



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia

Transdutor Termoelétrico na Recolha de Energia Térmica

Sofia Alexandra Ramos Ambrósio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo

Covilhã, Outubro de 2018

Agradecimentos

Muitas pessoas influenciaram e inspiraram este trabalho e, não poderia por isso, deixar de expressar o meu agradecimento àqueles que tornaram este caminho possível. Nesse sentido quero agradecer:

Ao meu orientador, Professor Doutor António Eduardo Vitória do Espírito Santo, por todo o conhecimento e sabedoria transmitidos. Sem a sua ajuda este trabalho não teria sido possível de realizar.

A todos os elementos do laboratório, pela troca de ideias construtivas. Em especial ao Joel e à Roberta pelas horas e conhecimentos gentilmente oferecidos.

Ao laboratório de termodinâmica aplicada e transmissão de calor do DEM/UBI pelo material dispensado necessário à realização experimental deste trabalho.

Aos meus amigos por toda a paciência e conselhos transmitidos.

Ao César por toda a ajuda não só intelectual mas principalmente emocional tornando-o um elemento chave para a realização deste trabalho.

À minha mãe pelo suporte e carinho incondicional dados tornando este percurso um percurso mais fácil do que seria sem ela.

“The cosmos is within us. We are made of star-stuff. We are a way for the universe to know itself.”

(Carl Sagan)

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Energy and Water Systems Integration and Management (EdgeWise), apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), com a referência ERANETMED/0004/2014, enquadrado na iniciativa ERANETMET dos Estados Membros, Países Associados e Países Parceiros Mediterrâneos (Projeto com o ID eronetmed_nexus-14-044).

Resumo

A necessidade de tornar sistemas de redes sem fios energeticamente autónomos, independentes de baterias, tem sido um desafio essencial tanto de cariz tecnológico como económico e ambiental. Nomeadamente, em sistemas de gestão e tratamento de água. Com a particularidade de hoje já ser reconhecido o impacto que os setores de água, energia e alimentação têm entre si devido a sua relação intrínseca: *Nexus- food, water, energy*.

Esta dissertação procura responder a desafios tecnológicos dentro do sector energético dos sensores sem fios. E, inserir esta solução no sector hídrico procurando formas de converter energia que à partida está a ser dissipada, em forma de calor, em energia elétrica.

De maneira a conseguir implementar esta solução é feito o estudo sobre transdutores termoelétricos, em particular a célula de Peltier. Este transdutor permite converter energia térmica em energia elétrica. Para que a célula consiga alimentar um microprocessador é desenvolvida uma placa PCB que consiga elevar e regular a tensão de saída da célula.

Adicionalmente, é feita a concetualização um protótipo que simula situações reais que possibilitam estabelecer e recolher um gradiente de temperatura. Ou seja, levando a que seja possível gerar energia elétrica que alimente a componente eletrónica.

Palavras-chave

Nexus- food, water, energy, gerador termoelétrico, célula de Peltier, efeito Seebeck, sensores.

Abstract

The need to overcome the dependency of wireless sensors from batteries has been a technological, economic and environmental challenge. Namely, in water management and treatment systems. Particularly, today it is known the impact that water, energy and food have on each other since their relationship it is complex and intrinsic. This concept it is known as Nexus: food, water and energy.

This dissertation seeks to respond to the technological challenges within the energy sector of wireless sensors. And insert this solution into the water sector searching ways to convert energy that is being dissipated, in the form of heat, into electrical energy.

In order to implement this solution, a study is made on thermoelectric transducers, in particular the Peltier cell. This transducer allows to convert thermal energy into electrical energy. In order for the cell feed the microprocessor a PCB board is developed and therefore it is possible to raise and regulate the output voltage to the cell.

Additionally, a prototype is developed that simulates real situations that make it possible to establish and collect a temperature gradient. Leading to being possible to generate electrical energy that feeds an electronic component.

Keywords

Nexus- food, water, energy, thermogenerator, Peltier cell, Seebeck effect, wireless sensors.

.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação e enquadramento da dissertação	1
1.2	Estrutura e organização da dissertação	3
2	Transdutores termoelétricos na recolha de energia térmica	5
2.1	Princípios de funcionamento	5
2.2	Propriedades de materiais termoelétricos	7
2.2.1	Estrutura química do telureto de bismuto	9
2.2.2	Materiais de mudança de fase	10
2.3	Dispositivos termoelétricos	11
2.3.1	Termopar	12
2.3.2	Gerador termoelétrico	13
2.4	Sistematização de soluções desenvolvidas	16
2.4.1	<i>Pacemaker</i>	17
2.4.2	Conversores DC-DC	19
2.4.3	Dissipadores de calor passivos e ativos	23
3	Validação experimental do transdutor	31
3.1	Configuração da instalação experimental	31
3.2	Instalação do transdutor termoelétrico	36
3.3	Determinação do ponto de carga ótima para diferentes gradientes de temperatura	38
4	Conversão e regulação de energia	43
4.1	Esquema funcional da eletrónica de regulação	43
4.1.1	Análise do componente integrado LTC3108	43
4.1.2	Introdução ao kit DC2080	44
4.2	Projeto e construção do regulador	45
5	Aplicação experimental	51
5.1	Ilustração do caso de aplicação	51
5.2	Instalação do transdutor com a eletrónica de regulação	55
6	Conclusão	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Evolução e trabalhos futuros	62
	Referências	63

Lista de Figuras

Figura 2.1 Princípios físicos termoelétricos. a) Gerador termoelétrico - efeito Seebeck. b) Refrigerador - efeito Peltier.	6
Figura 2.2 Propriedades termoelétricas de diferentes materiais. a) Gráfico representativo do coeficiente de Seebeck, figura de mérito (ZT) e condutividade térmica e elétrica em relação à concentração de elétrons de transporte. b) ZT de alguns materiais semicondutores e a sua relação com a temperatura. Imagens adaptadas de [7].	8
Figura 2.3 Estrutura química do telureto de bismuto. a) Estrutura cristalina do elemento Bi_2Te_3 . b) Alteração na estrutura química que leva à formação dos semicondutores tipo -n e -p.	9
Figura 2.4 Gráfico representativo da relação entre a temperatura e o armazenamento energético (em forma de calor) das fases SHS e LHS.	11
Figura 2.5 Modelo de um gerador termoelétrico. Imagem adaptada de [12].	13
Figura 2.6 Circuito equivalente, térmico e elétrico, de um TEG com uma carga (R_L) associada [X].	14
Figura 2.7 Arquitetura do sistema da recolha de energia através do TEG que alimenta o pacemaker.	19
Figura 2.8 Circuito representativo do conversor DC-DC boost.	20
Figura 2.9 Diferentes estados de comutação do transistor. a) Transistor ligado, estado ton. b) Transistor desligado, estado toff.	21
Figura 2.10 Formas de onda da corrente e tensão na bobina tendo em conta o ciclo de trabalho.	23
Figura 2.11 Dissipadores de calor compostos por alhetas.	24
Figura 2.12 Funcionamento de dissipadores Passivos. a) Placa metálica e b) Alhetas..	26
Figura 2.13 Funcionamento interno de um tubo de vapor.	27
Figura 2.14 Funcionamento interno de uma camara de vapor.	28
Figura 2.15 Transferência de calor por convecção. a) Convecção natural e b) Convecção forçada.	29
Figura 2.16 Princípio de funcionamento de um dissipador de célula de líquidos. a) Ilustração do procedimento interno da célula e b) Procedimento do sistema geral que envolve. Legenda: 1- Fonte de calor, 2- reservatório de água; 3- bomba; 4- permutador de calor; 5-ventoinha, 6- calor dissipado.	30
Figura 3.1 Visão real da célula de peltier. a) Esquema com as dimensões. b) Imagem real. Imagens adaptadas do datashet do modelo ETC-200-14-06-E.	32
Figura 3.2 Circuito equivalente simplificado do TEG a funcionar como V_G a alimentar uma carga R_L	33
Figura 3.3 Esquematização experimental onde, os retângulos com as cruzes representam a pasta térmica e o retângulo a cinzento-escuro representa a chapa de alumínio.	35

Figura 3.4 Setup Experimental. 1- <i>BoosterPack</i> + <i>LanchPad</i> ; 2- Cabo USB; 3- Potencióstato; 4- Voltímetro; 5- Termopares; 6 - Autotransformador; 7- Fonte de alimentação; 8 - Amperímetro.	36
Figura 3.5 Diferentes perspectivas do <i>setup</i> experimental. a) Visão transversal. b) Visão axial.	37
Figura 3.6 Circuito equivalente do <i>setup</i> experimental.	37
Figura 3.7 Gráfico da representação das curvas de potência ótima. Curvas a tracejado - Variação de resistência. Curvas contínuas - Variação de potência.	39
Figura 4.1 Transformador <i>step-up</i> do LTC3108.	42
Figura 4.2 Diagrama de blocos do componente LTC3108.	43
Figura 4.3 DC2080A com a utilização da célula de Peltier ETC-200-14-06-E e à esquerda da imagem o processador EFM32™ Giant Gecko. Legenda: 1- ligação com a parte positiva da célula; 2- ligação com a parte negativa da célula.	44
Figura 4.4 Imagens retiradas do osciloscópio. a) Tensão de entrada; b) Comutação do MOSFET.	45
Figura 4.5 Imagens retiradas do osciloscópio. a) V_{OUT} ; b) PGOOD; c) VMCU.	46
Figura 4.6 Esquemático do circuito pelo qual a placa é composta.	48
Figura 4.7 Placa PCB da eletrónica de regulação.	48
Figura 4.8 Processo de validação da placa PCB.	49
Figura 5.1 Funcionamento de um transdutor de pH. a) Características do transdutor b) Soluções com diferentes pH e respetivos fenómenos químicos.	53
Figura 5.2 Representação do transdutor e circuito de armazenamento. Legenda: 1-Célula de Peltier; 2- Parafina; 3- Placa de metálica; 4-Dissipador de calor de alhetas; 5- Tubo de plástico; 6-Lente de fresnel; 7- Caixa que contém a parafina; 8- Isolante térmico; 9- Pasta térmica; 10- Fluxo de água; 11- Resistências que aquecem a parafina.	54
Figura 5.3 Componentes responsáveis pela medição de pH. À esquerda o circuito EZO e à direita o sensor potenciométrico	55
Figura 5.4 Gráfico do perfil energético da comunicação entre o <i>gecko</i> e o EZO.	56
Figura 5.5 Diagrama sequencial do código proposto.	57
Figura 5.6 Ilustração do protótipo e respetivo sistema de medição de pH.	59
Figura 5.7 Fotos reais do protótipo de acoplamento entre a célula e o tubo. a) Visão lateral. b) Visão frontal.	59

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Propriedades físicas do termopar tipo k.	12
Tabela 2.2 Comparação entre os diferentes tipos de dissipadores.	25
Tabela 3.1 Dados técnicos da célula ETC-200-14-06-E.	32
Tabela 3.2 Sequência dos cálculos efetuados na extração de valores.	38
Tabela 4.1 Escolha de V_{OUT} através dos terminais VS1 e VS2.	43

Nomenclatura

I	Corrente elétrica [A];
V	Tensão elétrica [V];
P	Potência [W];
ZT	Figura de mérito;
λ	Condutividade térmica [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$];
T	Temperatura absoluta [$^{\circ}\text{C}$ ou K];
A	Área de superfície [m ²];
σ	Condutividade elétrica [$(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$];
V_G	Tensão gerada pelo TEG [V];
ΔT	Gradiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}$ ou K];
K_a	Resistividade térmica da placa de cerâmica [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$];
K_{TEG}	Resistividade térmica dos termopares [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$];
N	Número de termopares;
N_p	Número de enrolamentos no primário;
N_s	Número de enrolamentos no secundário;
l	Comprimento [m];
F	Constante de Faraday [C. mol ⁻¹]

Simbologia

α_n	Coeficiente de Seebeck do material tipo n [μVK^{-1}];
α_p	Coeficiente de Seebeck do material tipo p [μVK^{-1}];
π	Coeficiente de Peltier;
D	Duty cycle;
PF	Fator de potência [W];
Φ	Taxa de fluxo de calor [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$];

Lista de Acrónimos

UBI	Universidade da Beira Interior
TEG	Thermoelectric Generator
PCM	Phase Change Material
SH	Sensible Heat
LH	Lattent Heat
MPPT	Maximum Power Point Tracker
PWM	Pulse Width Modulation
MIT	Material de Interface Térmica
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
LDO	Low Dropout Linear
UART	Univeral Asynchronous Receiver/Transmitter
RTC	Real Time Clock
PCB	Printed Circuit Board

Capítulo 1

Introdução

Neste primeiro capítulo, em 1.1, é feita a apresentação do enquadramento do tema da dissertação tal como a motivação e objetivos a alcançar. Por último, em 1.2, é feita a organização estrutural desta dissertação.

1.1 Enquadramento, motivação e objetivos

A recolha de energia elétrica através do meio envolvente, também denominada por *Energy Harvesting* é uma tecnologia cada vez mais presente em diversas áreas. Porém, a mais comum é a área de sensores sem fios. Embora *energy harvesting* signifique recolher energia do meio ambiente o processo é diferente quando comprado com energias renováveis [1]. Em contraste, pode ser definida como uma recolha de energia do meio envolvente que está a ser desperdiçada (em forma de calor, vibração, entre outras) para o uso energético local de dispositivos de baixas potências. A recolha de energia térmica é uma das fontes utilizadas para converter energia do meio envolvente, neste caso em forma de calor, em energia elétrica [2].

As áreas de aplicação deste tipo de recolha de energia são muito vastas, abrangendo praticamente todas as áreas em que sejam utilizados sistemas de baixo consumo energético que utilizem baterias. Uma dessas áreas é a área de distribuição e tratamento de águas.

Não é novidade o fato de cada vez mais a água potável e a sua qualidade serem cada vez mais escassas. Este fato, praticamente de senso comum, acontece devido à quantidade de água potável ser um recurso natural que necessita de tempo para ser concebido. Adicionalmente, com o fato da população mundial continuar a aumentar exponencialmente, mais água potável é requerida e, com a agravante, de com este aumento desequilibrado também resultar mais poluição da água potável devido à diminuta consciência coletiva. Crescimento esse que não acompanha o tempo natural de renovação de água potável. Assim, são necessárias soluções que tratem a água potável tal como ela deve ser tratada e gerida. De forma sustentável. Devido às perdas de água potável utilizadas em estações de tratamento de água utilizar sistemas que o façam autonomamente apresenta uma solução inteligente. No entanto é necessário colocá-la em prática e de maneira economicamente e tecnologicamente factível.

A presente dissertação procura abordar o possível acoplamento de geradores termoelétricos a sistemas de redes sem fios que façam esse controlo de qualidade sem necessidade de uso de

baterias. De modo a satisfazer a necessidade ambiental e energética exigida pela situação atual.

Tal como referido anteriormente, a motivação desta dissertação passa por tornar a área de sensores sem fios independente de baterias. Pois, tal como anteriormente constatado, estas acarretam inúmeras desvantagens. Essas desvantagens passam desde a necessidade de substituição das mesmas bem como, em muitas aplicações, o difícil acesso para a sua substituição. Como tal o uso de energia que à partida está a ser desperdiçada durante a aplicação desses sensores, neste caso em forma de calor, é algo bastante criativo. Pois deste modo, uma energia que está a ser considerada um desperdício e até prejudicial ao sistema passa a ser uma energia extremamente útil.

O uso de geradores termoelétricos (TEG), como por exemplo as células de Peltier, a funcionar segundo o princípio Seebeck, para além de serem robustas a situações e ambientes mais adversos, conseguem cumprir o objetivo energético com as devidas salvaguardas. Sendo que necessitam de uma fonte de calor e de uma fonte fria é necessário assegurar que não ocorre um curto-circuito térmico de modo a que a sua utilização não se torne inválida. Adicionalmente, é necessário garantir que a tensão de saída do TEG seja ampliada.

Desta forma, o objetivo principal desta dissertação passa pela conceção de um circuito impresso cuja função é elevar a tensão de saída da célula. É também feita a idealização de uma situação real que assegure a alimentação de um sensor através de uma célula de Peltier utilizando as fontes frias e quentes já existentes e intrínsecos à aplicação do sensor.

Assim os objetivos inerentes à presente dissertação visam:

- Rever quais já as estratégias utilizadas para potenciar a eficácia do funcionamento da célula Peltier a funcionar como gerador termoelétrico.
- Estudar e assegurar que a célula de Peltier funciona no seu ponto máximo de potência consoante um determinado gradiente térmico.
- Projetar um circuito que consiga regular e maximizar a tensão de saída do transdutor termoelétrico.
- Idealizar um caso de aplicação que se insira na temática *Nexus-Água*, energia e Alimentação
- Realizar um protótipo em que insira a célula de Peltier como fonte de alimentação de um microprocessador e que este consiga comunicar com o circuito de medição de pH e forma a este conseguir efetuar as medições requeridas pelo caso de aplicação.

1.2 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação é organizada através de seis capítulos. Sendo que o primeiro é o presente capítulo 1 onde é feita a introdução geral do tema da dissertação bem como o seu objetivo. O capítulo 2 tem como base o suporte teórico da dissertação. No capítulo 3 é feito o estudo da célula de Peltier bem como a sua validação experimental. No capítulo 4 é desenvolvido um circuito cujo objetivo é regular e aumentar a potência da célula de Peltier de modo a que esta consiga alimentar um microprocessador. No capítulo 5 é proposto um caso experimental que consegue ser realizado através implementação de todos os integrantes anteriormente estudados com outros componentes projetados de maneira a que se atinja o objetivo principal. Por fim, no capítulo 6, são feitas as reflexões sobre o capítulo anterior e o modo como este se interliga com os restantes capítulos. Adicionalmente, são projetadas propostas de continuação do desenvolvimento deste tema.

No capítulo 2 é feita uma análise teórica de maneira a compreender como é que os transdutores termoelétricos, em específico, os geradores termoelétricos (TEG) funcionam. Assim são explorados os princípios físicos e químicos destes transdutores bem como os materiais que promovem o melhor desempenho possível dos mesmos. São também enunciados alguns exemplos de aplicações cuja solução energética foi solucionada com o uso de geradores termoelétricos assim como os obstáculos encontrados através desta solução. Por último, é feita uma análise de soluções de como potenciar o desempenho deste tipo de transdutores.

No capítulo 3 é testada uma célula de Peltier a funcionar segundo o princípio físico Seebeck. São reunidas as condições para que se consiga saber qual a potência máxima gerada pela célula em questão. Nomeadamente, rastreamento da temperatura através de dois termopares, e uma carga variável de maneira a conseguir rastrear, com precisão, qual a tensão e corrente máximas. Por fim são reunidos os dados recolhidos e o comportamento da célula é analisado através de um gráfico que representa o ponto de carga ótimo para diferentes gradientes de temperatura.

No capítulo 4 é idealizado um circuito de regulação da tensão de saída da célula de Peltier com o intuito de posteriormente ser desenvolvido e estudado a sua construção. Este circuito de regulação tem o objetivo, de tal como o nome indica, de regular a tensão de saída do transdutor termoelétrico e de elevar a mesma até um valor que consiga fazer com que o microprocessador consiga trabalhar. No final, a placa desenvolvida que contém esse circuito de regulação é validada.

No capítulo 5 é feita a ilustração de um caso de aplicação cuja fonte energia do sistema seja a célula de Peltier anteriormente testada no capítulo 3. Esse caso de aplicação significa medir o pH de uma amostra. Sendo que, este caso de aplicação se insere na temática *Nexus-Água*,

Energia e Alimentação. Este conceito é elucidado no início do capítulo de maneira a conseguir fornecer a perspetiva de integração do caso de aplicação com a temática *Nexus*. Adicionalmente, todas as variantes que colocam em prática a idealização deste caso de aplicação são finalmente agrupadas. Deste o transdutor, a placa com o circuito de regulação de tensão da célula de Peltier, o microprocessador, a fonte de calor e frio da célula de Peltier, o circuito e transdutor adjacente à medição de pH. Por fim é apresentado o *software* responsável pela comunicação entre o microprocessador e o circuito de medição de pH. Os resultados desta comunicação são analisados.

Por último, no capítulo 6 são feitas as reflexões sobre as conclusões desta dissertação bem como os possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Transdutores termoelétricos na recolha de energia térmica

Este capítulo está organizado do seguinte modo. Na secção 2.1 é realizada uma análise dos princípios físicos envolvidos na conversão da energia térmica em energia elétrica. A secção 2.2 ilustra alguns tipos de materiais utilizados em transdutores termoelétricos. A secção 2.3 ilustra alguns tipos de transdutores utilizados na recolha de energia térmica. Uma revisão do trabalho principal desenvolvido pela comunidade científica em relação a essa tecnologia, bem como as estratégias de melhoramento do transdutor são apresentadas na secção 2.4.

2.1 Princípios de funcionamento

O efeito termoelétrico permite a conversão de energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Por outras palavras, o transdutor caracteriza-se por dar origem a uma diferença de potencial aquando sujeito a um diferencial térmico. Este processo é reversível.

Este efeito engloba três fenómenos: efeito de Seebeck, efeito de Peltier e o efeito de Thomson. Estes três efeitos usualmente são denominados como o efeito Peltier-Seebeck [3].

O efeito de Joule é um fenómeno através do qual se gera calor como consequência da passagem de uma corrente elétrica por um material resistivo. Porém, geralmente, não é denominado como um efeito termoelétrico pois, em contraste com os outros três efeitos, não é reversível.

O primeiro efeito, efeito de Seebeck, foi descoberto em 1821 pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck. Thomas constatou que um circuito elétrico fechado, composto por dois metais diferentes (unidos em dois pontos), fazia desviar a agulha de uma bússola sempre que esses dois metais fossem mantidos a temperaturas diferentes. Isto significa que foi dada origem a um campo elétrico entre estes dois metais, fazendo desviar a agulha da bússola [4].

Sendo assim, o efeito Seebeck é a conversão direta de fluxo de calor em eletricidade na junção de diferentes tipos de materiais. Isto acontece devido ao fato de diferentes metais possuírem

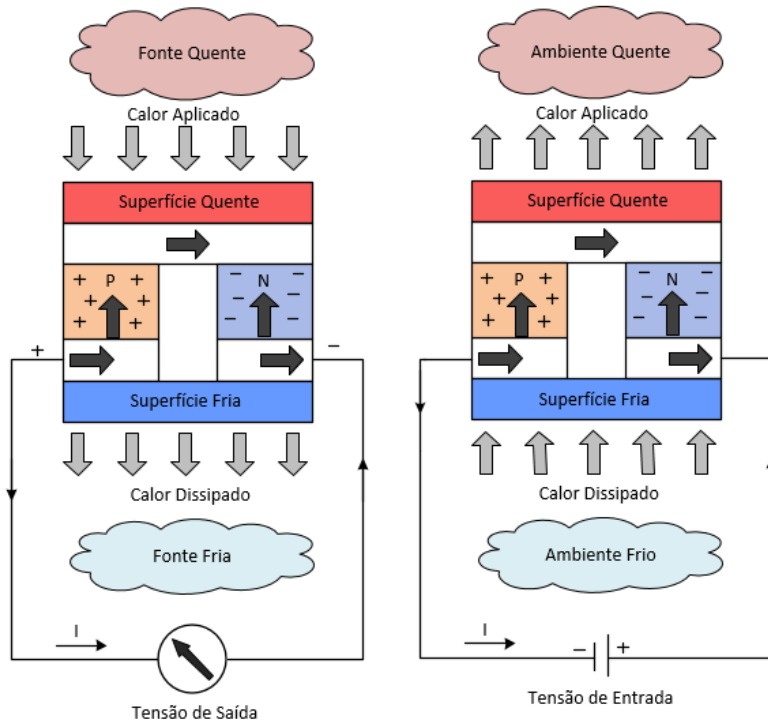


Figura 2.1 Princípios físicos termoelétricos. a) Gerador termoelétrico - efeito de Seebeck. b) Refrigerador - efeito Peltier.

elétrons com níveis de energias diferentes. Este princípio de funcionamento é ilustrado na figura 2.1. Dois fios condutores de materiais diferentes, unidos nas extremidades (uniões) formam um circuito elétrico fechado. Quando uma extremidade é aquecida, uma diferença de temperatura é conseqüentemente criada, provocando um fluxo de calor. Este fluxo de calor é transportado através da agitação de partículas, tais como, elétrons.

Se a difusão de elétrons (gerada pelo gradiente de temperatura) for maior num material haverá um fluxo de elétrons em torno do circuito. Ao contrário dos metais, nos semicondutores a taxa de difusão é muito maior, logo o fluxo/corrente será maior. Como tal, são usados materiais do tipo-n (alterados para criar um excesso de elétrons) e do tipo p (alterado para apresentar falta de elétrons) [4]. Os materiais tipo-n são considerados transportadores de carga negativas e os do tipo-p transportadores de carga positiva. Sendo assim, quando são usados dois pares de materiais do tipo n- e p-, e quando estes se encontram ligados em série, e é criado um fluxo de elétrons em torno do circuito, criando assim corrente [5].

Em cada material, o movimento de partículas, com carga, vai provocar um excesso de carga nas uniões de cada material, o que por sua vez, criará um campo elétrico até que o equilíbrio seja atingido [1].

O coeficiente de Seebeck, α , é dado pela equação,

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (1)$$

onde V é a tensão gerada e ΔT a diferença de temperatura entre dois materiais.

O sentido inverso do efeito Seebeck, denominado por efeito Peltier foi descoberto pelo físico francês Jean Charles Athanase Peltier. Jean Peltier constatou que os materiais termoelétricos também podem funcionar no sentido inverso. Isto é, quando é aplicada uma tensão é criada uma diferença de temperatura entre os materiais dissimilares. Por exemplo, quando uma gota de água é colocada na união de dois materiais dissimilares e é aplicada uma corrente a água adquire a sua forma sólida, no entanto, volta ao estado líquido quando é invertido o sentido da corrente [3].

O princípio de funcionamento deste efeito é ilustrado através da figura 2.1 b) onde explica, de forma esquemática, como este fenómeno funciona.

O coeficiente de Peltier é dado pela equação,

$$\pi = \frac{\Phi}{I} \quad (2)$$

onde, Φ é a taxa de fluxo de calor e I é a corrente aplicada entre dois materiais.

A taxa de fluxo de calor é dada pela equação,

$$\Phi = \frac{-\lambda A \Delta T}{h} \quad (3)$$

onde, λ é a condutividade térmica do material, A a área da superfície do mesmo, ΔT a diferença de temperatura e h é a espessura/altura do material.

Em 1851, William Thomson relacionou ambos os efeitos Peltier e Seebeck chegando à equação

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

sendo T a temperatura absoluta. Quando uma corrente, I , passa por um material condutor homogéneo e é sujeito a um gradiente de temperatura, T , é observado uma fonte de temperatura dentro do material [4] [5].

2.2 Propriedades de materiais termoelétricos

O desempenho dos dispositivos termoelétricos depende de vários fatores, particularmente, do tipo de material e das suas propriedades tais como o efeito Seebeck, condutividade elétrica e térmica e estabilidade térmica. Sendo assim, o estudo químico e físico dos materiais revela-se extremamente importante.

O uso de materiais inorgânicos tais como, polímeros, nano materiais, nano compósitos, exibem um fator de mérito, ZT, superior aquando comparado com materiais orgânicos. Para uma taxa de conversão energeticamente eficiente aceitável (superior a 10 %) o fator de mérito de um material tem de ser superior a 1. Além do fato de que diferentes materiais possuem diferentes capacidades termoelétricas e estas podem ainda ser potenciadas através de diferentes técnicas. Tais como, nanoestruturamento, nonocompositos e dopagem [6]. A eficiência e a qualidade dos dispositivos termoelétricos é maior quanto maior for a sua figura de mérito,

$$ZT = \frac{\alpha \cdot \sigma}{k}, \quad (5)$$

onde α, σ, k representam, respetivamente, o efeito Seebeck, a condutividade elétrica e a condutividade térmica [6].

Sendo assim, de modo a obter um valor alto da figura de mérito (≥ 1) o coeficiente de seebeck deverá ser o mais elevado possível para assim gerar valores de tensões mais elevadas. A condutividade elétrica também deverá ser elevada de modo a reduzir dissipações de energia através do efeito de Joule. Por fim, a condutividade térmica necessitará de apresentar valores reduzidos, de modo a permitir que o material resista a grandes diferenças de temperaturas.

As propriedades de transporte de eletrões são maioritariamente influenciadas pela concentração de cargas do material. Esta concentração de cargas está fortemente relacionada com a figura de mérito (ZT). E, nos semicondutores é muito superior aquando comparada com outros materiais, tais como, materiais condutores por exemplo, metais, e com materiais não condutores por exemplo, cerâmicas. Esta afirmação é de fácil visualização através da figura 2.2 a) [7].

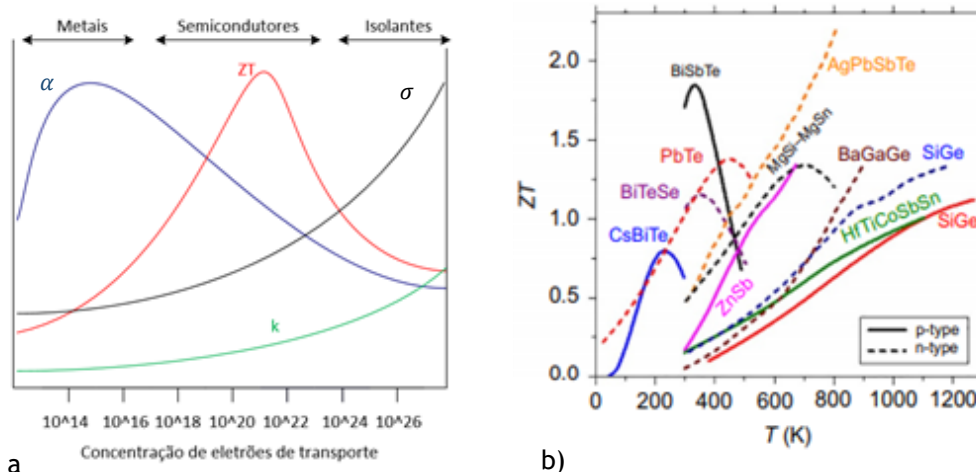


Figura 2.2 Propriedades termoelétricas de diferentes materiais. a) Gráfico representativo do coeficiente de Seebeck, figura de mérito (ZT) e condutividade térmica e elétrica em relação à concentração de eletrões de transporte. b) ZT de alguns materiais semicondutores e a sua relação com a temperatura. Imagens adaptadas de [7].

Esta evidência compreende-se através do fato de, no caso dos metais, o coeficiente de Seebeck ser quase nulo e de nos materiais isolantes a condutividade elétrica ser muito baixa.

Existem inúmeros materiais semicondutores que possuem figuras de mérito com valores elevados, isto é, apresentam características termoelétricas favoráveis. No entanto os materiais com base no telureto de bismuto (Bi_xTe_y), usualmente, são os mais utilizados. Inclusive, na parte prática desta dissertação, em particular no capítulo 3.

2.2.1 Estrutura química do telureto de bismuto

O telureto de bismuto é um material semiconductor que pode apresentar várias fases consoante a concentração de telúrio (Te) ou de bismuto (Bi). Em qualquer das suas fases a sua estrutura cristalina é hexagonal, tal como demonstra a figura 2.3 a). O telureto de bismuto na fase Bi_2Te_3 possui uma estrutura composta por um empilhamento de três camadas quintuplas (QL). A camada quintupla é formada pela seguinte sequência de elementos: $Te^1 - Bi - Te^2 - Bi - Te^1$. Os átomos Bi e Te encontram-se fortemente ligados entre si através de uma ligação iônica. Contrariamente, as camadas QL são ligadas entre si através de uma ligação mais fraca. Esta característica fornece a este composto uma estrutura similar a outras estruturas em camadas, como por exemplo o grafeno, facilitando assim a manipulação do material.

Mediante a modificação intencional nas condições de crescimento do Bi_2Te_3 é possível alterar a configuração do material de tipo -n para tipo -p ou vice versa. Se for adicionado mais telúrio

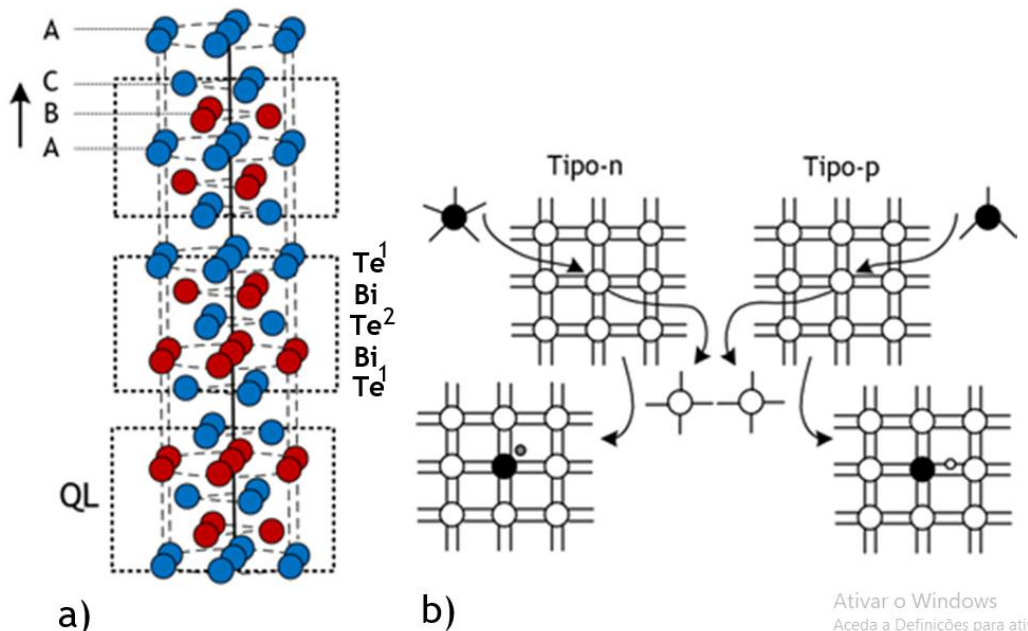


Figura 2.3 Estrutura química do telureto de bismuto. a) Estrutura cristalina do elemento Bi_2Te_3 . b) Alteração na estrutura química que leva à formação dos semicondutores tipo -n e -p.

a concentração de bismuto diminui fazendo com que o material apresente características de um semicondutor tipo-p. Esta circunstância deve-se ao fato da configuração eletrônica no bismuto apresentar menos um elétron de valência, aquando comparado com o telúrio. Logo, quando é substituído um elemento de telúrio por um de bismuto a ligação deixa de ser covalente para passar a ser simples- figura 2.3 b). A quebra desta ligação forma assim a denominada: lacuna.

Esta substituição de elementos normalmente é efetuada na camada da posição Te^1 , pois na posição Te^2 os átomos de telúrio possuem uma ligação mais forte. Tornando assim este material num semicondutor recetor de eletrões tipo-p.

No entanto, se ocorrer o inverso, isto é, se um átomo de telúrio substituir um de bismuto é formado um semicondutor tipo- n. Pois, tal como já foi referido anteriormente, o telúrio tem um elétron de valência a mais aquando comparado com o bismuto. Sendo assim, tal como a figura 2.3 b) ilustra, quando esta evidência ocorre o material fica com eletrões de valência a mais o que faz dele um material de tipo-n. Ou seja, torna-se um material dador de eletrões.

Quando dois materiais semicondutores do tipo-n e -p estão em contacto e, quando há um aumento de temperatura, os eletrões em excesso do material tipo-n movimentam-se para as lacunas do material tipo-p. Esta tensão gerada resulta deste movimento de eletrões [6].

2.2.2 Materiais de mudança de fase

Materiais de mudança de fase (denominados na literatura como PCMs - *Phase Change Materials*) podem ser usados no armazenamento de energia térmica. Esta energia térmica pode ser armazenada e libertada como calor sensível (SH) ou como calor latente (LH). O armazenamento de calor sensível (SHS) armazena a energia térmica aumentando a temperatura de um sólido ou de um líquido. Em contraste, o armazenamento de energia térmica de calor latente (LHS) ocorre quando um material absorve ou liberta o calor à medida que este passa de um sólido para um líquido, líquido para um gás ou vice-versa. No caso do LHS, que ocorre na fase transitória do material, a temperatura é constante [8].

Este tipo de armazenamento de energia térmica é o método mais eficiente, pois proporciona maior armazenamento de energia com uma menor diferença de temperatura. A figura 2.4 ilustra os dois tipos de armazenamento de energia térmica (SHS e LHS) e relaciona as três mudanças de fase do material e qual a sua relação entre a temperatura e a capacidade de armazenar energia em forma de calor.

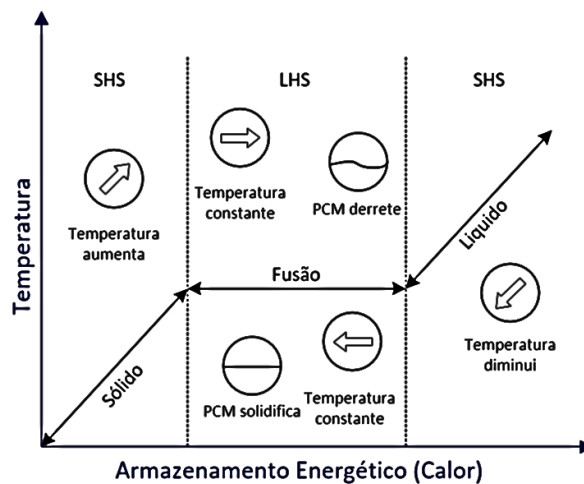


Figura 2.4 Gráfico representativo da relação entre a temperatura e o armazenamento energético (em forma de calor) das fases SHS e LHS.

Existem muitos tipos de materiais de PCM utilizados na literatura, em particular as ceras de parafina têm sido muito utilizadas. A parafina tem uma alta capacidade de LHS (200 - 250 KJ / Kg) e uma SHS baixa (3,22 KJ / Kg) e eles são considerados quimicamente inofensivos. Embora as ceras de parafina tenham um bom desempenho de armazenamento de calor, a condutividade é baixa (0,2 W / m / K), de modo que elas requerem uma grande área de superfície. Têm a capacidade de armazenar energia térmica com a vantagem de ser de baixo custo e de acesso fácil tornando este tipo de materiais uma grande escolha de PCM [9].

A parafina arrefece devido a técnicas de refrigeração, tais como, o ar ou sistemas de refrigeração de água. O uso do sistema de resfriamento a água tem uma maior condutância do que os sistemas de resfriamento [10]. Nesse caso, o fluxo de água funciona não apenas como fonte de calor, mas também como dissipador de calor. Mais à frente, no capítulo 5, é feita uma proposta de protótipo de um sistema de fluxo de água com o transdutor termoelétrico e onde é usada a parafina como intermediária da fonte de calor.

2.3 Dispositivos termoelétricos

Um dispositivo termoelétrico gera uma diferença de potencial quando há uma temperatura diferente aplicada em cada um dos lados das suas superfícies. A um circuito que incorpora tanto o efeito térmico como o efeito elétrico dá-se a designação de circuito termoelétrico. O dispositivo que inclui este circuito denomina-se dispositivo termoelétrico.

Pela ordem lógica anteriormente salientada pode-se afirmar que um gerador termoelétrico (TEG - *TermoEletric Gerador* e um termopar são ambos exemplos de dispositivos

termoelétricos. Podendo funcionar, respetivamente, como geradores de energia ou como sensores.

2.3.1 Termopar

De maneira a conseguir medir com precisão a temperatura num ambiente laboratorial e/ou prático, é imprescindível o uso de sensores de temperatura, ou seja, termopares.

Os termopares são sensores compostos por dois metais que geram uma tensão sempre que uma diferença de temperatura é aplicada nos pontos de junção entre os dois materiais. Tal como o gerador termoelétrico e, contrariamente ao gerador de calor (aquecimento e refrigeração) que usa o princípio físico de Peltier, os termopares funcionam segundo o princípio físico de Seebeck. Dois fios dissimilares são unidos em ambas as extremidades, se a temperatura das junções for diferente é estabelecido um potencial elétrico que é medido e correlacionado com a temperatura.

No entanto, para uma medição de temperatura apropriada é necessário ter em consideração alguns fatores tais como o isolamento adequado e o tipo de termopar a usar. Existem vários tipos de termopares, cuja denominação é feita através de letras maiúsculas, por exemplo, termopares do tipo K, J, T.

Vários modelos, embora funcionem todos com base no mesmo princípio físico, são constituídos por materiais diferentes o que, conseqüentemente, se traduz em diferentes propriedades funcionais. Deste modo, é necessário avaliar cada modelo tendo em conta, a precisão, sensibilidade, capacidade térmica, tensão gerada, potência produzida, custo, de modo a perceber qual o tipo de termopar ideal para uma determinada aplicação.

O termopar mais genérico é o do tipo K, para além de ser o mais genérico é o termopar usado na parte prática desta dissertação, capítulo 3, e como tal é o termopar sobre o qual mais alguns detalhes são demonstrados. Detalhes como, a densidade e a condutividade e capacidade térmica dos termopares tipo K, são enumerados na tabela 2.1 [11].

Tabela 2.1 Propriedades físicas do termopar tipo k.

Componentes dos fios do termopar	Propriedades do termopar tipo K	
	Cromel	Alumel
Condutividade Térmica [W/mK]	19,2	29,77
Densidade [Kg/m ³]	8730	8600
Capacidade Térmica [J/(Kg K)]	447,7	523,34

2.3.2 Gerador termoelétrico

Tal como já foi referido no subcapítulo 2.1 o gerador termoelétrico utiliza o fenómeno físico Seebeck como princípio de funcionamento. Quando surge uma diferença de temperatura é produzida uma diferença de potencial elétrico. A tensão produzida por este gerador é relativamente baixa, como tal é necessário o uso de um conversor DC-DC na sua saída de modo a ser possível encontrar o ponto de funcionamento máximo e elevar o seu nível de tensão.

A estrutura de um TEG é demonstrada na figura 2.5. Ao ser aquecida a junção quente dos materiais, através de uma fonte de calor, é provocado um movimento de eletrões. Elementos semicondutores do tipo p e n são sucessivamente conectados através de contactos de cobre.

De modo a maximizar a diferença de potencial à saída do circuito as junções são ligadas em série, eletricamente, fazendo com que a diferença de potencial à saída seja a soma da diferença de potencial de cada junção. A nível térmico é feita uma ligação das junções em paralelo de modo a que estas possuam uma diferença de temperatura aproximadamente constante entre elas.

A figura 2.6 representa o circuito equivalente de um gerador termoelétrico. Nomeadamente o esquema de funcionamento térmico e elétrico.

A tensão de circuito aberto, V_G , gerada pelo TEG na presença de uma diferença de temperatura ($\Delta T = T_{hot} - T_{cold}$) é dada pela equação,

$$V_G = N\alpha_{pn}\beta\Delta T . \quad (6)$$

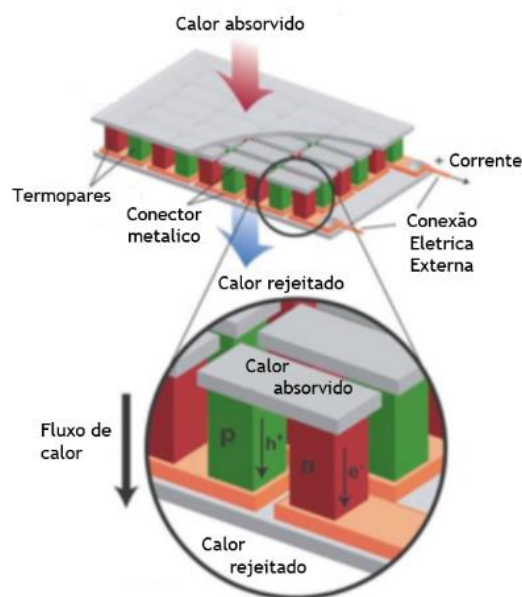


Figura 2.5 Modelo de um gerador termoelétrico. Imagem adaptada de [12].

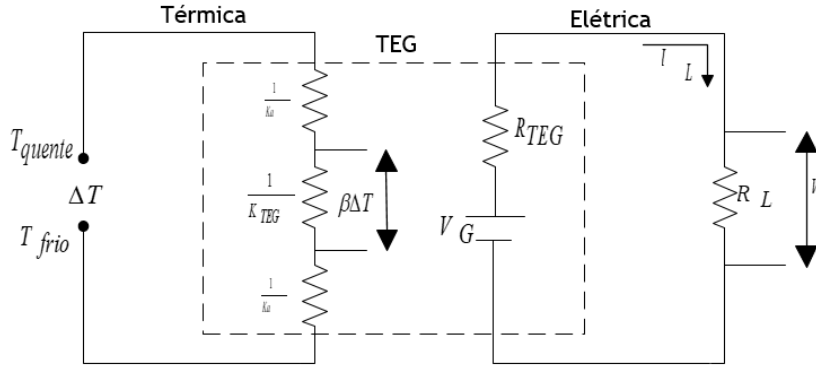


Figura 2.6 Circuito equivalente, térmico e elétrico, de um TEG com uma carga (R_L) associada.

onde N representa o número de termopares e β o coeficiente referente ao valor finito da relação entre a resistividade térmica das placas de cerâmica K_a e a resistividade térmica interna de todos os termopares K_{TEG} . O coeficiente β é dado pela expressão matemática,

$$\beta = \frac{K_a}{K_a + 2K_{TEG}} \quad (7)$$

tendo por base a resistividade térmica das placas de cerâmica (K_a) e dos termopares (K_{TEG}), que dependem da condutividade térmica dos seus materiais. A condutividade térmica das placas de cerâmica e dos termopares é representada, respetivamente, por λ_a e λ .

A resistividade térmica das placas de cerâmica é dada pela equação,

$$K_a = \lambda_a \frac{A_a}{h_a} \quad (8)$$

onde, h_a e A_a são, respetivamente, a espessura e a área da placa de cerâmica.

A resistividade térmica interna de todos os termopares K_{TEG} é dada pela equação,

$$K_{TEG} = 2N\lambda \frac{A}{l} \quad (9)$$

onde, l e A são, respetivamente, o comprimento e a área de cada semicondutor.

O esquema elétrico de um módulo termoelétrico é representado na figura 2.6 onde é possível verificar que o TEG está ligado uma carga R_L nos terminais do circuito, existindo assim uma corrente I_L que fluirá pela carga. A corrente é determinada através da expressão,

$$I_L = \frac{V_G}{R_L + R_{TEG}} \quad (10)$$

onde a resistência interna, R_{TEG} , do gerador termoelétrico sendo definida pela equação,

$$R_{TEG} = \frac{2N\rho \cdot l}{A} \quad (11)$$

levando a que seja possível, através das leis de Kirchhoff, obter a expressão da tensão na carga R_L resultando na equação,

$$V_L = V_G - R_{TEG}I_L = N\alpha_{pn}\beta\Delta T - R_{TEG}I_L. \quad (12)$$

De maneira a conhecer qual a potência gerada na carga em função da tensão utilizada por estes transdutores termoelétricos é definida a seguinte equação

$$P_L = I_L^2 V_L = \frac{R_L}{(R_L + R_{TEG})^2} \cdot (N\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2. \quad (13)$$

A potência máxima entregue à carga P_{Lmax} é obtida através da expressão,

$$P_{Lmax} = \frac{R_{TEG}}{(R_{TEG} + R_{TEG})^2} \cdot (N\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2 = \frac{(N\alpha_{pn}\beta\Delta T)^2}{4R_{TEG}} \quad (14)$$

tendo em conta a condição ($R_L = R_{TEG}$).

O fator de potência e a resistividade térmica interna são usados para avaliar a eficiência dos geradores termoelétricos. Um elevado fator de potência significa maior potência gerada. No entanto, uma baixa resistividade térmica interna do TEG, K_{TEG} , é o ideal para manter uma diferença de temperatura entre os termopares. A equação,

$$PF = \frac{P_{Lmax}}{(\Delta T)^2} = \frac{(N\alpha_{pn}\beta)^2}{4R_{TEG}} \quad (15)$$

demonstra a fórmula que representa o fator de potência [2].

As células de Peltier também são um exemplo de transdutores termoelétricos. Este tipo de dispositivo pode funcionar como refrigerador/aquecedor termoelétrico, usando o princípio físico do efeito Peltier, ou como gerador termoelétrico, usando o princípio físico do efeito Seebeck.

O esquema ilustrativo da célula de Peltier é o mesmo que o de um gerador termoelétrico (figura 2.5). No entanto, existem vários modelos na literatura. Dentro desses modelos existem células de Peltier com diferentes áreas, espessuras, e altura de termopares. Quanto maior a altura dos termopares mais a célula de Peltier deixa de ser considerada uma célula de Peltier e passa a

ser considerada e comercializada como gerador termoelétrico. Isto deve-se ao fato de quando mais altos forem os termopares maior a tensão gerada.

Como a função principal de uma célula de Peltier é funcionar como refrigerador/aquecedor, usando o princípio de Peltier, os *datasheets* destas células não têm registro dos parâmetros relacionados à sua eficiência aquando usados como um gerador TEG. Consequentemente, esses parâmetros precisam de ser extraídos de maneira a se conseguir caracterizar a célula de Peltier como um gerador termoelétrico. Os parâmetros a ter em consideração são: as propriedades do material (dadas pela figura de mérito) e fator de potência.

A escolha do material é determinante para a eficiência dos dispositivos TEG. A eficiência depende da temperatura de operação dos materiais, assim como das suas características, esta seleção é dada pela seguinte figura de mérito:

$$ZT = \frac{\alpha_{pn}^2 T}{4\rho\lambda}, \quad (16)$$

onde, α_{pn} é o coeficiente de Seebeck dos termopares ($\alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$), ρ a resistividade elétrica, λ a condutividade térmica dos materiais e, por fim, T é a temperatura ambiente absoluta.

Através da equação (16) é possível constatar que quanto menor for a condutividade e resistividade elétrica maior será o efeito Joule (quando uma corrente atravessa um condutor é gerado calor) prejudicando assim a figura de mérito. Em contraste com a resistividade e condutividade, quanto maior for o coeficiente Seebeck dos termopares maior será a sua figura de mérito. O que significa que maior será a diferença de potência gerada para uma diferença de temperatura.

2.4 Sistematização de soluções desenvolvidas

Com o aumento de pequenos dispositivos nas mais diversas áreas, desde a medicina à vida cotidiana, o uso de baterias tem sido a melhor solução energética para diversos dispositivos eletrônicos. No entanto, para determinadas aplicações onde o acesso às baterias é difícil a sua substituição ou recarregamento é geralmente impossível.

De maneira que, o uso de soluções com base em recolha de energia do ambiente - *energy harvesting* - tem sido amplamente explorado. Nomeadamente na área termoelétrica.

O uso de dispositivos termoelétricos é uma prática cada vez mais usual, sendo assim já muito tem sido feito no sentido de maximizar a sua eficiência energética. Nomeadamente, a

descoberta e melhoramento de características termoelétricas dos materiais, tais como a condutividade térmica e elétrica, e o melhoramento geométrico dos dispositivos, em específico, maior quantidade e o comprimento de termopares. No entanto a eficiência dos TEG ainda permanece baixa, sendo este um desafio que continua a ser estudado de maneira a melhorar o desempenho deste tipo de dispositivos.

De maneira a contrariar a baixa eficiência nos dispositivos TEGs são considerados métodos de condicionamento de potência. Estes métodos incluem *impedance matching* e a aplicação de conversores DC-DC. A *impedance matching* faz o balanço entre a resistência interna do sistema do TEG (R_{TEG}) e a resistência externa da carga ligada ao sistema TEG (R_L). De modo a que o balanço entre as resistências seja ótimo R_{TEG} deverá ser igual a R_L de maneira a assegurar a transferência máxima de potência para a carga. Contudo, este balanço é difícil de alcançar sem o uso de elementos eletrônicos, tais como, transístores, díodos, bobinas, condensadores e resistores. Sendo assim, o uso de conversores DC-DC (compostos pelos elementos a cima enumerados) em conjunto com as técnicas de seguimento do ponto de potência máxima (MPPT- *Maximum Power Point Tracker*) tem sido alvo de vários estudos de maneira a atingir tensões estáveis e pontos de potências máximos [13].

2.4.1 Pacemaker

Dentro da área de medicina também a tecnologia continua a melhorar e a dar novas respostas a antigos paradigmas. Nomeadamente, na especialidade de cardiologia com novas soluções que venham responder a problemas de substituição de baterias de *pacemakers*. O *pacemaker* é um pequeno dispositivo, em média um pouco maior que uma moeda de dois euros: 30,48 mm. Estima-se que cerca de três milhões de pessoas possuam um destes dispositivos e a cada ano cerca de 600 000 são implantados [14].

Embora, a média de idade ronde os 60 anos também crianças e jovens adultos podem vir a necessitar da implementação deste dispositivo. A patologia que provoca a necessidade do uso de um *pacemaker* denomina-se por bradicardia, cujo sintoma significa baixo ritmo cardíaco. O fato de um corpo possuir baixo ritmo cardíaco faz com que o coração não consiga bombear o sangue com a força suficiente de modo a irrigar todo o organismo.

A falta de sangue no cérebro ou noutros órgãos faz desencadear inúmeros sintomas. Sendo assim, a falta de impulsos elétricos no coração apresenta um risco considerável à sobrevivência do individuo. Com a implementação de um *pacemaker* é possível assegurar que o coração receba os impulsos elétricos necessários de modo a que este órgão possibilite a irrigação do sangue.

Tal como já foi referido anteriormente, é um dispositivo de pequenas dimensões e pesa cerca de 29 gramas.

Apesar do seu reduzido tamanho possui uma bateria, circuitos eletrônicos e uma memória computacional que no seu conjunto permite gerar sinais elétricos. Estes sinais, ou pulsos de estimulação, são enviados através de fios condutores, devidamente isolados, até ao músculo cardíaco. Os sinais permitem com que o músculo cardíaco comece a contrair impondo assim o ritmo cardíaco.

Porém, um dos principais obstáculos deste dispositivo são as baterias. As baterias são o principal elemento que delimita o tempo de vida deste dispositivo (passados cinco anos, em média, necessita de ser substituída). A substituição requer outro procedimento cirúrgico o que torna o processo muito invasivo. Adicionalmente, o elemento da bateria representa cerca de 60 % do tamanho total do dispositivo. Eliminar este elemento reduziria significativamente o tamanho e a aumentaria significativamente a qualidade de vida do paciente.

Mais uma vez, a utilização de um método que envolva o uso de *energy harvesting* significa uma solução bastante apelativa.

A implementação de um micro-TEG é fiável tanto nas dimensões como na sua eficácia aquando comparado com outros transdutores visto não necessitar de partes móveis (como é o caso dos transdutores piezoelétricos) que permitem converter a energia mecânica das vibrações. Na área biomédica é usado o calor do corpo como fonte de calor.

De maneira a que a sua implementação seja o mais favorável possível o micro-TEG deve ser colocado o mais perto possível da superfície da pele. Deste modo, é assegurada uma diferença de temperatura máxima entre o corpo e o ambiente nas junções do TEG.

A tensão de saída neste tipo de aplicações é limitada, cerca de 50 mV, pois o gradiente de temperatura estabelecido ronda os 1-2 Kelvin. De modo a colmatar este obstáculo, Ashraf Mohammadreza e Masoumi Nasser, decidiram usar uma arquitetura, figura 2.7, composta por: osciladores de baixa tensão, conversores *boost* e comparadores com algoritmo que mede o ponto máximo de tensão (MPPT). Consequentemente, esta arquitetura permitiu comprovar (através de simulações) que com a tensão de entrada baixa, 40 mV, fosse atingido o valor de saída necessário, 2,5 V, para alimentar o *pacemaker*. Adicionalmente, é de sublinhar as pequenas dimensões deste circuito: 1854 nm [15].

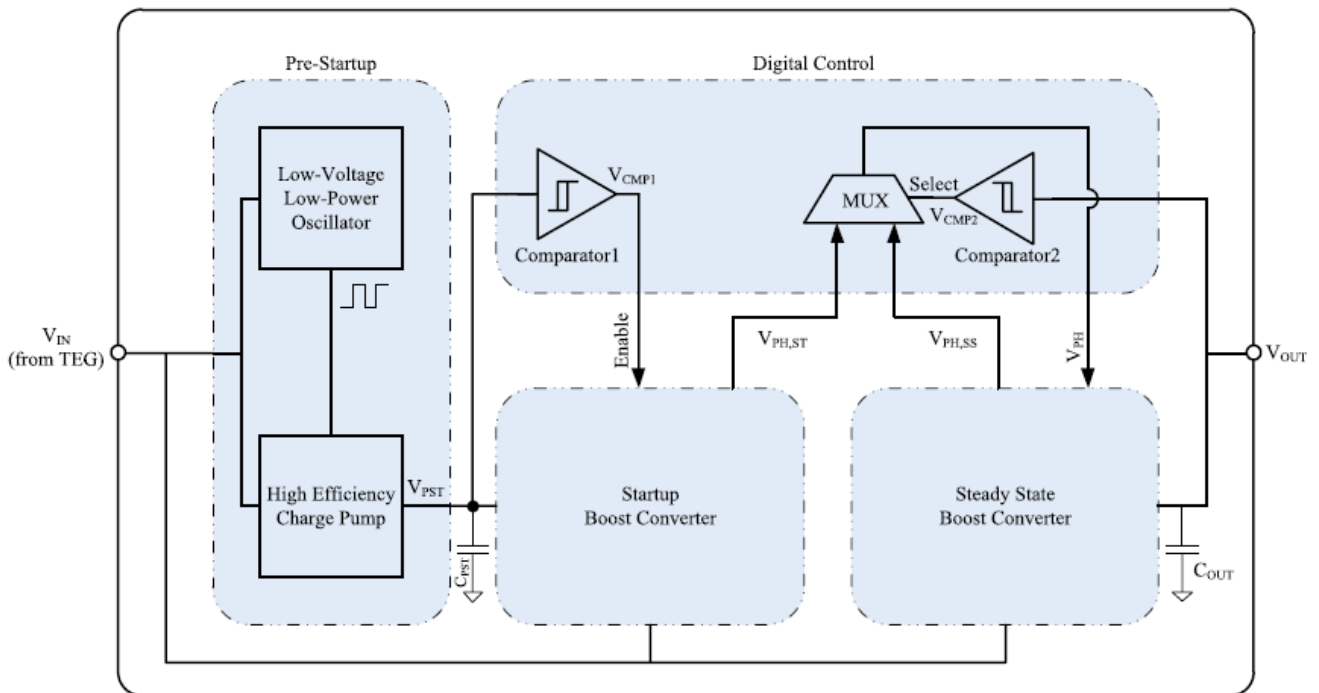


Figura 2.7 Arquitetura de sistema da recolha de energia através de TEG para alimentar o *pacemaker*.

2.4.2 Conversores DC-DC

Tal como o exemplo anteriormente explorado, *pacemaker*, existem outras aplicações, que utilizam o TEG como fonte de energia (usando calor dissipado), desde a área automóvel até à área biomédica. No entanto, uma maneira de potenciar as tensões de entrada de modo a que a tensão de saída consiga alimentar estes dispositivos passa por várias estratégias. Uma dessas estratégias, também já referida anteriormente, é o uso de conversores DC-DC, particularmente, o conversor *boost* [16].

Os conversores DC-DC são circuitos elétricos com o propósito de regular uma determinada tensão. Isto é, através deste tipo de sistemas é possível estabilizar e gerar uma tensão ou corrente de saída maior ou menor que a tensão ou corrente de entrada. O uso de transístores funcionam como interruptores que são ligados e desligados se a eles for fornecida uma tensão.

Este controlo é implementado através de, por exemplo, da modulação de pulso (*PWM-Pulse Width Modulation*). O este controlo regula o período de tempo que o interruptor (por exemplo, o transístor) se encontra aberto (*ton*) ou fechado (*toff*). Através desta linha de raciocínio, pode-se afirmar que o ciclo de trabalho (*duty-cycle*) é a principal característica que controla a tensão de saída [17]. Sendo o ciclo de trabalho representado pela fração de tempo em que um sistema está ativo (t_{on}) durante um determinado período de tempo (T) resultando a fórmula,

$$D = \frac{t_{on}}{T}. \quad (17)$$

Contrariamente a t_{on} , t_{off} é definido através da equação,

$$t_{off} = (1 - D)T, \quad (18)$$

que resulta da manipulação da equação (17).

Existem diferentes tipos de conversores DC-DC podendo ser categorizados através do seu isolamento galvânico. Isto é, podem ser categorizados consoante se são isolados galvanicamente (separação elétrica entre a referência de comando e a referência do circuito) ou o cas. Este isolamento galvânico deve-se ao fato de existirem transformadores no circuito principal de potência isolando a saída da entrada.

Posto isto, os conversores DC-DC são divididos em dois grupos. Os não isolados: *buck* (reductor de tensão ou *step-down*), *boost* (elevador de tensão ou *step-up*), *buck-boost*. E os isolados: *flyback*, *forward*, *push-pull*, meia ponte, ponte completa [18].

Já várias tipologias de conversores foram observadas de modo a promover tensões de saída mais estáveis de maneira a melhorar os sistemas termoelétricos. A escolha do conversor certo depende da sua aplicação. No entanto o conversor mais comum, e com mais relevância prática, nesta dissertação é o *boost* [17].

O conversor *boost* ou elevador de tensão, tal como o nome indica, tem a função de elevar/aumentar a tensão de entrada. A disposição eletrónica tanto do interruptor de potência (transistor) como dos elementos passivos (condensador, bobina e resistência) são feitos através da demonstração da figura 2.8.

Quando uma determinada corrente atravessa uma bobina (L) cria um campo magnético. E o inverso também acontece, isto é, quando um campo magnético atravessa uma bobina cria uma corrente. Assim que o transistor (T) feche (o transistor é ligado a um PWM que comanda a abertura e fecho de T) este passa a funcionar como um circuito fechado, e, nesse intervalo de tempo, o circuito passa a estar no estado *ton* - figura 2.9 a).

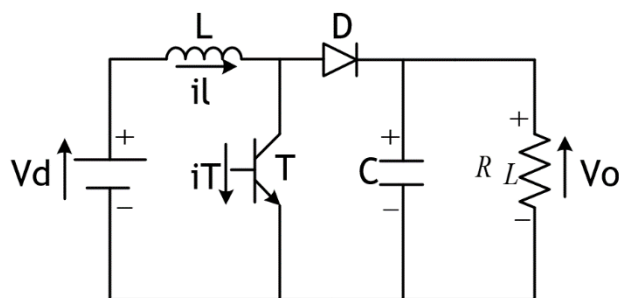


Figura 2.8 Circuito representativo do conversor DC-DC *boost*.

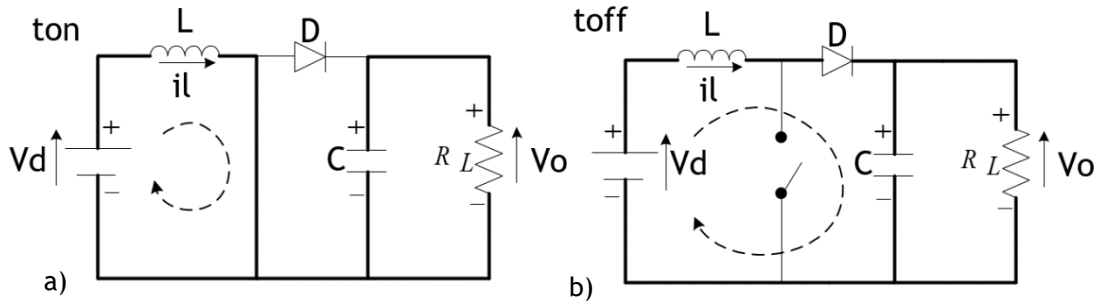


Figura 2.9 Diferentes estados de comutação do transistor. a) Transistor ligado, estado *ton*. b) Transistor desligado, estado *toff*.

Quando se encontra no estado *ton*, a corrente contínua gerada pela fonte de energia, V_d , passa pela bobina gerando um campo magnético à volta de L . Nesta fase, o diodo não deixa passar corrente, pelo que a resistência (R_L) e o condensador (C) estão isolados e a resistência é alimentada pelo condensador.

Pela lei das malhas de Kirchoff é possível obter a equação,

$$-V_d + V_L = 0 . \quad (19)$$

Sendo que a tensão da fonte é igual à tensão na bobina $V_d = V_L$. Sabe-se que,

$$V_L = L \frac{di_{L_{on}}}{dt_{on}} \quad (20)$$

e simplificando a fórmula de forma a que $i_{L_{on}}$ fique em evidência, sabe-se que,

$$i_{L_{on}} = \frac{v_d}{L} DT. \quad (21)$$

Devido à equação (21) é de prever que o gráfico (representado na figura 2.10) para de i_L (no estado *ton*) seja uma reta linear com um declive positivo.

Contrariamente a *ton*, quando o transistor é desligado, a corrente da bobina flui pelo circuito através do diodo, percorrendo o condensador e a resistência passando a ser considerado o circuito *toff*, representado pela figura 2.9 b).

No momento em que o interruptor é desligado, é gerado um pico de tensão na bobina, forçando o diodo a entrar em modo de condução, o que implica que a corrente, armazenada anteriormente na bobina, chegue ao condensador e à resistência.

O fenómeno do pico de tensão é o que torna este conversor num *boost* pois esse pico de tensão é superior à tensão de entrada e é esse pico de tensão que alimenta o condensador que alimenta

a carga, ou seja, a tensão de saída, V_o , significando que tensão de saída superior é superior à tensão de entrada.

Assim que o transistor abre, através da aplicação da lei das malhas de Kirchoff ao circuito da figura 2.9 b) é possível obter:

$$-Vd + V_L - V_o = 0 \quad (22)$$

Sendo a tensão de saída superior à tensão de entrada, a tensão nos terminais da bobina assume um valor negativo. Como consequência a taxa de crescimento da corrente que a percorre é também negativa e descrita pela equação,

$$i_{L_{off}} = \frac{Vd - V_o}{L} \cdot (1 - D)T . \quad (23)$$

Pode-se considerar a bobina como tendo um papel de carga e fonte de energia. Isto é, em *ton* armazena energia (pois cria o campo magnético). Por outro lado, em *toff* descarrega essa energia, funcionando como uma fonte de energia (pois o campo magnético gerado anteriormente ao passar pelos enrolamentos gera uma corrente).

Por último, em regime permanente, a quantidade de corrente armazenada na bobina, ao fim de um ciclo de comutação, tem que ser igual. Isto é, ao fim de um período de tempo, ou seja,

$$i_{L_{on}} + i_{L_{off}} = 0. \quad (24)$$

Substituindo as equações (21) e (23) na equação (24) é possível verificar que a tensão de saída em regime permanente é dada por,

$$V_o = \frac{1}{1-D} Vd \quad (25)$$

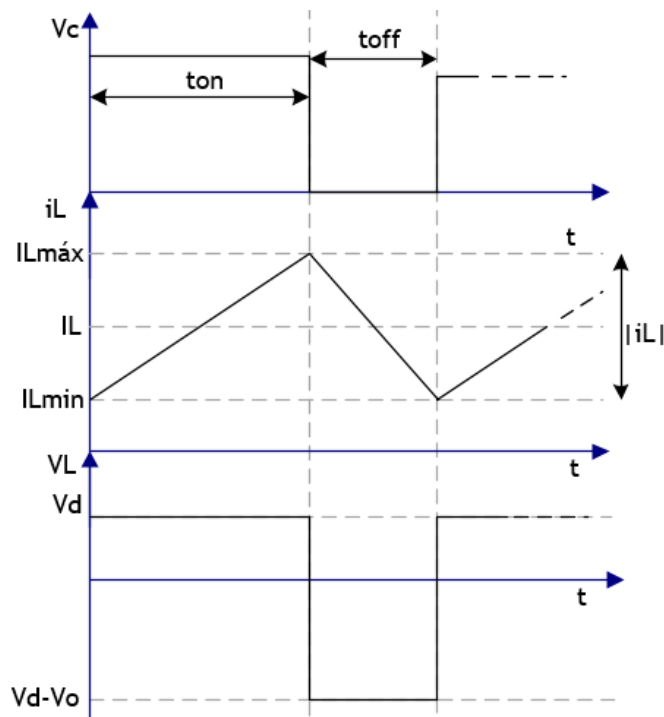


Figura 2.10 Formas de onda da corrente e da tensão na bobina, tendo em conta o ciclo de trabalho.

2.4.3 Dissipadores de calor passivos e ativos

De modo a um transdutor termoelétrico poder funcionar é imperativo a existência de um gradiente térmico. Isto significa ter existir uma fonte fria e uma fonte quente, nas respetivas faces do transdutor. Porém, devido à condução de calor, facilmente a face fria passa a estar quente, o que conseqüentemente, se traduz num gradiente térmico reduzido ou até mesmo nulo. Sendo assim surgiu a necessidade de encontrar uma solução que mantenha a face fria sempre a temperaturas o mais baixas possível. Essa solução são os dissipadores de calor.

Um dissipador de calor é um componente cujo objetivo é libertar (dissipar) ou absorver o calor desperdiçado de uma superfície quente. Esse calor é libertado ou absorvido para uma vizinhança seja esta o ar ambiente, um líquido ou um gás [19].

Esta estratégia, usada para elevar a potência e, conseqüentemente, a eficácia de dispositivos termoelétricos passa por sistemas de arrefecimento, ou por outras palavras, dissipadores de calor. Os dissipadores de calor permitem com que o gradiente de temperatura entre os materiais seja assegurado, e, em casos de dissipadores de elevada eficácia, o aumento do gradiente chega a ser possível.



Figura 2.11 Dissipadores de calor compostos por alhetas.

A configuração mais comum é a de uma superfície metálica fundida por uma série de extensões/colunas metálicas, também denominados por alhetas. A transferência de calor, por condução, é realizada ao longo de cada alheta. Esta descrição é fácil de visualizar através da figura 2.11, onde se mostram vários exemplos de geometrias disponíveis no mercado. De maneira a aumentar a taxa de dissipação de calor, a condutividade térmica das alhetas necessita ser elevada assim como a sua área de superfície.

A posição, em relação à fonte de calor, em que se coloca o dissipador, a sua geometria, a espessura e material utilizado, são fatores determinantes na eficácia dos geradores termoelétricos.

Existem duas principais categorias de dissipadores de calor: os passivos e os ativos. A categoria passiva, tal como o nome indica, é uma estratégia que não requer o fornecimento de energia externa para efetuar a transferência de calor, necessita do uso de fenómenos intrínsecos aos corpos físicos para efetuar a transferência de calor. Esses fenómenos são a condução de energia térmica por contacto e/ou a convecção natural. Contrariamente, um sistema ativo de dissipação de calor faz uso de uma fonte de energia externa para promover o fenómeno de transferência de calor. No entanto é uma prática comum combinar os sistemas passivos e ativos, tornando o sistema de dissipação de calor semi-ativo. Também é comum combinar sistemas dentro da mesma categoria, isto é, combinar dois (ou mais) dispositivos dentro da mesma categoria. Isto é, um sistema passivo com outro sistema passivo ou um sistema ativo com outro sistema ativo. Um exemplo disto, são as alhetas combinadas com tubos de vapor (ambos através de abordagens passivas). O uso comum desta combinação é a utilização de alhetas com outras tipologias. Consoante as necessidades do objetivo de aplicação são escolhidas a categoria e o método. A tabela 2 agrupa as diferentes categorias, procedimentos com as respetivas vantagens e desvantagens consoante a aplicação [19] .

Tabela 2.2 Comparação entre os diferentes tipos de dissipadores.

Categoria	Procedimento	Tipo de dissipador	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Passivo	Condução por contacto	Placa metálica	<ul style="list-style-type: none"> •Uso simples •Barato •grande disponibilidade no mercado 	•Potência de dissipação baixa	Sistemas que não tenham uma fonte de calor forte
		Alhetas	•Maior potência de dissipação que o anterior	•Capacidade de dissipação reduzida	Sistemas de potência de calor baixa/média
	Convecção natural por mudança de fase de substâncias	Tubos de vapor	<ul style="list-style-type: none"> •Mais potência de dissipação que o anterior •Funcionam na posição vertical e horizontal 	<ul style="list-style-type: none"> •Unidirecional •Dispendioso 	Sistemas de potência de calor média/alta
		Camaras de vapor	•Multidirecional, espalha uniformemente o calor	•Necessita de mais espaço Dispendioso	Sistemas de potência de calor alta
Semi-ativo	Convecção forçada por líquidos + condução através do ar	Placa Fria + Alheta	As duas técnicas em conjunto aumentam mutuamente a potência de dissipação	Dispendioso Necessita de mais espaço	Sistemas de potência de calor alta
Ativo	Convecção forçada do ar	Ventoinhas acopladas a Alhetas	Aumenta a potência de dissipação do dissipador ao qual é acoplado	Ventoinhas possuem baixo tempo de vida útil	Sistemas de potência de calor alta
	Convecção forçada através de líquidos	Célula embutida com camaras de líquidos (Placa Fria)	Produz uma taxa de dissipação alta	Uso complicado Dispendioso Muitas partes envolvidas no processo	Sistemas de potência de calor muito alta

Passivos

A categoria de dissipadores de calor passivos engloba diferentes tipos componentes: os de contacto, ou seja, por condução térmica (placa metálica e alhetas) e os de movimento de partículas, ou seja, os por convecção natural (tubos e camaras de vapor).

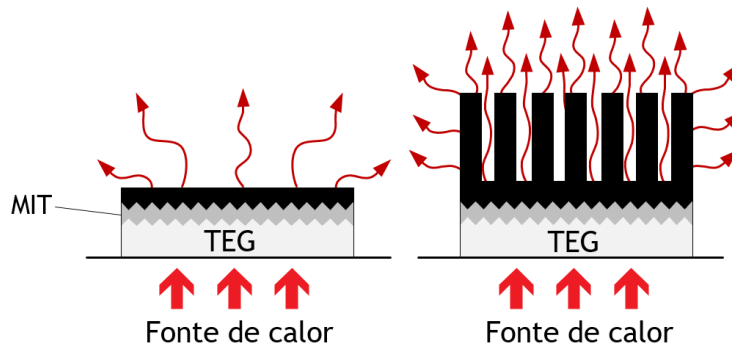


Figura 2.12 Funcionamento de dissipadores Passivos. a) Placa metálica e b) Alhetas.

Dois exemplos de dissipadores passivos, cuja troca de calor é feita exclusivamente através do contacto com a fonte quente, são as placas metálicas e as alhetas. A figura 2.12, demonstra, respetivamente, estes exemplos.

Placa metálica

O uso de uma placa de metal é o método mais simples e menos eficaz dentro dos dissipadores de calor. Uma placa, de um material com uma elevada condutividade térmica, por exemplo, cobre, é posta em contacto com a superfície que se pretende que se mantenha fria. Esta transferência de calor é feita por contacto e dissipa o calor para o meio ambiente. Para que os dois corpos consigam efetuar a transferência de energia de maneira eficiente, é usado um material de interface térmica (MIT). O MIT aumenta a capacidade de fluxo de calor, isto deve-se ao fato de ser criada uma superfície fina entre o dissipador de calor e o TEG o que faz com que a pasta ocupe todas as lacunas de ar. Este material de interface térmica pode ser, por exemplo, uma pasta térmica, ou seja, uma emulsão de, por exemplo, óleo com partículas de grafite. A figura 2.12 a) ilustra as ondas de calor a moverem-se para o meio ambiente [19].

Alhetas

Esta configuração é a mais comum e também a mais utilizada para combinar com outros tipos de dissipadores de calor. De uma maneira sucinta, é como uma placa térmica porém com alongamentos o que faz com que a troca de calor se efetue de uma maneira mais rápida e, como tal, mais eficaz. A figura 2.12 b) ilustra o modo como a transferência de calor é efetuada através da geometria deste dissipador de calor.

Tubo de vapor

Um exemplo de dissipação de calor passiva, neste caso por convecção natural, em particular por mudança de fase, é o tubo de vapor e as camaras de vapor. A convecção é o nome do fenómeno físico da troca de energia térmica (em forma de calor) entre dois corpos através de uma substância líquida ou gasosa até que o equilíbrio térmico seja atingido. No caso da

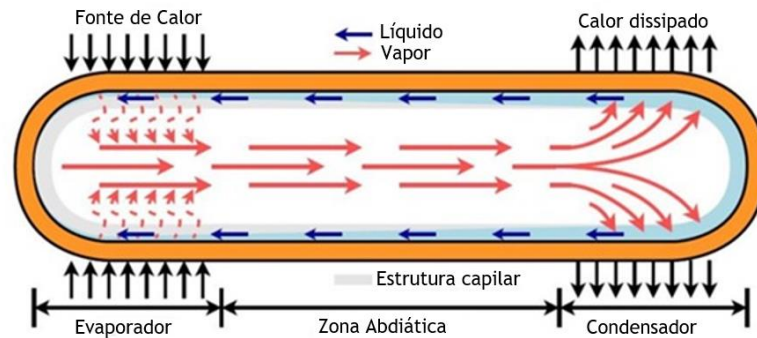


Figura 2.13 Funcionamento interno de um tubo de vapor

convecção natural a transferência de calor é feita através do movimento (não forçado) de um líquido ou gás através das diferenças de densidade dos fluidos ou gases devido aos gradientes de temperatura.

Os tubos de vapor funcionam segundo o princípio de mudança de fase de uma determinada substância, por exemplo, a água. Uma quantidade reduzida de água é inserida dentro de um tubo com ausência de pressão atmosférica, em vácuo. Este sistema, fechado, possui três zonas principais: o evaporador, a zona adiabática e, por último, o condensador. A primeira zona, o evaporador, está situado em cima da superfície que se pretende manter fria, mas, no entanto, que se encontra a aquecer: superfície fria do TEG. Quando esta aquece, consequentemente, o evaporador aquece. Provocando assim com que a quantidade de água que se encontra no estado líquido evapore. Devido à evaporação, a pressão aumenta e faz com que se movimente no sentido onde se situa a zona mais fria: o condensador. Na zona do condensador, tal como o nome sugere, a água muda para o seu estado líquido. Ao atingir o estado líquido esta move-se no sentido inverso, através dos capilares que revestem internamente a estrutura do tubo. A zona adiabática é a zona onde ocorre simultaneamente o movimento do vapor num sentido e o movimento do líquido no sentido inverso. A figura 2.13 ilustra, esquematicamente, os movimentos e as zonas envolvidas neste processo, em cima descrito. É de salientar o fato deste processo de arrefecimento acontecer de forma unilateral [20].

Câmaras de vapor

Outro processo muito semelhante aos tubos de vapor são as câmaras de vapor. As câmaras de vapor são uma versão melhorada dos tubos de vapor, embora utilizem os mesmos princípios físicos. No entanto, nas câmaras de vapor, a libertação de calor (arrefecimento) é feita de uma forma “alastrada”. Ou seja, o processo de arrefecimento (contrariamente aos tubos de vapor) é feito de uma maneira multilateral o que significa uma transferência de calor/arrefecimento mais rápido e eficiente. Contudo, tem a desvantagem de ser mais dispendioso.

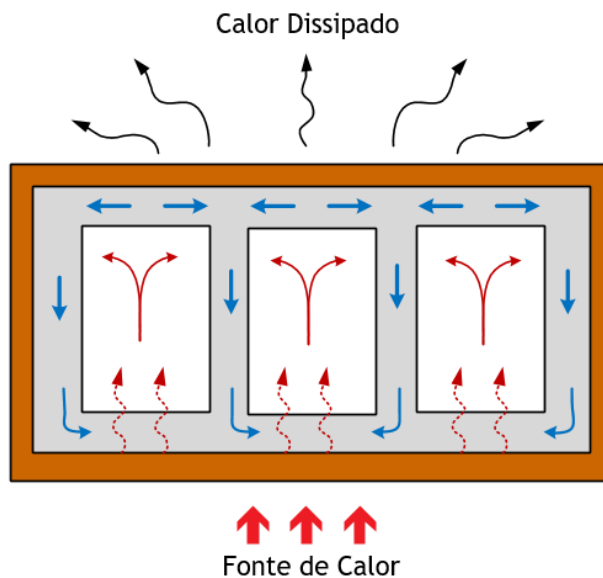


Figura 2.14 Funcionamento interno de uma câmara de vapor.

As câmaras de vapor podem ser descritas com um tubo de vapor planar. São utilizados em aplicações em que existem fluxos de calor elevados e aplicados numa área relativamente do evaporador. Esta estrutura é ilustrada através da figura 2.14.

Durante o processo, a entrada de calor no evaporador vaporiza o líquido dentro do evaporador. O vapor então flui por toda a câmara, criando um difusor de calor isotérmico. O vapor então condensa nas superfícies do condensador, onde o calor é removido por convecção forçada, convecção natural ou resfriamento por líquido. Forças capilares dentro do tubo capilar retornam do condensado ao evaporador.

De modo a melhorar o desempenho dos dissipadores passivos, e a personalizar o tipo de dissipadores consoante a aplicação, muitas vezes é feita a junção de dois tipos de dissipadores como por exemplo, a junção de alhetas nos condensadores de câmaras de vapor [21].

Ativos

Alhetas com ventoinha

Na literatura existem fontes que definem o uso de alhetas como um tipo de dissipação semi-ativa pois consideram que é o fruto da junção do uso de um dissipador de alhetas (passivo) com o de ventilação forçada (ativo). Outras fontes consideram o uso de alhetas com ventoinhas apenas como ativo pois não é usual fazer o contacto da ventoinha directamente com a fonte quente necessitando sempre de um intermediário, neste caso as alhetas. Seja este classificado como semi-ativo ou ativo é o mesmo.

Contrariamente aos sistemas passivos, o fenómeno principal de transferência de calor é a convecção forçada. Este tipo de convecção significa que existe um movimento ascendente e

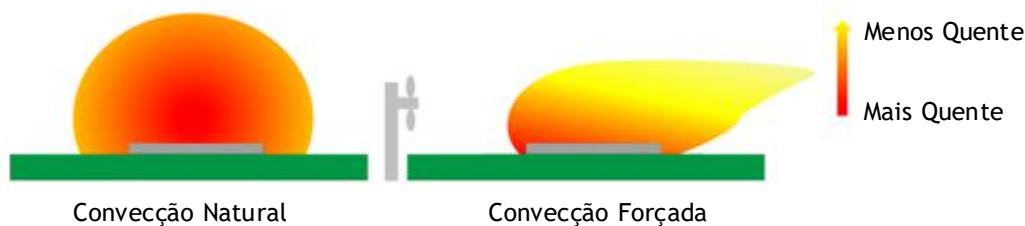


Figura 2.15 Transferência de calor por convecção. a) Convecção natural e b) Convecção forçada.

descendente de matéria. A convecção forçada é diferente da convecção natural, esta comparação é elucidada através da figura 2.15. Na figura 2.15 a) é ilustrada a convecção natural, que ocorre dentro de um fluido ou gás quando é gerado um gradiente de densidade provocado por um gradiente de temperatura. Esse gradiente de densidade, criado por via das forças gravíticas, gera um movimento de massa, visto que a matéria mais quente, logo menos densa, ascende enquanto que a matéria com a temperatura mais baixa desce. No entanto, quando, por um fator externo, é promovido o escoamento de um fluido ou gás ao longo de uma superfície, estamos perante uma situação de convecção forçada- figura 2.15 b). O uso de ventoinhas permite recriar o fenómeno anteriormente descrito.

Sendo assim, o uso de ventoinhas tem dois objetivos principais. O primeiro é o fato de aumentar a velocidade de escoamento do ar e o segundo o de assegurar que o ar que entra em contacto com a superfície quente se encontre à temperatura do meio envolvente, melhorando assim a capacidade de dissipar o calor. Contudo, é de sublinhar o fato de a área de contacto entre a ventoinha e a superfície demasiado pequena, sendo necessário juntá-la com outros equipamentos sejam estes passivos ou ativos, tal como já referido anteriormente [22].

Células de líquidos

O uso de células integradas com sistemas de tubos de água é um exemplo de um dissipador de calor de categoria ativa. Devido ao fato de necessitar de uma bomba para que um fluxo de água seja formado. Logicamente, essa bomba necessita de uma energia externa para que possa funcionar tornando este método um método que requer um gasto externo/ativo de energia.

Neste caso o dissipador de calor é um bloco embutido com camaras líquidas que forma a chamada célula fria. É esta célula fria fica em contacto com a zona fria do TEG que, se pretende que se mantenha fria. Usualmente a célula é composta por um material que seja um bom condutor de calor, como é o caso do alumínio e do cobre, de maneira a que o processo seja o mais rápido possível. Dentro desta célula está inserido um tubo com várias curvas (de maneira ao tubo conseguir cobrir a maior área possível). Dentro deste tubo circula uma quantidade de

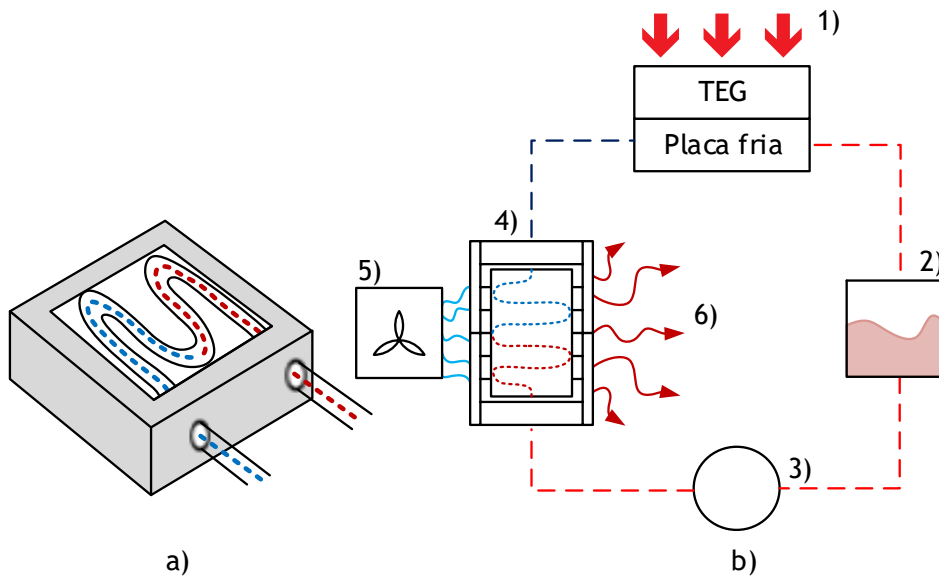


Figura 2.16 Princípio de funcionamento de um dissipador de célula de líquidos. a) Ilustração do procedimento interno da célula e b) Procedimento do sistema geral que envolve. Legenda: 1- Fonte de calor, 2- reservatório de água; 3- bomba; 4- permutador de calor; 5-ventoinha, 6-calor dissipado.

uma substância líquida, por exemplo, água. A substância líquida, está contida num reservatório e é bombeada através de uma bomba e transportada pelo tubo.

Um constituinte importante, deste sistema é o sistema permutador de calor, ou também chamado de ventilador. É no ventilador que ocorre a refrigeração da água que, posteriormente vai entrar na célula e permitir que a face fria do TEG permaneça fria.

O ventilador é composto por um conjunto de grelhas metálicas. A estas grelhas, ou seja, ao ventilador, é acoplado uma ventoinha que aumenta o processo de arrefecimento do tubo. Sendo assim pode-se constatar que água que sai da célula fria, através de um orifício através do tubo (saída), passando posteriormente por todos os constituintes deste sistema, volta a entrar por outro orifício através do mesmo tubo (entrada). Formando assim, um sistema fechado. A figura 2.16 auxilia na visualização mental deste procedimento em cima explicado [23].

Este é um método eficiente, 4 a 5 vezes mais eficiente do que o de ventilação forçada, exclusivamente, acoplada com alhetas. No entanto é um sistema menos simples pois requer vários componentes o que o torna dispendioso [19].

Capítulo 3

Validação Experimental do Transdutor

Este capítulo está organizado da seguinte maneira. Na secção 3.1 é feita uma análise às especificações técnicas dos materiais usados para a validação experimental da célula de Peltier e é feita uma ilustração do planeamento do setup experimental. Na secção 3.2 é feita a demonstração de como foram aplicados os componentes no âmbito laboratorial e dos procedimentos necessários para a extração dos dados a serem utilizados para a obtenção das curvas características. O capítulo termina com a secção 3.3 que é composta pela determinação da resistência de carga ótima através da análise de gráficos que relacionam a obtenção da tensão de saída, corrente e potência em função da diferença de temperaturas.

3.1 Configuração da Instalação Experimental

Antes de se instalar o transdutor no modelo experimental é necessário calcular e avaliar em que condições é que este tem um comportamento de carga ótimo.

Para se conseguir fazer a extração dos dados foi necessário aprofundar quais os materiais a serem usados no *setup* experimental e avaliar as suas características técnicas, de maneira a se saber quais os valores de tensão esperados e quais as restrições de temperatura existentes. O componente a ser avaliado é uma célula de Peltier, do fabricante *Adaptive Power Management*.

A estrutura física e respetivas dimensões da célula de Peltier, modelo ETC-200-14-06-E, pode ser vista na figura 3.1.

De maneira a potenciar o desempenho, isto é, saber quais as temperaturas que este suporta, qual o valor de carga se deve submeter foi necessária a extração desses valores.

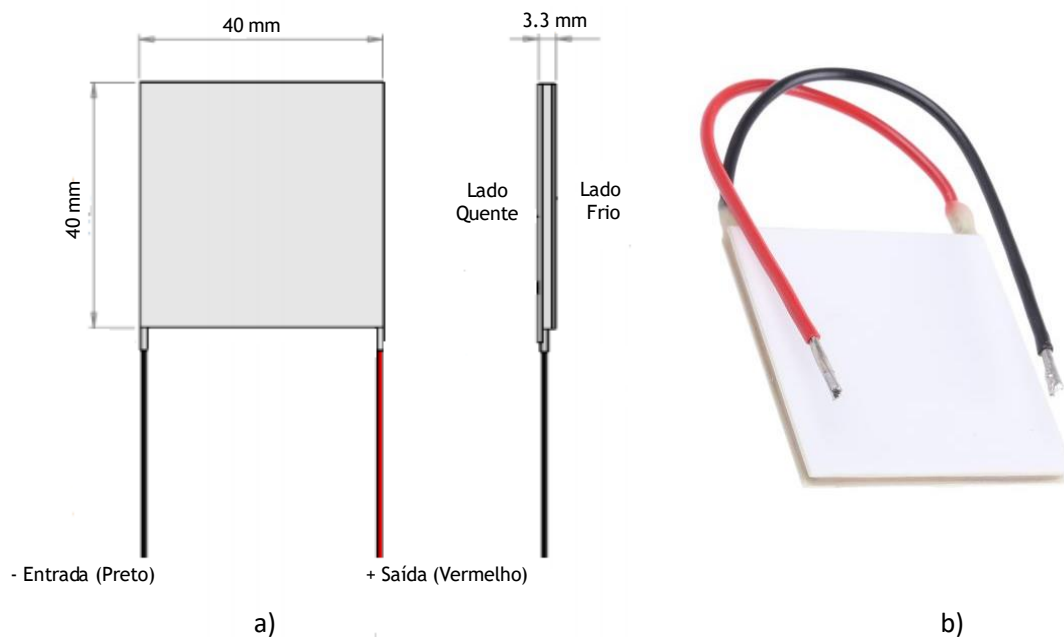


Figura 3.1 Visão real da célula de Peltier. a) Esquema com as dimensões. b) Imagem real. Imagens adaptadas do *datasheet* do modelo ETC-200-14-06-E.

Foi usada uma célula de Peltier como gerador termoelétrico sendo necessário extrair novos dados, pois os dados fornecidos pelo *datasheet* são referentes à célula a funcionar segundo o princípio Peltier.

Devido ao fato de se utilizar uma célula de Peltier como gerador térmico, os dados fornecidos pelo fabricante, em relação à tensão e corrente, máxima e mínima, não são facultados. No entanto as temperaturas suportadas por este transdutor foram consideradas de maneira a não danificar a célula, e conseqüentemente, a comprometer a sua eficácia.

Um dispositivo termoelétrico com base no efeito Seebeck gera uma tensão dada uma diferença de temperatura entre as junções de um material semiconductor, neste caso telureto de bismuto.

Tabela 3.1 Dados técnicos da célula ETC-200-14-06-E.

Modelo	Material Pares	Material de Superfície	ΔT_{max} [°C]	T_{max} [°C]	T_{min} [°C]
ETC-200-14-06-E	Telureto de Bismuto Bi_2Te_3	Cerâmica	68	90	-22

Quanto maior essa variação de temperatura maior será a tensão de saída. A tensão gerada na entrada nos terminais, V_G , é dada através da seguinte expressão,

$$V_G = \beta \cdot \Delta T . \quad (26)$$

onde β representa o coeficiente de Seebeck dos dois tipos de materiais, $\beta = \beta_p - \beta_n$, e ΔT a diferença de temperatura dos mesmos $\Delta T = T_p - T_n$.

Dado o circuito equivalente da figura 3.2 quando este se encontra em aberto, isto é, não possui nenhuma carga associada, R_L , a tensão de saída é igual à tensão dos terminais V_G . No entanto quando se liga uma carga R_L é gerada uma corrente I_L que percorre um circuito gerando uma tensão de saída V_L . Esta corrente é determinada pela queda de tensão nas duas resistências em série. Aplicando as leis de Kirchhoff obtém-se a seguinte equação:

$$-V_G + V_{TEG} + V_L = 0 \quad (27)$$

Desenvolvendo-se obtém-se:

$$-V_G + R_{TEG} \cdot I_L + R_L \cdot I_L = 0 \quad (28)$$

$$I_L = \frac{V_G}{R_{TEG} + R_L} \quad (29)$$

A tensão de saída é dada pela seguinte expressão:

$$V_L = V_G - R_{TEG} \cdot I_L \quad (30)$$

A tensão de saída, V_L , em função da temperatura e do coeficiente de Seebeck é a seguinte:

$$V_L = \beta \cdot \Delta T - \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot R_{TEG}}{R_{TEG} + R_L} \quad (31)$$

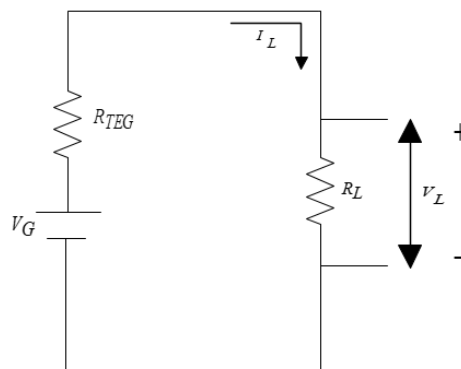


Figura 3.2 Circuito equivalente simplificado do TEG a funcionar como V_G a alimentar uma carga R_L .

De maneira a potência na carga ser máxima, P_{Lmax}

$$P_{Lmax} = \frac{V_G^2 R_L}{(R_{TEG} + R_L)^2}, \quad (32)$$

a resistência interna da célula, R_{TEG} , deverá ser igual à resistência da carga R_L .

Depois de calculadas e detalhadas as características do equipamento mais importante, a célula de Peltier, é feito um aprofundamento técnico dos outros equipamentos utilizados. Tais como os equipamentos responsáveis pelo aquecimento: placa térmica e autotransformador, pelo melhoramento do gradiente de temperatura: cortiça, dissipador, ventilador e pasta térmica, por fim, os responsáveis pela medição da temperatura: termopares e *booster pack* acoplado ao *lanckpad*.

De forma a realizar os vários ensaios experimentais em diferentes condições de temperatura, foi usada uma placa de aquecimento com uma área de superfície de 140 cm^2 , permitindo atingir temperaturas até 120°C . A placa é da marca Gunt Hamburg e o seu modelo é o WL352. A placa foi diretamente ligada a uma fonte de tensão monofásica de tensão variável até 220V, permitindo assim conforme a tensão fornecida regular a temperatura da placa.

De modo a se conseguir uma diferença de temperatura máxima, ΔT , é necessário manter o lado frio da célula o mais frio possível e o lado quente com o melhor contacto possível com a placa de aquecimento de modo a estar à mesma temperatura da placa. Posto isto, decidiu-se adotar algumas estratégias no sentido de cumprir esse objetivo.

Nomeadamente, o uso de cortiça para isolar termicamente as laterais da estrutura da célula com o intuito de minimizar um possível curto-circuito térmico. Isto é, diminuir a troca de calor entre a placa quente e a placa fria conseguindo assim obter uma diferença de temperatura maior entre as faces do TEG.

A segunda estratégia usada foi a utilização de um dissipador de calor com ventilação forçada. Isto é, foi usado um dissipador de calor com acoplamento a uma ventoinha. Neste sistema o principal responsável pela dissipação de calor é o ar como tal torna-se importante acelerar o processo de escoamento do mesmo. Ao se utilizar uma ventoinha em junção com o dissipador de calor torna-se possível acelerar o processo.

De modo a melhorar o contacto mecânico e térmico entre a célula e o dissipador de calor e a placa usou-se um material de interface térmico, a pasta térmica. A pasta térmica utilizada foi a HTK-002 do fabricante *Cooler Master*. Esta pasta é composta por uma emulsão de material de silicone e componentes condutores de calor, em específico, óxidos metálicos. Esta combinação promove uma condutividade térmica alta com pouco escorrimento (pois é de uma

viscosidade considerável) e uma estabilidade de temperatura elevada. É de salientar o fato de ser resistente a temperaturas até 177 °C e manter um bom isolamento melhorando assim a transferência de calor entre a célula e o dissipador de calor. Logo, a eficácia geral do transdutor é aumentada.

Por fim, a fixação e o melhoramento do contato entre a célula de Peltier e a placa de aquecimento foi feito recorrendo ao uso de uma placa metálica de alumínio uma vez que este é um material bom condutor de calor. A fixação entre a fonte de calor e o transdutor foi feita através de uma fita de alumínio, resistente a temperaturas até 140 °C.

Entre a célula e placa de alumínio foi usada, mais uma vez, a pasta térmica, pelas mesmas razões já em cima mencionadas.

Foi feita uma projeção do *setup* experimental, figura 3.3, que demonstra os dispositivos envolvidos e o modo como estes se interligam. O *Booster Pack* é um circuito responsável pelo acoplamento dos termopares a um *Lanch Pad* de modo a que posteriormente fosse possível a sua ligação ao computador de maneira a que a leitura da temperatura, através do *software* Matlab, fosse executada.

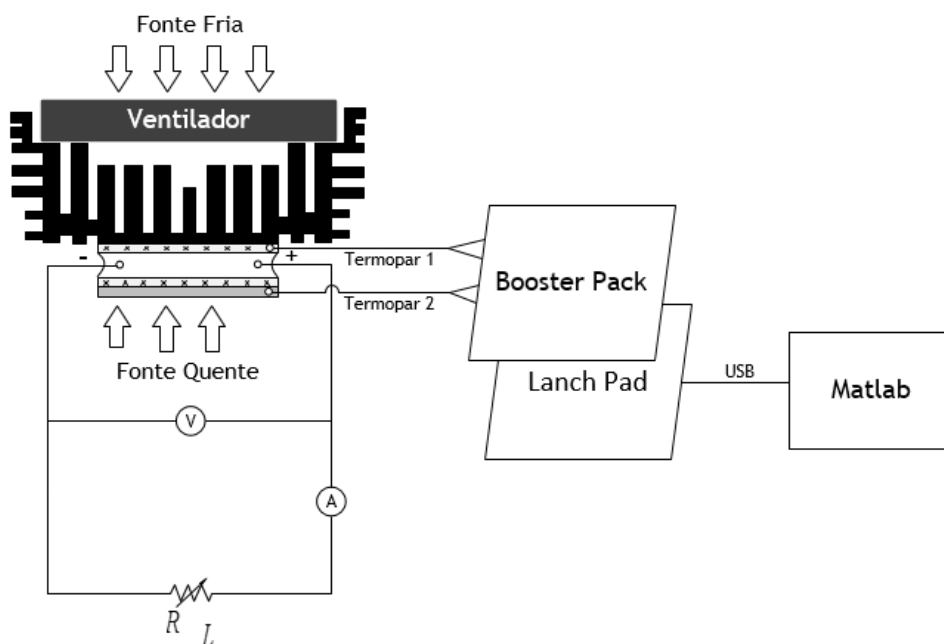


Figura 3.3 Esquemática experimental onde, os retângulos com as cruzes representam a pasta térmica e o retângulo a cinzento-escuro representa a chapa de alumínio.

3.2 Instalação do transdutor termoeletrico

É possível visualizar a instalação da célula de Peltier nos restantes equipamentos através do esquema real das fotografias da figura 3.4. Foram ligados um amperímetro para monitorizar a corrente e um voltímetro para monitorizar a tensão. O uso de uma fonte de tensão com 20 volts e com 0.15 amperes (potência 3W) foi necessário para alimentar o ventilador. Como a resistência interna da célula é muito baixa ($1,3 \Omega$) de maneira a diminuir possíveis interferências, optou-se por não usar de uma placa de ensaio. Pelo contrário a carga, potenciômetro, foi ligada diretamente, através de cabos, ao amperímetro e à parte negativa da célula.

Salienta-se o fato da utilização de pesos de modo a melhorar o contacto entre a placa de cortiça e a placa de aquecimento, pois caso contrário existiam pontos onde esta ficava flutuante fazendo assim que existisse ar entre estas diminuindo assim o seu propósito.

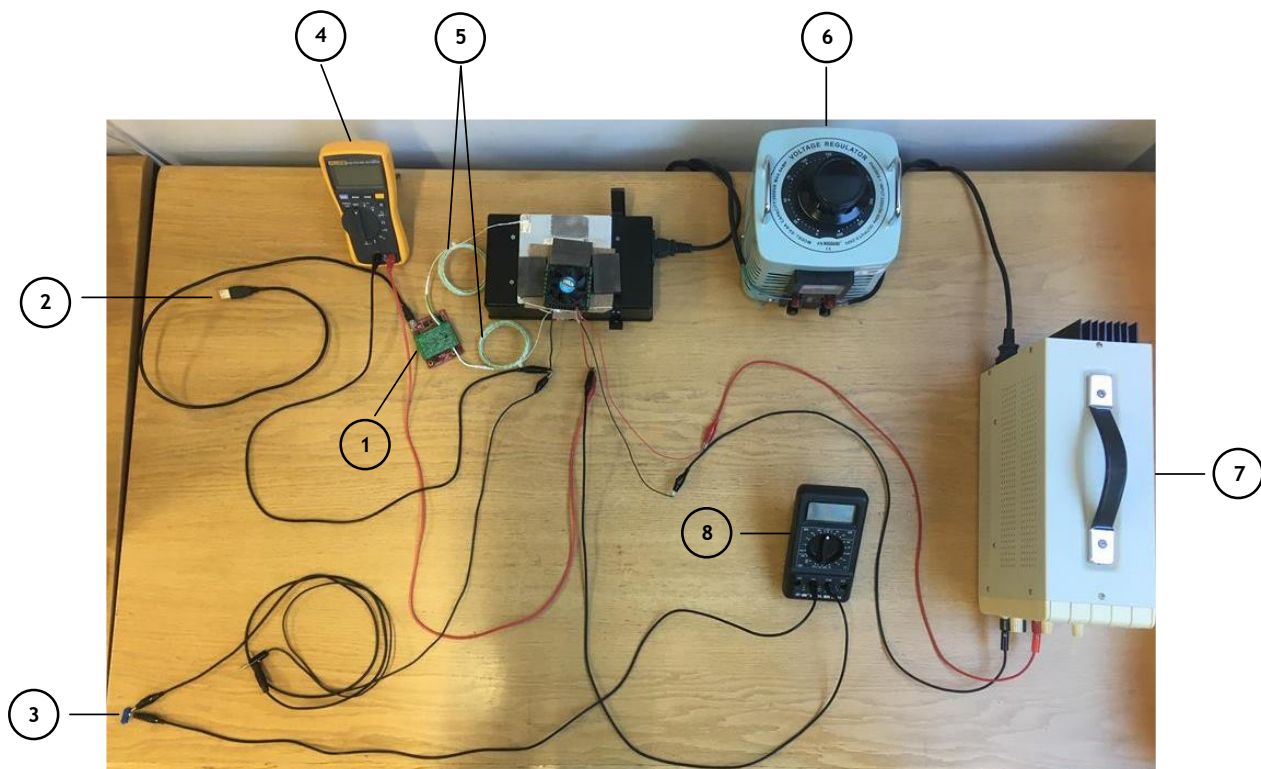


Figura 3.4. *Setup Experimental*. 1-BoosterPack + LanchPad; 2- Cabo USB; 3- Potenciômetro; 4- Voltímetro; 5- Termopares; 6 - Autotransformador; 7- Fonte de alimentação; 8 - Amperímetro.

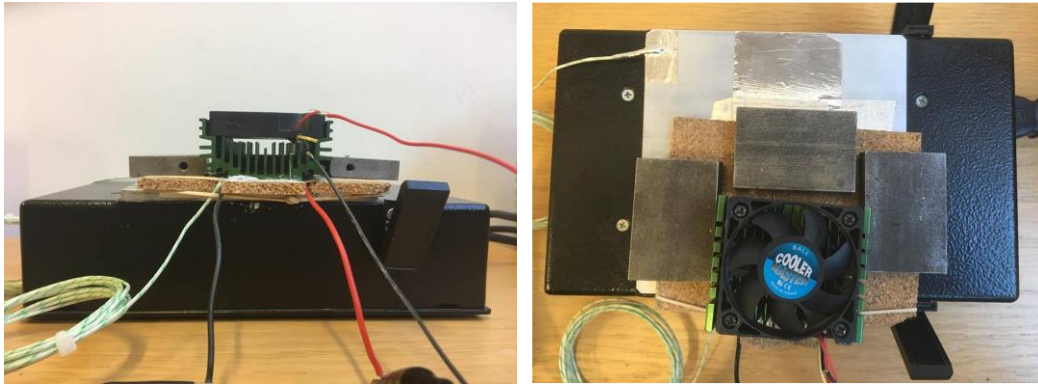


Figura 3.5 Diferentes perspetivas do *setup* experimental. a) Visão transversal. b) Visão axial.

Tal como já foi referido, a resistência interna da célula é muito baixa, e como os cabos utilizados não são cabos ideais, o circuito equivalente para instalação da célula de peltier nos restantes equipamentos necessita de ter presente as respetivas resistências dos cabos. Esse circuito equivalente é possível verificar na figura 3.6.

Posteriormente, ligou-se a fonte de tensão monofásica num determinado valor e, controlando através do matlab, foi possível saber quando é que a temperatura da placa estabilizava e qual a diferença de temperaturas em questão. Deste modo, conseguiu-se prosseguir com as leituras recolhidas segundo o raciocínio da tabela 3.2.

Para retirar os valores de uma determinada variação de temperatura, começou-se por colocar o potenciômetro no seu valor mínimo ($0,3\Omega$). Posteriormente, a carga foi aumentada gradualmente, e esse controlo foi feito através da leitura do voltímetro. A cada incremento de 10 mV foram retiradas as leituras da respetiva tensão e corrente. Este procedimento é de fácil compreensão através da visualização da tabela 3.2. No final foram feitos os cálculos para a potência e resistência correspondentes a uma determinada tensão e corrente.

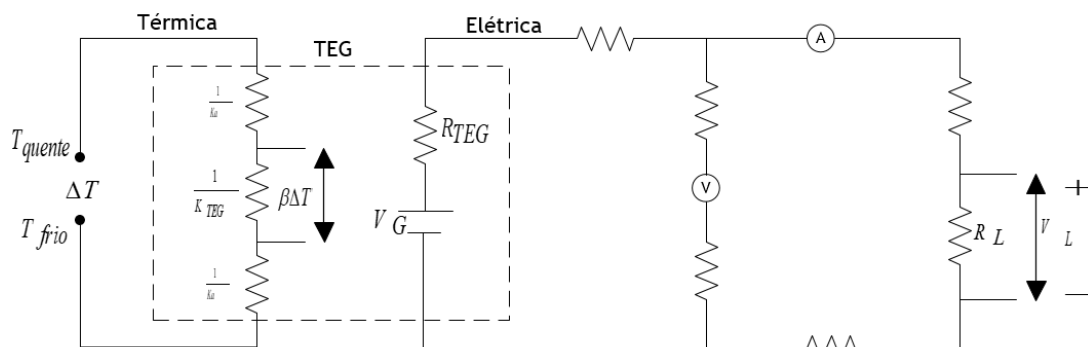


Figura 3.6 Circuito equivalente do *setup* experimental.

Tabela 3.2 Sequência de cálculos efetuados na extração dos valores.

	Resistência [Ω]	Corrente [A]	Tensão [V]	Potência [W]
$\Delta T = x$	$R_{Lmin} + R_{TEG} + R_{Cabos}$	$I_{máx}$	V_{min}	$P_{ótima}$
	$R_1 = V_1/I_1$	I_1	$V_1 = V_{min} + 10mV$	$P_1 = P_1 \times P_2$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	$R_{máx}$	I_{min}	$V_{máx}$	$P_{mínima}$

3.3 Determinação da resistência de carga ótima para diferentes temperaturas

Para a potência ser máxima a resistência de carga, R_L , deveria ser igual à resistência interna da célula, R_{TEG} . Porém, é de salientar, o fato dessa resistência ideal ser muito baixa, 1,3 ohms. Teoricamente seria possível simular esse valor de resistência, colocando o potenciômetro, R_L , a 1,3 ohms. No entanto, constatou-se que quando montado o circuito, a resistência de carga no mínimo, 0.3 ohms, a resistência do circuito possui 2,6 ohms. Tal fato deve-se aos cabos não serem cabos ideais, isto é, possuírem resistências próprias. A soma de todos os cabos é de 1,2 ohms.

Concluindo, como a resistência do circuito é superior à resistência ideal, a potência não será máxima e o valor máximo da potência será o primeiro ponto dos gráficos (ponto onde a resistência é mais baixa). Sendo assim, como a resistência interna é muito baixa, a célula começa a funcionar no seu valor máximo de potência. Tal constatação é possível verificar analisando o gráfico da figura 3.7, onde são comparadas várias potências para diferentes variações de temperaturas.

É de salientar que, a potência da ventoinha é superior à potência da célula. Porém, isto não será um obstáculo do ponto de vista energético pois na projeção do caso prático não será necessário o uso de um ventilador pois o responsável pela dissipação de calor não é o ar mas sim o escoamento de água. Apenas foi usado aqui para fins demonstrativos da célula de Peltier.

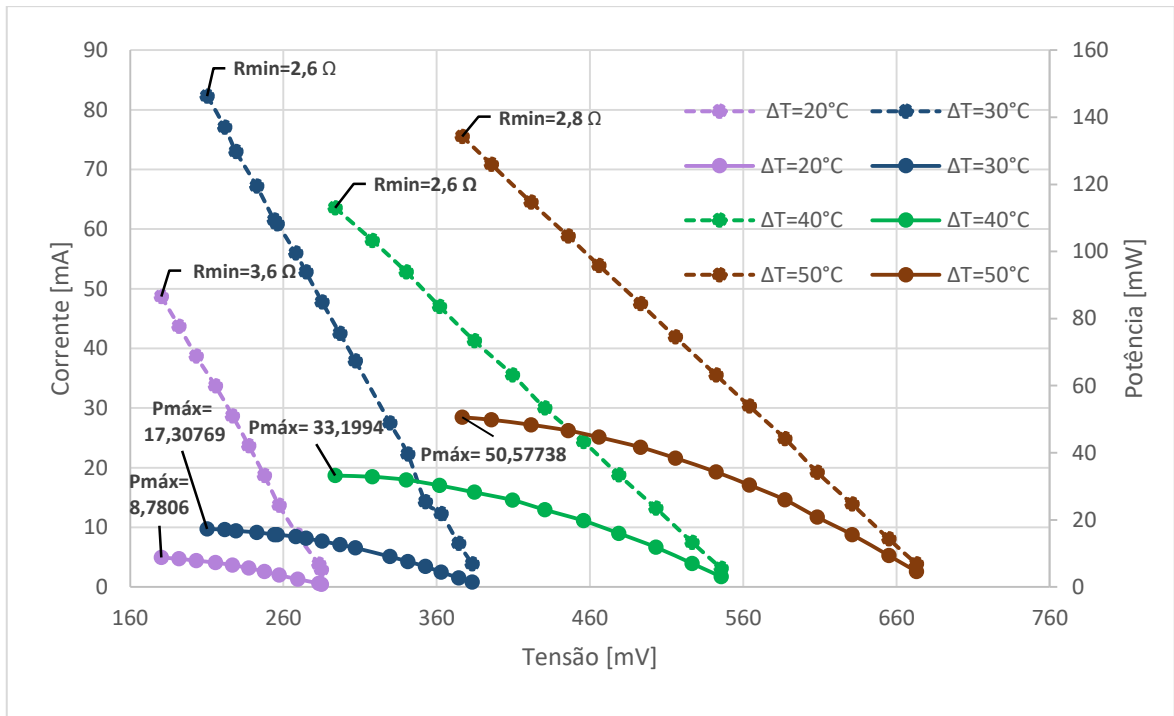


Figura 3.7 Gráfico da representação das curvas de potência ótima. Curvas a tracejado - Variação de resistência. Curvas contínuas - Variação de potência.

Capítulo 4

Conversão e Regulação da Energia

Neste capítulo é feita a análise da conversão e regulação da tensão de saída proveniente da célula de Peltier. Na secção 4.1 é feito o estudo do conversor principal (LTC3108) responsável pela regulação do sistema. Posteriormente, a célula é implementada num circuito cujo conversor principal é o LTC3108 de maneira a que seja possível a extração de gráficos de demonstrem o seu comportamento enquanto fonte de entrada. Na secção 4.2 é discutido o dimensionamento da eletrónica de regulação e da placa do circuito impresso onde posteriormente é validado na secção 4.3.

4.1 Esquema Funcional da Eletrónica de Regulação

De maneira a conseguir maximizar e estabilizar a tensão de saída da célula de Peltier, que posteriormente será a de entrada do microprocessador, é desenhado um esquema de eletrónica de regulação. Essa configuração é feita de maneira a cumprir os requisitos anteriormente referenciados.

4.1.1 Análise do componente integrado LTC3108

O conversor LTC3108 é um conversor DC-DC *step-up* (ou *boost*) integrado com o objetivo de gerir e aumentar a tensão de saída do gerador termoelétrico. Este funciona com tensões de entrada reduzidas, desde de 20 mV. Na figura 4.1 é possível ver o diagrama de blocos que ilustra o funcionamento interno do transformador *step-up* do LTC3108. O uso de um transformador *step-up* permite o aumento da tensão de entrada, neste caso, com um rácio de 1:100. Este rácio significa que há 1 enrolamento primário para cada 100 enrolamentos secundários.

Como esta relação passa de um valor mais baixo para um valor mais alto, ou seja, a tensão no primário é aumentada. No diagrama de blocos é usado um transformador *setp-up* com um rácio de 1:100, que é o rácio recomendado para os valores mais baixos de tensão de entrada, 20 mV. Pelo uso da equação,

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (33)$$

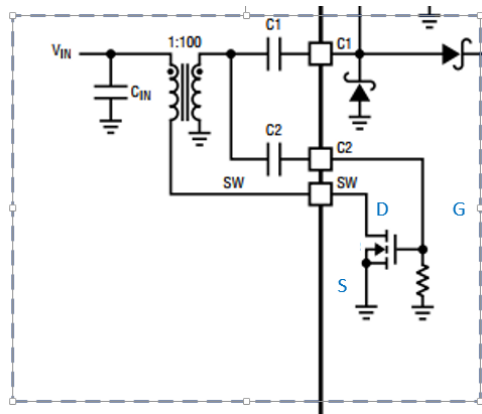


Figura 4.1 Transformador *step-up* do LTC3108.

onde, N_p e N_s são, correspondentemente, o número de enrolamentos do primário e o número de enrolamentos do secundário e V_p e V_s a tensão do primário e a tensão do secundário. É possível demonstrar que para 20 mV, com um rácio de 1:100, a tensão de saída do secundário, V_s , passa a ser 2 V.

O condensador, C_{IN} , tem a função de estabilizar e armazenar tensão proveniente da fonte, V_{IN} . Posteriormente, a abertura e fecho de um MOSFET de canal N (figura 4.1), gera oscilações de corrente e fluxo magnético no transformador.

Essas oscilações fazem com que o transformador aumente e gere uma tensão de saída AC no enrolamento secundário. Esta tensão AC é retificada para DC e armazenada num condensador, C_1 , sendo posteriormente conduzida através do terminal, C_1 , até ao retificador de sinal interno, SYNC RECTIFY (ilustrado na figura 4.2). Neste bloco é feita a retificação de sinal AC para DC, a saída do retificador de sinal fornece corrente ao terminal VAUX. A fonte de corrente contínua que alimenta os circuitos ativos dentro do controlador é VAUX. Esta fonte V_{CC} é conectada a um condensador externo de modo a manter VAUX constante. Assim que o valor de VAUX ultrapasse o valor de 2,5V a saída principal, V_{OUT} , começa a carregar.

O esquema funcional do conversor LTC3108 possui um *Low Dropout Linear*, LDO, que é um regulador linear de tensão. O LDO fornece uma tensão de saída regulada de 2,2V podendo alimentar processadores ou outros circuitos integrados de baixa potência. Este regulador é alimentado pelo valor mais alto de VAUX ou V_{OUT} . Assim que VAUX atinge o valor de 2,3 V (V_{OUT} ainda não começou a carregar pois VAUX ainda não atingiu os 2,5V) VLDO fica ativo.

A saída principal, V_{OUT} , é alimentada por VAUX e é através da escolha de uma das quatro combinações dos terminais VS1 e VS2 (tabela 4.1) que a tensão de saída, V_{OUT} , é definida.

De modo a fazer o monitoramento da tensão V_{OUT} é usado o comparador *power good*. Assim que V_{OUT} fique a 7,5% do seu valor total de tensão a saída PGD fica a alto. Contrariamente, se V_{OUT} diminui 9% do seu valor total de tensão PGOOD fica a baixo.

Tabela 2.1 Escolha de V_{OUT} através dos terminais VS1 e VS2.

VS1	VS2	V_{OUT}
GND	GND	2,35V
VAUX	GND	3,3V
GND	VAUX	4,1V
VAUX	VAUX	5V

A saída opcional V_{OUT2} pode ser ativada ou não pelo utilizador através do terminal V_{OUT2_EN} . Quando é ativada é conectada a V_{OUT} através de um interruptor MOSFET. Esta tensão de saída, controlada por um processador adicional colocado pelo utilizador, fornece energia a circuitos externos, por exemplo, sensores.

A saída VSTORE pode ser usada para carregar um condensador, ou um conjunto de condensadores, que no seu total possuem uma grande capacidade de armazenamento. Adicionalmente, também pode carregar uma bateria recarregável assim que V_{OUT} atinja a sua tensão regulada. Assim que V_{OUT} atinja o seu valor máximo predefinido, VSTORE começa a carregar até ao valor máximo de VAUX, 5,25V. Este elemento de armazenamento pode ser utilizado para alimentar o sistema no caso da perda da fonte de entrada, V_{IN} . É de salientar que quanto maior a capacidade de armazenamento do condensador mais tempo demorará a carregar dependendo da energia disponível na entrada. A figura 4.2 ilustra o esquema dos componentes intrínsecos ao LTC3108 anteriormente explicados.

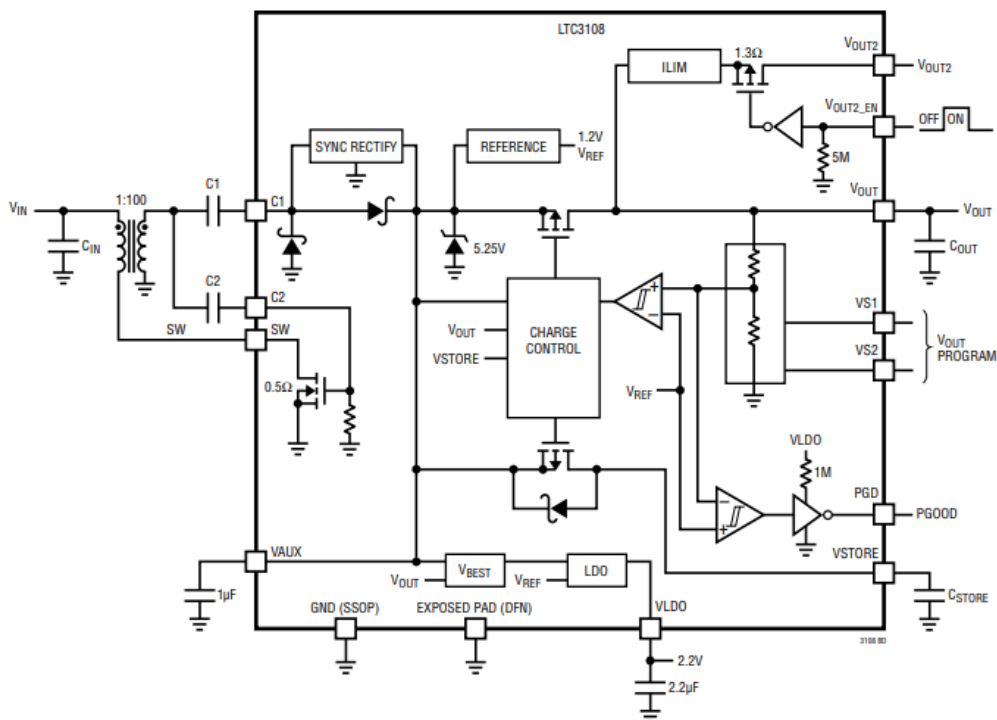


Figura 4.2 Diagrama de blocos do componente LTC3108.

4.1.2 Introdução do kit DC2080A

Para fins demonstrativos da célula de Peltier, como fonte de entrada de um circuito em que na sua constituição possua o conversor integrado LT3108, foi usado o *kit de energy harvesting* - DC2080A. A constituição da placa deste kit dispõe de vários circuitos integrados independentes, cada um com o seu tipo de fonte correspondente. Alguns exemplos de transdutores da placa são: célula fotovoltaica, célula de Peltier, a funcionar como TEG, e transdutor piezoelétrico.

O DC2080A possui dois transdutores acoplados: um TEG e uma célula fotovoltaica. No entanto foi utilizado a célula de Peltier anteriormente testada no capítulo 3. Na figura 4.3 é possível identificar o circuito responsável pela transformação da energia térmica em elétrica com o uso da célula de Peltier ETC-200-14-06-E.

Para fins demonstrativos do funcionamento do circuito foi necessário aplicar uma diferença de temperatura o mais baixa possível, 10 °C, de maneira a ser possível visualizar o comportamento do sistema. Caso contrário, os condensadores estariam sempre no seu nível máximo e o processador estaria constantemente ligado levando a que, tal como já foi referido, não fosse possível avaliar os vários ciclos de funcionamento do sistema.

A tensão de entrada é de 44 mV, figura 4.4 a), pode ser medida no condensador de entrada, ou no primário do transformador, ponto 2. A tensão medida no ponto 1 do primário do transformador é uma tensão DC com oscilações, curvas a amarelo da figura 4.4 b).

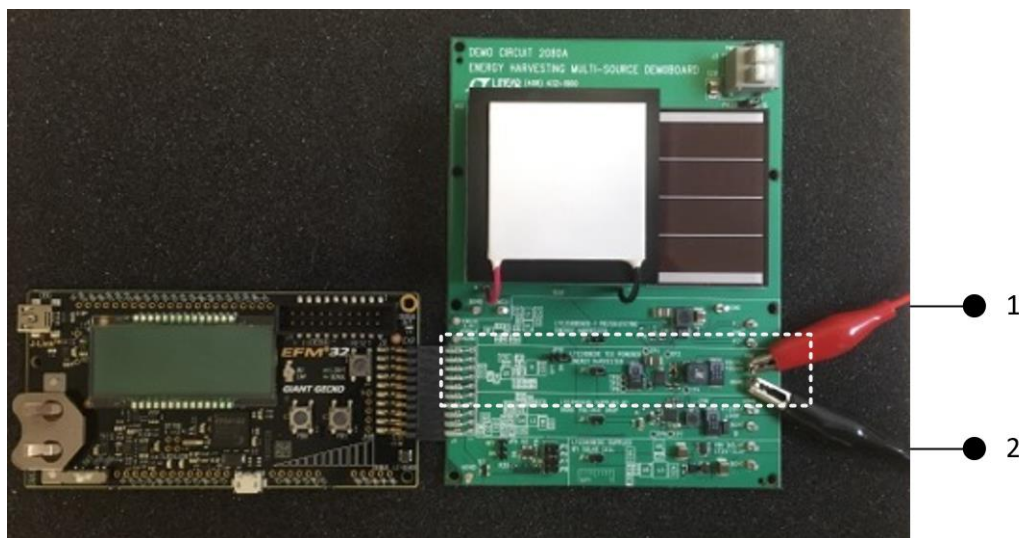


Figura 4.3 DC2080A com a utilização da célula de Peltier ETC-200-14-06-E e à esquerda da imagem o processador EFM32™ Giant Gecko. Legenda: 1- ligação com a parte positiva da célula; 2- ligação com a parte negativa da célula.

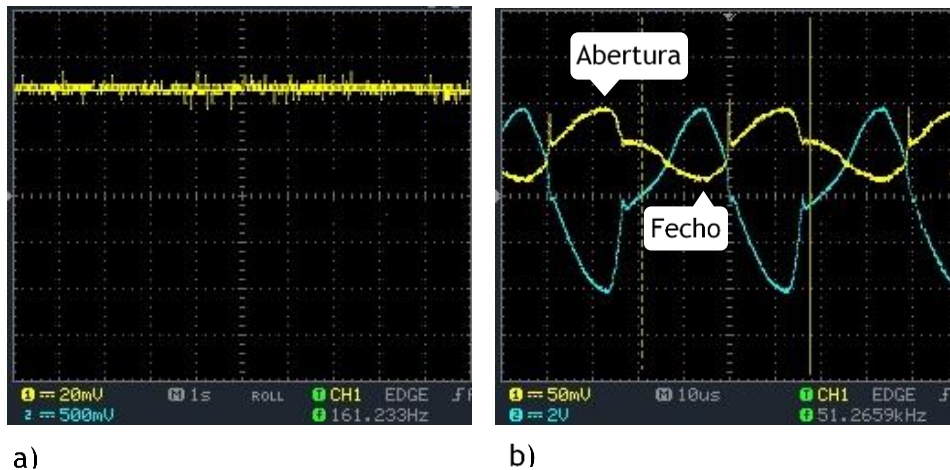


Figura 4.4 Imagens retiradas do osciloscópio. a) Tensão de entrada; b) Comutação do MOSFET.

Estas oscilações traduzem a abertura e fecho do MOSFET interno do LTC3018 (anteriormente mencionado na figura 4.4). Esta abertura e fecho pelo MOSFET gera oscilações da corrente nos enrolamentos do transformador. Essas oscilações induzem uma variação no fluxo eletromagnético do transformador provocando assim uma tensão 100 vezes superior no secundário do transformador, no ponto 3.

A tensão medida no ponto 3 do secundário do transformador, curvas a azul da figura 4.4 b), é uma tensão AC com uma frequência de comutação de 51,3 KHz. Salienta-se o fato de quando o MOSFET abre (ponto máximo da curva amarela da figura 4.4 b)) a corrente é mínima (ponto mínimo da curva azul da figura 4.4 b)) pois como a tensão é mínima a corrente é máxima pois a tensão e corrente são inversamente proporcionais.

É possível analisar a tensão de saída principal do conversor LTC3108, V_{out} , através do condensador associado a esta, C14, através da figura 4.5 a). Contata-se que V_{out} , embora esteja programada para atingir os 3,3 V apenas atinge os 3,15V. Este fato deve-se ao supervisor de baixas potências, LTC2935. Este componente está programado para monitorizar tensões V_{cc} de 3,15 V.

Assim que o condensador C14 atinga o valor de 3,15 V este valor entra no componente através do terminal VCC, figura 4.5 b), e o MOSFET que está colocado à saída do terminal RST fecha, fechando assim o circuito adjacente dos *headers* (que até a este momento estava aberto).

Conseqüentemente, a tensão dos *headers*, VMCU aciona o respetivo microprocessador percorrendo o circuito ligando aos 3,15 V ficando ligado durante 2 segundos -figura 4.5 c). À medida que a tensão VMCU aciona o microprocessador a tensão do banco de condensadores da tensão de saída começa a descarregar, figura 4.5 a), até atingir o valor 2,25 V. Deste modo, o

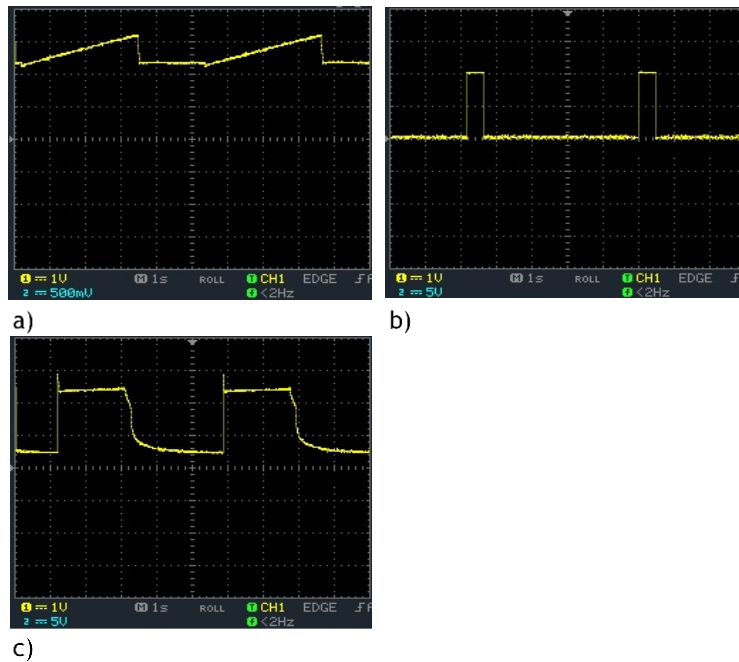


Figura 4.5 Imagens retiradas do osciloscópio. a) V_{OUT} ; b) $PGOOD$; c) $VMCU$.

supervisor (LTC29235) deteta o valor 2,25 V (valor também previamente programado) para que o MOSFET volte a abrir provocando um circuito aberto nos *headers* permitindo que o condensador de V_{OUT} não descarregue mais e que, contrariamente, comece a carregar.

O controlo da tensão de saída, V_{OUT} , é feita pelo $PGOOD$ (anteriormente já mencionado). Através da figura 4.5 b) é possível verificar que assim que V_{OUT} atinja o valor de 3,1 V o $PGOOD$ fica alto e mal atinja o valor de 3 V vai a baixo. Isto deve-se ao fato de o valor de ir a alto e a baixo ser muito próximo pois acontece num espaço de tempo praticamente impercetível, 0,2 segundos.

4.2 Projeto, construção e validação do regulador

Depois de compreendido o método de operação do LTC3108 e do DC2080A foi feita a idealização, construção e validação do circuito regulador que mais à frente irá ser acoplado ao microprocessador *gecko*. O *gecko efm32* é um microprocessador produzido pela empresa *Silicon Labs*. Este opera num intervalo de tensões de 1,9V - 3,8V, com um consumo médio de corrente de 150 µA.

O projeto consistiu na idealização de um esquemático de uma placa PCB, o projeto da placa PCB foi feito através do programa *Design Spark* e posteriormente equipada com os componentes.

O esquemático representativo da placa PCB é demonstrado através da figura 4.6. Neste esquemático é possível identificar os vários componentes utilizados para a concretização da

placa PCB representada na figura 4.7. O componente LTC3108 já foi explicado no subcapítulo anterior. Adicionalmente, ligado ao LTC3108, é possível verificar a presença do TEG como fonte de alimentação. O banco de condensadores, tal como já referido anteriormente, começa a carregar assim que V_{out} atinge o valor pretendido, 3,3V, de modo a assegurar que o sistema não desligue imediatamente, caso a fonte deixe de fornecer energia.

É de constatar o fato de existirem dois *headers*. O primeiro, responsável pela ligação a VMCU (microprocessador *gecko*). O segundo, pela conexão a outro possível sistema- por exemplo- um relógio ou rádio que comunique com outro processador.

Por fim, um componente fundamental ao funcionamento deste circuito é o componente LTC2935. O uso do LTC2935 nasce da necessidade de regular a tensão de VMCU. Ou seja, quando V_{OUT} atinge o valor 1,9V poderia alimentar VMCU, pois é a tensão mínima requerida para o *gecko* funcionar. No entanto, se tal acontecesse este iria gastar imediatamente toda a energia nesse instante, ficando ligado por apenas uma fração de segundos.

Adicionalmente, o fato de os condensadores estarem a carregar e a descarregar mais vezes iria diminuir o seu tempo útil de vida. Assim, de modo ao *gecko* conseguir funcionar de uma forma rentável é necessário que V_{OUT} e os bancos de condensadores tenham mais tempo para carregar mais tensão.

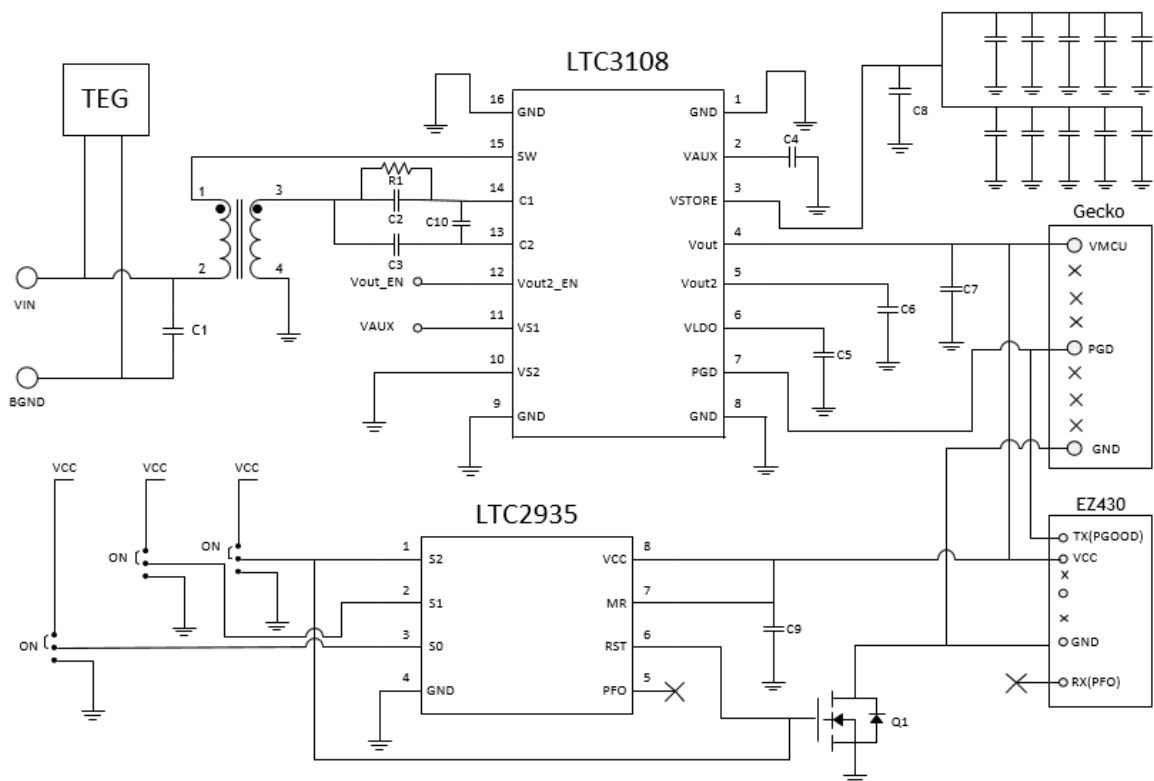


Figura 4.6 Esquemático do circuito pelo qual a placa é composta.

O componente LTC2935 permite que isto aconteça. Ao possuir um MOSFET que faz a abertura e fecho (ou seja a desconexão e conexão) entre o V_{OUT} e V_{MCU} . Por defeito o MOSFET encontra-se inicialmente aberto, ou seja, V_{OUT} está ligado apenas a LTC2935 e não ao microprocessador. Posto isto os condensadores conseguem carregar até atingirem o valor 3,15 V. Quando esse valor é atingido o MOSFET liga permitindo a ligação a V_{MCU} e o *gecko* utiliza essa tensão fazendo com que a tensão, V_{OUT} , descarregue.

Esta descarga de tensão continua a acontecer até que se atinga o valor de 2,25 V. Assim que o valor de 2,25V é atingido o LTC2935 volta a abrir o MOSFET, Q1, assegurando que V_{OUT} deixe de estar ligado a V_{MCU} e passe a estar apenas ligado aos condensadores de maneira a que estes voltem a carregar. Tal como descrito, esta gestão do valor de tensão é feita ciclicamente através da comutação de Q1.

Os valores mínimos (2,25V) e máximos (3,15V) de tensão, geridos pelo LTC2935, são predefinidos através da combinação de valores (alto-1 ou baixo-0) dos três terminais S2,S1,S0. É de salientar o fato de Q1 estar ligado ao terminal S2. Cada vez que Q1 liga ou desliga muda o sinal de S2 para, respetivamente, 1 ou 0. Devido a esta observação a combinação dos três terminais (S2 S1 e S0) muda, de 0 1 1 para 1 1 1, o que representa, respetivamente, os limites de valor mínimo e máximo, 2,25V e 3,15V, da tensão gerida pelo LTC2539.

Depois de avaliado e construído o esquemático do circuito responsável pela regulação e gestão da energia proveniente do TEG para o microprocessador, foi necessário construir a sua placa correspondente.

Para a construção da placa foi desenhado o circuito da figura 4.6 no programa *Design Spark*.



Figura 4.7 Placa PCB da eletrónica de regulação.

Posteriormente a ser desenhada e encomendada foi efetuado o processo de solda de todos os componentes representados na figura 4.6 (condensadores, integrados, MOSFET, *headers*, entre outros) tendo como resultado a placa da figura 4.7. As dimensões na placa são, aproximadamente, 7,5 cm de comprimento e 4,5 cm de largura.

Por fim, de maneira a garantir que a placa concebida consegue alimentar o microprocessador *gecko* foi colocada a célula ETC-200-14-06-E (inserida nas mesmas condições do capítulo 2) como fonte de alimentação. A figura 4.8 comprova a validação do sistema.



Figura 4.8 Processo de validação da placa PCB.

Capítulo 5

5. Aplicação experimental

Neste capítulo é realizada a observação e análise de um caso prático cujo sistema tem como fonte de alimentação a célula de Peltier. Na secção 5.1 é formulado um problema cuja solução passa pela implementação de um TEG como fonte de alimentação, também é feita uma ilustração da representação esquemática do protótipo construído para concetualizar este trabalho. De seguida, na secção 5.2, é feita a formulação de um código responsável pela comunicação energeticamente eficiente entre os circuitos em questão.

5.1 Ilustração do caso de aplicação

Este caso de aplicação é inserido no conceito *Nexus- food, water and energy*. O conceito surgiu da necessidade de interligar três sistemas: água, alimentos e energia. Até à data cada sistema fora visto, estudado e explorado isoladamente. No entanto, mudanças climáticas, o crescimento exponencial da população, entre outras desproporções, levaram a que se constatasse que uma alteração num destes sistemas tem um grande impacto nos outros. Levando a que seja crucial compreender os obstáculos e soluções das interações destes sistemas desde o ponto de vista científico, político, económico e social [24].

A primeira interação, entre água e alimentos é intuitiva, visto ser mandatário a utilização de água para o cultivo de, por exemplo, cereais. Por exemplo, a quantidade de água potável requerida para irrigar campos de cereais nos Estados Unidos da América representa, aproximadamente, 30 % do total de água potável disponível neste país. Se adicionalmente, for considerada a água utilizada no sector pecuário a percentagem sobe para os 70 %. Na realidade, um terço do total da água potável do planeta é utilizada na agricultura de campos de cereais utilizados, exclusivamente, para o fabrico de ração utilizada no sector pecuário de corte [25].

Sendo assim, à medida que a população aumenta exponencialmente, a demanda por produtos animais aumenta em simultâneo. Traduzindo assim um aumento na demanda de água e energia gasta nestes sectores.

Salienta-se o fato de também o sector que engloba a alimentação, também ter um impacto na qualidade da água através de, por exemplo, libertação de pesticidas, fertilizantes, fármacos.

A segunda interação, entre o impacto que o sector da água tem na energia reflete-se, maioritariamente, na quantidade de água necessária utilizada no sistema de refrigeração de centrais térmicas.

No entanto, o sector do sistema de energia e de alimentação também se relacionam. Nomeadamente, por exemplo, na energia necessária para que a irrigação dos campos agrícolas seja feita. Assim, dentro desta interação novas abordagens têm sido exploradas, nomeadamente o uso de *smart sensors*. Com aplicações deste o controlo de rega até ao controlo de qualidade de água utilizada na mesma [26].

O conceito *Nexus*-água energia e alimentação é bastante complexo pois significa relacionar três sectores de grandes dimensões que refletem a importância no nosso planeta, sociedade e, conseqüentemente, nas nossas vidas. De maneira a que estes sectores possam estabelecer uma relação simbiótica as perguntas corretas, obstáculos e soluções necessitam de ser amplamente explorados.

Nomeadamente, no sector agrónomo, o uso de sensores que detetam agentes contaminantes tais como, nitratos, ou sensores que detetam o nível de hidratação do solo têm sido amplamente explorados.

Adicionalmente, no sector anteriormente referido, o uso de campos de irrigação equipados com sensores autónomos (*smart sensors*) também tem sido vastamente explorado. Este investimento tecnológico tem sido feito de maneira a reduzir a quantidade de energia necessária envolvida nestes processos de irrigação [26].

No entanto, a energia requerida para alimentar estes sensores tem sido algo que acarreta algumas dificuldades. Nomeadamente, o fato de na maioria das aplicações, serem usados painéis fotovoltaicos como fonte de energia. Esta solução embora seja vantajosa em países e meses cuja abundância solar seja elevada no entanto a sua eficácia diminui significativamente em condições contrárias. Sendo assim, o uso único ou em conjunto de dispositivos termoelétricos com outras formas de fontes de energia representa uma solução promissora. Isto deve-se ao fato de não ser necessário o uso e troca de baterias (tal como já acontece com outras formas de *energy harvesting*) e também ao fato de os dispositivos termoelétricos serem mais robustos do que, comparativamente, aos painéis fotovoltaicos tendo um tempo de vida útil de, aproximadamente, 20 anos [4].

Posto isto, é proposto um sistema enquadrado na temática *nexus* que tem como objetivo fazer medições de controlo de qualidade de água. A aplicação escolhida foi o monitoramento dos níveis de pH da água. Outros fatores que influenciam a qualidade da água também podem ser monitorizados com os respetivos transdutores adequados à aplicação em questão. No entanto, para fins demonstrativos o pH foi o escolhido.

Tal como já referido em cima, o pH influencia a qualidade da água pois as propriedades químicas influenciam a qualidade desta substância líquida. De maneira a aceder a estas propriedades vários princípios de medição são usados e um destes princípios é a medição de pH através do princípio potenciométrico.

O pH de uma solução é qualificado como ácido neutro ou básico e é quantificado, respetivamente, desde o valor 1 até ao 14 sendo que quando o valor é igual a 7 a solução é considerada neutra. Esta escala foi formulada tendo como base a concentração de iões de hidrogénio contidos numa solução. O princípio físico potenciométrico é explicado através da célebre equação de Nernst,

$$E = E^0 - \frac{2,303RT}{F} \ln(H^+) \quad (34)$$

onde, E e E^0 , representam, respetivamente, o potencial eletroquímico entre o elétrodo de referência e o potencial eletroquímico padrão. Por último R representa a constante universal dos gases, F a constante de Faraday, T a temperatura absoluta e o logaritmo neperiano do valor da concentração de iões de hidrogénio representa o valor de pH.

O elétrodo utilizado no protótipo é do tipo de vidro e a figura 5.1 a) ilustra a as características desde transdutor. Tal como se pode verificar na figura, este elétrodo é constituído por uma esfera de vidro fundida com um tubo com o mesmo material.

Esta fusão entre a esfera e o tubo de vidro representa o elemento sensível ao pH que é preenchido com uma solução de cloreto de potássio (KCl) contendo um fio de cloreto de prata / prata.

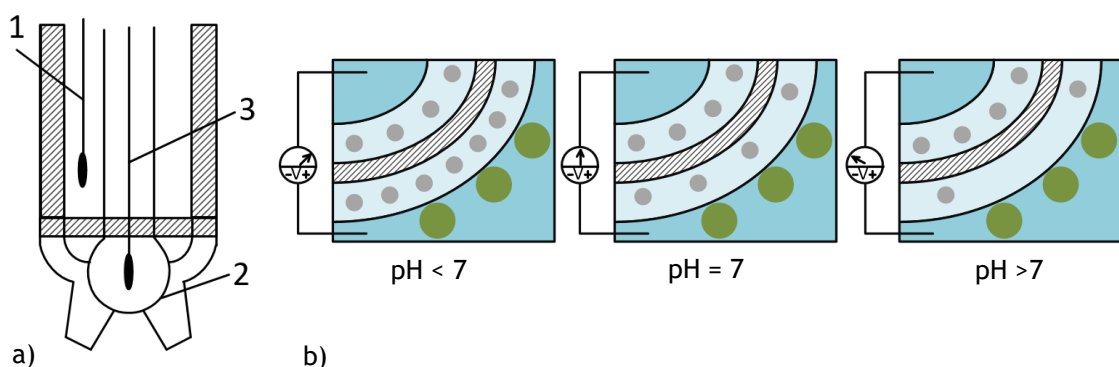


Figura 5.1. Funcionamento de um transdutor de pH. a) Características do transdutor b) Soluções com diferentes pH e respetivos fenómenos químicos.

O sistema de referência está localizado no tubo de vidro externo e também consiste num fio de cloreto de prata / prata embebido numa solução de KCl. O valor do pH é calculado a partir da diferença de potencial entre o sistema de referência e o sistema de medição.

Para entender como essa diferença de potencial é formada, é necessário compreender com precisão o sistema de medição. Por exemplo, se o líquido a ser medido for ácido clorídrico diluído (HCl), os iões, de menor dimensão, os de hidrogénio, que possuem carga positiva (H^+), são capazes de penetrar na fronteira da membrana de vidro, também conhecida como: camada de gel. Em oposição, os iões de maior dimensão e de carga negativa, cloreto (Cl^-), não conseguem penetrar na camada de gel, permanecendo assim na solução. O resultado é uma separação de cargas. O mesmo processo ocorre no interior do sensor que contém a solução neutra.

Se a concentração de iões de hidrogénio, ou seja, o valor do pH, no interior da esfera diferir da concentração no exterior, uma diferença de potencial é formado. Se a concentração dos iões de hidrogénio no interior for menor do que a concentração de iões no exterior, a solução medida é ácida ($pH < 7$) e uma diferença de potencial positiva. Se a concentração dos iões de hidrogénio for idêntica em ambos os lados, nenhuma diferença potencial é formada e a solução medida é neutra com um valor de pH 7. Finalmente, a solução medida é básica ($pH > 7$) se a concentração dos iões de hidrogénio dentro da esfera for maior que a solução medida com uma diferença de potencial negativa. De maneira a esta explicação ser mais perceptível a figura 5.1 b) ilustra este processo de separação de iões e, conseqüentemente, de cargas.

Posto isto, de maneira a ser mais fácil a visualização deste caso prático é feito um esquema através da figura 5.2 representando a idealização do protótipo mais à frente mencionado. Através desta imagem é possível visualizar os vários parâmetros que este sistema engloba.

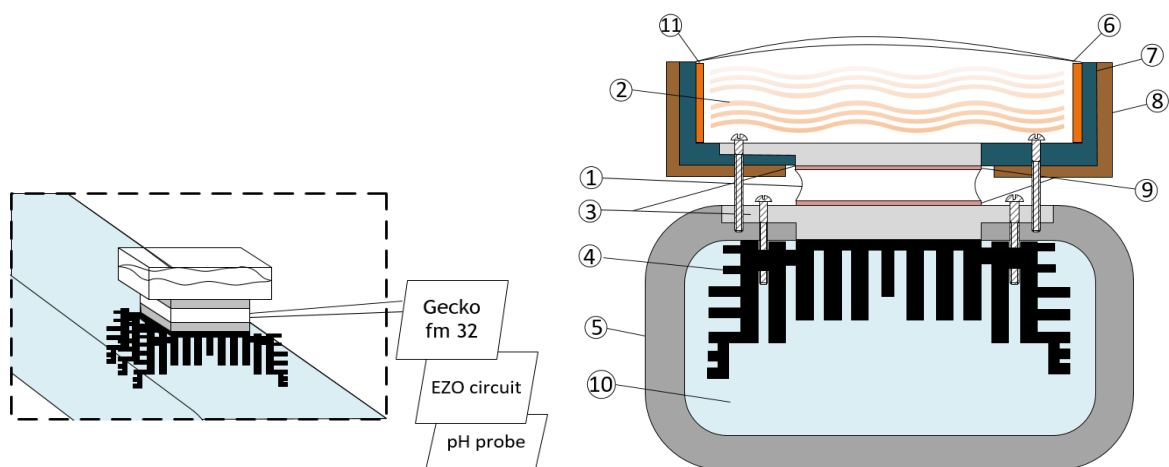


Figura 5.2 Representação do transdutor e circuito de armazenamento. Legenda: 1-Célula de Peltier; 2- Parafina; 3- Placa de metálica; 4-Dissipador de calor de alhetas; 5- Tubo de plástico; 6-Lente de fresnel; 7- Caixa que contém a parafina; 8- Isolante térmico; 9- Pasta térmica; 10- Fluxo de água; 11- Resistências que aquecem a parafina.

5.2 Instalação do transdutor com a eletrónica de regulação

Previamente à instalação do transdutor, no sistema de água, foi necessário programar o microprocessador *gecko* e o circuito para medição do pH, EZO, de maneira a estes estabeleçam uma comunicação que seja responsável pela recolha e leitura dos dados do pH através do sensor potenciométrico. Tanto o circuito EZO como o transdutor são possíveis de visualizar através da figura 5.3. Note-se que as imagens não estão à escala real.

A programação da comunicação entre estes dois componentes é fundamental para assegurar que a troca de dados é realizada de maneira a que seja gasta a menor quantidade de energia possível durante o processo de medição.

Para a instalação do transdutor foi necessário reunir vários fatores fundamentais. Nomeadamente, saber qual a energia produzida pela célula, a energia consumida pelo *gecko* e, por fim, a energia que o circuito EZO requer para fazer as medições de pH através do transdutor potenciométrico.

A placa produz um determinado valor de energia. Esse valor foi calculado através da seguinte equação,

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (35)$$



Figura 5.3 Componentes responsáveis pela medição de pH. À esquerda o circuito EZO e à direita o sensor potenciométrico.

sendo C a soma da capacidade dos condensadores de saída e V a tensão de entrada dos mesmos. Assim, sendo C 1,720 mF a capacidade total dos condensadores de saída da placa e 3,3V a tensão de entrada (regulado pelo LTC2935), sabe-se que a energia possível de armazenar na placa é de 9,37 mJ.

O microprocessador gasta diferentes valores de energia consoante o modo de funcionamento em que está. O gasto energético em modo de funcionamento *run* é de 114 μ A e 3V e em modo *deep sleep* é de 0,9 μ A e 3V.

De maneira a conseguir fazer o perfil energético do sistema, é necessário analisar o gráfico, representado através da figura 5.4, executado pelo programa *simplicity studio*. Através do gráfico é possível analisar a corrente (linha branca), a corrente média (linha amarela) e a tensão (linha laranja). É também possível ver o tempo em que a energia, ou seja a relação entre os fatores anteriormente enunciados, ocorre. Assim constata-se que, entre o momento em que o *gecko* acorda (momento em que linha branca, ou seja a corrente, sobe) e o momento em que volta a descer (*gecko* volta para *deep sleep*) o sistema faz uma medição de pH. Assim, o intervalo de tempo correspondente a uma medição de pH é de 1,27 s. Extraíndo o valor do tempo, da tensão e da corrente que o sistema necessita para fazer uma medição é possível chegar ao valor da energia total consumida pelo sistema: 22 mJ.

Recorrendo à manipulação da equação (35) sabe-se que a capacidade total de condensadores necessários para alimentar o sistema é de 4,22 mF. Relembrando que a energia total da placa PCB é de 9,37 mJ e a sua capacidade total dos condensadores é de 1,720 mF, é fácil de comprovar que não é possível fazer uma leitura de pH através da mesma. De modo a que a placa seja responsável por uma leitura de pH é imperatório aumentar a capacidade total de condensadores da placa PCB.

Posteriormente à compreensão do perfil energético e quais as modificações que necessitariam ser feitas é possível prosseguir à exposição do raciocínio e de, algumas, das linhas de código responsáveis pela comunicação entre circuitos e como tal, pelo gráfico da figura 5.4.

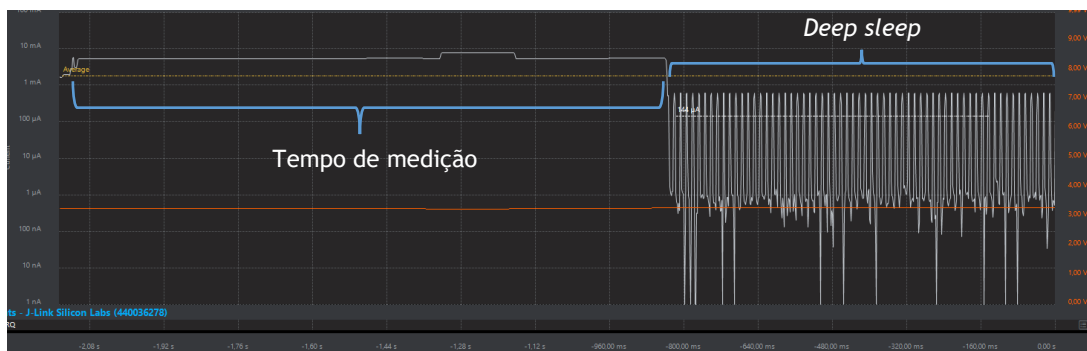


Figura 5.4 Gráfico do perfil energético da comunicação entre o *gecko* e o EZO.

De maneira a que o *gecko* e o EZO consigam comunicar a um valor energético o mais baixo possível foram feitos ajustes no tempo de comunicação entre estes. Tanto o EZO como o *gecko* comunicam via modo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), isto é, segundo um protocolo simples de transmissão e receção de dados.

Nos primeiros instantes, o *gecko*, acorda assim que o LTC2935 regule a tensão até ao valor 3,15V. De seguida, o circuito EZO envia (Tx) os dados da medição de pH ao *gecko* e assim que acaba de enviar os dados volta a entrar em modo *deep sleep*. Estes passos ocorrem de forma cíclica de maneira a que a recolha de dados de pH seja feita de 10 em 10 minutos. O diagrama sequencial, tal como o nome indica, representa a sequência de passos em cima descritos. Na função *main*, presente no microprocessador *gecko* é escrita uma função que no fim de 500 tempos, definidos pelo RTC- *Real Time Clock*, provoca uma interrupção.

O diagrama sequencial da figura 5.5 representa, tal como o nome indica, a sequência de passos que o programa faz de maneira a que o microprocessador *gecko* e o circuito EZO comuniquem. No primeiro passo, o microprocessador *gecko* encontra-se em modo *deep sleep*.

No entanto, assim que RTC conte 500 tempos ocorre uma interrupção na função *main*. Assim que a interrupção ocorre o *gecko* acorda e o *pin Vout* fica a alto deixando passar tensão, acionando o circuito EZO, voltando imediatamente para modo *deep sleep*. Até aqui a comunicação TX-RX é estabelecida.

Ao fim de 1,27 segundos (tempo que demora a concluir uma medição de pH) o *pin Vout* é colocado a baixo. Assim que é colocado a baixo o circuito EZO envia os dados da medição de pH para o *gecko* e desliga imediatamente. Aqui a comunicação TX-RX é feita no sentido inverso, isto é, neste momento o transmissor de dados passou a ser o EZO e o recetor de dados o *gecko*.

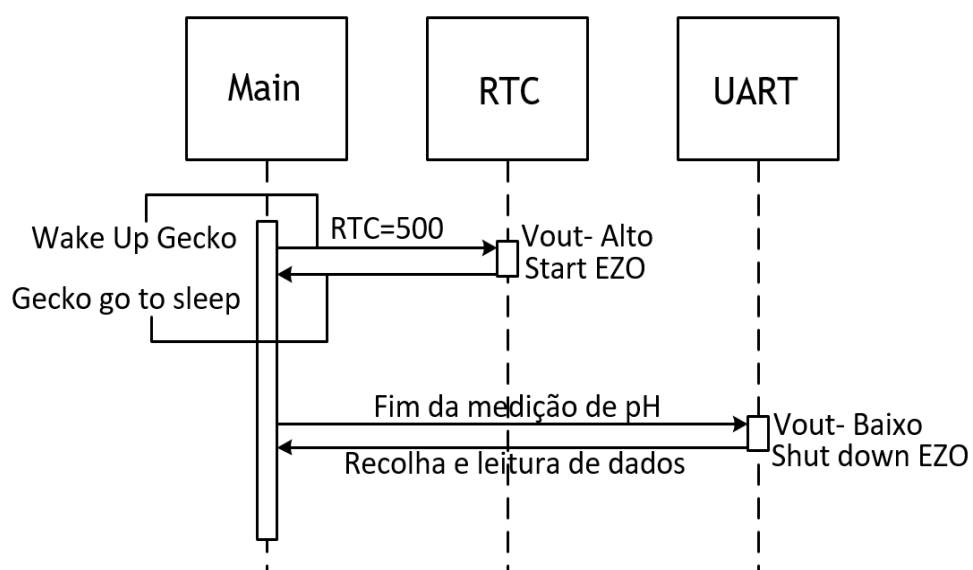


Figura 5.5 Diagrama sequencial do código proposto.

Os dados são recebidos e demonstrados no LCD do *gecko* de modo a que a leitura dos mesmos seja possível.

As linhas de código escritas de maneira a que estes passos sejam possíveis de implementar são posteriormente demonstradas.

```
while (1) {
    Rx_buffer_pointer = 0;

    GPIO_PinOutSet(CHARGER_PORT, CHARGER_PIN);
    EMU_EnterEM1();

    while (Rx_buffer_pointer <= 5){
    }
    GPIO_PinOutClear(CHARGER_PORT, CHARGER_PIN);

    rtcTick = 0;
    while (rtcTick <= 200){
        EMU_EnterEM2(true);
    }
}
```

Depois da interrupção, dentro do primeiro ciclo, em cima mencionado, a terceira linha é a responsável por colocar o pin *Vout* a alto ligando o circuito EZO. De seguida, ainda no mesmo ciclo, a quarta linha garante que o *gecko* volte para o modo *deep sleep* até que o EZO termine as medições de pH.

O segundo ciclo (quinta linha) é responsável por acordar o *gecko* e pela colocação do pin *Vout* a baixo, desligando o EZO e o *gecko* se manter acordado até receber os dados de pH. Por fim, a oitava linha garante que o *gecko* volte a entrar em modo *deep sleep* até à próxima medição de pH.

Depois de compreendido e implementado o código responsável pela comunicação entre o *gecko* e o EZO é possível conceptualizar um protótipo que consiga colocar em prática a implementação do sistema anteriormente estudado.

A figura 5.6 ilustra o protótipo final onde a fonte de alimentação permite aquecer a parafina através de duas resistências colocadas junto do recipiente que a contém. Deste modo é possível simular o sol.

De maneira a extrair os valores de pH da água seria necessário alimentar o sistema através da célula de Peltier. Assim seria necessário aquecer a parafina e ligar a bomba responsável pelo fluxo de água dentro do tubo. Adicionalmente seria necessário conectar uma fonte de alimentação, de modo a fornecer 12V, simulando o sol de maneira a conseguir aquecer a parafina.

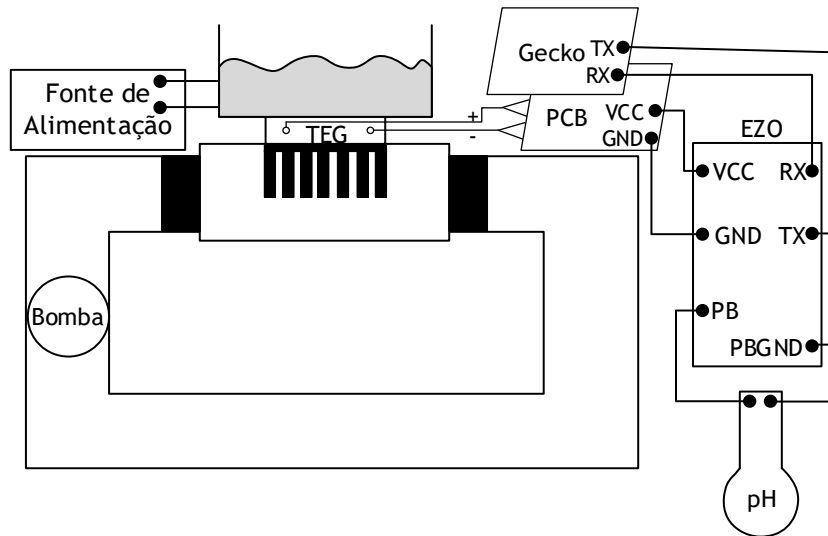


Figura 5.6 Ilustração da implementação do protótipo e respetivo sistema de medição de pH.

A caixa com capacidade de reter a parafina foi projetada através do programa *solid works* e impressa através de uma impressora 3D. A caixa é revestida por uma camada de cortiça no interior por uma camada metálica. A figura 5.6 a) demonstra a representação real da caixa bem como o seu acoplamento com o tubo.

Através da figura 5.7 b) é possível verificar que, dentro do recipiente, estão inseridos alguns dissipadores de calor de alhetas de maneira a melhorar o contacto entre a parafina e a caixa.

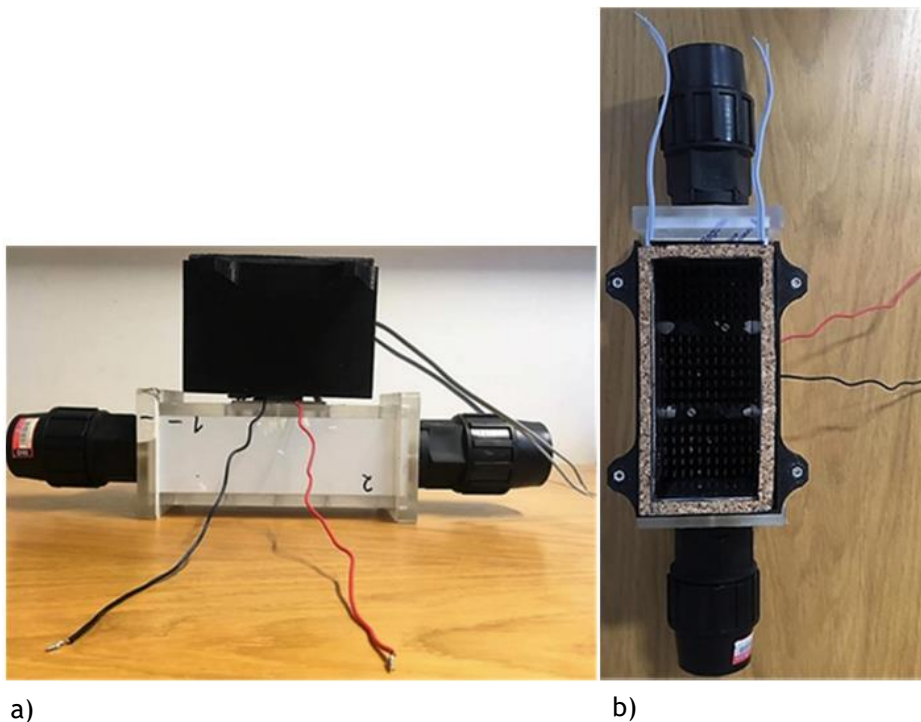


Figura 5.7 Fotos reais do protótipo de acoplamento entre a célula e o tubo. a) Visão lateral. b) Visão frontal.

Capítulo 6

Conclusão

Neste capítulo são enunciadas as reflexões sobre o trabalho desenvolvido e o que ainda pode ser feito em investigações futuras.

6.1 Conclusões

A necessidade de colmatar a dependência de baterias por parte dos vários sistemas elétricos é um grande desafio. Em particular, em sistemas com necessidades energéticas reduzidas, em específico sensores, o progresso tem sido considerável.

Esse progresso envolve abordagens como a *energy harvesting*, em particular através da termoelectricidade. O uso da célula de Peltier permitiu conhecer o seu limite de potência e, como tal, a sua potência máxima gerada de 50,6 mW a uma diferença de temperatura de 50 °C.

Saber a potência mínima e máxima da célula permitiu compreender as limitações energéticas e como superá-las de modo a ser possível o seu uso a nível experimental. Essa possibilidade tornou-se real através da projeção e concretização de uma placa PCB que contém um circuito responsável pela regulação e aumento da tensão à saída da célula. Foi através desta placa que foi possível estabilizar e aumentar uma tensão mínima de 40 mV para 3.3V.

Foi idealizado um protótipo de um caso prático de recolha de medições de pH, visto este fator ser inserido na temática *Nexus*. Este protótipo envolveu a projeção de um sistema de água bem como o protótipo responsável pelo acoplamento do transdutor, previamente estudado.

A escolha de um microprocessador de baixo consumo energético, o *gecko*, permitiu estabelecer uma comunicação energeticamente mais rentável com o circuito EZO. No entanto, a energia total do sistema continuou a ser superior à energia disponível pela placa PCB. Concluindo-se que seria necessário aumentar a capacidade dos condensadores da placa.

Concluindo, é possível afirmar que através do uso de transdutores termoelétricos, em especial da célula de Peltier usada, é possível alimentar e tornar um sistema, de baixa potência, energeticamente autónomo.

6.2 Evolução e trabalhos futuros

Existem um conjunto de direções de investigações futuras, tanto no âmbito desta dissertação, pois não esgota todos os assuntos abordados, quer no que concerne a novas perspectivas de investigações e desenvolvimentos.

O aumento de número de condensadores seria uma boa direção pois, embora signifique mais tempo a carregar energia, também se iria traduzir numa maior capacidade de energia armazenada podendo abrir mais o leque de aplicações que tenham esse requisito.

A implementação de um protocolo de comunicação entre sensores que estejam a ser alimentados por gerador termoelétrico para, por exemplo, sistemas de irrigação.

Uma sugestão passa pela implementação, por exemplo, através de um rádio, para que este tipo de energia seja possível de implementar a uma rede de sensor sem fios.

Outra direção seria a idealização de uma sinergia entre vários tipos de fontes de *energy harvesting* de maneira a utilizar os pontos fortes de cada uma de maneira a colmatar os pontos fracos. Por exemplo, o uso de células fotovoltaicas e de geradores termoelétricos.

Referências

- [1] Q. Wan, Y. Teh, Y. Gao, e P. K. T. Mok, «Analysis and Design of a Thermoelectric Energy Harvesting System With Reconfigurable Array of Thermoelectric Generators for IoT Applications», *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.*, vol. 64, n. 9, pp. 2346-2358, Set. 2017.
- [2] D. Milić, A. Prijić, L. Vračar, e Z. Prijić, «Characterization of commercial thermoelectric modules for application in energy harvesting wireless sensor nodes», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 121, pp. 74-82, Jul. 2017.
- [3] A. C. Yunus e A. B. Michael, «thermodynamics an engineering approach», 9th ed., McGraw-Hill educação - Europa.
- [4] M. Mohamed, A. Abdelmoula, C. E. Hadi, e M. Abdessamad, «Study of the economical feasibility and the performance of thermoelectric devices under different conditions: Power generation», em *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2016, pp. 1-7.
- [5] T. Pardy, T. Rang, e I. Tulp, «Modelling and experimental characterisation of thermoelectric heating for molecular diagnostics devices», em *2016 15th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC)*, 2016, pp. 27-30.
- [6] C. Gayner e K. K. Kar, «Recent advances in thermoelectric materials», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, pp. 330-382, Out. 2016.
- [7] G. Gadea, A. Morata, e A. Tarancon, «Chapter Five - Semiconductor Nanowires for Thermoelectric Generation», em *Semiconductors and Semimetals*, vol. 98, S. Mokkalapati e C. Jagadish, Eds. Elsevier, 2018, pp. 321-407.
- [8] K. Pielichowska e K. Pielichowski, «Phase change materials for thermal energy storage», *Prog. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 67-123, Ago. 2014.
- [9] A. Kumar, A. K. Rai, e R. Garg, «Experimental investigation of a passive solar still with paraffin wax as latent heat storage», em *2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD)*, 2015, pp. 1-6.
- [10] X. Bin, G. Guobiao, R. Lin, e L. Zhenguo, «Study on overload performance enhancement of motor based on heat storage of phase change paraffin», em *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2017, pp. 1-4.
- [11] A. A. Y. AlWaaly, P. S. Dobson, M. C. Paul, e P. Steinmann, «Thermocouple heating impact on the temperature measurement of small volume of water in a cooling system», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 127, pp. 650-661, Dez. 2017.
- [12] M. Nesarajah e G. Frey, *Thermoelectric Power Generation: Peltier Element versus Thermoelectric Generator (TEC vs. TEG)*. 2016.
- [13] J. H. Carstens e C. Gühmann, «Maximum Power Point Controller for Thermoelectric Generators to Support a Vehicle Power Supply», *12th Eur. Conf. Thermoelectr.*, vol. 2, n. 2, pp. 790-803, Jan. 2015.
- [14] M. Zhou, M. S. H. Al-Furjan, J. Zou, e W. Liu, «A review on heat and mechanical energy harvesting from human - Principles, prototypes and perspectives», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, pp. 3582-3609, Fev. 2018.
- [15] M. Ashraf e N. Masoumi, «A Thermal Energy Harvesting Power Supply With an Internal Startup Circuit for Pacemakers», *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.*, vol. 24, n. 1, pp. 26-37, Jan. 2016.
- [16] L. Francioso, C. De Pascali, V. Sglavo, A. Grazioli, M. Masieri, e P. Siciliano, «Modelling, fabrication and experimental testing of an heat sink free wearable thermoelectric generator», *Energy Convers. Manag.*, vol. 145, pp. 204-213, Ago. 2017.
- [17] D. G e S. N. Singh, «Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 1230-1247, Set. 2017.
- [18] M. Z. Hossain, N. A. Rahim, e J. a/l Selvaraj, «Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 205-230, Jan. 2018.
- [19] A. Elghool, F. Basrawi, T. K. Ibrahim, K. Habib, H. Ibrahim, e D. M. N. D. Idris, «A review on heat sink for thermo-electric power generation: Classifications and parameters affecting performance», *Energy Convers. Manag.*, vol. 134, pp. 260-277, Fev. 2017.
- [20] B.-J. Huang, Y.-H. Chuang, e P.-E. Yang, «Low-cost manufacturing of loop heat pipe for commercial applications», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 126, pp. 1091-1097, Nov. 2017.

- [21] M. R. Shaeri, D. Attinger, e R. Bonner, «Feasibility study of a vapor chamber with a hydrophobic evaporator substrate in high heat flux applications», *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 86, pp. 199-205, Ago. 2017.
- [22] M. Sajid, I. Hassan, e A. Rahman, «An overview of cooling of thermoelectric devices», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 15-22, Out. 2017.
- [23] M. J. Deasy, N. Baudin, S. M. O'Shaughnessy, e A. J. Robinson, «Simulation-driven design of a passive liquid cooling system for a thermoelectric generator», *Appl. Energy*, vol. 205, pp. 499-510, Nov. 2017.
- [24] B. W. Abegaz, T. Datta, e S. M. Mahajan, «Sensor technologies for the energy-water nexus - A review», *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 451-466, Jan. 2018.
- [25] K. T. Sanders e S. F. Masri, «The energy-water agriculture nexus: the past, present and future of holistic resource management via remote sensing technologies», *J. Clean. Prod.*, vol. 117, pp. 73-88, Mar. 2016.
- [26] A. Mérida García, I. Fernández García, E. Camacho Poyato, P. Montesinos Barrios, e J. A. Rodríguez Díaz, «Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system», *J. Clean. Prod.*, vol. 175, pp. 670-682, Fev. 2018.