sim, entra na funcao para encontrar qual calor. Caso nao, define atualiza o
status e aumenta
// o numero de tentativas.
if((gV_max+0x0020)>= V_target && V_target>= (gV_min-0x0020))
{
    //entra na rotina para ajustar o JFET
    //retorna o valor do JFET.
    jfetValue=jfet_adjust(V_target);
}

else
{
    FAULTjfet=1;
    g_tentativas++;
    gStatus=(gStatus<<1)+1;
}

//mede a tensão em aberta atual
VA_actual = read_VA();

//entra no loop se nao ocorreu erro ao encontrar o JFET
if(!FAULTjfet)
{ //se não tiver erro no jfet, se o jfet tiver sido encontrado

```

```

//verifica se a tensão aberta inicial confere com a medida
posteriormente (VA_actual)

    if (VA_actual <VA_initial+gVAtolerance && VA_actual >(VA_initial-
gVAtolerance))
    {
        //se confere, sai do loop e o status não tem erro por leitura de
VA.
        loop_VA=0;
        gStatus=0;
    }
    else
    {
        // caso contrário, valores não conferem (FAULTva=10) e continua no
loop
        FAULTva=1;
        loop_VA=1; //stay on the loop
        gControlVAtolerance=1; // para aumentar o intervalo de comparacao

        if(!FAULTjfet)
        { //se no JFET não ocorreu falha (se valor foi encontrado),
entao
            //somente o VA (tensao aberta) que nao foi encontrado
            g_tentativas++;
            gStatus=gStatus<<1+0;
        }

        qty_VA_nok++;
        gqtyVANok++;
        gqualVANok=gStatus;

        gControlVAtolerance++; // take out
    }
}

//se o valor de jfet for encontrado e as tensoes em aberto e final foram
similares entra na função
if (!(FAULTjfet | FAULTva))
{ //valor encontrado!
  //se o valor for encontrado

  loop_VA=0; //stop loop and send value

  gStatus=setgStatus();

  //  gStatus=1;
  //  gStatus=gStatus<<N_tentativas;
  //  gStatus=0b00001000;

  //zera variaveis que seriam utilizadas caso encontrasse o valor.
  gqualJFETnok=0; //not used now
  gqualVANok=0; //not used now

  gqtyJFETnok=0;
  gqtyVANok=0;

  //gControlVAtolerance=1;

```

```

}
else if (g_tentativas==N_tentativas)
{
    //valor nao encontrado e numero de tentativas atingido

    loop_VA=0; //stop loop and send value
    gStatus=gStatus & 0b11110111; //se tiver erro gStatus = 0xxx where x
indicates JFET error (1) or VA error(0)
    jfetValue=0x000;

    //armazena último valor da posição do relay
    auxErrorRelayNumber=gPosition;
    gPosition= 0; //set para 0 a fim de indicar erro.

    //zera variaveis que seriam utilizadas caso encontrasse o valor.
    gqualJFETnok=0; //not used now
    gqualVANok=0; // not used now

    gqtyJFETnok=0;
    gqtyVANok=0;
    gControlVAtolerance=1;
}
else
{ //valor da tensao nao foi encontrado / tensao em aberto inicial e
final sao diferentes e nao foi atingido o numero de tentativas previstas.
    loop_VA=1; //continua no loop
}

if(!loop_VA)
{
    //se valor do JFET for encontrado
    //se valor da tensão aberta inicial e final forem parecidas
    //enviar valores
    uint16_t relayPosition_JFETvalue;
    uint16_t testeee;
    relayPosition_JFETvalue = gPosition<<12| jfetValue;
    testeee = relayPosition_JFETvalue>>8;
    //teste11 = gPosition<<4 | jfetValue>>8;

    g_flag1=1;

    g_statusF=gStatus;
    g_relayPosition_JFETvalueF=relayPosition_JFETvalue;
    g_VtargetF=V_target;
    g_VminF=gV_min;
    g_VmaxF=gV_max;
    g_VmedidoF = gV_measured99;

    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_flag1);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_statusF);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, (g_relayPosition_JFETvalueF>>8));
//se igual a FFF indica nao encontrado //gPosition= 0 indica nao encontrado
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, (g_relayPosition_JFETvalueF));
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VtargetF>>8);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VtargetF);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VminF>>8);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VminF);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VmaxF>>8);
}

```

```

    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VmaxF);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VmedidoF>>8);
    UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, g_VmedidoF);

    g_flag1=0;

    if(!gReleError)
    {
        //set a última posição do rele para o jfet
        gPosition=auxErrorRelayNumber;
    }

    gControlJFETincrement=0;
    gControlVAtolerance=0;

}

}

}

uint32_t ADC_get_value(void)
{
    //recebe os valores do conversor analogico digital.
    uint16_t adcvalue;
    uint32_t dataReceivedADC[2];

    // GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, 0x00); //FS
    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/30000)); //3000

    SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0b10000000) );
    SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0x000) );
    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/30000)); //100000
    SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0x000) );
    SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0x000) );

    // GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7,0xFF); //turn ~CS off

    SSIDataGetNonBlocking(SSI0_BASE,&dataReceivedADC[0]);
    SSIDataGetNonBlocking(SSI0_BASE,&dataReceivedADC[1]);

    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/30000)); //testado com delay de
    SysCtlClockGet()/100

    //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, dataReceivedADC[0]);
    //UARTCharPutNonBlocking(UART0_BASE, dataReceivedADC[1]);

    while (SSIBusy(SSI0_BASE)){

}
}

```

```

    adcvalue = dataReceivedADC[0]<<8 |dataReceivedADC[1];

    return adcvalue;
}

uint8_t setgStatus(void)
{
    //funcao para definir o status do caracterizador caso o valor de tensão
    desejada tenha sido encontrada.
    //0b1100 indica que as condições previstas não foram atingidas (ie: verificar
    erro)
    //0b1000 indica que o valor foi encontrado na primeira tentativa.

    /*0b1011 - erro 2x no JFET; encontrou 3a tentativa (a)
    0b1001 - erro na 1a tentativa no JFET; encontrou na segunda (b)
    0b1010 - erro na 1a tentativa do JFET, erro da 2a tentativa do VA; encontrou
    na terceira (c)

    0b1111 - erro 2x no VA; encontrou 3a tentativa (d)
    0b1101 - erro na 1a tentativa no VA; encontrou na segunda (e)
    0b1110 - erro na 1a tentativa do VA, erro da 2a tentativa do JFET; encontrou
    na terceira (f)*/

    uint8_t statusJFET_VA;
    statusJFET_VA=0;
    if(gqtyJFETnok==1)
    { //b,c
        if(gqtyVANok==0)
        {
            statusJFET_VA=0b1001; //b
        }

        else if(gqtyVANok==1)
        {
            statusJFET_VA=0b1010; //c
        }
    }

    else if(gqtyJFETnok==2)
    { //a,f
        if(gqtyVANok==0)
        {
            statusJFET_VA=0b1011; //a
        }

        else if(gqtyVANok==1)
        {
            statusJFET_VA=0b1110; //f
        }
    }

    else if(gqtyVANok==2)
    {
        statusJFET_VA=0b1111; //d
    }
}

```

```

}

else if(gqtyVAnok==1)
{
    statusJFET_VA=0b1101; //h
}

else if(g_tentatives==0)
{
    statusJFET_VA=0b1000; // none error, found first tentative
}

else
{
    statusJFET_VA=0b1100; //protocol error
}

return(statusJFET_VA);
}

void UARTIntHandler(void)
{
    uint32_t ui32Status;
    uint8_t UARTdata;
    uint8_t i5;

    i5=0;
    // Get the interrupt status.
    //ui32Status = UARTIntStatus(UART0_BASE, true);
    // Clear the asserted interrupts.
    ui32Status = UARTIntStatus(UART0_BASE, true);
    UARTIntClear(UART0_BASE, ui32Status);

    //uint8_t index=0;
    // Loop while there are characters in the receive FIFO.
    while(UARTCharsAvail(UART0_BASE))
    {
        dataReceivedUARTCheck=1;
        i5++;

        // Read the next character from the UART and write it back to the UART.
        UARTdata = UARTCharGetNonBlocking(UART0_BASE);
        dataReceiveduartHandler[i5-1]=UARTdata;

        //readDataFrame(UARTdata);
    }

    //caso flag no ultimo bit pela UART alterar; 1 = faz o controle, 0 só envia o
    pwm
    //startMedicao=dataReceiveduartHandler[i5-1];
    startMedicao=1;
}

void iniSystem(void)

```

```

{
    //inicializacao dos perifericos e de algumas variaveis globais

    g_relayn[0] = 0x00000004; //rele de controle
    g_relayn[1] = 0x00000020; //rele 1
    g_relayn[2] = 0x00000010; //rele 2
    g_relayn[3] = 0x00000008; //rele 3

    g_qty=0;

    //PERIPHERALS
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOA); // Enable Port A Peripheral //
SPI 2 - ADC
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOE); // ADC
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOF); // SPI - DAC
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOB); // Relays // PWM PB7 PB6

// _____
//UART
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART0); //Enable UART Peripheral

    UARTConfigSetExpClk(UART0_BASE, SysCtlClockGet(), 115200, (UART_CONFIG_WLEN_8
| UART_CONFIG_STOP_ONE | UART_CONFIG_PAR_NONE));

    IntMasterEnable(); //enable processor interrupts
    IntEnable(INT_UART0); //enable the UART interrupt
    UARTIntEnable(UART0_BASE, UART_INT_RX ); //only enable RX and TX interrupts

    GPIOPinTypeUART(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_0 | GPIO_PIN_1); //PA0 - U0RX, PA1 =
U0TX
    UARTEnable(UART0_BASE); //Enable UART

// _____
//DAC
    GPIOPinTypeADC(GPIO_PORTE_BASE, GPIO_PIN_3 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_1 |
GPIO_PIN_4);
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_ADC0); //Enable ADC0 Peripheral
    SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_ADC1); //Enable ADC1 Peripheral
    //ADCHardwareOversampleConfigure(ADC0_BASE, 32);

// _____
//PORTB
    //PB1- FS; PB2,3,4,5:relays
    GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_3|
GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5);

    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2,0x00); //turn FSS, relay
control
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[2], 0xFF); //RelayRes3
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[1], 0x00); //RelayRes3
    GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, g_relayn[3], 0x00); //RelayRes3
    //GPIOPinWrite(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_3 | GPIO_PIN_4| GPIO_PIN_5, 0xFF);
//RelayRes3

```

```

//
//SPI 1 ADC Module 1
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_SSI1);
GPIOPinConfigure(GPIO_PF2_SSI1CLK);
//GPIOPinConfigure(GPIO_PF3_SSI1FSS); not
GPIOPinConfigure(GPIO_PF1_SSI1TX);
GPIOPinConfigure(GPIO_PF0_SSI1RX);
GPIOPinTypeSSI(GPIO_PORTF_BASE, GPIO_PIN_1 | GPIO_PIN_2 | GPIO_PIN_0 );
//SSI module, the clock source (this is hard wired), the mode, master/slave,
the bit rate and the data width.

    SSIConfigSetExpClk(SSI1_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_2,
SSI_MODE_MASTER, 50000, 8);
    SSIEnable(SSI1_BASE);

//
//SPI 2 ADC Module 0
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_SSI0);
GPIOPinConfigure(GPIO_PA2_SSI0CLK);
//GPIOPinConfigure(GPIO_PA3_SSI0FSS); not
GPIOPinConfigure(GPIO_PA5_SSI0TX);
GPIOPinConfigure(GPIO_PA4_SSI0RX);
GPIOPinTypeSSI(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_4 | GPIO_PIN_5 | GPIO_PIN_2);
GPIOPinTypeGPIOOutput(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7); //~CS
//GPIOPinTypeGPIOInput(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_6 ); //SSTRB
//GPIOIntTypeSet(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6, GPIO_RISING_EDGE);
//GPIOIntEnable(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_6);

//SSI module, the clock source (this is hard wired), the mode, master/slave,
the bit rate and the data width.
//to do check edges and SSI mode
    SSIConfigSetExpClk(SSI0_BASE, SysCtlClockGet(), SSI_FRF_MOTO_MODE_3,
SSI_MODE_MASTER, 500000, 8);
    SSIEnable(SSI0_BASE);

//ADC config
GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, 0xFF); //~CS
SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/1000)); //10us
GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, 0x00); //~CS
SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0b10001001) ); //8bits: 1 start, 3 channel,
1 differential/single, 3 range.
SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/1000)); //10us
GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, 0xFF); //~CS
SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/1000));
GPIOPinWrite(GPIO_PORTA_BASE, GPIO_PIN_7, 0x00); //~CS
SSIDataPutNonBlocking(SSI0_BASE, (0b10001000) ); //Clock Mode Internal (SSTRB
habilitado)

    SysCtlDelay((SysCtlClockGet()/1000)); //10us
    while(SSIBusy(SSI1_BASE)){

//

```

```

//PWM

volatile uint32_t loadPWM;
volatile uint32_t PWMclock;
volatile uint8_t adjustPWM;
adjustPWM = 83;

SysCtlPWMClockSet(SYSCTL_PWMDIV_1); //PWM clock = 40Mhz/32

SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_PWM1);
SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_PWM0);

GPIOPinTypePWM(GPIO_PORTB_BASE, GPIO_PIN_7 | GPIO_PIN_6);
GPIOPinConfigure(GPIO_PB7_M0PWM1);
GPIOPinConfigure(GPIO_PB6_M0PWM0);

PWMclock = SysCtlClockGet() / 1; //PWM clock = 40/32
loadPWM = (PWMclock / PWM_FREQUENCY) - 1; //55=PWM_FREQUENCY

//PB6 M0PWM0
PWMGenConfigure(PWM0_BASE, PWM_GEN_0, PWM_GEN_MODE_DOWN);
PWMGenPeriodSet(PWM0_BASE, PWM_GEN_0, loadPWM);
//PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, adjustPWM * loadPWM / 1000); //Mayara
PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_0, adjustPWM); //Anderson
PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_0_BIT, true);

//PB7 M0PWM1
PWMGenConfigure(PWM0_BASE, PWM_GEN_1, PWM_GEN_MODE_DOWN);
PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, 0);
//PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, adjustPWM * loadPWM / 1000); mayara
PWMPulseWidthSet(PWM0_BASE, PWM_OUT_1, adjustPWM); //Anderson
PWMOutputState(PWM0_BASE, PWM_OUT_1_BIT, true);

PWMGenEnable(PWM0_BASE, PWM_GEN_0);

//-----
//reles setados iniciais

gPosition=2;
gRelayOFF1=3;
gRelayOFF2=1;
gReleError=0;
auxErrorRelayNumber=0;

FAULTjfet=0;
FAULTva=0;
g_tentatives=0;

gControlJFETincrement=0;
gControlVAtolerance=0;
gJFETincrement=JFETinitialIncrement;
gVAtolerance=VAinitialTolerance;
startMedicao=0;

//inicializacao variaveis finais
g_statusF=0;
g_relayPosition_JFETvalueF=0;
g_VtargetF=0;
g_VminF=0;

```

```

    g_VmaxF=0;
    g_VmedidoF=0;
}

```

public.h

```

#ifndef PUB_H
#define PUB_H

#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>

#include "inc/tm4c123gh6pm.h"
#include "inc/hw_memmap.h"
#include "inc/hw_timer.h"
#include "inc/hw_types.h"
#include "inc/hw_gpio.h"
#include "inc/hw_ssi.h"
#include "driverlib/uart.h"
#include "driverlib/adc.h"
#include "driverlib/sysctl.h"
#include "driverlib/timer.h"
#include "driverlib/gpio.h"
#include "driverlib/pin_map.h"
#include "driverlib/ssi.h"
#include "driverlib/pwm.h"
#include "driverlib/interrupt.h"

#endif

```

global_variables.h

```

#ifndef GLOBALVARIABLES_H
#define GLOBALVARIABLES_H

#define N_amostras_V 20
#define N_amostras_VA 20
#define N_amostras_Vmin 20
#define N_amostras_Vmax 20
#define N_amostras_V_out 20

#define N_tentativas 3

#define JFETinitialIncrement 20
#define VAinitialTolerance 20

uint16_t gUARTdata;
uint32_t gSendPID;
uint16_t gV_Actual;
uint16_t gV_min;
uint16_t gV_max;
uint16_t gV_measured99;

uint8_t startMedicao;

```

```

uint32_t test_sumSamples1;
uint32_t sumSamples;

volatile uint32_t g_relayn[4];
uint16_t gV_measured;

uint8_t gtestInput1;
uint8_t gtestInput2;
uint16_t gtestInput;
uint16_t gqtyVANok;
uint16_t gqtyJFETnok;
uint16_t gqualVANok;
uint16_t gqualJFETnok;

uint16_t gPosition;
uint16_t gRelayOFF1;
uint16_t gRelayOFF2;
uint16_t gPosition;

uint8_t gchannelPWM; // "endereco" (energia)
uint8_t gflagPWM;
uint16_t gAuxTest;
uint16_t gvaluePWM;
#define PWM_FREQUENCY 20000
uint16_t g_qty;
uint16_t g_tentatives;
uint8_t gStatus;

uint16_t dataReceived2;
uint16_t dataReceivedUARTCheck;
uint16_t dataReceiveduartHandler[4];
uint32_t dataPWM1, dataPWM2;

uint8_t gReleError;
uint8_t auxErrorRelayNumber;
uint8_t gControlJFETincrement;
uint8_t gControlVAtolerance;
uint8_t gJFETincrement;
uint16_t gVAtolerance;

uint16_t FAULTjfet;
uint16_t FAULTva;

uint16_t qtySamples, qtySamplesTarget, avgSamples;
uint32_t sumSamples;

//finais
uint8_t g_statusF;
uint16_t g_relayPosition_JFETvalueF;
uint16_t g_VtargetF;
uint16_t g_VminF;
uint16_t g_VmaxF;
uint16_t g_VmedidoF;

```

```
uint8_t g_flag1;
```

```
#endif
```

APÊNDICE C – Excel código para calcular a estimativa da resistência equivalente de acordo com dados colocados pelo usuário.

Option Explicit

```

Sub ResistorCalc()
' sub para calcular qual a resistência equivalente
' baseado nos dados indicados na tabela 1- Dados
' Considerado:
' R1: serial com o transistor de efeito de campo
' Rx: Em paralelo com o R1+Transistor de efeito de campo
' Rreq: resistência total calculada

' A partir dos dados escritos na coluna G, pode-se
' estimar qual a resistência equivalente do circuito
' escolhendo a mais desejada para a aplicação.

    Dim i, j As Integer
    Dim Umax, Rreq
    Dim Rmin, Rmax
    Dim RminCalc, RmaxCalc
    Dim R1, Rx
    Dim rjmin, rjMax As Long

    R1 = Sheets(1).Range("C3").Value
    Rx = Sheets(1).Range("C4").Value

    Sheets(1).Range("E:G").ClearContents
    Sheets(1).Range("E3") = "Rx"
    Sheets(1).Range("F3") = "JFET VALUE"
    Sheets(1).Range("G3") = "REQ VALUE"

    rjmin = Sheets(1).Range("C6").Value
    rjMax = Sheets(1).Range("C5").Value
    j = rjmin - 4

    For i = rjmin To rjMax

        Rreq = Rx * (R1 + i) / (R1 + Rx + i)
        Sheets(1).Range("E" & (i - j)) = Rreq

        Sheets(1).Range("F" & (i - j)) = i
        Sheets(1).Range("G" & i - j) = Rreq

    Next i

End Sub

```

B	C	D	E	F	G
---	---	---	---	---	---

Tabela 1 - Dados	
R1	2.18
Rx	33.00
Rjmax	64.00
Rjmin	40.00

Calcular REQ

Rx	JFET VALUE	REQ VALUE
33	40	18.515
33	41	18.705
33	42	18.890
33	43	19.071
33	44	19.247
33	45	19.418
33	46	19.585
33	47	19.749
33	48	19.908
33	49	20.063
33	50	20.215
33	51	20.364
33	52	20.509
33	53	20.650
33	54	20.789
33	55	20.924
33	56	21.057
33	57	21.186
33	58	21.313
33	59	21.437
33	60	21.559
33	61	21.677
33	62	21.794
33	63	21.908
33	64	22.020

APÊNDICE D – Visualização do software LabVIEW utilizado no experimento.

