

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA  
UDESC CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT BACHARELADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MARCO AURÉLIO DEBORTOLLI**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE PELTIER COM RASTREAMENTO  
DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**JOINVILLE, SC  
2016**



**MARCO AURÉLIO DEBORTOLLI**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE PELTIER COM RASTREAMENTO  
DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão apresentado  
ao curso de Engenharia Elétrica do  
Centro de Ciências Tecnológicas, da  
Universidade do Estado de Santa  
Catarina, como requisito parcial para  
a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica

**Orientador:** Dr. Joselito Anastácio  
Heerd

**JOINVILLE, SC  
2016**



## RESUMO

Estudos em eficiência energética têm reduzido consideravelmente as perdas em equipamentos e máquinas, entretanto as perdas de energias térmicas ainda são consideráveis em muitos sistemas. Essa energia térmica, que na maioria das vezes é ignorada, pode ser reaproveitada para gerar energia elétrica através de geradores termoelétricos, conseqüentemente aumentando a eficiência do sistema. Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo do funcionamento de uma célula de Peltier comercial atuando como um gerador termoelétrico, além disso, verificar a viabilidade de utilização das células para carregar uma bateria de 12 V, utilizando um conversor Boost com controle de seguimento de máxima potência (MPPT). O trabalho apresenta o modelamento matemático do módulo e a implementação de um protótipo para realização dos ensaios para obtenção de parâmetros experimentais, ainda apresenta a comprovação, através de simulações, do modelo elétrico da célula. Como resultado do modelo encontrado, é apresentado um conversor Boost que possui na entrada 16 módulos termoelétricos ligados em série e paralelo gerando uma potência de 7,2 W, no ponto de máxima potência, em uma determinada configuração de temperatura, utilizado para carregar uma bateria de 12V.

**Palavras-chave:** Células de Peltier. Geradores termoelétricos. Efeito Seebeck. Reaproveitamento de energia. Controle MPPT.



## ABSTRACT

Energy efficiency studies have considerably reduced the losses in equipment and machines, however the losses of thermal energy are still considerable in many systems. This thermal energy, which in most cases is ignored, can be reused to generate electricity through thermoelectric generators, consequently increasing the efficiency of the system. This work aims to present a study of the operation of a commercial Peltier cell acting as a thermoelectric generator, in addition to verify the feasibility of using the cells to charge a 12 V battery using a Boost converter with maximum power point tracking (MPPT). The work presents the mathematical modeling of the module and the implementation of a prototype for the accomplishment of the tests to obtain experimental parameters, still presents the proof, through simulations, of the electric model of the cell. As a result of the model found, is presented a Boost converter that has in the input 16 thermoelectric modules connected in series and parallel generating a power of 7.2 W, in the point of maximum power, in a certain configuration of temperature, used to charge a battery of 12 V.

**Key-Words:** Peltier cells. Thermoelectric generators. Seebeck effect. Reuse of energy. MPPT control.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um termopar simples.....	18
Figura 2 - Coeficientes de Seebeck para alguns metais, ligas e semicondutores.....	19
Figura 3 - Comportamento de materiais com altos valores de ZT em relação a temperatura .....	21
Figura 4 - Funcionamento de um refrigerador termoelétrico. ....	23
Figura 5 - Configuração interna de uma célula de Peltier.....	23
Figura 6 - Configuração interna de uma TEG e o efeito Seebeck .....	24
Figura 7 - Estrutura básica de um par termoelétrico de semicondutores .....	25
Figura 8 - Modelo elétrico equivalente de um par termoelétrico.....	28
Figura 9 - Bancada de ensaios montada.....	31
Figura 10 - Fluxograma do funcionamento do sistema de controle de temperatura da fonte quente .....	32
Figura 11 – Sistema construído para ensaio dos módulos termoelétricos: dissipador de calor, dois sensores de temperatura LM-35, célula de Peltier TEC-12715, fonte de calor com 10 resistores TO-220 de 27 $\Omega$ - 30 W. ....	33
Figura 12 - Fonte de calor, composta por um bloco de alumínio e 10 resistores TO-220 de 27 $\Omega$ - 30 W.....	33
Figura 13 – LM35 com encapsulamento TO-92 .....	34
Figura 14 - Esquemático do driver de amplificação utilizado para alimentar a carga resistiva de aquecimento.....	35
Figura 15 - Placa Arduino Uno utilizada na realização do controle .....	36
Figura 16 - Janela do System Identification Tool do Matlab <sup>®</sup> com a resposta de característica da planta de temperatura. ....	37
Figura 17 - Resposta ao degrau no PID tuner do controle projetado .....	38
Figura 18 - Diagrama de blocos do controle.....	38
Figura 19 - Resposta do controle desenvolvido a um degrau de 100 °C .....	39
Figura 20 - TEC1-12715 adquirida para realização dos ensaios e obtenção do modelo.....	40
Figura 21 - Valor da resistência interna para diferentes valores de temperatura média.....	42
Figura 22 - Curvas de potência transferida para carga para diferentes temperaturas médias e com mesmo $\Delta T$ .....	43

Figura 23 - Ensaio de carga para diferentes valores de $T_H(\Delta T)$ .....	45
Figura 24 - Comportamento da potência máxima de saída em função da diferença de temperatura .....	46
Figura 25 - Modelo elétrico da TEC implementado no simulador LTspice® .....	47
Figura 26 - Simulação de carga do modelo elétrico da célula de Peltier .....	47
Figura 27 - Arranjo dos módulos para simulação complementar .....	49
Figura 28 - Conversor Boost complementar .....	50
Figura 29 - Fluxograma do método MPPT do tipo Perturba e Observa .....	51
Figura 30 - Esquemático do circuito de controle.....	52
Figura 31 - Alterações do circuito de controle para acelerar a simulação e limitar ganho mínimo para atuação do controle.....	54
Figura 32 - Comportamento da tensão $V_x$ que determina o tempo de atuação da chave do conversor.....	55
Figura 33 - Comportamento da corrente (a), tensão (b) e potência (c) de entrada do conversor, em conjunto com suas curvas médias, para uma diferença de temperatura inicial de 60 °C com uma queda para 55 °C no tempo igual a 3s.....	56
Figura 34 - Largura de pulso do PWM no início e no final da simulação respectivamente .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características principais do módulo de Peltier Habei TEC1-12715.....	41
Tabela 2 - Ensaio de carga para temperatura média de 50,25 °C e uma diferença de temperatura de 29,5 °C .....	41
Tabela 3 - Configuração de temperatura dos ensaios realizados para as curvas de potência gerada em função da carga. ....	44
Tabela 4 - Características relevantes do módulo para a montagem do modelo.....	46
Tabela 5 - Comparação dos valores simulados e experimentais para diferentes gradientes de temperatura .....	48
Tabela 6 - Principais parâmetros do conversor complementar .....	50
Tabela 7 - Valores de corrente, tensão e potência no ponto de máxima potência para um $\Delta T$ de 60 °C e 55 °C segundo a simulação .....	57
Tabela 8 Potência por m <sup>2</sup> gerada por dois módulos termoelétricos diferentes e um módulo fotovoltaico.....	58



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>O MÓDULO TERMOELÉTRICO DE PELTIER .....</b>	<b>17</b>
2.1	OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS .....	17
2.2	FIGURA DE MÉRITO .....	20
2.3	FUNCIONAMENTO BÁSICO DO MÓDULO .....	22
2.4	MODELO ELÉTRICO .....	25
<b>3</b>	<b>BANCADA PARA ENSAIO DAS CÉLULAS DE PELTIER .....</b>	<b>31</b>
3.1	FONTES DE CALOR.....	32
3.2	CONTROLE DE TEMPERATURA DA FONTE QUENTE .....	34
3.2.1	<b>O transdutor de temperatura.....</b>	<b>34</b>
3.2.2	<i>Driver</i> de amplificação.....	35
3.2.3	O microcontrolador.....	35
3.2.4	Técnica de identificação da planta e controle do sistema .....	36
<b>4</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DA CÉLULA DE PELTIER .....</b>	<b>40</b>
4.1	ENSAIOS REALIZADOS .....	40
4.1.1	<b>Resistência interna do módulo .....</b>	<b>41</b>
4.1.2	<b>Potência gerada pelo módulo .....</b>	<b>43</b>
4.2	COMPROVAÇÃO DO MODELO .....	46
<b>5</b>	<b>CONTROLE DE SEGUIMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....</b>	<b>49</b>
5.1	O CONVERSOR BOOST .....	50
5.2	CONTROLE POR SEGUIMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA MPPT .....	51
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>60</b>
	<b>Referências .....</b>	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE A – Código desenvolvido para a placa Arduino UNO® por meio do Arduino IDE. ....</b>	<b>64</b>

<b>APÊNDICE B – Tabelas de todos os ensaios realizados para a modelagem da célula de Peltier TEC1-12715 .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO A – Informações técnicas da TEC1-12715, fabricante Habei.....</b>	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo excessivo de recursos naturais em conjunto com a poluição atmosférica tem se tornado um assunto cada vez mais discutido nas últimas décadas, não só por ambientalistas, mas por profissionais de todas as áreas que se preocupam com o aquecimento global.

Os combustíveis fósseis, que ainda são vastamente utilizados como fontes energéticas, são grandes contribuintes no aumento da emissão de poluentes na atmosfera e também uma fonte que se tornará escassa em um futuro não muito distante.

Apesar das indústrias serem os principais consumidores de combustíveis fósseis, não pode-se esquecer que os automóveis, aeronaves e embarcações, em sua grande maioria, são totalmente dependentes de combustíveis fósseis e contribuem com uma boa parte da poluição despejada diariamente na atmosfera.

A utilização de novas energias renováveis, consideradas limpas, como a eólica e solar, tem ganhado grande destaque no mundo e vem sendo utilizada pelas pessoas com o objetivo de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, uma vez que o custo dessas aplicações tem reduzido com o avanço tecnológico da área.

Em conjunto com a busca por novas tecnologias para geração de energia elétrica, surgem novos conceitos de reaproveitamento de energia ou aumento no rendimento de processos, uma vez que diversos deles possuem grandes perdas de energia, geralmente em forma de calor. Em razão disso, a utilização de geradores termoelétricos em variados setores tem se tornado uma nova opção para o reaproveitamento dessa energia hoje desperdiçadas.

Os geradores termoelétricos se utilizam dos efeitos de Peltier, Seebeck e Thomson, para realizar uma conversão direta de energia térmica para energia elétrica, a partir de um gradiente de temperatura.

Diversas empresas têm buscado investir nesses dispositivos termoelétricos para a geração de energia elétrica a partir fontes de calor antes ignoradas. Em 2012, a empresa Boeing, por meio do inventor Nathan D. Hiller, utilizou células termoelétricas em um projeto desenvolvido para aproveitar as baixas temperaturas no lado externo do avião (BOING COMPANY, 2015). As placas são acomodadas entre a camada interna e externa da fuselagem do avião, aproveitando assim a

grande diferença de temperatura que existe entre a cabine aquecida e o lado externo quando voando a altas altitudes.

Neste mesmo sentido, a BMW tem utilizado dispositivos termoelétricos em seus carros. Foram projetados dois sistemas para a geração de energia, um no sistema de exaustão e outro para o sistema de recirculação dos gases de exaustão. Com a utilização desse processo, a empresa obteve, ainda em 2008, um valor aproximado de 200 W de energia gerada, e mais tarde com a utilização de novas tecnologias em materiais obteve um valor de 1000 W de energia (GREEN CAR CONGRESS, 2011).

Em 2009, a mesma empresa adicionou novamente módulos termoelétricos em seus carros, dessa vez no radiador do sistema de recirculação de gases da exaustão, conseguindo com isso uma geração de 250 W de energia e conseqüentemente reduzindo a emissão de gases poluentes e o consumo de combustível em 2%.

Direcionado para o mercado consumidor existem diversas empresas que desenvolvem produtos com esse tipo de tecnologia. A TEGMART, por exemplo, desenvolve dispositivos para fornos e fogões a lenha. Uma das versões disponibilizadas pela empresa fornece uma tensão de saída de 12 V e pode gerar aproximadamente 45 W de potência, quando a placa é aquecida a uma temperatura de 450 °C. A TEGSTOVE é outro exemplo de empresa que utiliza o calor gerado em um mini fogareiro portátil para gerar até 5 W de potência, possibilitando o carregamento de um aparelho celular ou GPS em locais remotos.

Os módulos termoelétricos, todavia possuem baixa eficiência, mas assim mesmo já foram utilizados geradores com eficiência de aproximadamente 7% em 25 diferentes missões da NASA, gerando energia elétrica para sondas que viajam pelo sistema solar (NASA, 2009).

Com uma vasta gama de aplicações possíveis as TEGs possuem um grande potencial tecnológico, uma vez que com investimentos em pesquisas de novos materiais é esperado um ganho em eficiência, assim como a redução de custos.

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo sobre a célula de Peltier atuando como gerador termoelétrico de energia, e mediante a isso, obter de forma experimental o modelo elétrico da placa. A partir deste modelo, estimar a quantidade de energia gerada por um conjunto de módulos e verificar a possibilidade de sua



utilização, em conjunto com um conversor do tipo Boost, para carregar uma bateria. Ainda, por se tratar de um sistema de baixa eficiência, a fim de extrair o máximo de potência possível das células, um controle de seguimento de máxima potência (MPPT) foi projetado para controlar o conversor.

## 2 O MÓDULO TERMOELÉTRICO DE PELTIER

### 2.1 OS EFEITOS TERMOELÉTRICOS

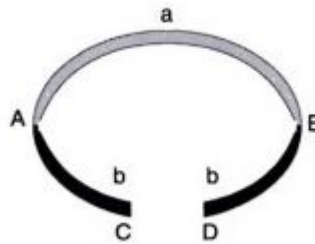
A termoeletricidade é um conjunto de fenômenos físicos que criam uma relação entre as propriedades elétricas dos materiais e a temperatura. Essa relação permite que um gradiente de temperatura seja transformado em energia elétrica, denominado de efeito Seebeck, ou ainda, que energia elétrica seja transformada em um gradiente de temperatura, este conhecido como efeito Peltier.

Os efeitos termoeletricos foram primeiramente observados em metais, no início do século XIX, porém se mostraram mais interessantes a partir do século XX com o avanço da tecnologia dos materiais semicondutores, onde esses efeitos apresentam maior eficiência.

Segundo Fernandes (2012), em 1823, Thomas J. Seebeck notou que unindo dois materiais condutores sujeitos a uma diferença de temperatura e conectados aos terminais de um galvanômetro, o surgimento de uma diferença de potencial poderia ser observada. A esse arranjo de elementos e sujeitos a uma diferença de temperatura foi dado o nome de termopar. Cerca de treze anos mais tarde, o francês Jean C. A. Peltier verificou o efeito contrario ao de Seebeck. Utilizando uma montagem praticamente idêntica ao de Seebeck, Peltier inverteu o processo. No lugar do galvanômetro aplicou uma corrente elétrica e assim verificou um surgimento de uma diferença de temperatura entre os metais.

O efeito Seebeck pode ser convenientemente discutido usando como referência a representação de um termopar como mostra a Figura 1. O termopar pode ser considerado como um circuito formado por dois condutores distintos, **a** e **b**, os quais estão conectados eletricamente em série, porém termicamente em paralelo. Se considerarmos que as junções nos pontos **A** e **B** estão em temperaturas diferentes  $T_1$  e  $T_2$  respectivamente e  $T_1 > T_2$ , uma força eletromotriz  $V_G$  é gerada entre os terminais **C** e **D**.(ROWE, 2005)

Figura 1 - Esquema de um termopar simples



Fonte: (ROWE, 2005)

Conforme apresentado por Goldsmith (2009) e Rowe (2005), a diferença de potencial entre os pontos C e D segue a seguinte equação:

$$V_G = \alpha \Delta T , \quad (2.1)$$

onde  $V_G$  é a tensão em Volts [V],  $\Delta T$  é a diferença de temperatura entre as junções **A** e **B** ( $T_1 - T_2$ ) em Kelvin [K] e  $\alpha$  é o coeficiente Seebeck em [V/K]. A corrente fluindo da junção quente para a junção fria significa que  $\alpha$  tem valor positivo, sendo negativo no caso da corrente fluir no sentido inverso. O coeficiente de Seebeck tem variação praticamente linear para pequenas diferenças de temperatura. (FERNANDES, 2012).

O coeficiente de Seebeck é uma característica intrínseca dos materiais, e pode tomar valores tanto positivos quanto negativos como mostra a Figura 2.

O surgimento da força eletromotriz é devido ao deslocamento dos elétrons da camada de valência do material condutor, de um local com temperatura mais elevada para outro com temperatura mais baixa (FERNANDES, 2012).

O efeito Peltier pode ser considerado o oposto do efeito Seebeck. Se uma corrente elétrica, de intensidade determinada, for aplicada entre os pontos **C** e **D** da Figura 1, na junção **A** ocorrerá uma variação positiva de temperatura, enquanto na junção **B** uma variação negativa, ou seja, **A** libera calor enquanto **B** absorve, criando assim um gradiente térmico entre as duas junções. A corrente pode fluir em ambos os sentidos, sendo que se em um sentido a junção esquenta, a inversão da corrente provoca o resfriamento da junção.

Figura 2 - Coeficientes de Seebeck para alguns metais, ligas e semicondutores

Metais / Ligas e outros materiais	Coefficiente de Seebeck [ $\mu\text{V/K}$ ]	Semicondutores	Coefficiente de Seebeck [ $\mu\text{V/K}$ ]
Antimônio	47	Se	900
Níquel crômio	25	Te	500
Cádmio	7.5	Si	440
[Tungstênio	7.5	Ge	300
Ouro	6.5	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$ (tipo n)	-230
Prata	6.5	$\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (tipo p)	300
Cobre	6.5	$\text{Sb}_2\text{Te}_3$ (tipo p)	185
Ródio	6.0	PbTe	-180
Tântalo	4.5	$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Chumbo	4.0	$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Alumínio	3.5	$\text{Pb}_{09}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360
Carvão	3.0	$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710
Merúrio	0.6	$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990
Platina	0	$\text{SnBb}_4\text{Te}_7$	25
Sódio	-2.0	$\text{SnBi}_4\text{Te}_7$	120
KOH	-9.0	$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
Níquel	-15	$\text{SnBi}_{2.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_7$	110
Cu Ni Mn Fe (constantan)	-35	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
bismuto	-72	$\text{PbBi}_4\text{Te}_7$	-53

Fonte: (FERNANDES, 2012)

A relação existente entra a quantidade de calor absorvida ou liberada pela junção e a corrente elétrica é dada por (2.2) (MOURA, 2014; FERNANDES,2012):

$$Q = \pi I , \quad (2.2)$$

onde  $Q$  é a quantidade de fluxo de calor em Watts [W],  $I$  é a corrente elétrica dada em Amperes [A] e  $\pi$  é o coeficiente de Peltier dado em [W/A] ou [V].

Este efeito surge devido à existência de uma força eletromotriz na junção, originada pela diferente composição de cada um dos lados da junção (FERNANDES, 2012).

Apesar de existir em qualquer junção condutora este fenômeno é geralmente mascarado em junções metálicas pelo efeito Joule que tem maior influência, porém a utilização de semicondutores permite obter um efeito Peltier mais pronunciado (MOURA, 2014).

Nem Peltier nem Seebeck verificaram um relacionamento entre as experiências que realizaram. Apenas W. Thomson (que depois virou Lord Kelvin) , em 1855, aplicando os conceitos termodinâmicos nos experimentos pôde

estabelecer uma relação entre os coeficientes que descrevem os efeitos Seebeck e Peltier (ROWE, 2005).

Thomson percebeu que considerando um material homogêneo, onde simultaneamente existem uma corrente elétrica e uma diferença de temperatura aplicadas, além da liberação de calor por efeito Joule haverá uma liberação ou absorção de calor proporcional a intensidade da corrente, dada por (2.3).

$$Q = \beta I \Delta T , \quad (2.3)$$

onde  $Q$  é a quantidade de calor liberada ou absorvida em Watts,  $I$  é intensidade de corrente elétrica em Ampères,  $\Delta T$  é a diferença de temperatura em Kelvin e  $\beta$  é o coeficiente de Thomson medido em [V/K].

Thomson também relacionou os efeitos de Seebeck e Peltier através da equação a seguir:

$$\pi = \alpha T , \quad (2.4)$$

ou seja, o coeficiente de Peltier é igual ao coeficiente de Seebeck multiplicado pela temperatura absoluta ( $T$ ).

## 2.2 FIGURA DE MÉRITO

A figura de mérito é utilizada para comparar sistemas termoelétricos em relação a sua capacidade de transformar energia térmica em energia elétrica. O que define essa dimensão é a relação de três grandezas, as propriedades elétricas, propriedades térmicas e a temperatura absoluta de funcionamento. Um material que possui uma alta figura de mérito é considerado um bom material para aplicações em sistemas termoelétricos.

A figura de mérito é representada pela letra  $Z$  e é definida por (2.5), onde  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck,  $\rho$  é resistividade elétrica do material e  $\kappa$  é a condutividade térmica. A unidade de medida de  $Z$  é [K<sup>-1</sup>].

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} . \quad (2.5)$$

A figura de mérito não é constante com a temperatura. Com isso pode ser encontrado referências ao parâmetro figura de mérito  $ZT$  (adimensional), calculado para uma determinada temperatura pela seguinte equação:

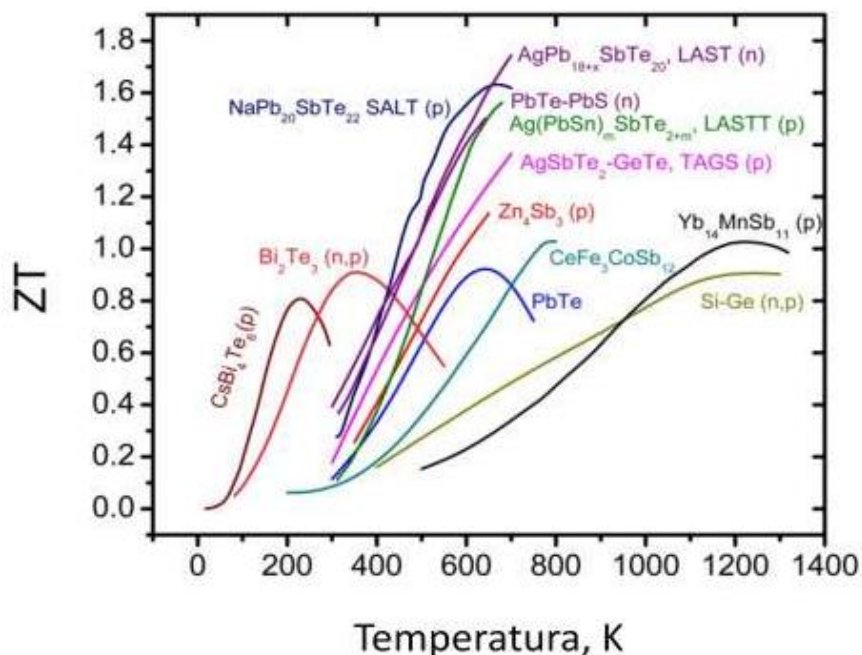
$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \cdot \kappa}, \quad (2.6)$$

onde  $T$  é a temperatura em que se queira saber a figura de mérito.

Quando tratamos de materiais termoelétricos, um bom material é aquele que possui um alto coeficiente de Seebeck com uma baixa resistividade elétrica e condutividade térmica, ou seja, quanto maior a figura de mérito melhor o material. Um problema comum em relação aos materiais de baixa resistividade elétrica é que apresentam alta condutividade térmica, sendo complicado encontrar materiais com as três características citadas anteriormente. A grande maioria dos materiais apresenta valores de figura de mérito inferior à unidade, sendo que para ser considerado um bom material termoelétrico o valor da figura de mérito deve ser superior a unidade.

Na Figura 3 podemos ver como se comportam os valores de figura de mérito de alguns materiais.

Figura 3 - Comportamento de materiais com altos valores de  $ZT$  em relação a temperatura



Fonte: (FERNANDES, 2012)

Claramente pode ser visto uma dependência da temperatura no valor da figura de mérito de cada material, e ainda a existência de um ponto ótimo de operação, assim para diferentes temperaturas de aplicação podem ser utilizados diferentes materiais.

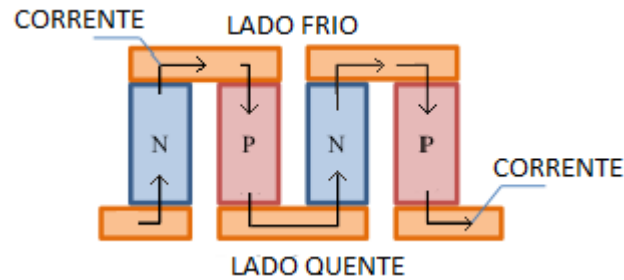
### 2.3 FUNCIONAMENTO BÁSICO DO MÓDULO

Os módulos, também conhecidos como placas ou células, termoelétricos são a forma mais prática de se visualizar os efeitos citados anteriormente. O mercado possui uma grande variedade de dispositivos termoelétricos, porém todos são definidos segundo seu principal modo de operação, os que operam pelo efeito Peltier e os que operam pelo efeito Seebeck. Os que operam pelo efeito Peltier são conhecidos pela sigla TEC, do inglês *thermoelectric cooler*, e são utilizados para aplicações de refrigeração ou aquecimento. As células que operam pelo efeito Seebeck são conhecidas pela sigla TEG, do inglês *thermoelectric generator*, e tem como aplicação a geração de energia elétrica.

Como explicado anteriormente, o efeito Peltier provoca o aquecimento de uma das junções e o resfriamento da outra se uma corrente elétrica atravessa os dois condutores. Esses condutores são tipicamente semicondutores dopados tipo-p e tipo-n, que possuem respectivamente lacunas livres e elétrons livres. Os semicondutores são conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo.

Se na Figura 4 uma corrente contínua flui por pares de elementos de tipo-n para o tipo-p, a temperatura da junção tem sua temperatura reduzida devido à absorção de calor do ambiente. Este calor é transferido através do elemento por transporte de elétrons que se movem de um estado de alta energia para um estado de baixa energia até ser liberado no outro lado fazendo com que a temperatura aumente. Caso a corrente seja invertida, o processo ocorre de forma inversa, o lado que estava frio passa a esquentar, enquanto o lado que estava quente passa a ser refrigerado.

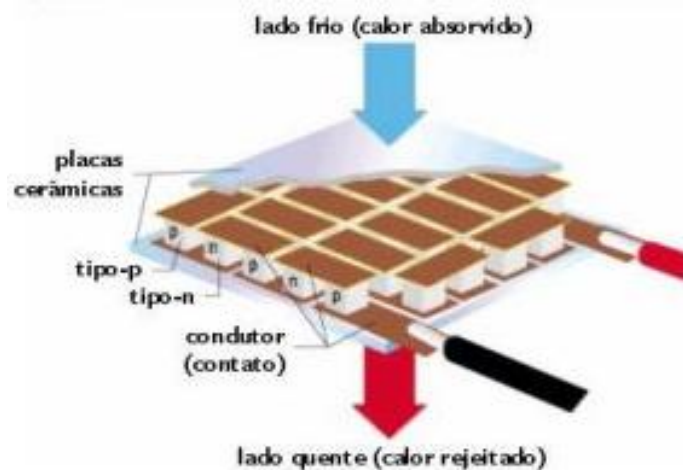
Figura 4 - Funcionamento de um refrigerador termoelétrico.



Fonte: Adaptado de (AUDIFFRED, 2015)

Os elementos semicondutores são unidos por bons condutores como o cobre e, soldados entre duas placas cerâmicas, que possuem a função de proteger mecanicamente o módulo e prover isolamento elétrico (Figura 5). Para que a transmissão de calor de cada um deles ocorra para a mesma direção todos são colocados termicamente em paralelo, e o fato de estarem eletricamente em série permite o aumento da tensão elétrica a ser aplicada (PINDADO, 2008).

Figura 5 - Configuração interna de uma célula de Peltier



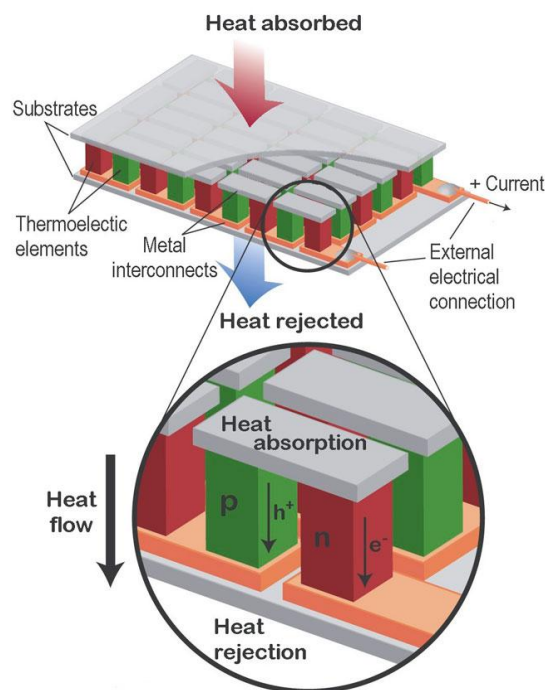
Fonte: DANVIC. **Pastilhas de efeito Peltier**. Disponível em: <<http://www.danvic.com/produtos/pastilha-de-efeito-peltier/>>

As TEGs tem o princípio de funcionamento e configuração muito semelhante ao das TECs. Ao colocarmos uma fonte de calor na face superior da placa e um sumidouro no outro, como apresentado na Figura 6, a extremidade aquecida transfere energia térmica para os elétrons da camada de valência do material, que



ao receberem energia suficiente, saltam de suas órbitas tornando-se elétrons livres, iniciando assim um deslocamento para a zona próxima ao sumidouro, onde há níveis de energia mais baixos por causa da temperatura reduzida. A zona aquecida fica com excesso de cargas positivas, enquanto a zona mais fria com excesso de elétrons livres. Esse processo entra em equilíbrio quando a tensão gerada entre os extremos do material é maior que a energia que os elétrons possuem para se movimentar.

Figura 6 - Configuração interna de uma TEG e o efeito Seebeck



Fonte: (SNYDER;TOBERER, 2008)

Na Figura.6 o símbolo  $h^+$  representa o excesso de lacunas no material tipo-p, enquanto que  $e^-$  o excesso de elétrons presentes no material tipo-n.

Apesar de existirem diferenças entre os dois tipos de módulos, TEC e TEG, eles podem ser usados para qualquer um dos dois propósitos. Uma TEC pode ser usada para gerar energia, ou uma TEG para refrigerar um objeto. A diferença existente entre elas muitas vezes não é visual, mas sim nos materiais utilizados na construção. As TECs geralmente são fabricadas para atuarem em baixas temperaturas ou próximas da temperatura ambiente, enquanto as TEGs são

projetadas para altas temperaturas, assim conseguem atingir um maior gradiente de temperatura.

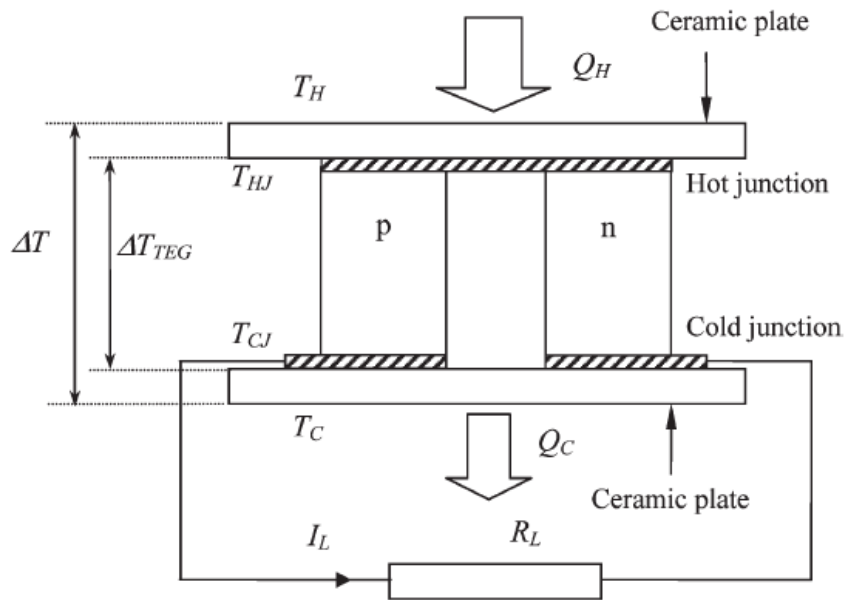
## 2.4 MODELO ELÉTRICO

Com o conhecimento dos efeitos termoelétricos e do funcionamento dos módulos, é possível reunir todos os efeitos e equacionar o funcionamento de uma célula de Peltier.

Para obter o modelo elétrico teórico das células foram estudadas as propostas de Mitrani (2005) e Dalola (2009), e por questões práticas foi optado por usar como base o trabalho de Dalola (2009), de onde foram retiradas as deduções a seguir.

Dado o par termoelétrico de semicondutores da Figura 7 podemos reescrever as equações (2.1) e (2.2) para este caso, resultando em (2.6) e (2.7).

Figura 7 - Estrutura básica de um par termoelétrico de semicondutores



Fonte: (DALOLA, 2009)

$$V_G = \alpha(T_{HJ} - T_{CJ}), \quad (2.6)$$

$$Q_X = \alpha T_X I, \quad (2.7)$$

O circuito termoelétrico da Figura 7 é feito de dois semicondutores diferentes, tipo-n e tipo-p. Em (2.6) assumimos que o circuito está aberto, ou seja, a carga  $R_L$  não existe, então assumindo que existe uma temperatura  $T_{HJ}$  na junção superior e uma temperatura  $T_{CJ}$  na junção inferior, uma tensão  $V_G$  surgirá entre os semicondutores tipo-n e tipo-p. Já em (2.7) foi feita a combinação de (2.2) e (2.4), para termos uma dependência apenas do coeficiente de Seebeck, mesmo representando o efeito Peltier. Esse efeito ocorre quando uma corrente  $I$  percorre o par de semicondutores, assim calor será absorvido em uma junção e será liberado em outra. A taxa de transferência de calor na junção, HJ ou CJ, é dada por (2.7), onde  $T_X$  é a temperatura absoluta na junção.

O par termoelétrico possui duas placas cerâmicas, uma em cada junção, eletricamente isolantes e termicamente condutoras com uma condutância térmica  $K$ .

Uma fonte de calor a uma temperatura  $T_H$  transfere calor para a junção quente que se encontra a uma temperatura  $T_{HJ}$ , ao passo que a junção fria se encontra a uma temperatura  $T_{CJ}$ , liberando calor para a fonte fria que se encontra a uma temperatura  $T_C$ . Para realizar esta análise teórica, assumiremos que as junções possuem resistência térmica e elétrica nula, e ainda os efeitos de convecção e radiação térmica são desprezíveis. Assumiremos ainda que o coeficiente de Seebeck  $\alpha$ , a condutividade térmica  $\lambda$ , e a resistividade elétrica  $\rho$  dos materiais não variam em função da temperatura.

Alguns parâmetros precisam ser definidos para que o modelo elétrico dos módulos possa ser encontrado, assim uma serie de equações serão definidas a partir de relações elétricas e físicas.

Com uma carga resistiva conectada ao par termoelétrico, uma corrente  $I_L$  surge no circuito e é definida por

$$I_L = \frac{V_G}{R_{in} + R_L} = \frac{\alpha(T_{HJ} - T_{CJ})}{R_{in} + R_L}, \quad (2.8)$$

onde  $R_{in}$  é a resistência elétrica interna do par de semicondutores. Esse parâmetro é definido por

$$R_{in} = \frac{2\rho h}{A_{leg}}, \quad (2.9)$$

onde  $h$  e  $A_{leg}$  são respectivamente a altura e a área de uma das pernas do par termoelétrico.

As taxas de transferência de calor  $Q_H$  e  $Q_C$  entre as fontes de calor e as junções são representadas por (2.10) e (2.11)

$$Q_H = (T_H - T_{HJ})K , \quad (2.10)$$

$$Q_C = (T_{CJ} - T_C)K . \quad (2.11)$$

Podemos também definir a taxa de transferência de calor entre as duas junções como sendo a soma do efeito Peltier, presente quando existe uma corrente elétrica, a condução térmica através do par termoelétrico de acordo com a lei de Fourier, e as perdas por efeito Joule devido à corrente elétrica. Assim teremos (WU, 1996 apud DALOLA, 2009):

$$Q_H = \alpha T_{HJ} I_L + (T_{HJ} - T_{CJ})K_{in} - 0,5I_L^2 R_{in} , \quad (2.12)$$

$$Q_C = \alpha T_{CJ} I_L + (T_{HJ} - T_{CJ})K_{in} - 0,5I_L^2 R_{in} , \quad (2.13)$$

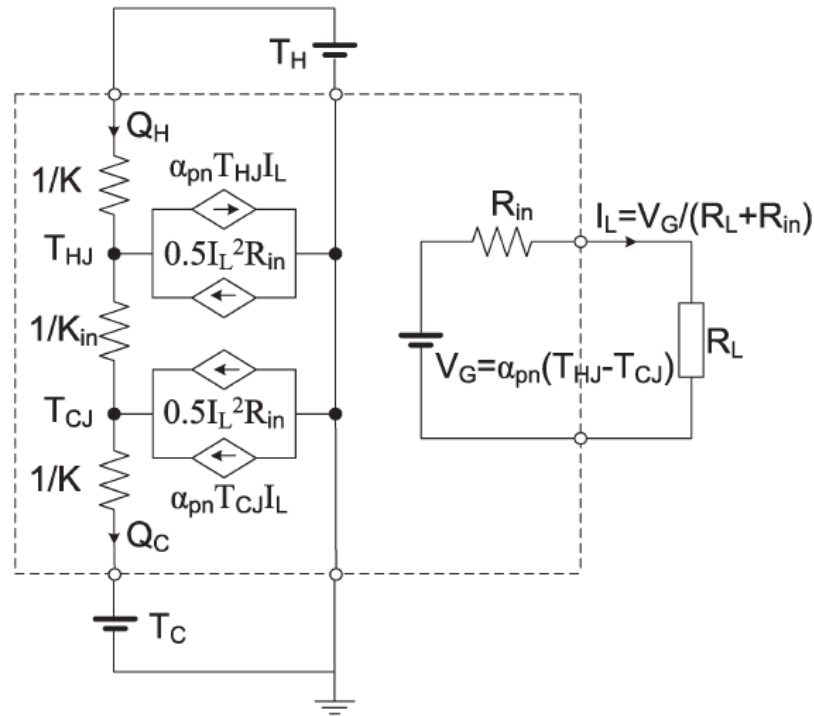
onde  $K_{in}$  é a condutância térmica interna do par termoelétrico, e é dada por

$$K_{in} = \frac{2\lambda A_{leg}}{h} . \quad (2.14)$$

Na Figura 8 podemos ver o modelo elétrico equivalente do par termoelétrico, tanto a parte térmica quanto a parte elétrica. No modelo as variáveis térmicas  $Q$ ,  $T$ ,  $K$  são representadas por correntes elétricas, tensões e condutâncias, respectivamente.

O modelo tem três portas, duas entradas e uma saída, onde as entradas fazem parte do sistema térmico e a saída do sistema elétrico. A entrada  $T_C$  é equivalente a temperatura do lado frio do par, enquanto  $T_H$  é a temperatura da fonte quente. As fontes de corrente que aparecem no modelo são as representações do efeito de Peltier e as perdas por efeito Joule, que contribuem no valor final das taxas de transferência de calor,  $Q_H$  e  $Q_C$ , como é mostrado em (2.12) e (2.13). A saída, na direita da figura, é representada por uma fonte de tensão  $V_G$  em série com uma resistência  $R_{in}$ , onde  $V_G$  é a tensão de circuito aberto, mostrada em (2.6), e  $R_{in}$  a resistência interna do dispositivo.

Figura 8 - Modelo elétrico equivalente de um par termoeletrico



Fonte: (DALOLA, 2009)

Uma característica interessante de se avaliar é o  $\Delta T_{TEG} = T_{HJ} - T_{CJ}$ , que nada mais é do que o gradiente de temperatura efetivo entre as junções. Para encontrar esse valor primeiro igualamos (2.10) com (2.12) e (2.11) com (2.13) e substituímos  $I_L$  por seu valor representado em (2.8), obtendo assim (2.15) e (2.16).

$$(T_H - T_{HJ})K = \frac{\alpha^2 T_{HJ} (T_{HJ} - T_{CJ})}{R_{in} + R_L} + (T_{HJ} - T_{CJ})K_{in} - 0,5 \left[ \frac{\alpha (T_{HJ} - T_{CJ})}{R_{in} + R_L} \right]^2 R_{in}, \quad (2.15)$$

$$(T_{CJ} - T_C)K = \frac{\alpha^2 T_{CJ} (T_{HJ} - T_{CJ})}{R_{in} + R_L} + (T_{HJ} - T_{CJ})K_{in} + 0,5 \left[ \frac{\alpha (T_{HJ} - T_{CJ})}{R_{in} + R_L} \right]^2 R_{in}. \quad (2.16)$$

Se somarmos (2.15) e (2.16), e resolver para  $\Delta T_{TEG}$ , encontramos (2.17),

$$\Delta T_{TEG} = \frac{K}{K + 2K_{in} + \frac{2\alpha^2 T_m}{R_{in} + R_L}} \Delta T \approx \frac{K}{K + 2K_{in}} \Delta T = \beta \Delta T, \quad (2.17)$$

onde  $\Delta T = T_H - T_C$  é a diferença de temperatura externa às placas cerâmicas aplicada no dispositivo, e  $T_m = (T_H + T_C)/2$  é a temperatura média do mesmo.

A partir de (2.17) podemos perceber que o gradiente efetivo de temperatura, ou seja, o que determina a potência de saída, é menor que a temperatura aplicada externamente. Isso ocorre devido à condutância térmica  $K$  das placas cerâmicas, criando uma diferença de temperatura entre a fonte externa e a junção do termopar. Esse problema pode ser reduzido se for utilizado um material com uma condutância térmica  $K$  de grande valor, de preferência o maior possível.

O gradiente  $\Delta T_{TEG}$  não depende apenas das características térmicas e elétricas da TEG, mas também da carga a ser conectada devido ao efeito Peltier. Uma carga de baixa resistência implica em uma corrente mais elevada, e por consequência um efeito Peltier mais forte, como mostrado em (2.7). O efeito Peltier eleva a temperatura do lado frio e reduz a temperatura no lado quente, e é representado pelo terceiro termo do denominador em (2.17).

Podemos então por fim definir a potência de saída de um par termoelétrico. A potência de saída  $P_L$  é dada pelo produto da tensão  $V_L$ , na carga  $R_L$ , multiplicado pela corrente  $I_L$ . A tensão  $V_L$  por sua vez é dada pela seguinte relação:

$$V_L = \alpha \Delta T_{TEG} - I_L R_{in} , \quad (2.18)$$

onde o primeiro termo é a tensão  $V_G$ , e o segundo corresponde a queda de tensão na resistência interna  $R_{in}$ . Assim teremos a potência dada por

$$P_L = I_L V_L = I_L (\alpha \Delta T_{TEG} - I_L R_{in}) . \quad (2.19)$$

Se substituirmos  $I_L$  de (2.8) em (2.19)

$$\begin{aligned} P_L &= \alpha^2 \Delta T_{TEG}^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2} \\ &= \alpha^2 \beta^2 \Delta T^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2} . \end{aligned} \quad (2.20)$$

Por Thevenin, a potência máxima é encontrada quando a carga possui o mesmo valor de resistência que  $R_{in}$ , assim temos

$$P_{Lmax} = \frac{\alpha^2 \Delta T_{TEG}^2}{4R_{in}} = \frac{\alpha^2 \beta^2 \Delta T^2}{4R_{in}}. \quad (2.21)$$

Todos as equações até agora foram definidas para um único par de semicondutores, assumindo então que uma TEG é composta por N pares, a sua resistência e a condutância internas, dadas em (2.9) e (2.14) respectivamente, devem ser multiplicadas por N para representar o módulo inteiro. Como agora existem N pares ligados em série, a tensão de saída  $V_G$ , mostrada em (2.6), tem seu valor acrescido em N vezes, e assim a potência de saída também é modificada para representar a potencia total gerada pelo módulo. As equações modificadas são mostradas abaixo:

$$V_G = N\alpha\Delta T_{TEG}, \quad (2.22)$$

$$R_{in} = \frac{2N\rho h}{A_{leg}}, \quad (2.23)$$

$$K_{in} = \frac{2N\lambda A_{leg}}{h}, \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} P_L \\ &= N^2 \alpha^2 \Delta T_{TEG}^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2}, \quad (2.25) \\ &= N^2 \alpha^2 \beta^2 \Delta T^2 \frac{R_L}{(R_{in} + R_L)^2}. \end{aligned}$$

Além das equações de desempenho citadas acima, podemos calcular a eficiência de transformação de energia para uma ou um conjunto de placas de Peltier através da equação abaixo

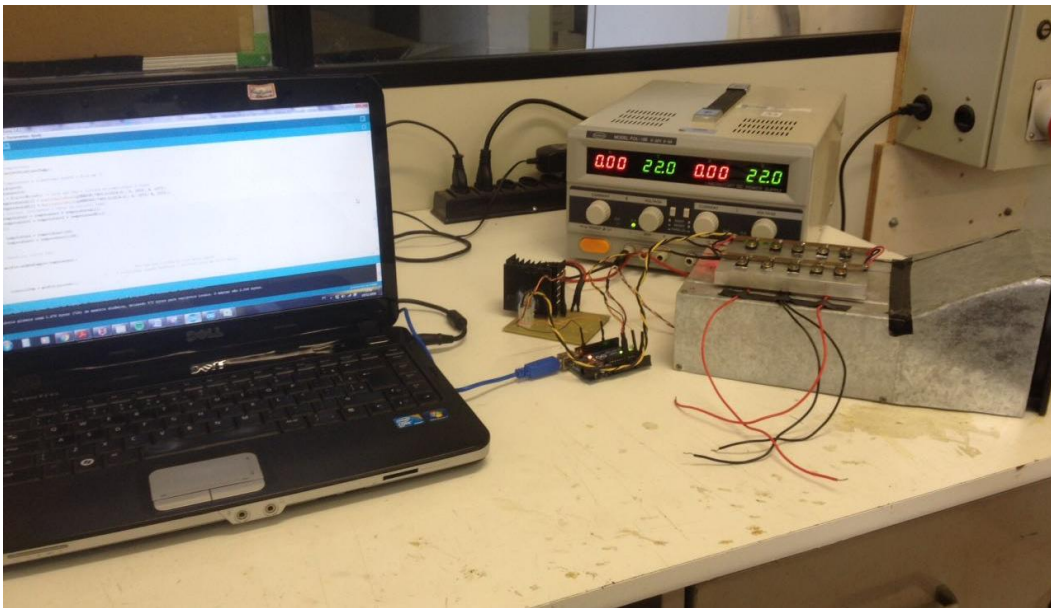
$$\eta = \frac{P_L}{Q_H}. \quad (2.26)$$

As equações apresentadas neste capítulo caracterizam completamente o funcionamento dos módulos termoeletricos. No próximo capítulo será apresentado um sistema, construído para efetuar ensaios nos módulos termoeletricos, e assim obter um modelo que possa ser usado para rastrear a máxima transferência de potência (MPPT).

### 3 BANCADA PARA ENSAIO DAS CÉLULAS DE PELTIER

Para a verificação do efeito Seebeck e obtenção do modelo elétrico dos módulos termoelétricos, uma bancada de ensaios foi construída. O sistema desenvolvido permite medir a potência gerada pelo módulo em função de alguns parâmetros, tais como a diferença de temperatura e a carga de saída utilizada. A Figura 9 mostra o sistema de ensaios construído.

Figura 9 - Bancada de ensaios montada



Fonte: Próprio autor

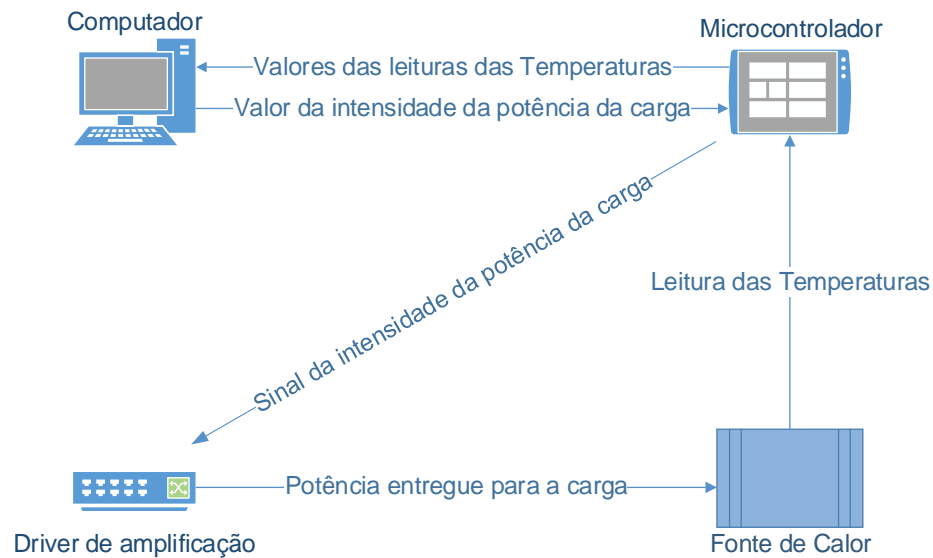
Para facilitar o entendimento do sistema, a Figura 10 mostra um esquemático do funcionamento do sistema de medição.

Conforme a Figura 10, o microcontrolador recebe a leitura de temperatura da fonte quente que se encontra em uma das faces do módulo, que por sua vez envia esse dado ao computador que armazena o valor e compara com o valor referência, definindo a intensidade do sinal a ser aplicada na carga. Essa informação é passada para o microcontrolador que envia a intensidade de sinal para o driver de amplificação. O driver amplifica o sinal de forma que a corrente demandada pela fonte quente seja suprida a fim de manter a temperatura no valor desejado.

Podemos separar isso em subsistemas para melhor compreender o funcionamento do sistema



Figura 10 - Fluxograma do funcionamento do sistema de controle de temperatura da fonte quente



Fonte: Próprio autor

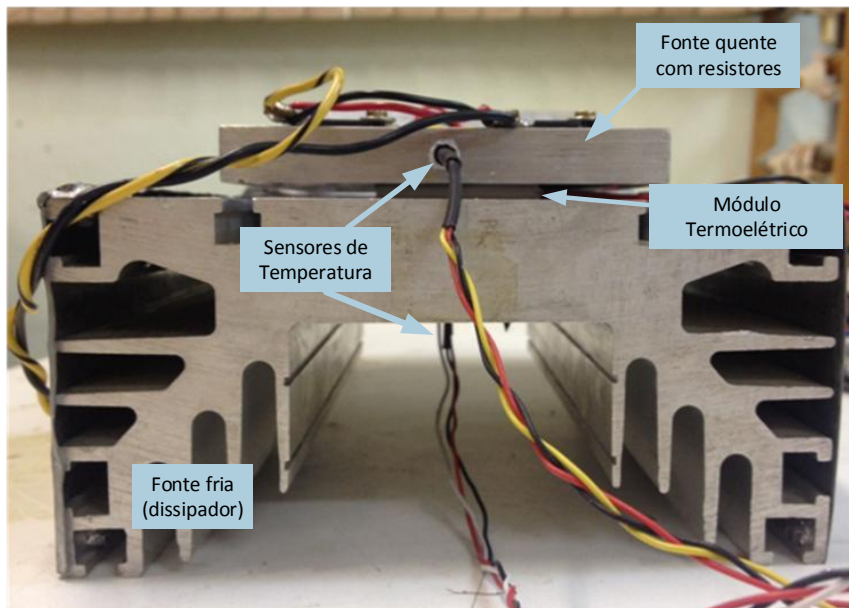
### 3.1 FONTES DE CALOR

Como descrito anteriormente, a geração de energia nos módulos termoelétricos acontece pelo princípio do efeito Seebeck, onde é necessária a existência de uma diferença de temperatura entre as superfícies do módulo para que o mesmo transforme essa energia térmica em energia elétrica.

Para que seja possível ensaiar as placas termoelétricas o sistema de calor, visto na Figura 11, constituído por um lado frio e um lado quente foi construído. O lado frio é basicamente um dissipador de calor com baixa resistência térmica e um cooler, que não aparece na imagem. A fonte fria tem o objetivo deixar a superfície da placa o mais próxima possível da temperatura ambiente. Nesse lado não haverá controle de temperatura.

Para construir o lado quente foi utilizado um bloco metálico e resistores de potência, em encapsulamento TO-220. O princípio de funcionamento do resistor é simples, gera calor por efeito Joule quando uma corrente sobre ele é aplicada. Se vários resistores forem colocados juntos uma fonte de calor com maior potência é criada e pode ser utilizada para diversos módulos ao mesmo tempo. Não é possível que os resistores sejam colocados diretamente sobre as placas termoelétricas, assim um bloco metálico foi utilizado homogeneizar a distribuição de calor sobre os módulos emulando aplicações existentes.

Figura 11 – Sistema construído para ensaio dos módulos termoelétricos: dissipador de calor, dois sensores de temperatura LM-35, célula de Peltier TEC-12715, fonte de calor com 10 resistores TO-220 de 27  $\Omega$  - 30 W.



Fonte: Próprio autor

O protótipo foi construído com uma chapa de alumínio de 120x120x1,9mm e dez resistores em paralelo como podemos ver na Figura 12. O número de resistores foi considerado para obter melhor distribuição de calor sobre a chapa e aumentar a potência térmica da fonte. Os resistores foram colocados em paralelo para obter maior potência sobre cada um, uma vez que a tensão máxima de entrada é de 22 V.

Figura 12 - Fonte de calor, composta por um bloco de alumínio e 10 resistores TO-220 de 27  $\Omega$  - 30 W.



Fonte: Próprio autor

## 3.2 CONTROLE DE TEMPERATURA DA FONTE QUENTE

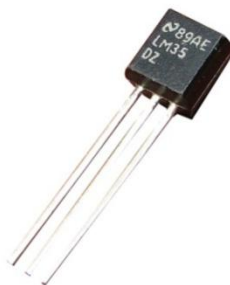
Para realização dos ensaios é necessário que a fonte de calor tenha pouca variação de temperatura. O *hardware* de controle para realizar tal função é composto pelo microcontrolador, que tem a função de definir a potência entregue aos resistores, o *driver* de amplificação, que tem o objetivo de condicionar o sinal de potência de saída, e o transdutor de temperatura, que mede o valor da temperatura na fonte de calor.

### 3.2.1 O transdutor de temperatura

O transdutor de temperatura utilizado, o LM35, é um sensor com uma saída linear de tensão em função da temperatura, sua saída tem uma variação de  $10\text{mV}/^\circ\text{C}$  o que o torna muito confiável e de fácil utilização. O tipo de LM35 utilizado nesse projeto, com o encapsulamento TO-92 (Figura 13), é muito sensível, então, para que o vento gerado pelo cooler não interfira nas medições e para que seja medido o mais perto possível da superfície do módulo, evitando os erros do gradiente de temperatura na fonte quente e no dissipador, foram efetuados furos para alojar os sensores de temperatura, como pode ser visto na Figura 11, tendo assim um maior contato e evitando a interferência do vento gerado pelo cooler. Um segundo LM35 foi utilizado para medir a temperatura da face do dissipador mais próxima da célula de Peltier somente para fins de observação, uma vez que não é feito o controle de temperatura no lado frio.

O sensor é alimentado com 5V, e o sinal gerado pelo LM35 é enviado à porta de leitura analógica do microcontrolador.

Figura 13 – LM35 com encapsulamento TO-92

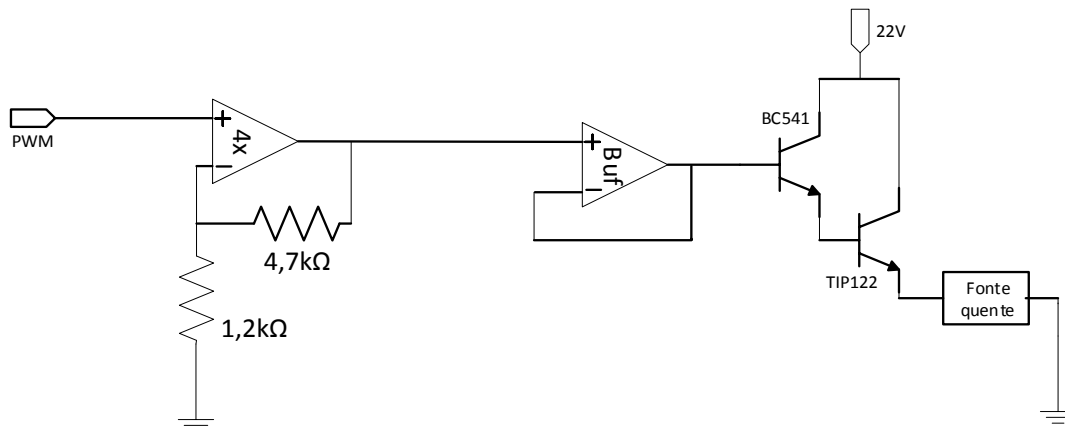


Fonte: VIDA DE SILÍCIO. **LM35 – Medindo temperatura com Arduino**. Disponível em: <<http://blog.vidadesilicio.com.br/arduino/basico/lm35-medindo-temperatura-com-arduino/>>

### 3.2.2 Driver de amplificação

Foi desenvolvido um amplificador para amplificar o sinal PWM enviado pelo microcontrolador, antes de chegar nos resistores da fonte. O circuito, exemplificado na Figura 14, possui um amplificador operacional funcionando como um amplificador com ganho de aproximadamente 4 vezes com sua saída ligada em um buffer que por sua vez tem a saída ligada na base do transistor BC541. Este transistor, em conjunto com o TIP 122 formam o driver de alimentação da carga resistiva. A saída do driver possui uma amplitude de pulso de 22 V e uma corrente máxima de 8 A.

Figura 14 - Esquemático do driver de amplificação utilizado para alimentar a carga resistiva de aquecimento



Fonte: Próprio autor

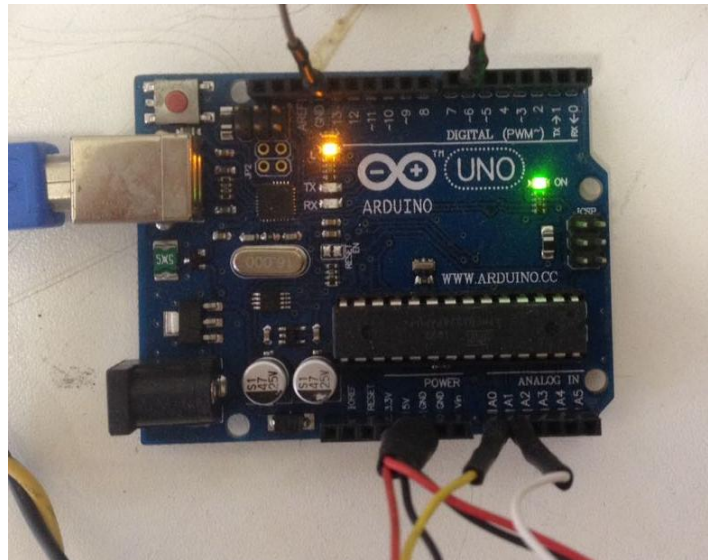
### 3.2.3 O microcontrolador

Nesse projeto foi utilizada a placa Arduino Uno, mostrado na Figura 15, para efetuar o controle de temperatura. O Arduino Uno é um placa baseada no microcontrolador ATmega328P. A placa possui diversas entradas e saídas digitais e analógicas, e possui a facilidade de utilizar uma comunicação e alimentação via USB. A escolha por essa plataforma foi feita pelo fato dela ser muito versátil e de fácil programação, além de possuir um Arduino Uno e ter a experiência de já ter utilizado anteriormente.

O Arduino tem a função de controlar a temperatura do lado quente dos módulos termoeletricos. Através da medição da temperatura real pelo sensor e de uma referência digital da temperatura desejada, um sinal retangular de largura

variável (PWM - Pulse With Modulation) é enviado ao circuito de driver, mostrado na Figura 14. Este sinal possui amplitude 0 ou 5 V.

Figura 15 - Placa Arduino Uno utilizada na realização do controle



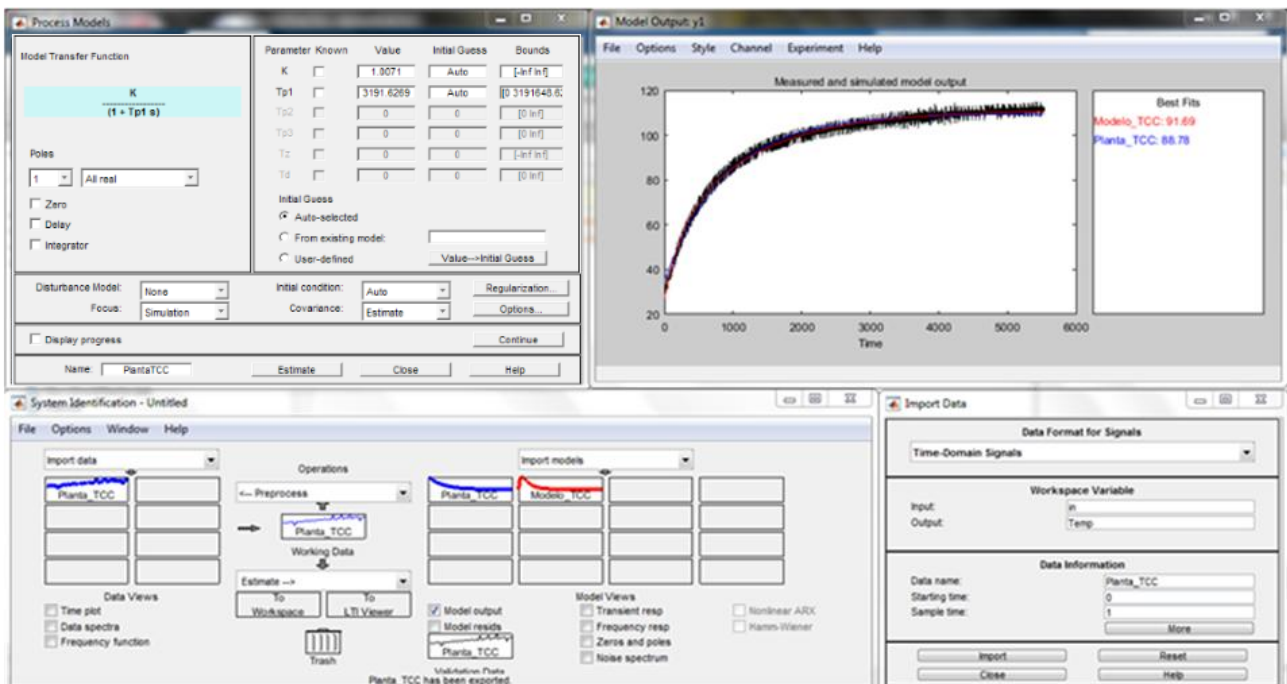
Fonte: Próprio autor

### 3.2.4 Técnica de identificação da planta e controle do sistema

Antes de fazer o projeto do controlador, foi necessário identificar o modelo da planta do sistema de aquecimento. Utilizando o Arduino, foi aplicado um degrau de tensão na carga e foi medida a temperatura da planta a cada um segundo, utilizando o sensor de temperatura LM35, até que a temperatura se estabilizasse. Foram amostrados 5.538 temperaturas para criar a curva de resposta ao degrau.

Finalizada a aquisição de dados foi utilizada uma ferramenta do Matlab<sup>®</sup> chamada *System Identification*, que permite, através dos dados amostrados, fazer uma aproximação numérica para a planta (Figura 16). No caso em questão foi escolhida uma aproximação para uma função transferência de primeira ordem. O resultado obtido teve, segundo o software, uma fidelidade de aproximadamente 89%, o que torna o modelo suficientemente confiável.

Figura 16 - Janela do System Identification Tool do Matlab® com a resposta de característica da planta de temperatura.



Fonte: Próprio autor

A função transferência resultante desse processo é dada abaixo

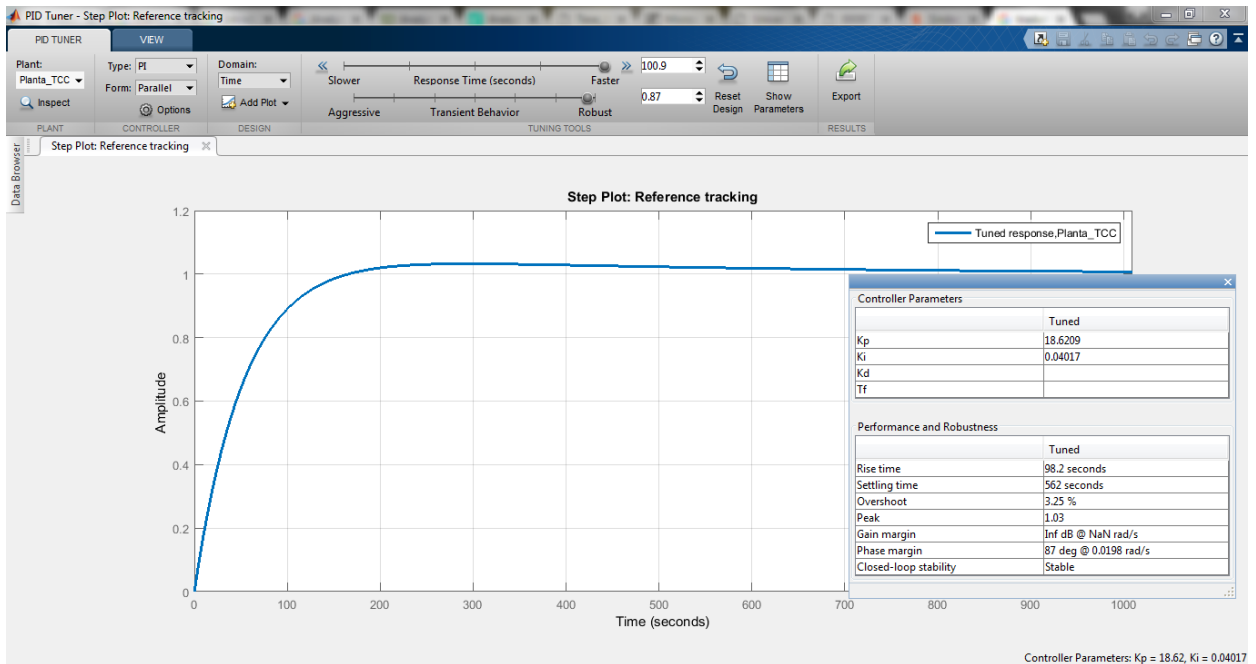
$$G(s) = \frac{0,9523}{898,872s + 1} \quad (3.1)$$

A partir dessa função de transferência, utilizando o PID *turner*, outra extensão do Matlab®, foi possível projetar uma função de controle de temperatura para a planta. Foram escolhidos alguns parâmetros para selecionar qual seria o melhor tipo de controle, como um *overshoot* que não ultrapassasse 5%, pois o tempo de resfriamento é mais longo do que o de aquecimento, e um tempo de assentamento menor do que 20 minutos, uma vez que a resposta de um sistema térmico é geralmente lento. O resultado obtido foi de um controle PI com um  $k_p=18,6$  e um  $k_i=0.04017$ , com sua resposta ao degrau mostrada na Figura 17

A função transferência do controlador resultou na forma:

$$G_c(s) = \frac{18,6}{1 + 0,04017s} \quad (3.2)$$

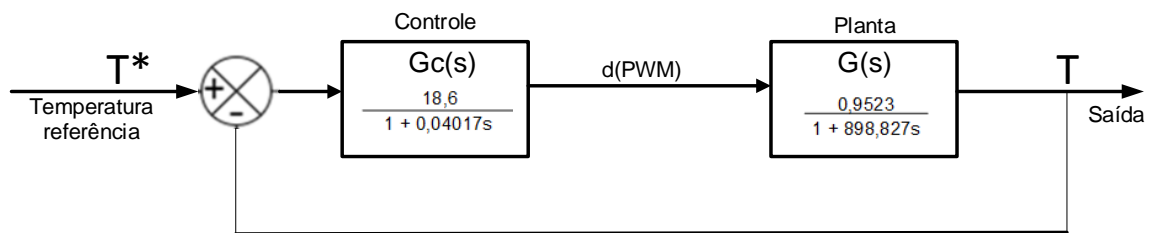
Figura 17 - Resposta ao degrau no PID tuner do controle projetado



Fonte: Próprio autor

O sistema completo, com controle de temperatura em malha fechada, pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 18.

Figura 18 - Diagrama de blocos do controle

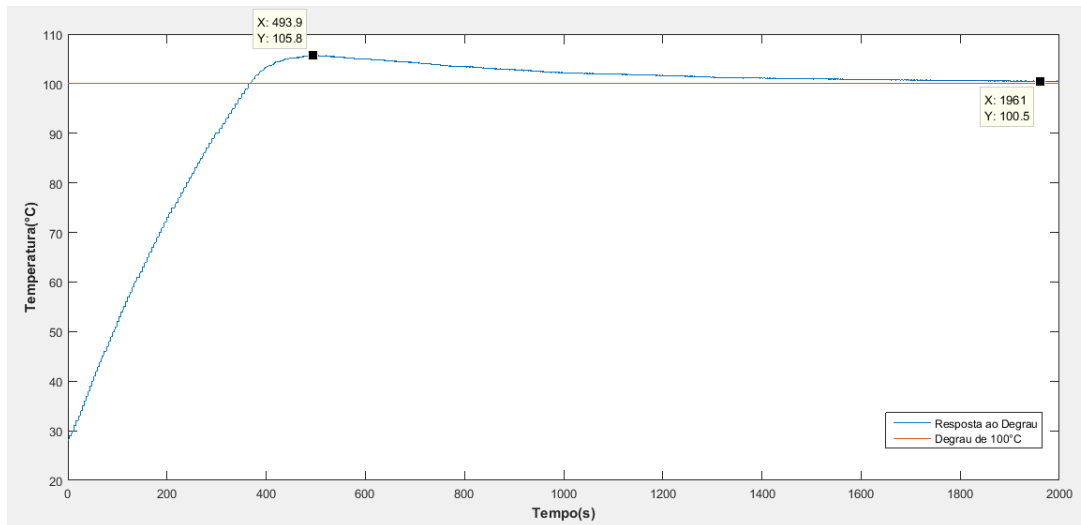


Fonte: Próprio autor

Para a implementação do sistema de controle digital proposto, foi utilizado a ferramenta de programação Arduino IDE disponibilizada pela Arduino®. O algoritmo do controlador PI pode ser lido na íntegra no Apêndice A.

Para fins de validação do controle um ensaio de resposta ao degrau foi realizado. Com um degrau de temperatura de 100 °C obtemos a resposta mostrada pela Figura 19.

Figura 19 - Resposta do controle desenvolvido a um degrau de 100 °C



Fonte: Próprio autor

O resultado do ensaio foi satisfatório, sendo que o tempo de assentamento foi de aproximadamente 18 minutos, o que é menor que os 20 minutos estipulados como tempo máximo. Apesar do overshoot do ensaio ter sido de 5,8%, diferente dos 3,25% projetados, o tempo de assentamento ficou dentro do esperado.



## 4 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DA CÉLULA DE PELTIER

### 4.1 ENSAIOS REALIZADOS

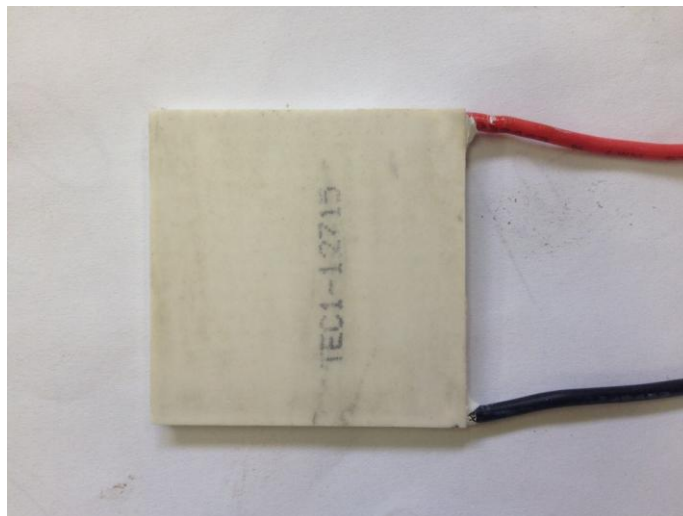
Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados a fim de modelar a célula termoelétrica.

Para realização dos testes, foram adquiridos módulos termoelétricos comerciais do tipo TEC, ou seja, módulos fabricados com a função de trabalharem como refrigeradores, através do efeito Peltier, e não como termogeradores. As TEGs, que são específicas para geração, possuem um preço mais elevado e são difíceis de encontrar no Brasil. Já as TECs são encontradas com maior facilidade e com um preço reduzido, uma vez que já estão presentes em alguns equipamentos de refrigeração produzidos no país.

A tecnologia utilizada na fabricação das TECs é muito parecida com a utilizada nas TEGs, tendo apenas algumas características alteradas, então, neste trabalho foi optado por utilizar módulos do tipo TEC.

Foram compradas duas células do modelo TEC1-12715 (Figura 20), da fabricante Habei, com o objetivo de obter o seu modelo. A Tabela 1 mostra algumas características desse módulo. Suas informações técnicas completas podem ser vistas no Anexo A .

Figura 20 - TEC1-12715 adquirida para realização dos ensaios e obtenção do modelo



Fonte: Próprio autor

Tabela 1 - Características principais do módulo de Peltier Habei TEC1-12715

V <sub>máx</sub> (V)	I <sub>máx</sub> (A)	R <sub>in</sub> (Ω) (25 °C)	Dimensão (LxCxE)(mm)
15,4	15	0,7 ≈ 0,8	40 x 40 x 3,8

Fonte: Próprio autor

Como comentado anteriormente, os parâmetros informados pelo fabricante são relacionados à função de refrigeração das placas, porém o conhecimento do valor da resistência interna é útil para comparar com o obtido nos ensaios.

#### 4.1.1 Resistência interna do módulo

Para a determinação da resistência interna do módulo não é possível a utilização de (2.24) por falta de informações, e muito menos a realização de medidas diretas com um multímetro enquanto a placa está em funcionamento por gerarem valores inconsistentes.

No trabalho apresentado por Mitrani (2006), é mostrado que a resistência interna do módulo varia em função da temperatura. Desse modo, foram feitas medidas das tensões de circuito aberto em diferentes condições de temperatura. Em seguida, foram medidas as tensões em diferentes cargas resistivas com valores variando de 0,1 Ω a 8,2 Ω. O resultado de um dos ensaios é apresenta na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio de carga para temperatura média de 50,25 °C e uma diferença de temperatura de 29,5 °C

Ensaio de carga: T <sub>H</sub> =65 °C ; T <sub>C</sub> =35,5 °C ; T <sub>m</sub> =50,25 °C ; ΔT=29,5°C ; V <sub>G</sub> = 0,824 V							
R <sub>L</sub> (Ω)	V(V)	I(A)	P(W)	R <sub>L</sub> (Ω)	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,060	0,529	0,032	1,306	0,409	0,313	0,128
0,161	0,083	0,516	0,043	1,446	0,433	0,299	0,130
0,231	0,115	0,498	0,057	1,476	0,439	0,297	0,131
0,286	0,138	0,483	0,067	1,586	0,452	0,285	0,129
0,343	0,161	0,469	0,076	1,656	0,463	0,280	0,129
0,406	0,185	0,456	0,084	1,821	0,482	0,265	0,128
0,476	0,214	0,450	0,096	1,906	0,490	0,257	0,126
0,571	0,244	0,427	0,104	2,001	0,500	0,250	0,125
0,696	0,273	0,392	0,107	2,166	0,521	0,241	0,125
0,816	0,308	0,377	0,116	2,696	0,565	0,210	0,118
0,906	0,330	0,364	0,120	3,306	0,600	0,181	0,109
1,006	0,351	0,349	0,122	4,626	0,653	0,141	0,092
1,026	0,361	0,352	0,127	5,416	0,677	0,125	0,085
1,082	0,370	0,342	0,127	6,686	0,703	0,105	0,074
1,198	0,394	0,329	0,130	8,216	0,725	0,088	0,064

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 2 mostra o resultado do ensaio realizado para uma temperatura no lado quente de  $T_H=65\text{ °C}$  e no lado frio de  $T_C=35,5\text{ °C}$ , obtendo assim uma diferença de temperatura de  $\Delta T=29,5\text{ °C}$  e uma temperatura média  $T_m=50,25\text{ °C}$ .

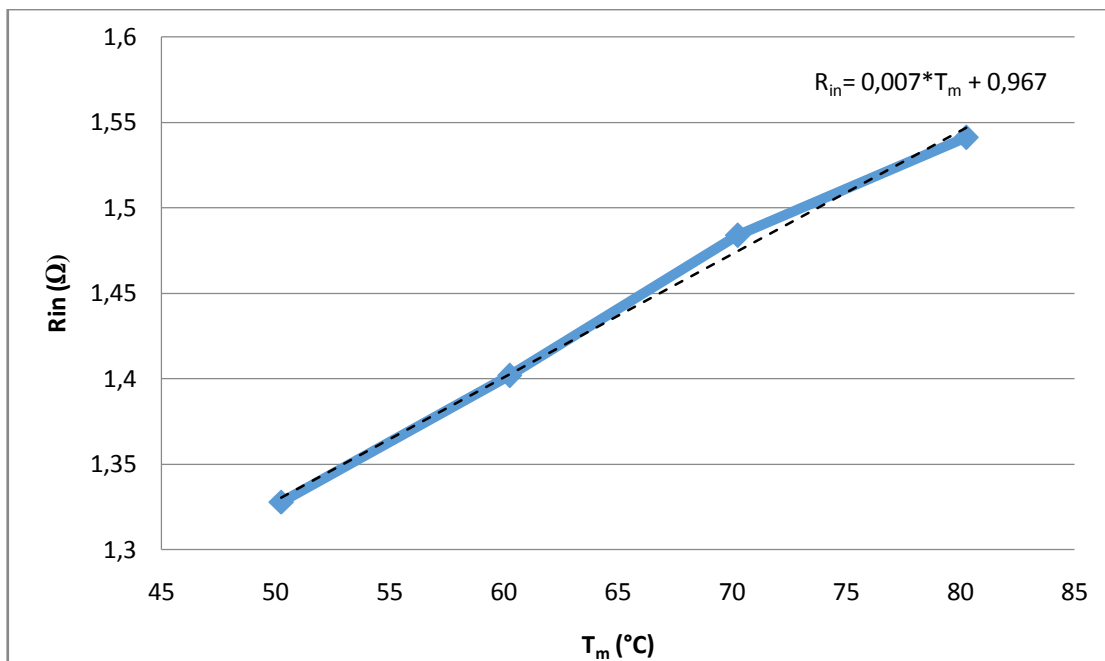
Ao adicionarmos uma carga na saída do módulo, o efeito Peltier tende a reduzir a diferença de temperatura efetiva da célula, podendo assim distorcer alguns valores medidos. Para minimizar os erros provenientes desse efeito os ensaios tiveram que ser realizados rapidamente, evitando variações na diferença de temperatura, entretanto, visando reduzir ainda mais os erros, foram utilizados somente os onze valores de cargas, destacados na Tabela 2, que se encontram mais próximos da potência máxima para calcular a resistência interna a partir da seguinte relação:

$$R_{in} = \frac{V_G}{I_L} - R_L, \quad (4.1)$$

e com os onze valores calculados foi feito uma média para achar o valor de  $R_{in}$ .

Este mesmo ensaio foi repetido para a mesma diferença de temperatura (Apêndice B), porém para três temperaturas médias diferentes ( $60,25\text{ °C}$ ,  $70,25\text{ °C}$  e  $80,25\text{ °C}$ ) e o resultado dos valores de resistência interna obtido são dados pela Figura 21.

Figura 21 - Valor da resistência interna para diferentes valores de temperatura média



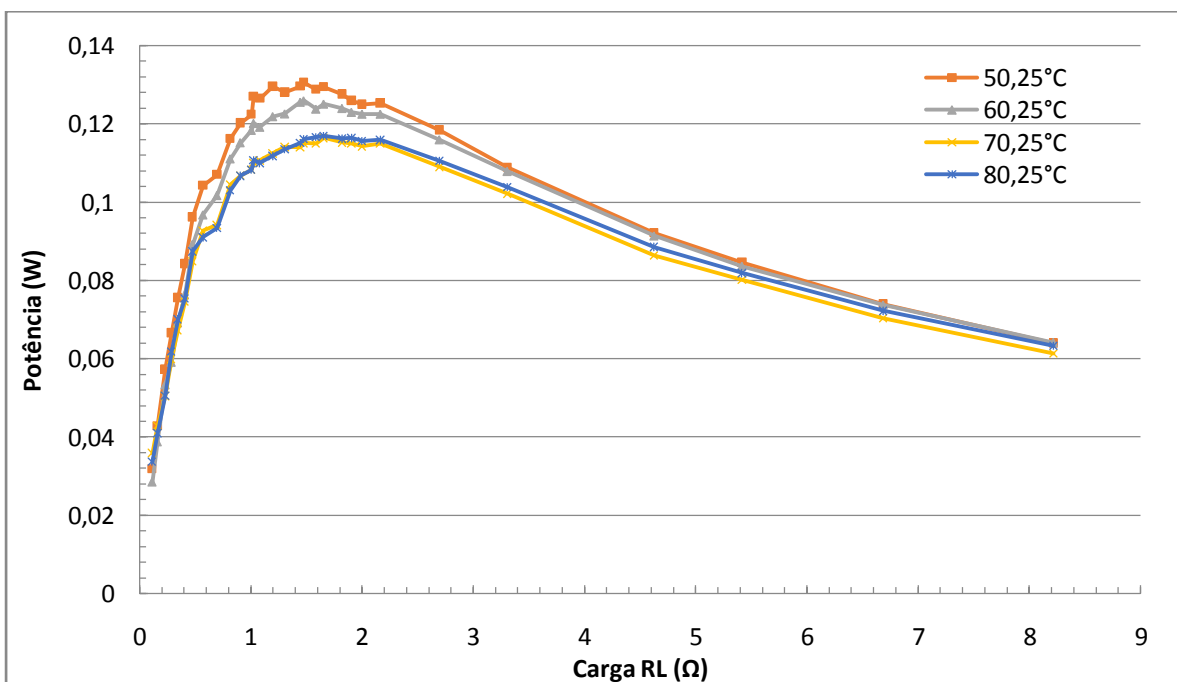
Fonte: Próprio autor

Podemos ver claramente que a resistência interna aumenta linearmente com o aumento da temperatura média do módulo, sendo que o menor valor de resistência observado foi de  $1,3163 \Omega$  e o maior valor foi de  $1,5411 \Omega$ . Uma linha de tendência foi adicionada ao gráfico, assim temos a equação da resistência interna em relação a temperatura média.

#### 4.1.2 Potência gerada pelo módulo

Saber quanta potência o gerador termoeletrico é capaz de gerar é muito importante para saber a quantidade de módulos que serão necessários em cada aplicação. Assim, para as mesmas condições descritas no experimento anterior foram traçadas as curvas de potência em cada uma das temperaturas médias, mostradas na Figura 22.

Figura 22 - Curvas de potência transferida para carga para diferentes temperaturas médias e com mesmo  $\Delta T$



Fonte: Próprio autor

O principal fator para determinar a potência de saída é a diferença de temperatura, porém nesse caso o gradiente térmico é constante e mesmo assim existe diferença na potência gerada. Isso se deve ao fato de que quanto maior a

temperatura média, maior a resistência interna, gerando mais perdas por efeito Joule e fazendo com que a potência gerada seja menor. Com isso podemos perceber que utilizar o gerador em temperaturas mais baixas pode trazer benefícios, se uma grande diferença de temperatura puder se criada.

Com esse ensaio também foi possível obter o coeficiente de Seebeck do módulo. Apesar de o coeficiente Seebeck variar com a temperatura, mesmo que de forma não muito significativa, não foi levado esse efeito em consideração. Para obter o coeficiente foi utilizada a equação (2.6) em cada um dos quatro casos anteriores e feita uma média aritmética, obtendo como resposta um coeficiente  $\alpha$  de 0,0277 V/K.

Conhecendo o comportamento do módulo para diferentes temperaturas médias, uma análise do comportamento em diferentes gradientes de temperatura pode ser feita.

Nesses ensaios foi procurado obter a máxima diferença de temperatura possível para cada temperatura aplicada no lado quente. As temperaturas de cada ensaio são apresentadas na Tabela 3 e na Figura 23 são apresentadas as curvas correspondentes.

Tabela 3 - Configuração de temperatura dos ensaios realizados para as curvas de potência gerada em função da carga.

	$T_H$ (°C)	$T_C$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$T_m$ (°C)
Ensaio 1	50	32	18	41
Ensaio 2	60	34	26	47
Ensaio 3	70	35,5	34,5	52,75
Ensaio 4	80	37	43	58,5
Ensaio 5	90	38	52	64
Ensaio 6	100	39,7	60,3	69,85

Fonte: Próprio autor

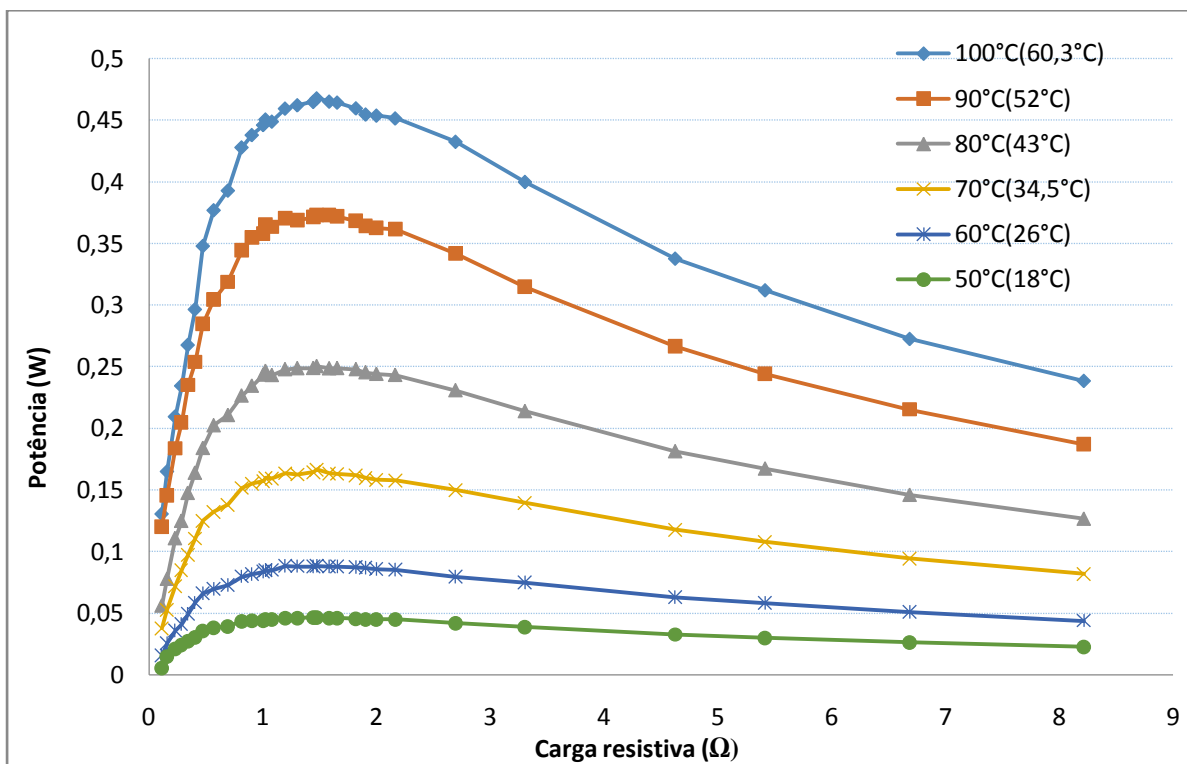
Os valores de carga utilizados para a realização dos ensaios descritos na Tabela 3 são os mesmo apresentados na Tabela 2 e podem ser vistos no Apêndice B. A Figura 23 traz as curvas de potência para cada um dos ensaios.

O comportamento da potência gerada pelo módulo termoelétrico fica muito claro com as curvas apresentadas pela Figura 23. O aumento da diferença de

temperatura faz com que a potência gerada na saída cresça consideravelmente. Enquanto primeiro ensaio a potência máxima gerada chegou ao entorno de 50 mW, no sexto ensaio a potência máxima alcançou um valor próximo a 470 mW.

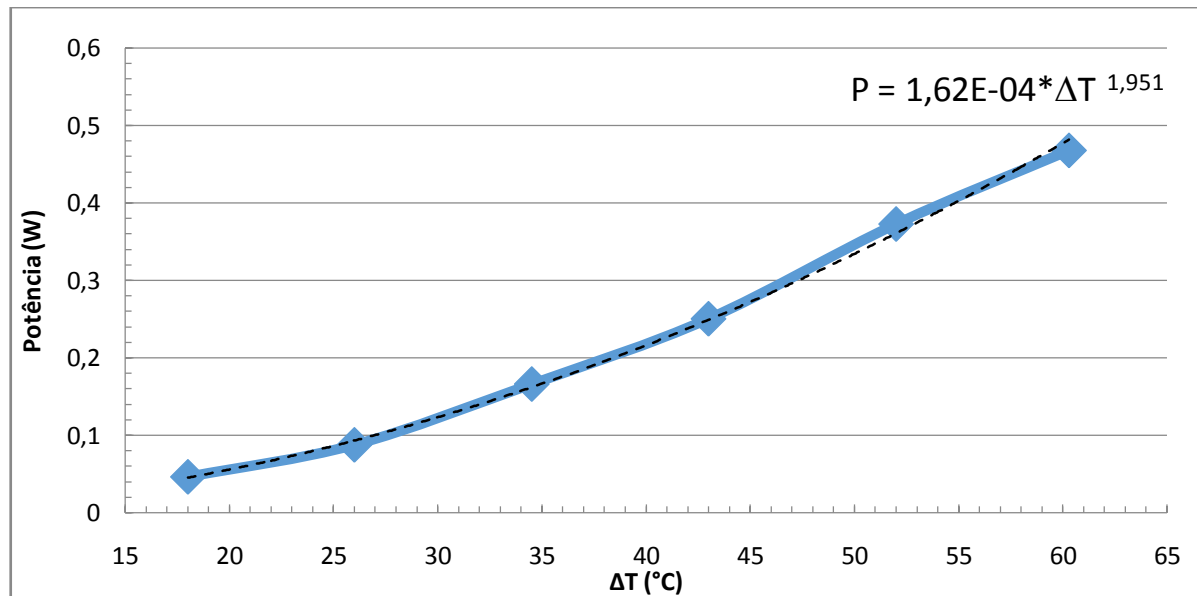
O comportamento da potência máxima gerada em função da diferença de temperatura é melhor observado na Figura 24. Pode-se perceber que o crescimento pode ser aproximado por uma função potencial, como mostrado pela curva de tendência na Figura 24. Com essa curva é possível estimar a potência gerada quando a placa se encontra em grandes diferenças de temperatura, sem que seja necessária a realização de ensaios.

Figura 23 - Ensaio de carga para diferentes valores de  $T_H (\Delta T)$



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Comportamento da potência máxima de saída em função da diferença de temperatura



Fonte: Próprio autor

#### 4.2 COMPROVAÇÃO DO MODELO

Utilizando os dados adquiridos durante os ensaios é possível utilizar o modelo exposto no Capítulo 2 para realizar uma simulação.

A Tabela 4 traz algumas características importantes da TEC para que o modelo seja elaborado

Tabela 4 - Características relevantes do módulo para a montagem do modelo

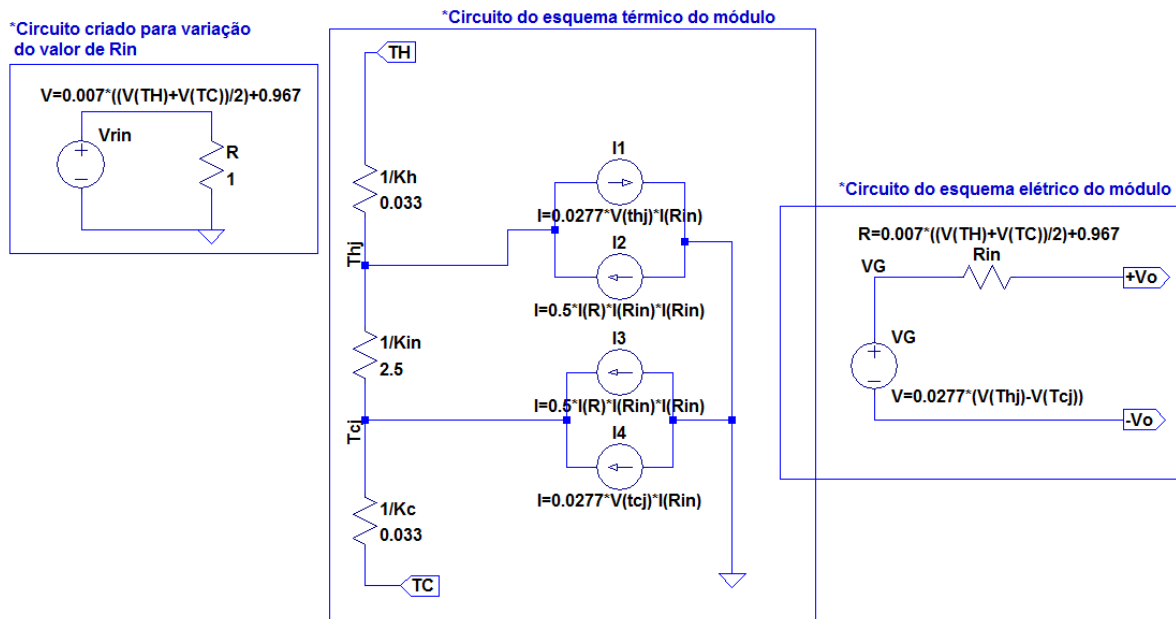
Modelo	$R_{in}$ ( $\Omega$ )	$\alpha$ (V/K)	$K_{in}$ ( $\Omega^{-1}$ )	$K$ ( $\Omega^{-1}$ )
TEC1-12715	$0,007 * T_m + 0,967$	0,0277	0,5	30

Fonte: Próprio autor

onde  $R_{in}$  e  $\alpha$  foram determinados pelos ensaios realizados. Os coeficientes  $K_{in}$  e  $K$  não são fornecidos pelo fabricante das placas, assim, neste trabalho foram utilizados os mesmo valores dados por Dalola (2009), uma vez que a placa utilizada em ambos casos possuem características parecidas.

Com esses dados em mãos foi utilizado o *LTspice®*, um *software* de simulação de circuitos disponibilizado gratuitamente pela *Linear Technology®*, uma empresa de componentes eletrônicos, que é de fácil utilização. O modelo da célula de Peltier utilizado nas simulações pode ser visto na Figura 25.

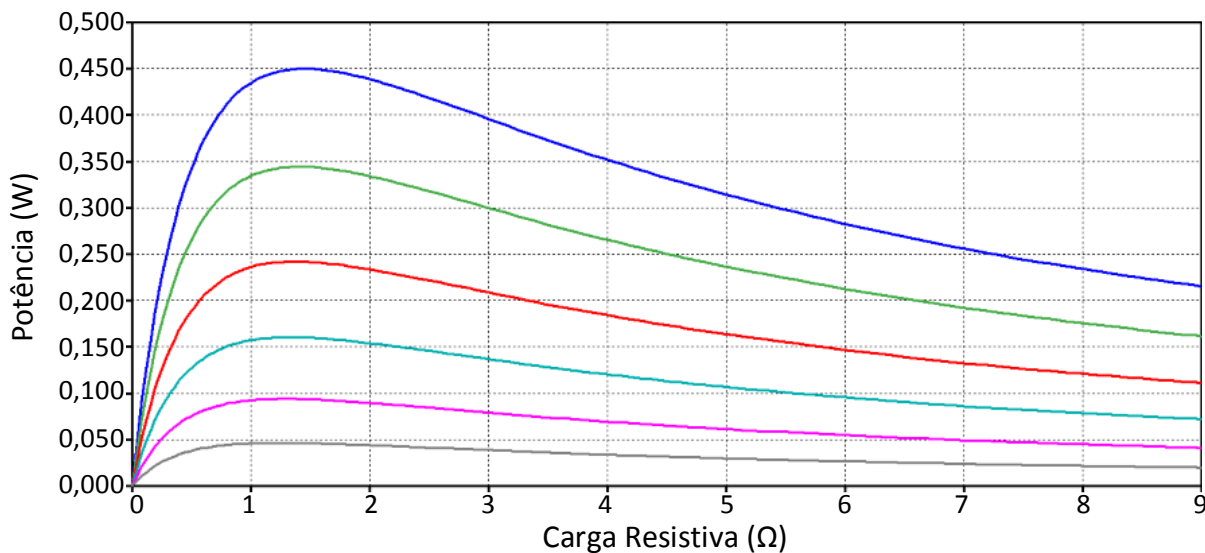
Figura 25 - Modelo elétrico da TEC implementado no simulador LTspice®



Fonte: Próprio autor

Para validar o modelo, foi feita uma simulação, mostrada na Figura 26, com as mesmas condições de temperatura utilizadas nos ensaios práticos, podendo assim, comparar os resultados.

Figura 26 - Simulação de carga do modelo elétrico da célula de Peltier



Fonte: Próprio autor

Ao compararmos o resultado da simulação da Figura 26 com o resultado experimental da Figura 23 observamos uma semelhança muito grande, e ao



comparar os valores de máxima potência dos dois casos na Tabela 5, apesar de apresentarem erros, percebemos que o modelo pode ser considerado válido.

Tabela 5 - Comparação dos valores simulados e experimentais para diferentes gradientes de temperatura

T <sub>m</sub> (°C)	Potência máxima (W)		Erro(%)
	Experimental	Simulado	
18	0,0465	0,0465	-0,03
26	0,0883	0,0939	-6,36
34,5	0,1667	0,1604	3,75
43	0,2504	0,2420	3,39
52	0,3730	0,3443	7,70
60,3	0,4679	0,4500	3,82

Fonte: Próprio autor

Uma das fontes de erro que pode explicar os valores apresentados na Tabela 5 é a não consideração da dependência térmica da constante de Seebeck. Outro fator que pode levar à erros são as aproximações da resistência interna e a condutância térmica do módulo. Apesar dos erros, o modelo pode ser utilizado considerando que na temperatura com maior geração de energia existe um erro de apenas 3,82%.

Utilizando os dados adquiridos nas simulações acima, pode ser feita uma estimativa da eficiência do módulo para a diferença de 60 °C no ponto de máxima potência. Utilizando a equação (2.26) teremos:

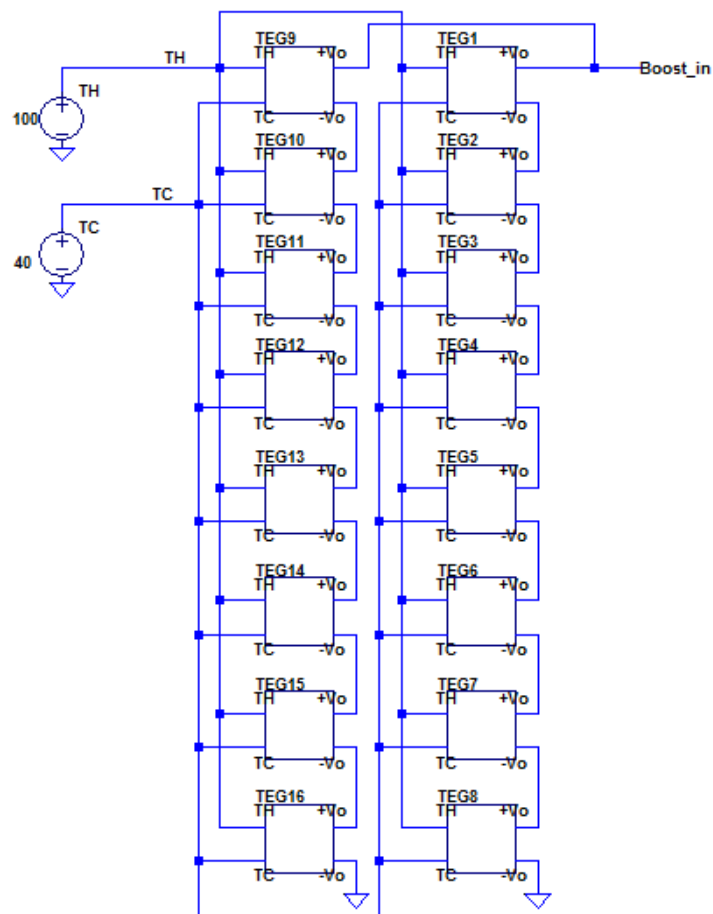
$$\eta = \frac{P_L}{Q_H} = \frac{0,450}{21,64} \approx 2\% . \quad (4.2)$$

A eficiência encontrada é consideravelmente baixa, porém é válido ressaltar que o módulo ensaiado não foi desenvolvido para esse objetivo. Os módulos termoelétricos possuem normalmente baixa eficiência de transformação de energia. Módulos mais específicos para geração podem alcançar níveis de eficiência de aproximadamente 7% quando utilizados em aplicações com grandes gradientes de temperatura.

## 5 CONTROLE DE SEGUIMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Para verificar uma das aplicações práticas do módulo, foi feita uma simulação onde o objetivo é utilizar as células e um conversor do tipo Boost para carregar uma bateria de 12 V. Um módulo, nas condições de máxima potência apresentadas nos ensaios, tem uma tensão e corrente de saída de aproximadamente 830 mV e 560 mA respectivamente, com uma potência gerada de 470 mW, o que claramente é insuficiente para carregar a bateria. Para aumentar a tensão de saída devem-se colocar módulos em série, e para aumentar a corrente, módulos em paralelo. A fim de obter valores mais favoráveis, nessa aplicação serão utilizados oito módulos em série com mais oito módulos em paralelo, chegando a um total de 16 placas termoeletricas. Esse arranjo é mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Arranjo dos módulos para simulação complementar



Fonte: Próprio autor

## 5.1 O CONVERSOR BOOST

Com o número de módulos definidos é possível projetar o conversor Boost para adequar a tensão e corrente de saída para a aplicação.

Os parâmetros principais do conversor são mostrados na Tabela 6.

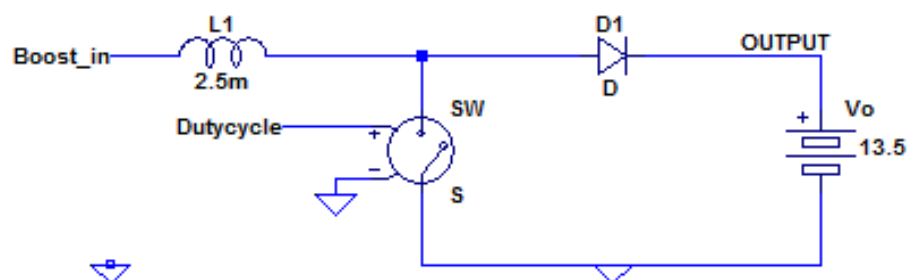
Tabela 6 - Principais parâmetros do conversor complementar

Tensão de saída nominal(V)	Tensão de entrada nominal (V)	Indutância (mH)	$\Delta I$ (%)	Razão cíclica nominal	$f_s$ (Hz)
13,5	6,5	2,5	< 10	0,52	15k

Fonte: Próprio autor

O valor da tensão de saída foi baseado na idéia de utilizar o conversor para carregar uma bateria de 12 V, onde no ciclo de carga se tem uma tensão próxima de 13,5 V. O valor de entrada nominal foi estimado a partir dos dados de máxima potência na curva de temperatura média de 70 °C obtidos nas simulações realizadas previamente neste trabalho. Por se tratar de uma simulação utilizando uma chave ideal, onde não existem perdas de comutação, a frequência de chaveamento utilizada poderia ser bem elevada, porém para não sobrecarregar a simulação e aumentar o tempo gasto com a simulação desnecessariamente, foi escolhido o valor de 15 kHz por ser plausível em uma aplicação real e obter uma indutância relativamente pequena. A indutância foi calculada a partir dos valores acima determinados e utilizando uma ondulação máxima de 10%. O circuito montado no simulador é mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Conversor Boost complementar

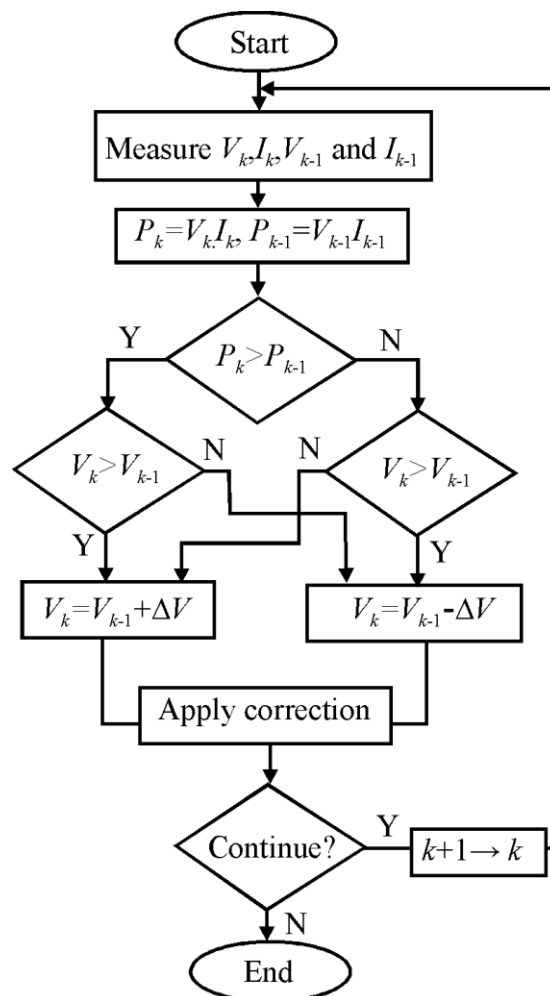


Fonte: Próprio autor

## 5.2 CONTROLE POR SEGUIMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA MPPT

A geração de energia elétrica através de módulos termoeletrônicos possui uma baixa eficiência, e como vimos anteriormente os módulos são muito suscetíveis a variação de temperatura e carga. A fim de buscar o máximo desempenho em cada situação de temperatura, foi desenvolvido um controle que tem o objetivo de operar o conversor no ponto de máxima transferência de potência dos módulos. Esse método de controle é conhecido como MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*, e pode ser implementado de diversos modos. Dentre estes métodos o mais comum deles, e que será utilizado aqui, é o método chamado Perturba e Observa (P&O), onde o funcionamento pode ser observado no fluxograma apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma do método MPPT do tipo Perturba e Observa



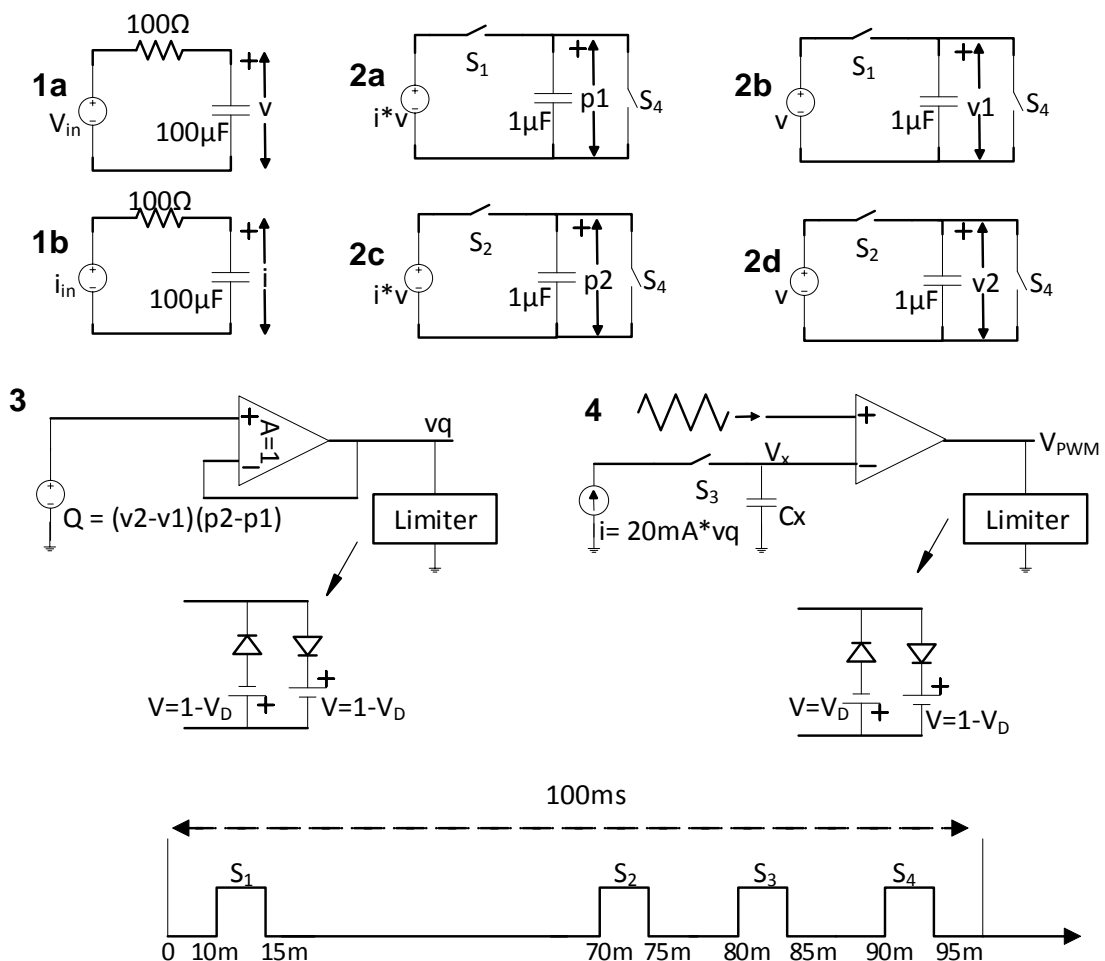
Fonte: (Stošović, 2014)

O método P&O apresentado na Figura 29 primeiramente faz medições de tensão e de corrente de geração atuais  $X_i(k)$ , calcula a potência equivalente e em seguida compara com os valores anteriores  $X_i(k-1)$ . Verifica-se então se a potência aumentou ou diminuiu, caso tenha aumentado verifica-se a alteração de tensão e se aplica a correção devida. No caso do conversor boost em questão, onde é controlada a potência de entrada, se a potência aumentou e a tensão reduziu, deve-se aumentar a razão cíclica para que a tensão continue a diminuir, entretanto se ao invés de reduzir, a tensão tenha aumentado junto com a potência, deve-se reduzir a razão cíclica para que a tensão continue a aumentar.

No LTspice® não há como implementar esse modo de controle de forma puramente digital, com isso um circuito analógico foi desenvolvido com base no trabalho apresentado por Stošović (2014).

O esquemático do circuito de controle pode ser visto na Figura 30

Figura 30 - Esquemático do circuito de controle



Fonte: Adaptado de (Stošović, 2014)

Na figura acima, os dois circuitos na parte superior esquerda, 1a e 1b, servem para obter o valor médio da tensão e da corrente respectivamente, enquanto os outros quatro circuitos na parte superior direita, 2a, 2b, 2c e 2d, armazenam os valores de potência e tensão em dois instantes distintos, comandados pelas comutações das chaves  $S_1$  e  $S_2$ . Após a obtenção das segundas amostras de tensão e potência, no circuito 3 é realizada a multiplicação das diferenças das tensões pela diferença das potências, onde no final um limitador define o valor de  $V_q$  com valores -1 ou 1. O valor de  $Q$  não é de grande importância inicialmente, e sim o sinal da resposta.

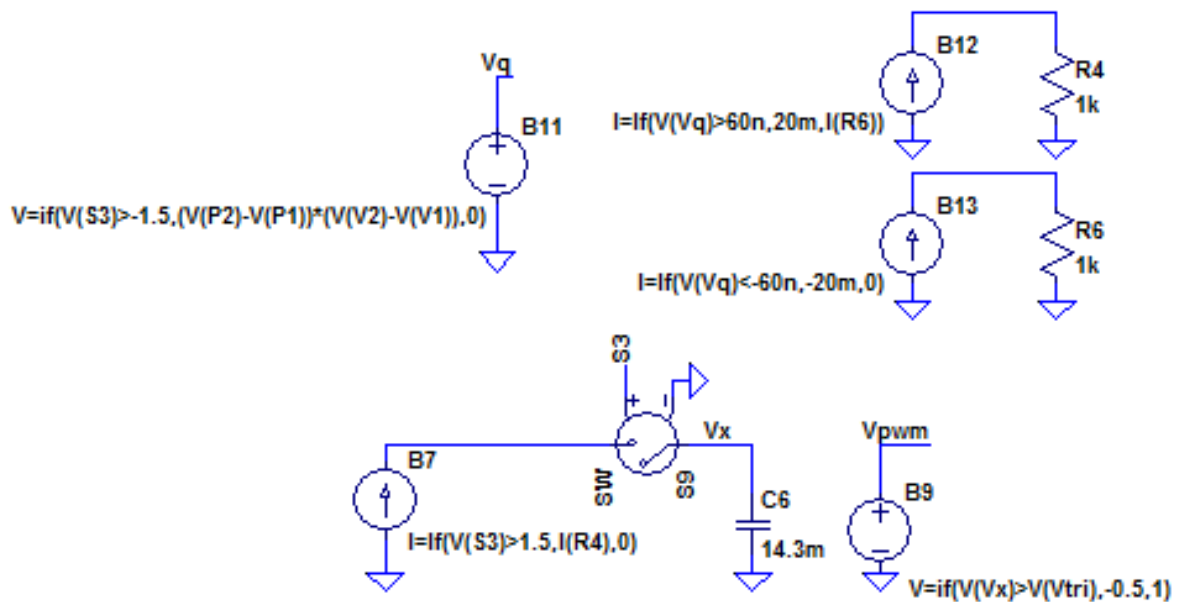
O resultado de  $V_q$  é utilizado em uma fonte de corrente controlada para criar um incremento ou decremento, de tensão no capacitor  $C_x$ . Esta variação ocorre no momento em que a chave  $S_3$  é comutada. O valor de  $V_x$ , tensão do capacitor  $C_x$ , é utilizado em um comparador, onde na entrada positiva há um sinal triangular na frequência de comutação da chave do conversor. Na saída do comparador foi adicionado um limitador para que a tensão de saída fosse somente 0 ou 1.

Para finalizar o período de controle, usando a chave  $S_4$  os valores armazenados de  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $p_1$  e  $p_2$  são zerados e um novo ciclo de medições é iniciado.

O período de atuação do controle foi definido em 100 ms para reduzir o tempo de simulação necessário, em uma aplicação real esse tempo pode ser aumentado.

Ao aplicar esse controle utilizando o *software* LTspice, foi notado algumas anormalidades em certos valores e uma demora muito grande para realização da simulação. Com isso algumas adaptações foram feitas para aperfeiçoar a simulação e a resposta do sistema como mostra a Figura 31. Além disso foi adicionado um limite mínimo para que o valor de  $V_q$  atue na tensão de  $C_x$ , em outras palavras, se a resposta  $V_q$  for menor que a referência definida, que é de 60 nV, a tensão de  $C_x$  não é alterada. Essa alteração traz benefícios ao ponto que ao invés do conversor ficar flutuando próximo do valor de máxima potência, ao chegar a um ponto onde o incremento de potência é muito pequeno não é realizada nova perturbação e o valor de potência fica muito próximo do ideal.

Figura 31 - Alterações do circuito de controle para acelerar a simulação e limitar ganho mínimo para atuação do controle.



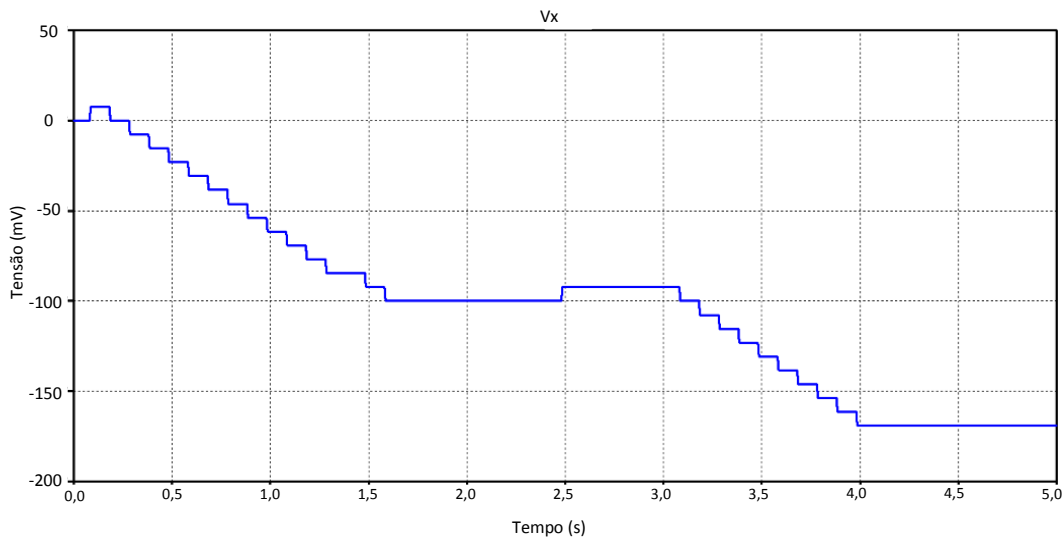
Fonte: Próprio autor

Os circuitos 3 e 4 da Figura 30, foram substituídos pelos circuitos da Figura 31. No LTspice não são encontrados comparadores ideais, sendo necessária a utilização de componentes reais, o que faz com que as simulações fiquem muito lentas, com isso foram utilizadas fontes comportamentais, que nada mais são que fontes controladas que aceitam a utilização de algumas funções especiais, para realizar as mesmas tarefas realizadas pelos comparadores. A fonte B11 define o valor de Q somente se a chave  $S_3$  estiver fechada, as fontes B12 e B13 trabalham em conjunto para definir o incremento de corrente a ser aplicado por B7, e por fim, a fonte B9 funciona como o comparador que define a razão cíclica a ser aplicado na chave do conversor.

Com o circuito de controle rearranjado foi realizada uma simulação para verificar o funcionamento do sistema completo, onde inicialmente é aplicada uma diferença de temperatura de  $60\text{ }^\circ\text{C}$  nos módulos por um período de 3 segundos e então há uma redução abrupta da diferença de temperatura para  $55\text{ }^\circ\text{C}$ .

Para definir a largura de pulso do comando da chave do conversor, o controle atua na tensão  $V_x$ , com isso aumentando ou reduzindo o tempo de atuação da chave. O valor inicial de  $V_x$  é igual a zero, ou seja, a razão cíclica inicial da chave é de 0,5. A Figura 32 apresenta o comportamento de  $V_x$  durante a simulação.

Figura 32 - Comportamento da tensão  $V_x$  que determina o tempo de atuação da chave do conversor



Fonte: Próprio autor

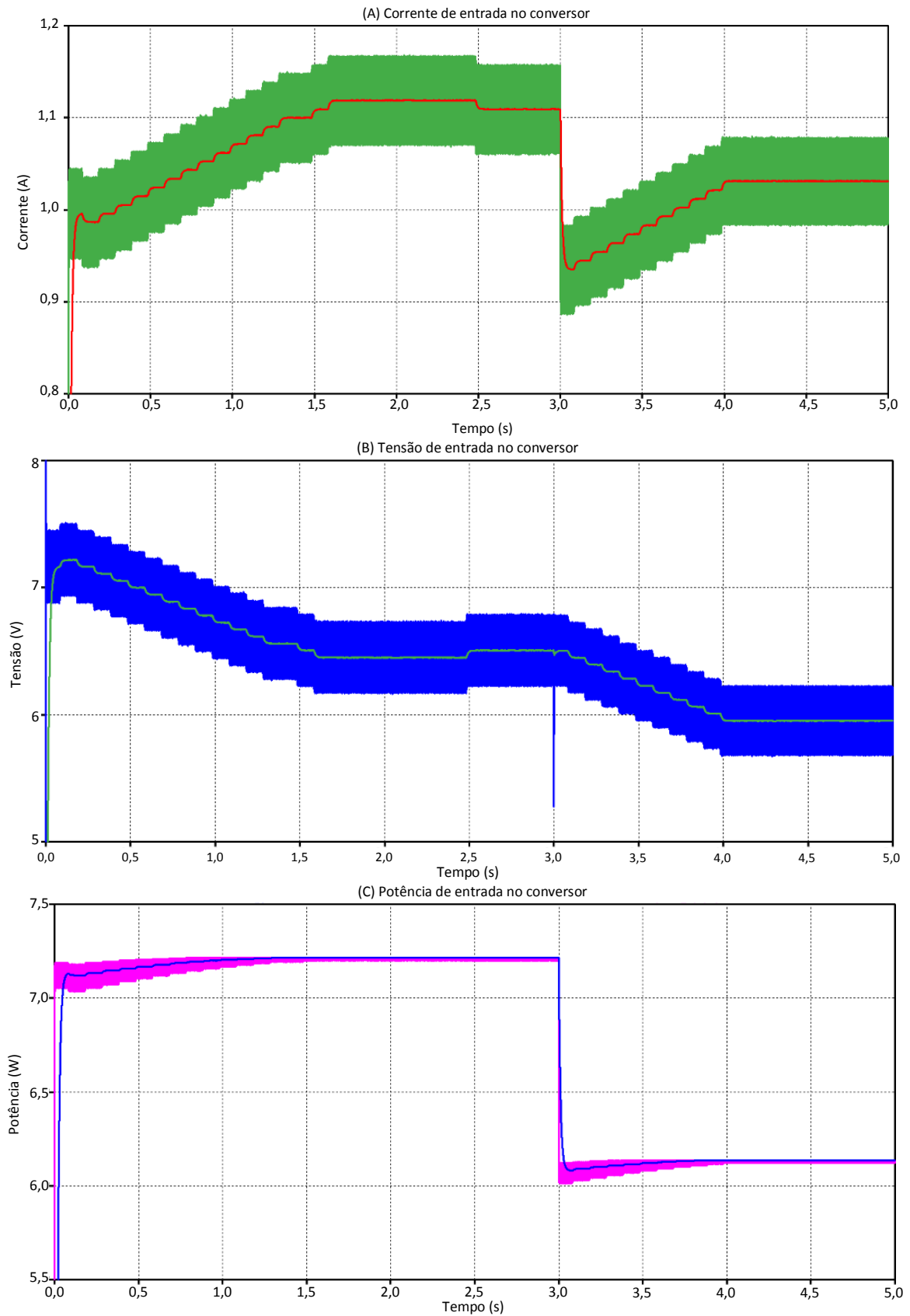
Como pode ser visto na Figura 32, no primeiro ciclo de controle  $V_x$  recebe um incremento de tensão, reduzindo a razão cíclica. No ciclo seguinte o controle analisa que houve uma redução na potência e um aumento na tensão de entrada, como pode ser visto nas Figuras 33, o que provoca uma redução na tensão de  $V_x$  definida pelo controlador, e como resultado um aumento da razão cíclica, conseqüentemente provocando uma queda no valor de tensão e um aumento no valor da corrente e da potência. Nos ciclos seguintes esse comportamento se repete até que em um determinado momento não há mais atuação do controle. Esse período de inatividade é devido ao limite mínimo de ganho de potência imposto para que o controle possa atuar, observado entre os tempo de simulação de 15,5 e 2,5 segundos, da Figura 32.

No tempo de simulação igual a 3 segundos ocorre uma redução na diferença de temperatura, acarretando em uma queda brusca da corrente de entrada (Figura 33-a) e conseqüentemente da potência (Figura 33-c), entretanto, apesar de ocorrer uma queda de tensão repentina (Figura 33-b), a tensão retorna para o valor anterior rapidamente devido à fonte de tensão constante na saída do conversor, visto na Figura 28, e a não variação da razão cíclica.

Após esse transitório o controle volta a atuar de forma a aumentar a razão cíclica, reduzindo assim ainda mais o valor de  $V_x$ , visto na Figura 32, até novamente alcançar o valor máximo de potência e cessar a atuação a partir do tempo de simulação igual a 4 segundos.

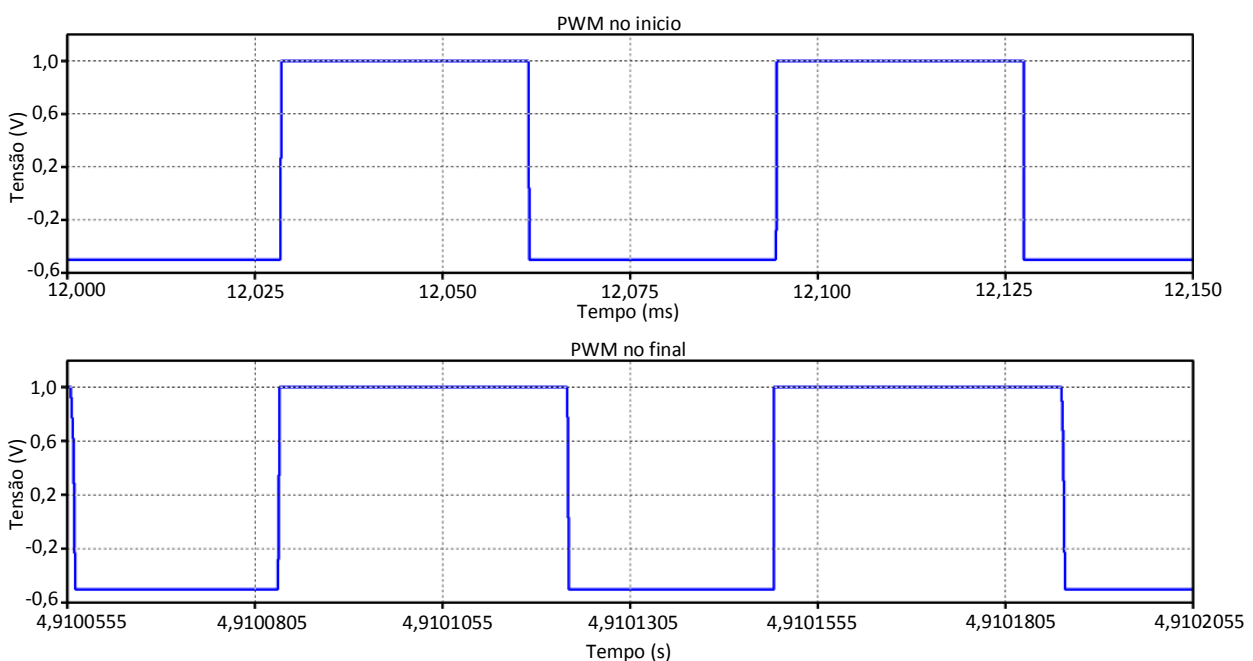


Figura 33 - Comportamento da corrente (a), tensão (b) e potência (c) de entrada do conversor, em conjunto com suas curvas médias, para uma diferença de temperatura inicial de 60 °C com uma queda para 55 °C no tempo igual a 3s.



Através da Figura 34 é possível verificar a mudança no valor da largura de pulso do PWM. Inicialmente a razão cíclica possuía um valor de 0,5 e conforme o controle foi atuando em busca da máxima potência esse valor foi sendo incrementado, chegando a um valor final de aproximadamente 0,58. Para efeitos de visualização da diferença da largura de pulso em dois instantes diferentes foi utilizado um período idêntico nos dois gráficos.

Figura 34 - Largura de pulso do PWM no início e no final da simulação respectivamente



Fonte: Próprio autor

Como resultado dessa simulação a Tabela 7 traz os valores de corrente, tensão e potência para o ponto de máxima potência em cada um dos casos. Os valores obtidos para a diferença de 60 °C já eram esperados, uma vez que eram conhecidos esses valores para uma única célula.

Tabela 7 - Valores de corrente, tensão e potência no ponto de máxima potência para um  $\Delta T$  de 60 °C e 55 °C segundo a simulação

$\Delta T$					
60 °C			55 °C		
Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)
1,11	6,50	7,215	1,03	5,95	6,136

Fonte: Próprio autor

Com a aquisição desses dados pode ser feita uma relação entre a potência gerada pelo sistema e a área ocupada pelos módulos. Considerando a área ocupada por uma única placa termoelétrica igual a  $1,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , e que foram utilizados 16 módulos, teremos uma área de aproximadamente  $25,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . A potência total gerada pelos módulos foi de 7,2 W, assim teremos uma distribuição de potência de aproximadamente  $281,25 \text{ W/m}^2$ .

Para efeito de comparação, o módulo fotovoltaico comercial Q.PLUS BFR-G4.1, da empresa Q.Cells<sup>®</sup>, possui uma eficiência de até 17%, uma potência nominal de geração de aproximadamente 280 W e cobre uma área de  $1,67 \text{ m}^2$ , tendo assim uma distribuição de potência de  $167,67 \text{ W/m}^2$ .

À primeira vista, como mostra a Tabela 8, o módulo de Peltier testado, mesmo não sendo específico para geração, é muito melhor que a placa fotovoltaica em relação a quantidade de potência gerada por metro quadrado, porém essa comparação só serve para se ter uma noção da quantidade de energia gerada pela TEC, uma vez que as duas aplicações são bem diferentes.

Outra comparação interessante de se fazer é entre a potência gerada pela TEC1-12715, ensaiada nesse trabalho, e um módulo termoelétrico mais específico para geração de energia, como, por exemplo, o módulo HT8-12-F2-4040, da empresa Laird Technologies<sup>®</sup>. Esse módulo, aplicado as mesmas condições da TEC1-12715, possui uma capacidade de geração de aproximadamente 1,3 W e uma eficiência de 3,2%, como mostra a Tabela 8.

Tabela 8 Potência por  $\text{m}^2$  gerada por dois módulos termoelétricos diferentes e um módulo fotovoltaico

	Área ( $\text{m}^2$ )	Potência (W)	Eficiência	$\text{W/m}^2$
TEC1-12715	$1,6 \times 10^{-3}$	0,450	2%	281,25
Q PLUS BFR-G4.1	1,67	280	17%	167,25
HT8-12-F2-4040	$1,6 \times 10^{-3}$	1,3	3,2%	812,5

Fonte: Próprio autor

Os dados apresentados na Tabela 8 mostram claramente que o módulo termoelétrico com características mais específicas para geração de energia possui uma capacidade de geração muito superior do que a ensaiada neste trabalho. O

módulo HT8-12-F2-4040 pode alcançar temperaturas de 200 °C no lado quente e gerar mais que 5 W de potência quando aplicado a grandes gradientes térmicos.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo principal deste trabalho residiu no estudo da célula de Peltier atuando como um gerador termoelétrico de energia, reaproveitando calor desperdiçado em algum processo.

Por meio de ensaios experimentais e simulações, foi possível constatar a quantidade de potência gerada por um dispositivo termoelétrico quando sujeito a diferentes gradientes de temperaturas. Pode-se ainda, observar que o fator mais determinante para a geração de energia é a diferença de temperatura aplicada entre as duas faces do módulo. Conforme se aumenta o gradiente de temperatura de forma linear a potência gerada na saída aumenta de forma potencial.

A maior temperatura que pode ser aplicada durante os ensaios foi de 100 °C, sendo esse o limite máximo de temperatura alcançável sem danificar o módulo. Essa temperatura pode ser considerada baixa quando tratando de sistemas termoelétrico e restringindo as áreas de aplicação para o sistema.

Apesar da baixa eficiência apresentada pela TEC1-12715 e a temperatura aplicável ser limitada, foi possível extrair uma potência de aproximadamente 450 mW de uma única célula, mostrando que apesar de não ser um módulo termoelétrico específico para geração é capaz de gerar energia elétrica.

Para demonstrar uma possível aplicação para os módulos, foi projetado o conversor complementar para carregar uma bateria. Quando falamos de reaproveitamento de energia em sistemas de baixa eficiência é necessário aproveitar o máximo possível da potência gerada, assim, a utilização do controle de seguimento de máxima potência desenvolvido é essencial para que se obtenha o melhor resultado possível.

Com uma vasta gama de aplicações possíveis os módulos termoelétricos possuem um grande potencial tecnológico, uma vez que com investimentos em pesquisas de novos materiais é esperado um ganho em eficiência, assim como a redução de custos. Assim, acredito que em um futuro próximo a geração de energia através dessas placas pode se tornar uma boa solução para o aumento de eficiência de processos com grandes perdas térmicas.

Pensando em trabalhos futuros dentro do estudo realizado, seria interessante a implementação de um sistema com diversos módulos termoelétricos e o conversor Boost com controle MPPT. Assim como, a realização de ensaios com TEGs que permitam a aplicação de temperaturas mais elevadas para que possam ser obtidos maiores valores de potência.

Também torna-se interessante estudar a aplicação da célula em casos mais específicos, fazendo um levantamento do comportamento da temperatura do local durante um período, assim pode-se projetar um sistema de geração mais adequado para aplicação.

## Referências

- PINDADO, R. H. **Climatización Mediante Células Peltier**. 2008. 237 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2008. Disponível em: <<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/48c66604d0038.pdf>>. Acesso em: 29 out. 2016.
- SNYDER, G. J.; TOBERER, E. S. **Complex thermoelectric materials**. Pasadena: Nature, v. 7, fev. 2008.
- GREEN CAR CONGRESS. **Bmw provides an update on waste heat recovery projects: Turbosteamer and the Thermoelectric Generator**. 2011. Disponível em: <<http://www.greencarcongress.com/2011/08/bmwthermal-20110830.html>>. Acesso em: 18 novembro 2015.
- BOEING COMPANY. Nathan D. Hiller. **Thermoelectric power generation using aircraft fuselage temperature differential**. US nº 8973377, 09 mar. 2012, 10 mar.2015. Disponível em: <<http://patents.justia.com/patent/8973377#history>>. Acesso em: 19 nov. 2016.
- CARVALHO, C. A. R. DE. **Estudo de viabilidade do aproveitamento do calor de escape para geração energia elétrica em automóveis**. masterThesis—[s.l.] UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ, 15 dez. 2012.
- FERNANDES, A. E. S. DOS S. **Conversão de energia com células de Peltier**. Tese de mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012.
- GOLDSMID, H. J. **Introduction to Thermoelectricity**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2009.
- GOLDSMID, H. J.; DOUGLAS, R. W. **The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration**. British Journal of Applied Physics, v. 5, n. 12, p. 458, 1954.
- HEREMANS, J. P. **Low-dimensional thermoelectricity**. Acta Physica Polonica Series A, v. 108, n. 4, p. 609, 2005.
- ROWE, D. M. **Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano**. [s.l.] CRC Press, 2005.
- AUDIFFRED, D. B. DE LA S. **Utilização de dispositivos termoelétricos para geração de energia elétrica em nanosatélites**. 2015. 88f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Aeroespacial, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- MITRANI, D. *et al.* **Methodology for extracting thermoelectric module parameters**. IEEE transactions on instrumentation and measurement, Agosto. 2005. v. 54, n. 4, p. 1548–1552.
- DALOLA, S. *et al.* **Characterization of thermoelectric modules for powering**

**autonomous sensors.** IEEE transactions on instrumentation and measurement, jan. 2009. v. 58, n. 1, p. 99–107.

CHAVEZ, J. A. *et al.* **Spice model of thermoelectric elements including thermal effects.** Proceedings of the 17th IEEE instrumentation and measurement technology conference, 2000. IMTC 2000, 2000, , [s.l.] . **Anais...** [S.l.]: [s.n.], 2000. V. 2, p. 1019–1023 vol.2.

STOŠOVIĆ, M. A. *et al.* **SPICE Modeling and Simulation of a MPPT Algorithm.** Electronics, Banja Luka, v. 18, n.1, jun. 2014. Disponível em: <[http://electronics.etfbl.net/journal/Vol18No1/xPaper\\_02.pdf](http://electronics.etfbl.net/journal/Vol18No1/xPaper_02.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2016.



## APÊNDICE A – Código desenvolvido para a placa Arduino UNO® por meio do Arduino IDE.

```

class PID{
public:

    double error;
    double sample;
    double lastSample;
    double kP, kI, kD;
    double P, I, D;
    double pid;
    double n;
    double setPoint;
    long lastProcess;

    PID(double _kP, double _kI, double _kD){
        kP = _kP;
        kI = _kI;
        kD = _kD;
    }

    void addNewSample(double _sample){
        sample = _sample;
    }

    void setSetPoint(double _setPoint){
        setPoint = _setPoint;
    }

    double process(){
        // Implementação PID
        error = setPoint - sample;
        float deltaTime = (millis() - lastProcess) / 1000.0;
        lastProcess = millis();

        //P
        P = error * kP;

        //I
        if(I > 255)
            I=255;}
        if(I<0){
            I=0;}
        else{

```

```

    I = I + (error * kI) * deltaTime;}

    //D

    D = (lastSample - sample) * kD / deltaTime;
    lastSample = sample;

    // Soma tudo
    pid = P + I + D;

    if (pid>255){
    pid=255;}
    if (pid<0){pid=0;}
    return pid;
}
double process2(){
    error = setPoint - sample;
    float deltaTime = (millis() - lastProcess) / 1000.0;
    lastProcess = millis();
//

    if(I > 255)
    {I=255;}
    if(I <0){
    I=0;} // Usado para verificar o valor do Integrador
    else{
        I = I + (error * kI) * deltaTime;}
    lastSample = sample;
    return I;
}
};

#define pSENSOR      A0
#define pSENSOR2     A1
#define pCONTROLE    6

PID meuPid(11.4206, 0.015146, 0);

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    pinMode(pSENSOR, INPUT);
    pinMode(pSENSOR2, INPUT);
    pinMode(pCONTROLE, OUTPUT);
}

int controlePwm = 0;
double integra;
double setTemp = 0.0;

```

```

double n;
double temperatureA[150];
double temperatureB[150];
double temperature;
double temperature2;
int i;
void loop() {
    //Seta a temperatura
    meuPid.setSetPoint(setTemp);

    // Lê temperatura e transforma Quente e Fria em °C.
    temperature=0;
    temperature2=0;

    // Loop que faz a leitura da temperatura 150 vezes
    for(i = 0;i<=149;i++){
        temperatureA[i] = map((analogRead(pSENSOR)*495.0/1024.0), 0, 1023, 4,
1023);
        temperatureB[i] = map((analogRead(pSENSOR2)*495.0/1024.0), 0, 1023, 4,
1023);
        //A cada leitura, incrementa o valor da variavel temperature
        temperature = temperature + temperatureA[i];
        temperature2 = temperature2 + temperatureB[i];
    delay(1);
    }
    //Tira a média da temperatura quente e fria
    temperature = temperature/150;
    temperature2 = temperature2/150;

    // Manda pro objeto PID!

    meuPid.addNewSample(temperature);

    //Recebe o valor do PID
    controlePwm = meuPid.process();

    // Saída do controle
    analogWrite(pCONTROLE,controlePwm);

    // Lê o valor do integrador
    integra = meuPid.process2();

    Serial.print(integra);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temperature);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temperature2);
    Serial.print("\t");
    Serial.print(temperature-temperature2);

```

```
Serial.print("\t");  
Serial.print(controlePwm);  
Serial.print("\t");  
Serial.println(millis()/1000.0);  
  
};
```

**APÊNDICE B – Tabelas de todos os ensaios realizados para a modelagem da célula de Peltier TEC1-12715**

Ensaio de carga:  $T_H=65\text{ °C}$  ;  $T_C=35,5\text{ °C}$  ;  $T_m=50,25\text{ °C}$  ;  $\Delta T=29,5\text{ °C}$  ;  $V_G = 0,824\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)		$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,060	0,529	0,032		1,306	0,409	0,313	0,128
0,161	0,083	0,516	0,043		1,446	0,433	0,299	0,130
0,231	0,115	0,498	0,057		1,476	0,439	0,297	0,131
0,286	0,138	0,483	0,067		1,586	0,452	0,285	0,129
0,343	0,161	0,469	0,076		1,656	0,463	0,280	0,129
0,406	0,185	0,456	0,084		1,821	0,482	0,265	0,128
0,476	0,214	0,450	0,096		1,906	0,490	0,257	0,126
0,571	0,244	0,427	0,104		2,001	0,500	0,250	0,125
0,696	0,273	0,392	0,107		2,166	0,521	0,241	0,125
0,816	0,308	0,377	0,116		2,696	0,565	0,210	0,118
0,906	0,330	0,364	0,120		3,306	0,600	0,181	0,109
1,006	0,351	0,349	0,122		4,626	0,653	0,141	0,092
1,026	0,361	0,352	0,127		5,416	0,677	0,125	0,085
1,082	0,370	0,342	0,127		6,686	0,703	0,105	0,074
1,198	0,394	0,329	0,130		8,216	0,725	0,088	0,064

Ensaio de carga:  $T_H=75\text{ °C}$  ;  $T_C=45,5\text{ °C}$  ;  $T_m=60,25\text{ °C}$  ;  $\Delta T=29,5\text{ °C}$  ;  $V_G = 0,832\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)		$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,057	0,500	0,029		1,306	0,400	0,306	0,123
0,161	0,079	0,491	0,039		1,446	0,426	0,295	0,126
0,231	0,111	0,481	0,053		1,476	0,431	0,292	0,126
0,286	0,130	0,455	0,059		1,586	0,443	0,279	0,124
0,343	0,154	0,449	0,069		1,656	0,455	0,275	0,125
0,406	0,176	0,433	0,076		1,821	0,475	0,261	0,124
0,476	0,206	0,433	0,089		1,906	0,484	0,254	0,123
0,571	0,235	0,412	0,097		2,001	0,495	0,247	0,122
0,696	0,266	0,382	0,102		2,166	0,515	0,238	0,122
0,816	0,301	0,369	0,111		2,696	0,559	0,207	0,116
0,906	0,323	0,357	0,115		3,306	0,597	0,181	0,108
1,006	0,345	0,343	0,118		4,626	0,650	0,141	0,091
1,026	0,351	0,342	0,120		5,416	0,673	0,124	0,084
1,082	0,359	0,332	0,119		6,686	0,702	0,105	0,074
1,198	0,382	0,319	0,122		8,216	0,726	0,088	0,064

Ensaio de carga:  $T_H=85\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=55,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=70,25\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=29,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 0,831\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,064	0,561	0,036	1,306	0,386	0,296	0,114
0,161	0,083	0,516	0,043	1,446	0,406	0,281	0,114
0,231	0,108	0,468	0,050	1,476	0,412	0,279	0,115
0,286	0,131	0,458	0,060	1,586	0,427	0,269	0,115
0,343	0,152	0,443	0,067	1,656	0,439	0,265	0,116
0,406	0,174	0,429	0,075	1,821	0,458	0,252	0,115
0,476	0,201	0,422	0,085	1,906	0,468	0,246	0,115
0,571	0,230	0,403	0,093	2,001	0,478	0,239	0,114
0,696	0,256	0,368	0,094	2,166	0,499	0,230	0,115
0,816	0,292	0,358	0,104	2,696	0,542	0,201	0,109
0,906	0,311	0,343	0,107	3,306	0,581	0,176	0,102
1,006	0,330	0,328	0,108	4,626	0,632	0,137	0,086
1,026	0,336	0,327	0,110	5,416	0,659	0,122	0,080
1,082	0,346	0,320	0,111	6,686	0,686	0,103	0,070
1,198	0,367	0,306	0,112	8,216	0,710	0,086	0,061

Ensaio de carga:  $T_H=95\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=65,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=80,25\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=29,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 0,850\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,062	0,544	0,034	1,306	0,385	0,295	0,113
0,161	0,081	0,504	0,041	1,446	0,408	0,282	0,115
0,231	0,108	0,468	0,050	1,476	0,414	0,280	0,116
0,286	0,133	0,465	0,062	1,586	0,430	0,271	0,117
0,343	0,155	0,452	0,070	1,656	0,440	0,266	0,117
0,406	0,175	0,431	0,075	1,821	0,460	0,253	0,116
0,476	0,204	0,429	0,087	1,906	0,471	0,247	0,116
0,571	0,228	0,399	0,091	2,001	0,481	0,240	0,116
0,696	0,255	0,366	0,093	2,166	0,501	0,231	0,116
0,816	0,290	0,355	0,103	2,696	0,546	0,203	0,111
0,906	0,311	0,343	0,107	3,306	0,586	0,177	0,104
1,006	0,330	0,328	0,108	4,626	0,640	0,138	0,089
1,026	0,337	0,328	0,111	5,416	0,666	0,123	0,082
1,082	0,345	0,319	0,110	6,686	0,695	0,104	0,072
1,198	0,366	0,306	0,112	8,216	0,721	0,088	0,063

Ensaio de carga: $T_H=50\text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_C=32\text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_m=41\text{ }^\circ\text{C}$ ; $\Delta T=18\text{ }^\circ\text{C}$ ; $V_G = 0,480\text{ V}$								
$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)		$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,025	0,219	0,005		1,306	0,245	0,188	0,046
0,161	0,049	0,304	0,015		1,446	0,259	0,179	0,046
0,231	0,070	0,303	0,021		1,476	0,262	0,178	0,047
0,286	0,083	0,290	0,024		1,586	0,270	0,170	0,046
0,343	0,097	0,283	0,027		1,656	0,276	0,167	0,046
0,406	0,111	0,273	0,030		1,821	0,288	0,158	0,046
0,476	0,130	0,273	0,036		1,906	0,293	0,154	0,045
0,571	0,148	0,259	0,038		2,001	0,300	0,150	0,045
0,696	0,165	0,237	0,039		2,166	0,312	0,144	0,045
0,816	0,188	0,230	0,043		2,696	0,336	0,125	0,042
0,906	0,199	0,220	0,044		3,306	0,358	0,108	0,039
1,006	0,210	0,209	0,044		4,626	0,389	0,084	0,033
1,026	0,215	0,210	0,045		5,416	0,402	0,074	0,030
1,082	0,221	0,204	0,045		6,686	0,418	0,063	0,026
1,198	0,235	0,196	0,046		8,216	0,432	0,053	0,023

Ensaio de carga: $T_H=60\text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_C=34\text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_m=47\text{ }^\circ\text{C}$ ; $\Delta T=26\text{ }^\circ\text{C}$ ; $V_G = 0,700\text{ V}$								
$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)		$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,042	0,368	0,015		1,306	0,339	0,260	0,088
0,161	0,064	0,398	0,025		1,446	0,356	0,246	0,088
0,231	0,091	0,394	0,036		1,476	0,361	0,245	0,088
0,286	0,108	0,378	0,041		1,586	0,373	0,235	0,088
0,343	0,130	0,379	0,049		1,656	0,381	0,230	0,088
0,406	0,154	0,379	0,058		1,821	0,399	0,219	0,087
0,476	0,177	0,372	0,066		1,906	0,406	0,213	0,086
0,571	0,199	0,349	0,069		2,001	0,414	0,207	0,086
0,696	0,225	0,323	0,073		2,166	0,429	0,198	0,085
0,816	0,255	0,313	0,080		2,696	0,463	0,172	0,080
0,906	0,272	0,300	0,082		3,306	0,497	0,150	0,075
1,006	0,290	0,288	0,084		4,626	0,539	0,117	0,063
1,026	0,295	0,288	0,085		5,416	0,560	0,103	0,058
1,082	0,303	0,280	0,085		6,686	0,582	0,087	0,051
1,198	0,325	0,271	0,088		8,216	0,600	0,073	0,044

Ensaio de carga:  $T_H=70\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=35,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=52,75\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=34,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 0,972\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,066	0,575	0,038	1,306	0,461	0,353	0,163
0,161	0,092	0,571	0,053	1,446	0,488	0,337	0,165
0,231	0,129	0,558	0,072	1,476	0,496	0,336	0,167
0,286	0,156	0,545	0,085	1,586	0,509	0,321	0,163
0,343	0,183	0,534	0,098	1,656	0,520	0,314	0,163
0,406	0,212	0,522	0,111	1,821	0,543	0,298	0,162
0,476	0,244	0,513	0,125	1,906	0,552	0,290	0,160
0,571	0,275	0,482	0,132	2,001	0,563	0,281	0,158
0,696	0,310	0,445	0,138	2,166	0,585	0,270	0,158
0,816	0,352	0,431	0,152	2,696	0,636	0,236	0,150
0,906	0,375	0,414	0,155	3,306	0,679	0,205	0,139
1,006	0,398	0,396	0,157	4,626	0,738	0,160	0,118
1,026	0,405	0,395	0,160	5,416	0,765	0,141	0,108
1,082	0,415	0,384	0,159	6,686	0,795	0,119	0,095
1,198	0,443	0,370	0,164	8,216	0,820	0,100	0,082

Ensaio de carga:  $T_H=80\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=37\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=58,5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=43\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 1,190\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,080	0,702	0,056	1,306	0,570	0,436	0,249
0,161	0,112	0,696	0,078	1,446	0,600	0,415	0,249
0,231	0,160	0,693	0,111	1,476	0,608	0,412	0,250
0,286	0,189	0,661	0,125	1,586	0,628	0,396	0,249
0,343	0,225	0,656	0,148	1,656	0,642	0,388	0,249
0,406	0,258	0,635	0,164	1,821	0,672	0,369	0,248
0,476	0,296	0,622	0,184	1,906	0,684	0,359	0,245
0,571	0,340	0,595	0,202	2,001	0,699	0,349	0,244
0,696	0,383	0,550	0,211	2,166	0,726	0,335	0,243
0,816	0,430	0,527	0,227	2,696	0,789	0,293	0,231
0,906	0,461	0,509	0,235	3,306	0,841	0,254	0,214
1,006	0,495	0,492	0,244	4,626	0,916	0,198	0,181
1,026	0,503	0,490	0,247	5,416	0,952	0,176	0,167
1,082	0,513	0,474	0,243	6,686	0,988	0,148	0,146
1,198	0,545	0,455	0,248	8,216	1,020	0,124	0,127



Ensaio de carga:  $T_H=90\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=38\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=64\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=52\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 1,450\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,117	1,026	0,120	1,306	0,694	0,531	0,369
0,161	0,153	0,950	0,145	1,446	0,733	0,507	0,372
0,231	0,206	0,892	0,184	1,476	0,742	0,503	0,373
0,286	0,242	0,846	0,205	1,586	0,769	0,485	0,373
0,343	0,284	0,828	0,235	1,656	0,785	0,474	0,372
0,406	0,321	0,791	0,254	1,821	0,819	0,450	0,368
0,476	0,368	0,773	0,285	1,906	0,833	0,437	0,364
0,571	0,417	0,730	0,305	2,001	0,852	0,426	0,363
0,696	0,471	0,677	0,319	2,166	0,885	0,409	0,362
0,816	0,530	0,650	0,344	2,696	0,960	0,356	0,342
0,906	0,567	0,626	0,355	3,306	1,020	0,309	0,315
1,006	0,600	0,596	0,358	4,626	1,110	0,240	0,266
1,026	0,612	0,596	0,365	5,416	1,150	0,212	0,244
1,082	0,627	0,579	0,363	6,686	1,200	0,179	0,215
1,198	0,666	0,556	0,370	8,216	1,240	0,151	0,187

Ensaio de carga:  $T_H=100\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_C=39,7\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $T_m=69,85\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $\Delta T=60,3\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $V_G = 1,650\text{ V}$

$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)	$R_L(\Omega)$	V(V)	I(A)	P(W)
0,114	0,122	1,070	0,131	1,306	0,777	0,595	0,462
0,161	0,163	1,012	0,165	1,446	0,820	0,567	0,465
0,231	0,220	0,952	0,210	1,476	0,831	0,563	0,468
0,286	0,259	0,906	0,235	1,586	0,859	0,542	0,465
0,343	0,303	0,883	0,268	1,656	0,877	0,530	0,464
0,406	0,347	0,855	0,297	1,821	0,915	0,502	0,460
0,476	0,407	0,855	0,348	1,906	0,931	0,488	0,455
0,571	0,464	0,813	0,377	2,001	0,953	0,476	0,454
0,696	0,523	0,751	0,393	2,166	0,989	0,457	0,452
0,816	0,591	0,724	0,428	2,696	1,080	0,401	0,433
0,906	0,630	0,695	0,438	3,306	1,150	0,348	0,400
1,006	0,670	0,666	0,446	4,626	1,250	0,270	0,338
1,026	0,680	0,663	0,451	5,416	1,300	0,240	0,312
1,082	0,697	0,644	0,449	6,686	1,350	0,202	0,273
1,198	0,742	0,619	0,460	8,216	1,400	0,170	0,239

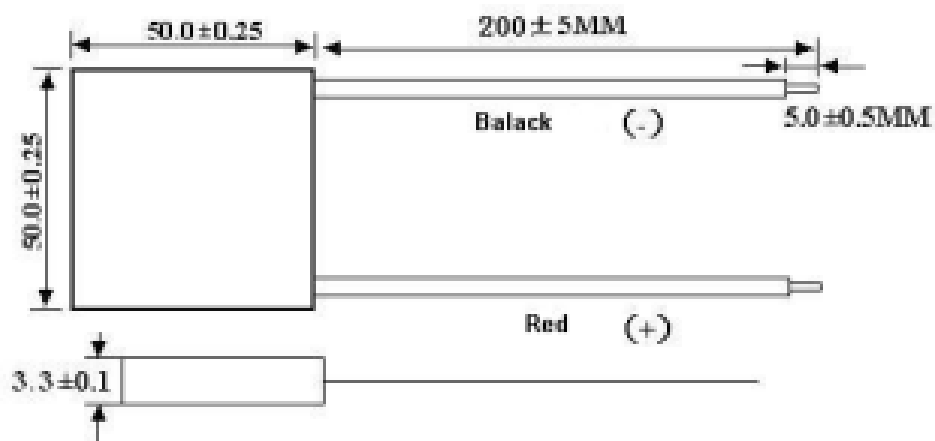


## ANEXO A – Informações técnicas da TEC1-12715, fabricante Habei



Hebei I.T. (Shanghai) Co., Ltd

### TEC1-12715 Datasheet



No.	Items	Symbol	Parameter	Condition
1	Max. Operating Tem.	T	$<90^{\circ}\text{C}$	
2	Max. Cooling Power	Q <sub>max</sub>	136	Vacuum testing Tem T <sub>b</sub> -30 $^{\circ}\text{C}$
3	Tem. Difference Max	$\Delta T_{\text{max}}$	70	Vacuum testing Tem T <sub>b</sub> -30 $^{\circ}\text{C}$
4	Input Voltage Max	V <sub>max</sub>	15.4	Vacuum testing Tem T <sub>b</sub> -30 $^{\circ}\text{C}$
5	Max. Current	I <sub>max</sub>	15.0	Vacuum testing Tem T <sub>b</sub> -30 $^{\circ}\text{C}$
6	Resistance	R	$0.75 \pm 0.05$	Ambient Tem T <sub>b</sub> -25 $^{\circ}\text{C}$
7	Parallel		$\leq 0.05 \text{ m}$	
8	Lines		20AWG	

When the ambient temperature raise or fall 1 $^{\circ}\text{C}$ , the module resistance will raise or fall 0.015 accordingly.