



**Energy Harvest: Recolha de Energia
termoelétrica
Versão final após a defesa**

Luzolo João

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

Janeiro de 2023

Declaração de Integridade

Eu, Luzolo João, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M10548 de/o Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade Faculdade Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 9/01/2023

A handwritten signature in black ink, reading "Luzolo João". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping flourish over the "João".

Agradecimentos

A presente dissertação de mestrado marca o término de uma longa jornada acadêmica. A sua realização contou com apoios e incentivos de muitos aos quais gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente à Deus, pela saúde e força para conseguir superar todos os obstáculos até chegar aqui.

Ao meu pai Lundoloka Sebastião e aos meus irmãos, pelo apoio, amor e incentivo constante, pela coragem nos momentos em que esta faltou, por estarem sempre a torcer e a confiar em mim.

Ao Professor Doutor António Eduardo Viatória Espírito Santos, orientador desta dissertação, pela disponibilidade, apoio e pelo esclarecimento de dúvidas que surgiram ao longo da realização do trabalho.

A minha namorada Andreia Kakuarta, por todo o apoio, motivação e compreensão durante todo período de trabalho.

Aos amigos e colegas que contribuíram não só na realização deste trabalho, mas também em todo meu percurso académico. Agradeço pelo apoio, companheirismo.

Por fim, quero agradecer à todas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho, um muito obrigado!

Resumo

Com os diversos avanços verificados nas tecnologias de redes sensores sem fios, surge a necessidade destes sistemas tornarem energeticamente autónomos. Historicamente, as baterias têm sido as fontes de alimentação usadas para fornecer energia nestas tecnologias. Visando solucionar as limitações apresentadas pelas baterias, inúmeras pesquisas têm sido feitas para maximizar a vida útil e a capacidade dos nós sensores. As técnicas de *Energy Harvesting* surgem com uma das soluções alternativa.

Esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver um setup experimental, tendo em vista recolha de energia através de um transdutor termoelétrico, utilizando a diferença de temperatura entre a água de uma canalização, e a temperatura de um material de mudança de fase que armazena energia solar térmica. A energia produzida tem como objetivo de alimentar nós sensores usados na área de monitoramento de distribuição de água. O sistema desenvolvido é composto por uma célula de Peltier, 2 termopares e ThermoBooster Pack acoplado ao Lanch Pad, sensor de corrente INA219, microcontrolador mbed e o software de programação node-red. De maneira elevar a energia produzida célula de Peltier e efetuar a sua regulação foi usado o conversor LTC3108 da Linear Technology. Este circuito eletrónico faz parte do kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A.

Palavras-chave

Energy harvesting; Seebeck effect; Peltier effect; thermoelectric generator; smart sensor.

Abstract

With the various advancements seen in wireless sensor network technologies, these systems need energy autonomy. Normally, batteries have been the power sources used to provide energy in these technologies. To solve the limitations presented by batteries, several researches have been proposed to maximize the lifetime and capacity of sensor nodes. *Energy harvesting* as an alternative to power sensor nodes.

This dissertation aims to develop an experimental setup, for energy harvesting from a thermoelectric transducer, using the difference temperature between the pipe water, and the temperature of a material that stores solar thermal energy. The energy produced will be used to power smart sensor. The experimental system consists of a Peltier cell, 2 thermocouples and ThermoBooster Pack coupled to the Launch Pad, INA219 current sensor, mbed microcontroller and the software node-red. The Energy Harvesting (EH) Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A kit was used to regulate the energy produced by the Peltier cell.

Keywords

Energy harvesting; Seebeck effect; Peltier effect; thermoelectric generator; smart sensor.

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Acrónimos	xviii
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento do trabalho	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura e organização da dissertação	3
Capítulo 2	5
2. Procedimentos de conversão de energia termoelétrica	5
2.1 Efeito termoelétrico	5
2.1.1 Efeito Seebeck	5
2.1.2 Efeito Peltier	8
2.1.3 Efeito Thomson	9
2.2 Materiais Termoelétricos	10
2.3 Módulos termoelétricos	11
2.3.1 Refrigeradores termoelétricos	12
2.3.2 Geradores termoelétricos	13
2.4 Aplicações de geradores termoelétricos	17
2.4.1 Aplicações nos dispositivos wearable	17
Capítulo 3	20
3. Plataforma de teste e avaliação	20
3.1 Procedimento experimental	20
3.1.1 Interface de usuário com Node-red	21
3.1.2 MBED LPC1758	22
3.1.3 INA219	24
3.2 Medição de temperatura quente e fria	24
3.3 Medição de energia gerada	25
Capítulo 4	27
4. Módulo de captação de energia termoelétrica	27

4.1 Introdução ao kit Energy Harvesting Multi-source Demo Board with Transducers DC2080A	27
4.1.1 Conversor LTC3108	28
4.2 Teste e Validação	31
Capítulo 5	34
5. Conclusão	34
5.1 Considerações finais	34
5.2 Trabalhos futuros	35
Referencias bibliográficas	36

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Fluxograma das principais fontes usadas na recolha de energia.	2
Figura 2.1 – Princípio de funcionamento do efeito Seebeck.....	6
Figura 2.2 – Representação de um termopar	7
Figura 2.3 – Princípio de funcionamento do efeito Peltier. a) modo de refrigeração b) modo de aquecimento.	9
Figura 2.4 – Gráficos representativos de figura de mérito (ZT). a) Representação das características dos materiais termoelétrico, figura de mérito (ZT), coeficiente de Seebeck e condutividade térmica em relação à concentração de eletrões de transporte. B) Figura de mérito (ZT) de diferentes materiais termoelétricos em função de temperatura [7].	11
Figura 2.5 – Módulo termoelétrico.	12
Figura 2.6 – Representação esquemática de um gerador termoelétrico.	14
Figura 2.7 – Circuito elétrico equivalente a um gerador termoelétrico.....	16
Figura 2.8 – a) Modelo de relógio Eco-Drive Thermo; b) Relógio Seiko Thermic [13]..	18
Figura 2.9 – Camisola e braçadeira com módulos termoelétricos embutidos, desenvolvidas no centro ASSIST [12]	18
Figura 2.10 – Sistema de monitoramento EEG sem fio alimentado por TEG[13].	19
Figura 2.11 – Protótipo de gerador de microenergia térmica.	19
Figura 3.1 – Representação por blocos do setup experimental desenvolvido.	20
Figura 3.2 – O editor node-red.	22
Figura 3.3 – Distribuição de pinos disponíveis no Mbed LPC1768 [15].....	23
Figura 3.4 – Código usado para a medição parâmetros elétricos (Corrente elétrica, tensão de saída e potência).	23
Figura 3.5 – Sensor de monitoramento Ina219.	24
Figura 3.6 – Fluxo usado na medição de temperatura.	24
Figura 3.7 – Código para separação dos dados da temperatura.	25
Figura 3.8 – Fluxos usados para leitura da corrente, tensão de saída e potência proveniente do mbed.	25
Figura 3.9 – Código usado no node-red para separ os dados recebidos do mbed.	26
Figura 4.1 –Placa de desenvolvimento DC2080A.....	28
Figura 4.2 – Diagrama de blocos do conversor LTC3108.....	31
Figura 4.3 – kit de recolha de energia DC2080A conectado com o microcontrolador EFM 32 Giant Gecko.	32
Figura 4.4 – Tensão <i>de</i> entrada, medida através do osciloscópio.	33
Figura 4.5 – Tensão de saída <i>V</i> OUT, medidas através do osciloscópio.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Densidade de algumas fontes de recolha de energia ambiente [3].....	3
Tabela 4.1 – Os pinos do conversor LTC3108.....	29
Tabela 4.2 – Seleção de tensão de saída principal através dos pinos VS1 e VS2.	30

Lista de Acrónimos

GRP	Gabinete de Relações Públicas
UBI	Universidade da Beira Interior
EH	Energy Harvesting
RSSF	Rede de Sensor Sem Fio
TEG	Gerador Termoelétrico
TEC	Refrigerador Termoelétrico
TEM	Módulo Termoelétrico
AC	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
MOSFET	Transístor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor

Capítulo 1

1. Introdução

Neste capítulo é apresentado o enquadramento à temática e as motivações que levam ao desenvolvimento deste trabalho, seguido por objetivos principais. No final do capítulo, é apresentado de forma breve a organização da dissertação.

1.1 Motivação e enquadramento do trabalho

As tecnologias de redes de sensores sem fios (RSSF) têm vindo a emergir como uma das áreas de pesquisa mais atraente nos últimos anos. Esta é composta por um conjunto de pequenos nós de sensores autónomos, que processam informações e comunicam-nas sem fios. Estas tecnologias podem ser aplicadas em diversas áreas, como por exemplo: na medicina e nos cuidados de saúde, monitoramento de sistemas de distribuição de água, operações de socorro em catástrofes naturais, mapeamento da biodiversidade, monitoramento militar, monitoramento em estruturas prediais [1].

A eficiência enérgica é um dos fatores limitante no funcionamento destas tecnologias. As baterias são as fontes de alimentação normalmente usadas para fornecer energia nas redes de sensores sem fios. Elas possuem inúmeras desvantagens, como curto tempo de vida útil e precisam ser substituídas regularmente, o que às vezes é impossível quando usados em locais de difícil acesso e aos fatores de custo associados a elas. Visando solucionar as desvantagens apresentadas pelas baterias, inúmeras pesquisas são feitas para maximizar a vida útil e a capacidade dos nós sensores. O uso de *Energy Harvesting* é uma técnica alternativa.

O termo *Energy Harvesting* é associado ao conceito da recolha de energia disponível no meio ambiente ou de outras fontes de energia (como por exemplo o calor do corpo humano) e convertê-la em energia utilizável. Esta técnica tem sido alvo de investigação recente e continua a crescer em ritmo acelerado, devido às inúmeras aplicações e vantagens que introduz, principalmente na alimentação de sistemas autónomos de monitoramento remota, redes de sensores sem fios, dispositivos wearable e em outros micro sistemas autoalimentados.

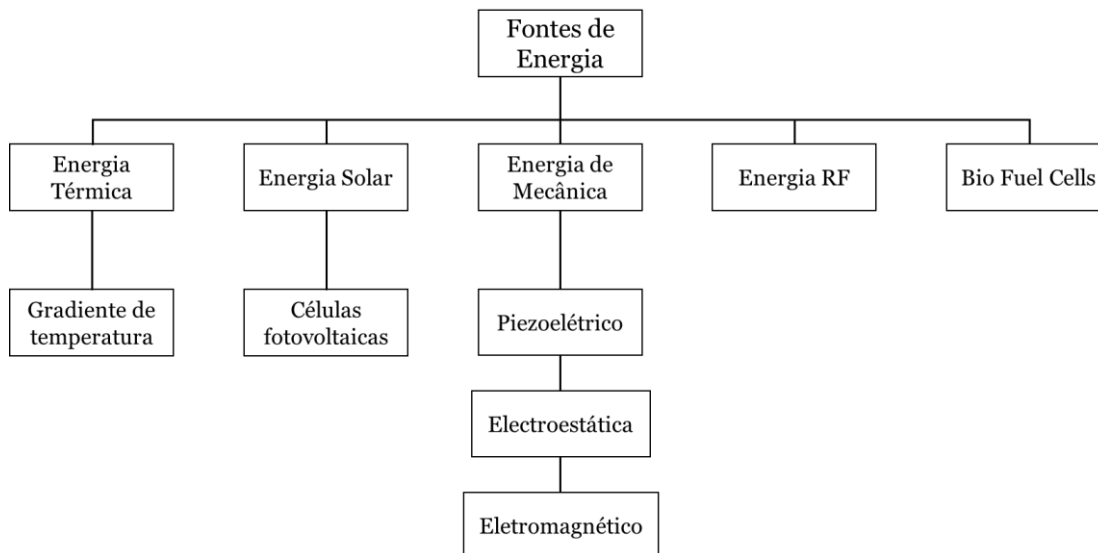


Figura 1.1 – Fluxograma das principais fontes usadas na recolha de energia.

A energia no meio ambiente pode ser recolhida de diversas maneiras. Um sistema de recolha de energia normalmente é composto por uma fonte de energia, uma arquitetura de conversão e regulação de energia, e uma carga ou dispositivo de armazenamento. A fonte de energia refere-se à fonte disponível no meio ambiente (térmica, solar, vibrações). A arquitetura de consiste em mecanismos para aproveitar e converter a energia ambiente em energia elétrica (transdutores de energia), o circuito de regulação é responsável pela regulação do nível de tensão desejada na saída. O dispositivo de armazenamento é associada à atividade final da energia recolhida [2].

A escolha da melhor solução de *Energy Harvesting*, a aplicar num determinado projeto, é associado em conhecer as propriedades que caracterizam as fontes, nomeadamente: a densidade de potência, corrente elétrica e tensão máxima produzida, o tamanho e peso, as propriedades ambientais, entre outras. A tabela 1.1 apresenta algumas fontes de energia ambiente com a sua capacidade de geração de energia.

O presente trabalho foca-se, no estudo da recolha de energia termoelétrica através de transdutores termoelétricos, com a finalidade de alimentar redes de sensores sem fios para monitorização de distribuição de água, evitando perdas de água e melhorando a eficiência do abastecimento.

Tabela 1.1 – Densidade de algumas fontes de recolha de energia ambiente [3]

Fontes de recolha de energia	Densidade gerada pela fonte	Densidade de potência útil
Luz ambiente		
Indoor	$0.1mW/cm^2$	$10 \mu W/cm^2$
Outdoor	$100mW/cm^2$	$10 mW/cm^2$
Vibração/Movimento		
Humana	$0.5m@1Hz$ $1m/s^2@50Hz$	$4\mu W/cm^2$
Industrial	$1m@5Hz$ $10m/s^2@1Hz$	$100\mu W/cm^2$
Energia Térmica		
Humana	$20mW/cm^2$	$30\mu W/cm^2$
Industrial	$100mW/cm^2$	$1 - 10\mu W/cm^2$
RF		
Telemóvel	$0.3\mu W/cm^2$	$0.1\mu W/cm^2$
Wi-Fi	$0.003\mu W/cm^2$	$0.001\mu W/cm^2$

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo principal desenvolver um setup experimental, tendo em vista recolha de energia através de uma célula de Peltier, utilizando a diferença de temperatura entre a água de uma canalização, e a temperatura de um material de mudança de fase que armazena energia solar térmica. A energia elétrica recolhida é uma fonte de energia alternativa que pode vir ser aplicada para alimentar nós em redes de sensores sem fios para gestão e monitorização de água potável.

1.3 Estrutura e organização da dissertação

Esta dissertação é composta por 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo é feita uma introdução geral à temática da dissertação, apresentando o enquadramento, os motivos que levam ao desenvolvimento do trabalho e os principais objetivos desta dissertação.

Capítulo 2 – Procedimento de conversão de energia termoelétrica: no segundo capítulo é apresentado o conceito da recolha de energia termoelétrico. Concretamente analisa-se o funcionamento dos transdutores termoelétricos, com o especial foco nos geradores termoelétricos (TEG). São apresentando os efeitos termoelétricos existentes que nos permite compreensão melhor o funcionamento de sistemas de recolha de energia através de transdutores termoelétricos. Por último, são enumeradas aplicações de algumas

tecnologias cuja fontes de alimentação são geradores termoelétricos com o conceito de *Energy harvesting*.

Capítulo 3 – Plataforma de teste e avaliação, neste capítulo, são apresentadas todas etapas do processo de desenvolvimento do setup experimental utilizado no âmbito desta dissertação. Inicialmente, é feito a descrição e análise às especificações técnicas dos diversos materiais e equipamentos que servem de apoio aos ensaios experimentais realizados. Também são apresentadas as técnicas usadas na medição da temperatura quente e fria nas faces da célula de Peltier. E no final do capítulo, é demonstrada a metodologia aplicada para extração dos valores da tensão de saída, corrente e da potencia produzidas durante os ensaios experimentais realizados.

Capítulo 4 – Módulo de captação de energia termelétrica, terminando o processo da recolha de energia através da célula de Peltier, é necessária regular a energia recolhida. Neste capítulo, é feito a análise do conversor LTC3108 da Linear Technology. Este circuito é responsável pela regulação de energia produzida pelo do transdutor termoelétrico. Além disso, neste capítulo também foi estudado o kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A, usado para a realização dos testes.

Capítulo 5 – Conclusão, neste último capítulo, é feita a apresentação dos resultados alcançados e projetam-se os possíveis trabalhos futuros no seguimento do trabalho realizado.

Capítulo 2

2. Procedimentos de conversão de energia termoelétrica

Neste capítulo é apresentado o conceito da recolha de energia termoelétrica. Concretamente analisa-se o funcionamento dos transdutores termoelétricos, com o especial foco nos geradores termoelétricos (TEG). No final do capítulo, são enumeradas aplicações de algumas tecnologias cuja fontes de alimentação são geradores termoelétricos com o conceito de *Energy harvesting*.

2.1 Efeito termoelétrico

O efeito termoelétrico é um conjunto de fenómenos físicos que consistem na conversão de energia térmica em energia elétrica e vice-versa. Este efeito é reversível, diferente do efeito Joule que, apesar de ser um fenómeno gerado quando uma tensão elétrica é aplicada através de um material resistivo, geralmente não é considerado como um efeito termoelétrico pois, este é irreversível. Os dispositivos termoelétricos geram tensão elétrica quando se encontram a uma diferença de temperatura entre as suas extremidades. O oposto acontece quando uma tensão é aplicada a eles, criam uma diferença de temperatura [4].

O efeito termoelétrico engloba três fenómenos: efeito Seebeck, efeito Peltier e efeito Thomson. Fenómenos estes descobertos por Thomas Seebeck, Jean Peltier e William Thomson. Em muitas referencias, o efeito termoelétrico também é denominado de efeito Peltier-Seebeck, devido as descobertas independentes dos físicos Jean-Charles Athanase Peltier e Thomas Johann Seebeck [4].

2.1.1 Efeito Seebeck

Os fenómenos termoelétricos foram descobertos no início de século XIX. O primeiro foi em 1821 pelo físico alemão Thomas Johann Seebeck. Este observou que, um circuito elétrico fechado, formado por dois condutores metálicos diferentes, desviava a agulha de uma bússola enquanto havia uma diferença de temperatura entre as suas junções. Inicialmente, o Seebeck não reconheceu que havia uma corrente elétrica envolvida, então chamou o fenómeno de efeito termomagnético, pensando que os dois metais se

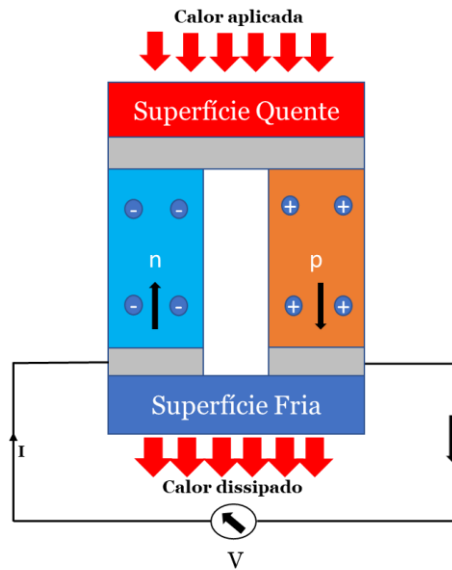


Figura 2.1 – Princípio de funcionamento do efeito Seebeck

tornaram magneticamente polarizados pelo gradiente de temperatura. No entanto, o físico dinamarquês Hans Christian Orsted posteriormente retificou a ideia inicial do Seebeck, e chamou o fenômeno de efeito termoelétrico [5]. O efeito Seebeck consiste na produção de uma diferença de potencial elétrico entre dois materiais semicondutores diferentes, submetidos a uma diferença de temperatura entre as extremidades. Este efeito é caracterizado pelo coeficiente de Seebeck α , descrito matematicamente através da seguinte equação:

$$\alpha = \frac{V}{\Delta T} \quad (2.1)$$

Em que, α é o coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$], V é a diferença de potencial [V] e ΔT a diferença de temperatura entre dois materiais [K].

Na figura 2.1 pode ser observado uma ilustração esquemática do princípio de funcionamento do efeito Seebeck, num circuito fechado, composto por dois tipos de materiais semicondutores diferentes, um do tipo-p e outro do tipo-n, ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Os materiais do tipo-p são transportadores de cargas positivas, enquanto os materiais do tipo-n são transportadores de cargas negativas. Quando são conectadas e os seus terminais submetidos a temperaturas diferentes, cria-se um fluxo contínuo de elétrons que tendem a movimentarem-se para a região com menor concentração de energia, aumentando a

concentração de íons positivos na outra região, ou seja, na superfície com a temperatura mais elevada, os elétrons tendem a tornar-se mais energéticos, provocando assim a deslocação dos mesmo para região com menor concentração de energia. Desta forma, o coeficiente de Seebeck pode ser positivo ou negativo, dependendo do sentido no qual se movimentam os elétrons. No material do tipo-p o coeficiente de Seebeck é positivo, os elétrons deslocam-se da superfície quente para a superfície fria. No material tipo-n acontece o contrário, os elétrons movem-se da região fria para região quente, o coeficiente de Seebeck neste caso é negativo [6].

A tensão gerada pelo efeito Seebeck é diretamente proporcional à variação de temperatura entre as superfícies quente e fria, expresso pela equação:

$$V = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot (T_h - T_c) \quad (2.2)$$

Onde, $(\alpha_p - \alpha_n)$ é a diferença do coeficiente de Seebeck dos semicondutores do tipo-p e do tipo-n, T_h é temperatura da superfície quente e T_c é temperatura da superfície fria.

Os termopares são o exemplo mais comum de aplicação do efeito de Seebeck. Os termopares são dispositivos formados por dois materiais condutores diferentes, ligados em junções, que geram uma diferença de potencial em função da diferença de temperaturas entre as suas junções. Estes dispositivos são os sensores de temperaturas mais usados nas industriais e não só, pois praticamente cobrem uma ampla gama de leitura de temperatura.

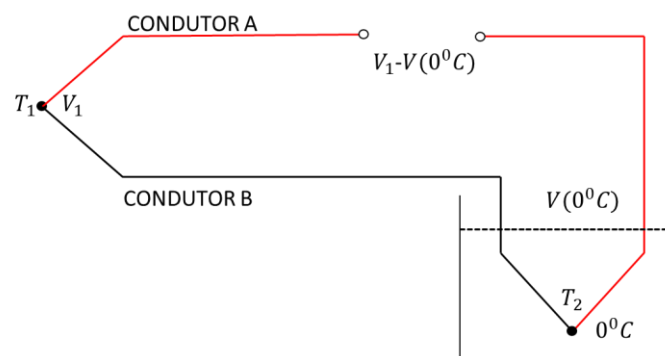


Figura 2.2 – Representação de um termopar

Os termopares funcionam através do circuito aberto. Para que seja realizado a medição de temperatura, é necessário que uma das junções seja mantida a uma temperatura constante com valor muito baixo, e a outra junção colocada onde a temperatura precisa

ser medida. A junção com temperatura constante é considerada como a junção de referência.

2.1.2 Efeito Peltier

Em 1834, físico francês Jean-Charles Athanase Peltier, descobriu o efeito oposto ao efeito Seebeck. O Peltier ao analisar o efeito Seebeck, observou que quando uma corrente elétrica I flui num circuito formado por dois materiais condutores diferentes, energia térmica é absorvida numa das extremidade e libertada na outra [6].

Pela figura 2.3 pode-se observar de forma esquemática o princípio de funcionamento deste efeito. Num circuito fechado, formado por junção de dois materiais semicondutores distintos, do tipo-p e do tipo-n, quando percorrido por uma corrente elétrica I , cria uma energia térmica que é absorvida numa da extremidade e dissipada na outra. A região por onde esta energia é absorvida ou dissipada depende do sentido da corrente I que percorre o circuito. Podemos notar pelas imagens da figura 2.3 que, no material semicondutor do tipo-p, o calor é absorvido na extremidade do terminal positivo e dissipado na extremidade do terminal negativo da fonte, enquanto no material tipo-n acontece o contrário, o calor é absorvido na extremidade do terminal negativo e dissipado na extremidade do terminal positivo. Desta forma, na representação da figura 2.2 a), a corrente elétrica I flui de material semicondutor do tipo-p para o tipo-n, os elétrons deslocam-se de um nível de baixa energia para outro nível com maior concentração e o calor é absorvido na superfície fria, funcionando como refrigerador, na imagem b) ocorre o processo inverso, ao inverter o sentido da corrente I , a energia térmica é dissipada na superfície quente, funcionando como aquecedor.

O efeito Peltier é quantificado pelo coeficiente de Peltier π , expresso como,

$$\pi = \frac{Q_p}{I} \quad (2.3)$$

onde, Q_p é a taxa de fluxo de calor do efeito Peltier [W] e I a corrente elétrica [A].

Num circuito formado por materiais semicondutores do tipo-p e do tipo-n, o coeficiente de Peltier pode ser expresso pela seguinte equação:

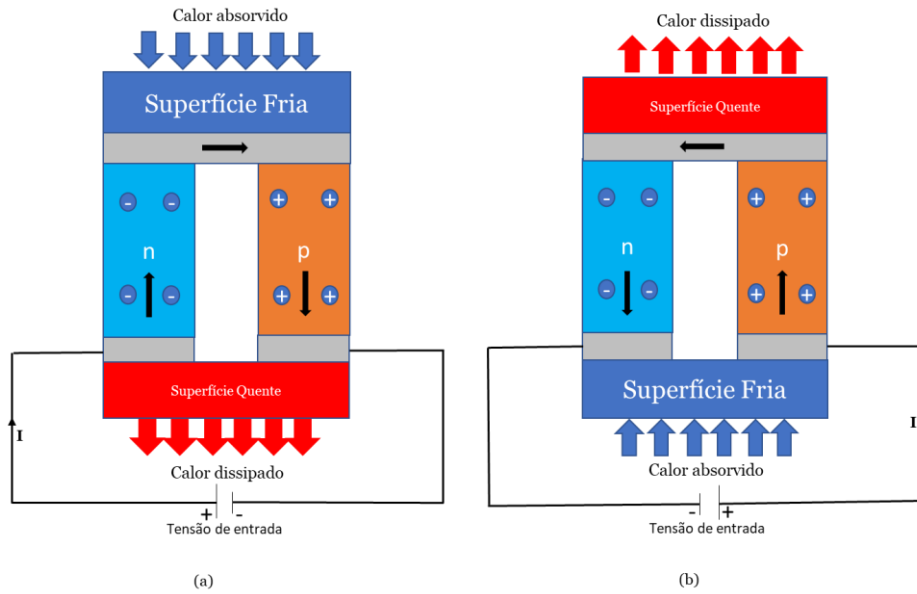


Figura 2.3 – Princípio de funcionamento do efeito Peltier. a) modo de refrigeração b) modo de aquecimento.

$$\pi = \pi_p - \pi_n \quad (2.4)$$

Em que, π_p é o coeficiente de Peltier do material semiconductor do tipo-p [V] e π_n o coeficiente de Peltier do material do tipo-n [V].

2.1.3 Efeito Thomson

O físico William Thomson, também conhecido como Lord Kelvin, em 1851 estabeleceu as relações termodinâmicas entre os efeitos Seebeck e Peltier. Segundo o Thomson, num material condutor homogêneo, percorrido por uma corrente elétrica, para além do efeito joule, existe libertação ou absorção de calor ao longo do condutor que, é proporcional a intensidade da corrente sob um gradiente térmico [5].

O Thomson relacionou os coeficientes Seebeck e Peltier, chegando à equação:

$$\pi = \alpha \times T \quad (2.5)$$

Onde: π é o coeficiente de Peltier [V]; α é o coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$] e T a temperatura absoluta do sistema [K].

2.2 Materiais Termoelétricos

Os materiais termoelétricos possuem alto potencial de transformar calor em energia elétrica e vice-versa. É extremamente necessário o estudo ou a identificação dos materiais termoelétricos, pois assim, temos a noção dos materiais com melhores propriedades a serem usados nas diferentes aplicações.

A eficiência e a qualidade dos materiais termoelétricos são caracterizadas pela figura de mérito, representada usualmente pela letra Z e medido em K^{-1} . Esta relaciona três tipos grandezas: propriedade elétrica, propriedade térmica e o coeficiente do Seebeck dos materiais. Matematicamente a figura de mérito é expressa pela seguinte equação:

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{k} \quad (2.6)$$

Onde, α é o coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V}/\text{K}$], σ é a condutividade elétrica [$\Omega\cdot\text{m}$], k é a condutividade térmica total [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]. Este último é composto por condutividade térmica dos portadores da carga (k_c) e condutividade térmica da rede (k_l). O produto $\alpha^2 \cdot \sigma$ normalmente é chamado de fator de potência, a chave para determinar o desempenho de um material termoelétrico nos módulos termoelétricos.

Muitas vezes, a figura de mérito é representada de forma adimensional, ZT , definido como:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{k} T \quad (2.7)$$

Onde, T a temperatura absoluta [K].

Os materiais mais usados na construção de conversores termoelétricos são aqueles que possuem um alto valor de figura de mérito, uma vez que, o alto valor de ZT implica a alta eficiência que os materiais termoelétricos possuem de converter a energia térmica para elétrica e vice-versa. Obter a alta eficiência dos materiais termoelétricos exige a maximização do ZT . Para isto, é preciso um valor elevado do coeficiente de Seebeck e da condutividade elétrica, combinado com uma baixa condutividade térmica, como se pode verificar nas equações (2.6) e (2.7). No entanto, a interdependência destes parâmetros torna muito desafiador o aumento da figura de mérito, na maioria dos materiais, a elevada condutividade elétrica é sempre acompanhada por uma elevada condutividade térmica e vice-versa[7].

Na figura 2.4–b) é ilustrado a figura de mérito de alguns materiais com características termoelétricas interessantes em função da temperatura. Como podemos verificar, há alguns materiais termoelétricos com figura de mérito acima de 1. Na gama de temperatura do ambiente, os materiais semicondutores que contêm telúrio de bismuto (Bi_xTe_y) são os que apresentam maior valor de figura do mérito ($ZT \approx 1$), sendo estes os mais indicados nos conversores termoelétricos.

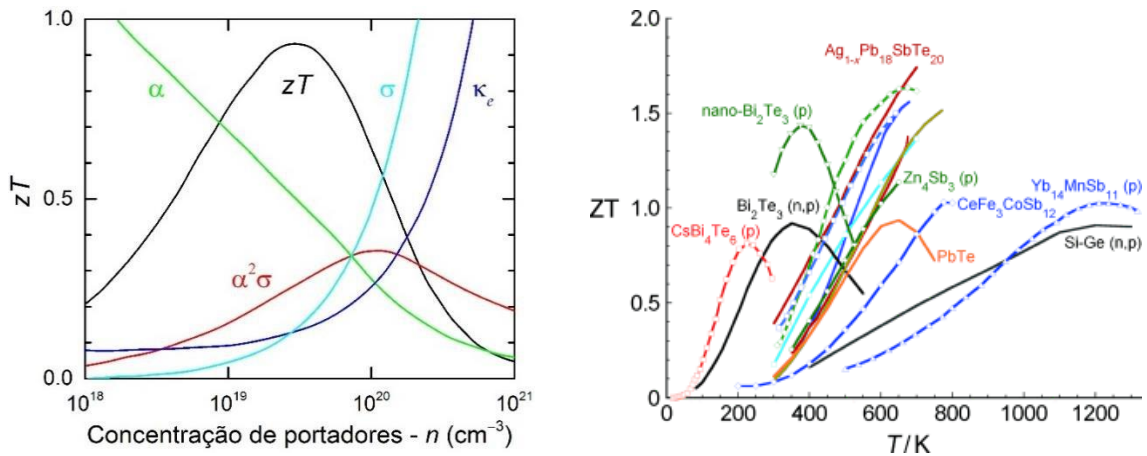


Figura 2.4 – Gráficos representativos de figura de mérito (ZT). a) Representação das características dos materiais termoelétrico, figura de mérito (ZT), coeficiente de Seebeck e condutividade térmica em relação à concentração de elétrons de transporte. B) Figura de mérito (ZT) de diferentes materiais termoelétricos em função de temperatura [7].

2.3 Módulos termoelétricos

Os módulos termoelétricos (TEM), também designados por conversores termoelétricos, são dispositivos de estado sólido, sem partes móveis, que usam os efeitos termoelétricos para bombear calor, no caso dos refrigeradores termoelétricos (TEC), ou para gerar energia elétrica, no caso dos geradores termoelétricos (TEG). Estes módulos são compostos por vários pares de materiais termoelétricos semicondutores, do tipo-p e do tipo-n, como se pode constatar na figura 2.5. Estes materiais são ligados eletricamente em série, e termicamente em paralelo. A ligação em série é feita através de placas condutores metálicos de cobre, e em paralelo por meio de duas placas de cerâmica planas [6].

Os módulos termoelétricos abrangem uma ampla variedade de aplicações em diversas áreas desde equipamentos militares, aeroespaciais, produtos industriais, automobilísticas, instrumentais, telecomunicações, equipamentos medicinais, entre outros [8].

Estes dispositivos possuem uma série de características vantajosas, comparando com outras tecnologias. Características como [8], [9]:

- Ausência de ruídos elétricos e vibrações mecânicas;
- Ausência de partes moveis;
- Pequeno tamanho e peso;
- Múltiplas funcionalidades;
- Grande controlo de temperatura;
- Alta fiabilidade;
- Durabilidade;
- Baixo custo de manutenção;
- Podem funcionar em ambientes muito severos, muito sensíveis ou muito pequeno para refrigeração convencional;
- Podem ser implantando dentro de outros objetos, como no corpo humano, etc.

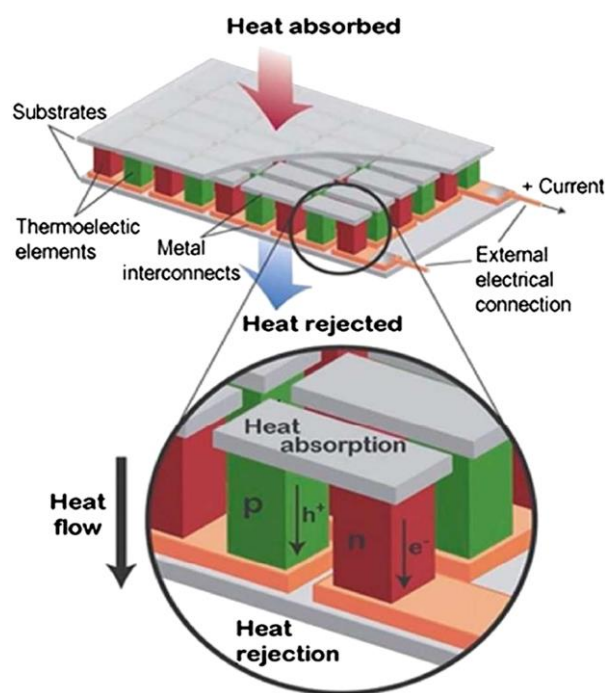


Figura 2.5 – Módulo termoelétrico.

2.3.1 Refrigeradores termoelétricos

Os refrigeradores termoelétricos (TEC), fazem o uso do efeito Peltier para converter energia elétrica num gradiente de temperatura. Estes dispositivos são constituídos por várias junções de materiais semicondutores, do tipo-p e do tipo-n, ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo.

Um sistema de refrigerador termoelétrico, geralmente é composto por um circuito elétrico, com uma fonte de energia DC que fornece uma corrente contínua através do circuito, um ou mais dissipadores de calor, uma ou mais fontes de calor e uma unidade de controlo [8].

O desempenho de um refrigerador termoelétrico é caracterizado por parâmetros como a capacidade de refrigeração e o coeficiente de desempenho [10]. Estes parâmetros são expressos matematicamente pelas equações (2.8) e (2.9):

$$Q_c = \alpha_{pn} T_c I - \frac{1}{2} I^2 R_{TEC} - K_{TEG} (T_h - T_c) \quad (2.8)$$

em que, Q_c capacidade de refrigeração, α_{pn} é o coeficiente de Seebeck dos materiais tipo-p e tipo-n [V/K], T_c é a temperatura na superfície fria do TEC [K], T_h é a temperatura na superfície quente [K], I é a corrente elétrica do circuito [A], R_{TEC} é a resistência interna do TEC [Ω] e K_{TEG} é a resistividade térmica interna [W/mK].

$$COP = \frac{Q_c}{P_e} \quad (2.9)$$

onde, COP é o coeficiente de desempenho e P_e a potencia de entrada, dada pela equação:

$$P_e = \alpha_{pn} (T_h - T_c) I + I^2 R_{TEC} \quad (2.10)$$

2.3.2 Geradores termoelétricos

Os geradores termoelétricos (TEG) são dispositivos termoelétricos que têm a finalidade de converter energia térmica em energia elétrica, segundo o efeito Seebeck. À semelhança dos refrigeradores termoelétricos, os TEG são formados por junções de vários pares de materiais semicondutores, do tipo-p e do tipo-n, ligados eletricamente em série, de modo a aumentar as voltagens elétricas geradas e termicamente em paralelo, para aumentar a condutividade térmica.

Uma fonte de calor externa aquece a junção quente, provocando um distúrbio de eletrões nos matérias semicondutores do tipo-p e do tipo-n. Estes eletrões deslocam-se para o lado frio. O calor flui através o circuito e é dissipado na junção fria através de um dissipador de calor. Assim sendo, uma diferença de potencial é gerada desde que a diferença de potencia seja mantida em todo módulo.

A diferença de potencial gerada no circuito aberto, é igual a soma das tensões obtida em cada N pares de materiais semicondutores constituintes do módulo, ligados em série.

$$V_0 = N.(\alpha_p - \alpha_n).\Delta T \quad (2.11)$$

onde N corresponde ao número pares de matérias semicondutores, $(\alpha_p - \alpha_n)$ é o coeficiente de Seebeck dos materiais tipo-p e tipo-n, e ΔT a variação de temperatura entre o lado quente e o lado frio.

A quantidade de calor absorvida na superfície quente (Q_h) e dissipada na superfície fria (Q_c) do módulo podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$Q_h = N[(\alpha_p - \alpha_n)T_h I - \frac{1}{2}I^2 R_{TEG} + K_{TEG}(T_h - T_c)] \quad (2.12)$$

e

$$Q_c = N[(\alpha_p - \alpha_n)T_c I + \frac{1}{2}I^2 R_{TEG} + K_{TEG}(T_h - T_c)] \quad (2.13)$$

Onde $(\alpha_p - \alpha_n)$ é o coeficiente de Seebeck dos materiais tipo-p e tipo-n [V/K], T_h é a temperatura na superfície quente do TEG [K], T_c é a temperatura na superfície fria [K], I é a corrente elétrica do circuito [A], R_{TEG} é a resistência interna do TEG [Ω] e K_{TEG} é a resistividade térmica interna [W/mK].

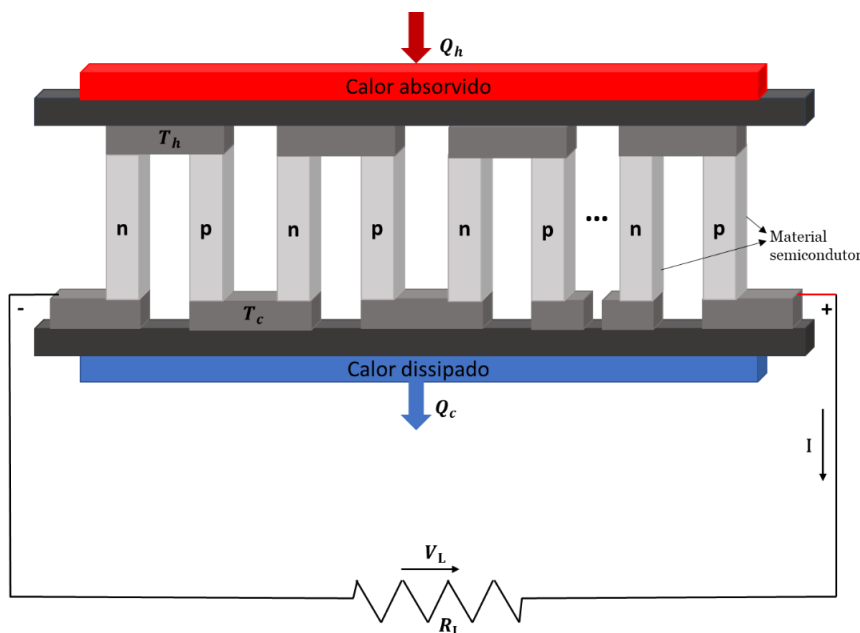


Figura 2.6 – Representação esquemática de um gerador termoeletrico.

A resistividade térmica interna equivalente a todos os N pares de materiais semicondutores é dada pela equação:

$$K_{TEG} = 2N\lambda \frac{A}{l} \quad (2.14)$$

Os parâmetros λ , A e l , representam respetivamente, a condutividade térmica, a área da secção transversal e o comprimento de cada material semiconductor.

Por outro lado, a resistência interna do gerador termoelétrico é expressa como:

$$R_{TEG} = \frac{2N\rho l}{A} \quad (2.15)$$

Onde ρ é a resistividade elétrica.

Na representação esquemática do módulo termoelétrico, ilustrado na figura 2.6, podemos observar a conexão de uma carga R_L ao módulo. Com base a isto, surge uma corrente elétrica I que flui pela carga, gerando uma tensão de saída nos terminais da carga R_L . A corrente elétrica I circula no circuito pode ser calculada pela equação:

$$I = \frac{V_O}{R_{TEG} + R_L} \quad (2.16)$$

A tensão gerada nos terminais da carga R_L é obtida aplicando as leis de Kirchhoff, resultando nas seguintes equações:

$$-V_O + V_{TEG} + V_L = 0 \quad (2.17)$$

$$V_L = V_O - V_{TEG} \quad (2.18)$$

$$V_L = V_O + R_{TEG}I = V_O \left(\frac{R_L}{R_{TEG} + R_L} \right) \quad (2.19)$$

A potência elétrica produzida pelo TEG é calculada pela expressão:

$$P = N[(\alpha_p - \alpha_n)\Delta T - I^2 R_L] \quad (2.20)$$

A potência elétrica gerada na carga R_L é dada pela equação:

$$P_L = I^2 R_L \quad (2.21)$$

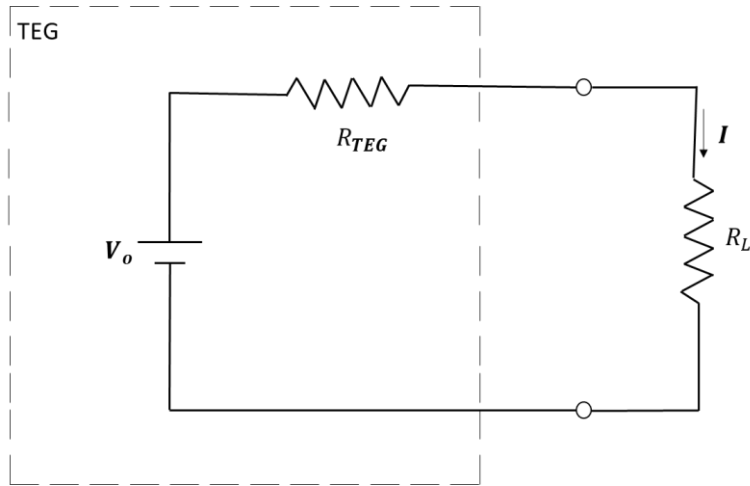


Figura 2.7 – Circuito elétrico equivalente a um gerador termoelétrico.

Com base as equações anteriores, é possível calcular a potência máxima entregue à carga P_{max} , obtida quando a resistência interna do gerador R_{TEG} é igual à resistência de carga R_L :

$$P_{max} = \frac{V_0^2}{4R_{TEG}} = \frac{(N \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T)^2}{4R_{TEG}} \quad (2.22)$$

Dado a equação (2.22), pode-se obter a corrente máxima pela expressão:

$$I_{max} = \frac{V_0}{2R_{TEG}} \quad (2.23)$$

A eficiência de um gerador termoelétrico é dada pela razão entre a potência elétrica produzida na saída do gerador (P) e a taxa de transferência de calor absorvida na superfície quente (Q_h). Substituindo as equações fica:

$$\eta = \frac{P}{Q_h} = \frac{NR_{TEG}\Delta T(\alpha_p - \alpha_n)^2}{K(NR_{TEG}R_L)^2 + N(T_h R_L + NR_{TEG}T)(\alpha_p - \alpha_n)^2} \quad (2.24)$$

Onde T é a temperatura média das superfícies quente e fria [11].

$$T = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (2.25)$$

2.4 Aplicações de geradores termoelétricos

Os módulos termoelétricos, como já referido anteriormente, são dispositivos que usam efeitos termoelétricos para resfriar ou aquecer os objetos, e para produzir energia elétrica. São conversores de energia muito confiáveis e não produzem ruídos ou vibrações no seu funcionamento, dado que não têm partes mecânicas móveis [8].

Estes dispositivos têm encontrado diversas aplicações, devido as inúmeras vantagens que apresentam comparando com outras tecnologias. Em seguida são apresentados de uma forma resumida algumas dessas aplicações.

2.4.1 Aplicações nos dispositivos wearable

Os módulos termoelétricos precisam apenas de pequenas quantidades de calor para produzir energia elétrica. O calor pode ser proveniente de várias fontes, como o corpo humano, plantas, automóveis, entre outras. Várias técnicas têm sido desenvolvidas de modo que os módulos termoelétricos sejam capazes de usar as pequenas quantidades de calor corporal para aplicações de baixa potência, como relógios e alguns equipamentos médicos.

O corpo humano produz energia a partir de várias atividades diárias como, caminhar, correr, nadar. Essas energias podem ser colhidas através de transdutores para produzir energia elétrica para pequenos dispositivos [12].

Os relógios de pulso com a tecnologia termoelétrica convertem o calor corporal em energia elétrica, através do efeito Seebeck. Estes dispositivos usam a diferença de temperatura entre o corpo humano e o ambiente para produzir energia. O relógio Seiko Thermic, fabricado em 1998, é considerado a primeira aplicação de recolha de energia térmica a um produto de consumo. O relógio em operação produz uma potência elétrica de $22\mu W$ com uma diferença de temperatura de 1 K entre o ambiente e o pulso, a tensão do circuito aberto é de 300mV. A energia produzida serve também para carregar uma bateria de 4,5 mAh. Em 1999, a Citizen Watch desenvolveu um relógio de modelo Eco-Drive Thermo, usando um gerador termoelétrico que produzia uma tensão de 640mV com a potencia de $13,8\mu W$, para uma diferença de temperatura de $1^{\circ}C$ [13].



Figura 2.8 – a) Modelo de relógio Eco-Drive Thermo; b) Relógio Seiko Thermic [13]

O centro para Sistemas Autoalimentados Avançados de Sensores e Tecnologias Integrados (ASSIST), financiado pela National Science Foundation (NSF), nos últimos anos tem desenvolvido sistemas de ponta para aplicações de alto valor, desde 2012 ASSIST tem estado focado na produção e avaliação de wearable de monitoramento de saúde autoalimentado com maior conforto do usuário e comunicação entre os dispositivos por meio de IoT [12].

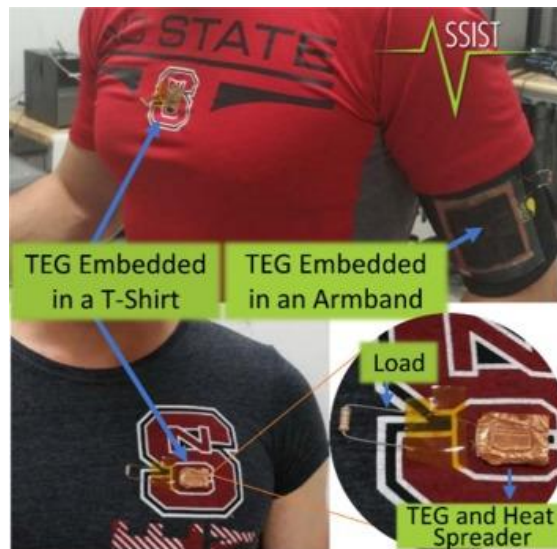


Figura 2.9 – Camisola e braçadeira com módulos termoelétricos embutidos, desenvolvidas no centro ASSIST [12]

Na figura 2.10 é apresentado um sistema de eletroencefalografia de dois canais (EEG), alimentado por geradores termoelétricos. O dispositivo é um sistema de monitoramento sem fio, autónomo, constituída por 10 unidades de TEG, à 22°C de temperatura ambiente, produz uma potência de 2,5Mw, resultando numa densidade de $30\mu W/cm^2$ para uma tensão superior a 4V quando posicionado no pulso [13].



Figura 2.10 – Sistema de monitoramento EEG sem fio alimentado por TEG[13].

O grupo de Bert Gyselinckx desenvolveu um gerador termoelétrico comercial para ser usado numa rede de sensores corporal. O gerador termoelétrico é formado por material de telúrio de bismuto (BiTe). Normalmente o dispositivo colocado no local mais conveniente do corpo, de modo a obter o máximo calor corporal. Inicialmente a potência média armazenada na bateria do dispositivo é de $100\mu\text{W}$ com uma tensão de saída de 2.4V [13].

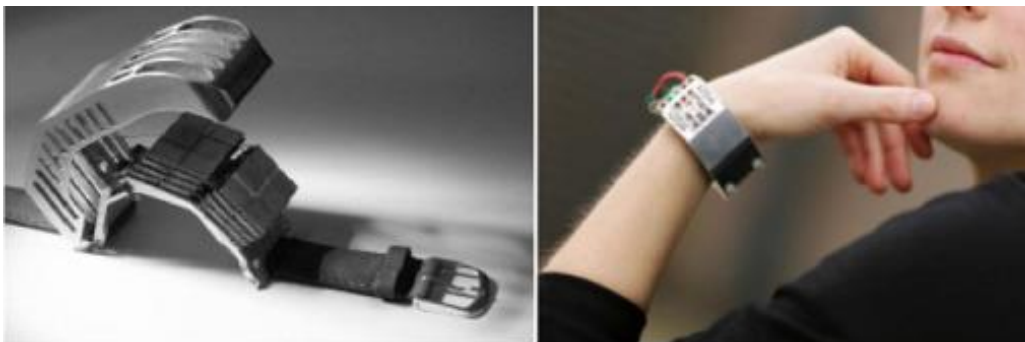


Figura 2.11 – Protótipo de gerador de microenergia térmica.

Capítulo 3

3. Plataforma de teste e avaliação

Neste capítulo, são apresentadas todas as etapas do processo de desenvolvimento do setup experimental utilizado no âmbito desta dissertação.

Numa primeira fase, é feita a descrição e análise das especificações técnicas dos diversos materiais e equipamentos que servem de apoio aos ensaios experimentais realizados. Também são apresentadas as técnicas usadas na medição da temperatura quente e fria nas faces da célula de Peltier. No final do capítulo, são apresentadas as metodologias aplicadas para extração dos valores da tensão de saída, corrente elétrica e da potência produzida pelo transdutor termoeletrico.

3.1 Procedimento experimental

Para a realização dos procedimentos experimentais, foi desenvolvido uma plataforma de teste ilustrada na Figura 3.1. No modelo, são apresentados os diversos equipamentos utilizados neste trabalho e a forma como eles são interligados. Os dispositivos são nomeadamente: a célula de Peltier, os equipamentos responsáveis pelo aquecimento e melhoramento do gradiente de temperatura, os responsáveis pela medição de temperatura: 2 termopares e ThermoBooster Pack acoplado ao Lanch Pad, os equipamentos responsáveis pela medição da energia gerada: sensor de corrente INA219 e microcontrolador mbed. Também foi usado software de programação node-red para monitor os dados.

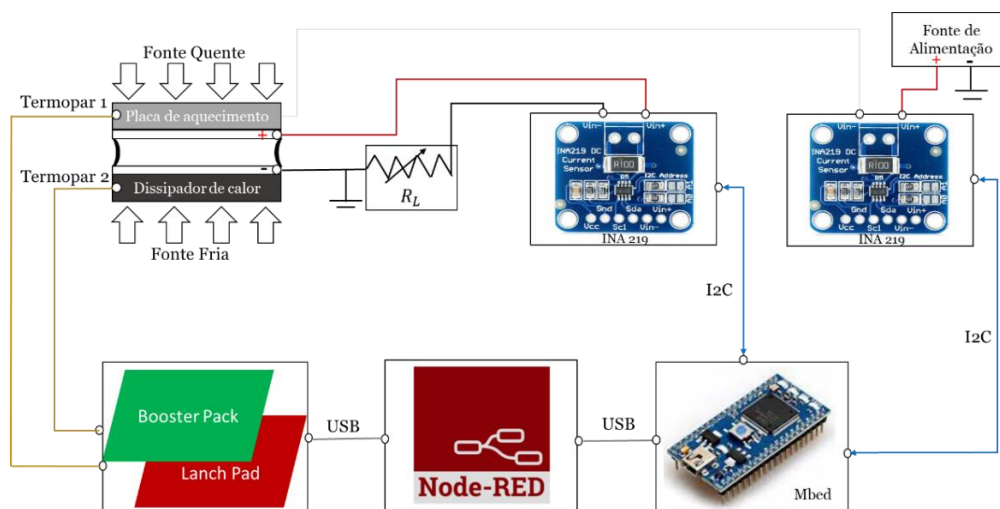


Figura 3.1 – Representação por blocos do setup experimental desenvolvido.

3.1.1 Interface de usuário com Node-red

Durantes os testes experimentais, foi usado um computador de marca Acer, e node-red como software de interface.

O Node-RED é um software de programação visual baseada em fluxo de código aberto, desenvolvida para criação de aplicativos IoT, mas também serve para conectar dispositivos de hardware, interfaces APIs (Application Programming Interfaces) e outros serviços web de maneira mais inteligente. O Node- RED é um open source, desenvolvida pela IBM Emerging Technolog, a sua programação é baseada em JavaScript, construída na plataforma Node.js, que apresenta um editor de fluxo baseado em navegador web, tornando fácil a conexão de blocos de códigos predefinidos, para executar uma determinada tarefa. Os fluxos criados no Node-RED são armazenados usando JSON (JavaScript Object Notation), que pode ser facilmente importado e exportado para compartilhamento com outros utilizadores [14].

No editor de Node-red apresentado na figura 3.2, pode-se observar os diversos componentes que compõem o software de programação, nomeadamente: Painel de nós, editor de fluxo, painel de informações e debug, menu de deploy, menu de aplicação.

Como referido anteriormente, o Node-red fornece um editor de fluxo baseado num browser que facilita a conexão dos fluxos utilizando os diversos nós disponível no painel. No Node-red é possível trabalhar com vários editores de fluxos abertos ao mesmo tempo.

Os nós são os blocos de construção de fluxos em Node-RED. O painel de nós localizado a esquerda do editor de fluxos, é organizado de acordo com as suas funções e APIs. Entre os diversos nós que constituem este painel, podem ser destacados 3 categorias: nós de entrada de dados, nós de processamento e nós de saída dados. Cada um tem uma funcionalidade bem definida.

- Nós de entrada: Os nós de entrada leem ou recebem mensagens vindos da rede.
- Nós de processamento: Estes nós processam mensagens recebidos de nós de entrada e enviam o resultado para nós de saída.
- Nós de saída: São os nós de saída que enviam mensagens para rede de acordo com os dados recebidos.

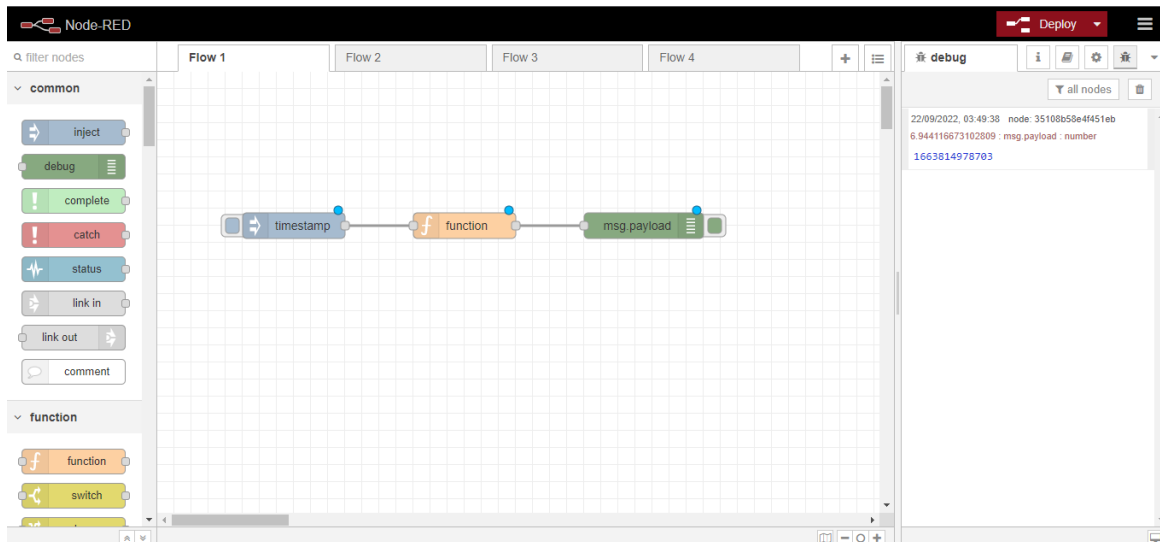


Figura 3.2 – O editor node-red.

3.1.2 MBED LPC1758

Os microcontroladores mbed são placas de desenvolvimento de microcontroladores de fácil programação. O mbed LPC1758 em particular possui as seguintes características:

- Processador ARM Cortex-M3 de 32 bits;
- Frequência de clock de 96 MHz;
- Memória RAM de 32 KB e memória Flash de 512 KB;
- Possui 6 canais ADC e 1 canal DAC
- Protocolos de interfaces: Ethernet, SPI (Serial Peripheral Interface), I2C (Inter-Integrated Circuit), UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), CAN (Controller Area Network), PWM (Pulse Width Modulation), USB (Universal Serial Bus); e outras interfaces de E/S.

Pelas características descritas, pode-se notar que mbed LPC1758 é um microcontrolador muito potente e com uma grande conectividade.

A programação do microcontrolador mbed LPC1758 é baseada em linguagem C/C++. Usa IDE online, um editor e compilador de código online.

Na figura 3.3 são ilustrados os 40 pinos de conexão disponíveis neste microcontrolador.

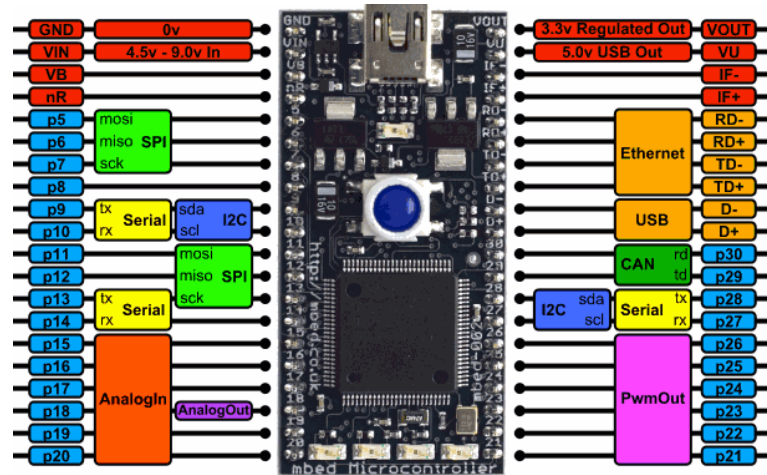


Figura 3.3 – Distribuição de pinos disponíveis no Mbed LPC1768 [15].

```

#include "mbed.h"
#include "INA219.hpp"

Serial pc(USBTX, USBRX);
DigitalOut led1(LED1);

// Get this to work with the INA219 Breakout from Adafruit
INA219 ina219(p28, p27, 0x40, 400000, RES_10BITS);

Ticker measure;
float refresh_rate = 0.2;

void show_currentpowervoltage()
{
    float current_ma = ina219.read_current_mA();
    float power_mw = ina219.read_power_mW();
    float bus_voltage_mv = ina219.read_bus_voltage();

    pc.printf("%f:Corrente %f:Potencia %f:Vshunt %f:Vbus ", current_ma, power_mw, shunt_voltage_mv,
    bus_voltage_mv);

    led1 = !led1;
}

int main(void)
{
    pc.baud(9600);

    float refresh_interval = 1/refresh_rate;
    measure.attach(&show_currentpowervoltage, refresh_interval);

    while (1) {
    }
}

```

Figura 3.4 – Código usado para a medição parâmetros elétricos (Corrente elétrica, tensão de saída e potência).

3.1.3 INA219

INA219 é um sensor de monitoramento digital de corrente e tensão DC, com uma interface compatível com I2C ou SMBUS, e possui 16 registros programáveis que permitem a configuração flexível para resolução de medição dos dados. O dispositivo conta com uma resistência shunt de 100mΩ, realiza leituras na faixa de 0 até 26V DC, e a corrente máxima permitida é de 3,2A. Para sua alimentação, o dispositivo usa uma fonte de 3 ou 5V.

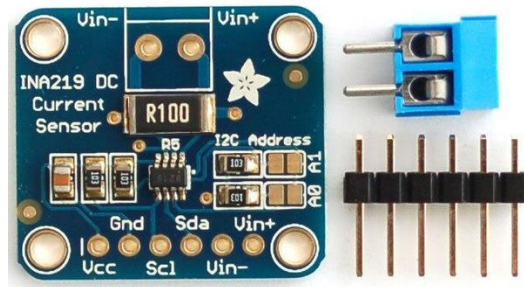


Figura 3.5 – Sensor de monitoramento Ina219.

3.2 Medição de temperatura quente e fria

Para gerar as diferentes condições de temperatura entre as superfícies do módulo termoeletrico, foi utilizada uma placa de aquecimento de alumínio e um dissipador de calor para melhorar o gradiente de temperatura. Foram colocados dois termopares em ambas faces do transdutor termoeletrico para monitorar as temperaturas nas superfícies quente e fria. Os termopares estão ligados ao circuito boosterPack acoplado ao Lanch Pad que permite a ligação ao computador de maneira a que seja feita a leitura e o armazenamento dos dados da temperatura, através do software node-red.

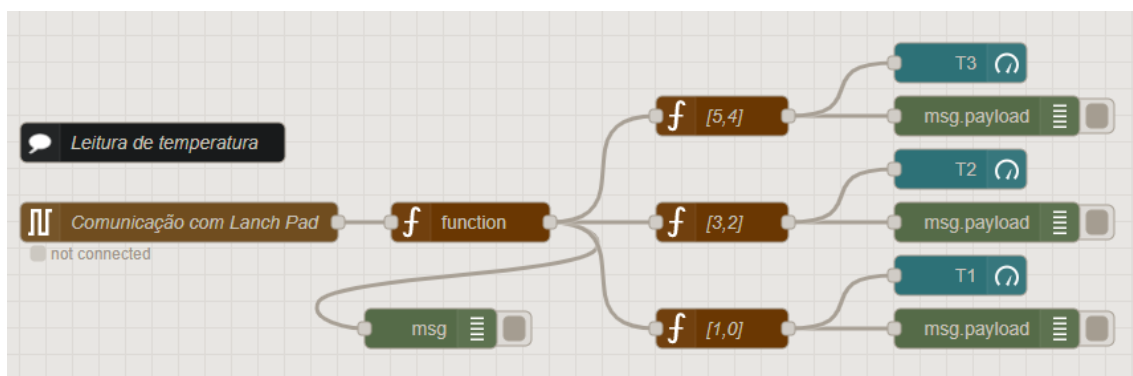


Figura 3.6 – Fluxo usado na medição de temperatura.

Setup	On Start	On Message	On Stop
		<pre>1 msg.payload=(msg.payload[1]*256) + (msg.payload[2]) 2 return msg;</pre>	
		<pre>1 msg.payload=(msg.payload[3])*256 + (msg.payload[4]) 2 return msg;</pre>	
		<pre>1 msg.payload=(msg.payload[5])*256 + (msg.payload[6]) 2 return msg;</pre>	

Figura 3.7 – Código para separação dos dados da temperatura.

3.3 Medição de energia gerada

Para os efeitos de medição de energia gerada pelo módulo termoeletrico, foi utilizado o sensor de corrente INA219 junto com o microcontrolador mbed, ligado ao computador para o monitoramento da corrente elétrica, tensão de saída e a potência produzida pelo módulo.

Com intuito de explorar o máximo do processo de conversão de energia termoeletrica usando o efeito Seebeck, foram realizados vários testes experimentais com diferentes valores de temperatura na superfície quente do módulo. Além da temperatura, variou-se também o valor da carga adicionado no circuito, neste caso o potenciômetro. Iniciou-se por colocar o potenciômetro no seu valor mínimo. E ao decorrer dos ensaios, o valor da carga foi aumentado gradualmente até chegar no máximo.

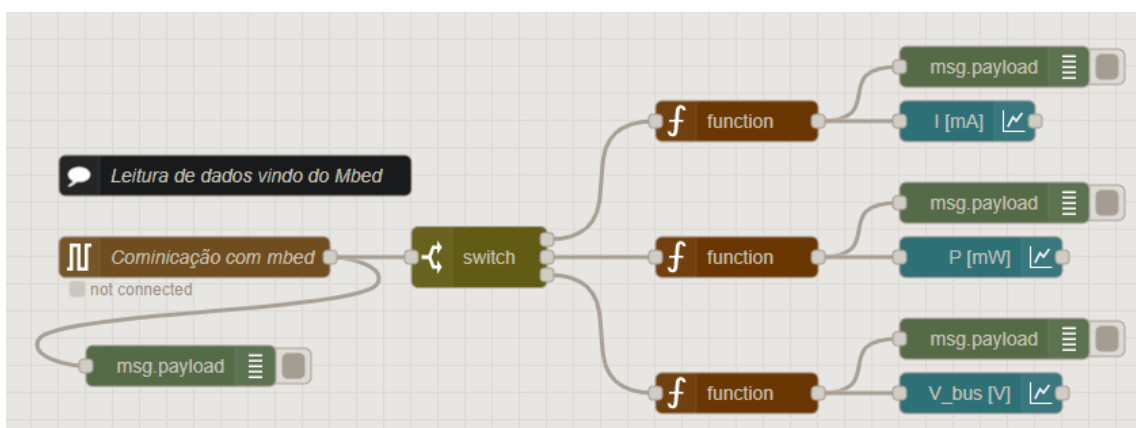


Figura 3.8 – Fluxos usados para leitura da corrente, tensão de saída e potência proveniente do mbed.

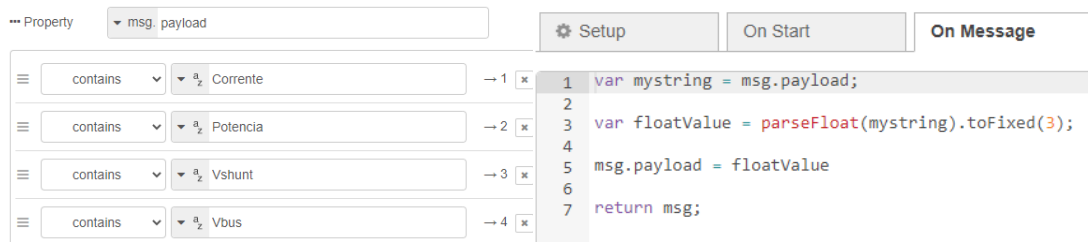


Figura 3.9 – Código usado no node-red para separ os dados recebidos do mbed.

Capítulo 4

4. Módulo de captação de energia termoelétrica

Neste capítulo é feita a análise do circuito eletrônico de regulação da tensão produzida pelo do transdutor termoelétrico estudado no capítulo anterior. O objetivo é transformar a energia proveniente da célula de Peltier, em energia utilizável, de modo a alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo, como nós sensores inteligentes.

Neste trabalho, foi escolhido o conversor o LTC3108 da fabricante Linear Technology, para recolher a energia produzida pela célula de Peltier e posteriormente efetuar a sua regulação. Para a realização dos testes, foi usado o kit Energy Harvesting Multi-Source Demo Board with Transducers DC2080A.

4.1 Introdução ao kit Energy Harvesting Multi-source Demo Board with Transducers DC2080A

O DC2080A é um kit de desenvolvimento de recolha de energia versátil, fabricada pela Analog Devices. É destinado a projetos relacionados a *Energy Harvesting*. A placa possui 4 circuitos de regulação de energia independentes e selecionáveis individualmente:

- LTC3588-1: Geradores piezoelétricos;
- LTC3108: Geradores térmicos;
- LTC3105: Queda de tensão no diodo, 4-20 mA loop;
- LTC3459: Gerador solar.

O kit da recolha de energia DC2080A, possui dois transdutores de energia integrados: um painel fotovoltaico e outro transdutor termoelétricos (TEG). A placa contém vários jumpers que permitem com que o dispositivo seja configurado de várias maneiras.

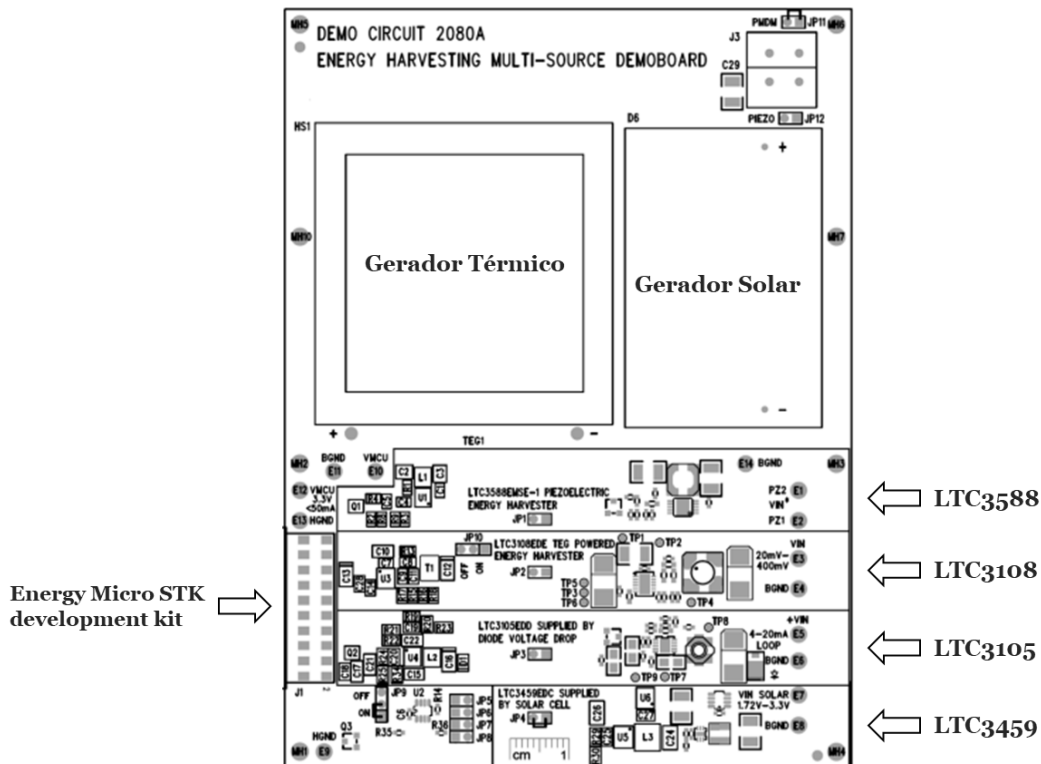


Figura 4.1 –Placa de desenvolvimento DC2080A.

4.1.1 Conversor LTC3108

O LTC3108 é um conversor DC/DC step-up desenvolvida pela Linear Technology. Este conversor é altamente integrado, ideal para gerir energia proveniente de fontes de tensão de baixa eficiência, como no caso dos geradores termoelétricos, impulsionando-a para uma tensão maior na saída.

O conversor LTC3108 foi projetado com intuito de gerenciar o carregamento e regulação de saídas múltiplas em um sistema no qual o consumo de energia média é muito baixo, mas que necessita de pulsos periódicos de maior consumo. Isso é o típico de aplicações redes sensores sem fio, onde o consumo de energia é extremamente baixo na maioria das vezes, exceto quando os circuitos são alimentados para fazer medições e transmitir dados.

A configuração dos pinos do conversor LTC3108 é ilustrada na Figura 4.1.

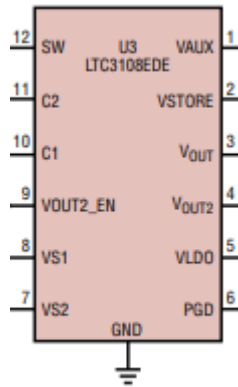


Tabela 4.1 – Os pinos do conversor LTC3108.

- VAUX (Pin 1): Saída do retificador interno do circuito.
- VSTORE (Pin 2): Saída para condensador de armazenamento ou bateria.
- V_{OUT} (Pin 3): Saída principal do conversor, selecionável através da combinação dos pinos VS1 e VS2, como mostra a Tabela 4.1.
- V_{OUT2} (Pin 4): Saída comutada do conversor.
- VLDO (Pin 5): Low Dropout Linear, regulador linear de tensão. O LDO fornece a saída regulada de 2,2V.
- PGD (Pin 6): Power good output, monitora a saída principal V_{OUT} . A saída PGD fica alto quando o V_{OUT} atinge 7,5% do seu valor programado. Contrariamente, PGD fica baixo quando o V_{OUT} atinge 9% do seu valor programado.
- VS2 (Pin 7): Pino de seleção de saída principal (V_{OUT}).
- VS1 (Pin 8): Pino de seleção de saída principal (V_{OUT}).
- V_{OUT2_EN} (Pin 9): Habilita a saída opcional V_{OUT2} .
- C1 (Pin 10): Condensador C1.
- C2 (Pin 11): Condensador C2.
- SW (Pin 12): Switching Regulator.
- GND (Pins 13): Terra.

O circuito LTC3108 contém todos os requisitos para um circuito de regulação de energia para desenvolvimento de aplicações de Energy Harvesting. Na figura 4.1 é ilustrado o diagrama de blocos do seu funcionamento. A primeira etapa do funcionamento do LTC3108 consiste num pequeno transformador step-up externo com uma relação de espiras de 1:100, um condensador externo C_{IN} e um transistor MOSFET integrado, o que permite ao circuito operar com valores de tensões de entrada (V_{IN}) muito baixa, a partir de 20mV.

A frequência de oscilação é determinada pela indutância do enrolamento secundário do transformador step-up e está tipicamente na faixa de 10kHz a 100kHz. Para tensões de entrada, V_{IN} mais altas, é necessário diminuir o número de espiras do enrolamento do secundário.

A relação entre as tensões elétricas dos enrolamentos primário e secundário do transformador é dada pela equação:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{V_P}{V_S} \quad (4.1)$$

Onde, N_P e N_S representam o número dos enrolamentos do primário e do secundário do transformador e V_P e V_S correspondem a tensão do primário e a tensão do secundário.

Pela equação 4.1, é possível provar que para uma entrada (V_{IN}), de 20mV, com a relação de espiras de 1:100, a tensão na saída do transformador tende a aumentar.

As oscilações de corrente e do fluxo magnético geradas no transformador criam uma tensão AC na saída do transformador. Esta tensão é aumentada e retificada para uma tensão DC por um retificador interno e posteriormente armazenada no condensador $C_{AUX} = 1\mu F$, conectado ao terminal VAUX. A saída VAUX funciona como uma fonte de alimentação interna dos circuitos ativos dentro do conversor. Quando o valor do terminal VAUX excede o valor de 2,5V, o condensador conectado a ele começa a carregar até regular a tensão da saída principal, V_{OUT} .

O LTC30108 Possui um regulador linear de tensão LDO (Low Dropout Linear Regulator) que fornece uma tensão regulada de 2,2V para alimentar processadores ou outros dispositivos de baixa potência. Além disso, o valor da tensão de saída principal (V_{OUT}) é programável pelos pinos de seleção VS1 e VS2, através das ligações dos

Tabela 4.2 – Seleção de tensão de saída principal através dos pinos VS1 e VS2.

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

Na figura 4.3 é ilustrado o kit de recolha de energia DC2080A conectado com o microcontrolador EFM 32. Os microprocessadores EFM 32 Giant Gecko 32 bits são microcontroladores produzidas pela empresa Silicon Labs, são usados para sensoriamento e controlo, operam num intervalo de tensões entre 1,85 V a 3,8 V.

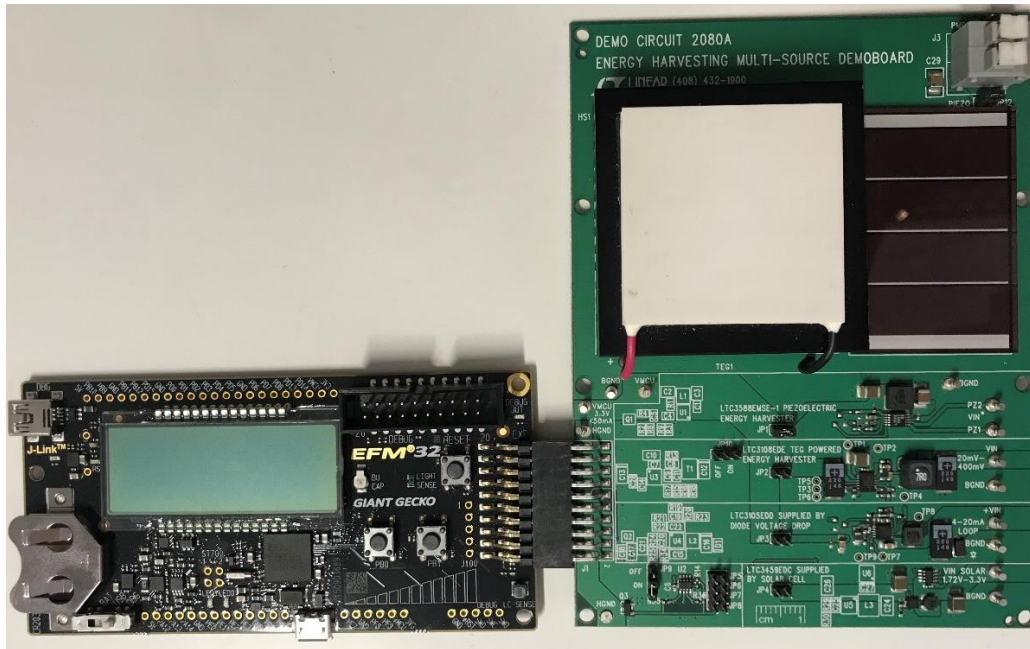


Figura 4.3 – kit de recolha de energia DC2080A conectado com o microcontrolador EFM 32 Giant Gecko.

O kit DC2080A é possui um banco de condensador, composto por 15 condensadores de 100 μF , que servem de armazenamento de energia suficiente para alimentar os dispositivos extremos, com o microcontrolador EFM 32.

Para o processo demonstrativo do funcionamento do transdutor termoelétrico, foi necessário colocar a palma da mão por cima da célula Peltier durante alguns segundos, de maneira a criar uma diferença de temperatura entre as superfícies da célula. Manter a da mão na superfície da célula de Peltier aumenta gradualmente a temperatura e, consequentemente, a tensão de saída. Na figura 4.4 está ilustrada a tensão produzida pela TEG quando aquecido com a palma da mão. O valor de tensão produzida pela célula de Peltier, pode ser medido no condensador de entrada ou, no enrolamento do primário do transformador.

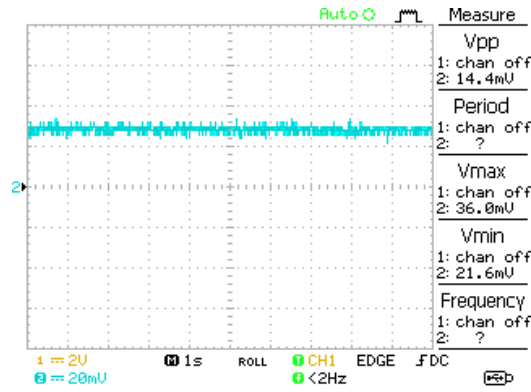


Figura 4.4 – Tensão de entrada, medida através do osciloscópio.

A tensão selecionada à saída do conversor LTC3108, V_{OUT} , é configurada para o valor de 3,3 V. Entretanto, para o circuito da placa DC2080A iniciar a operação de carregamento e descarregamento da tensão de saída de banco de condensadores, numa primeira fase e descarregamento da tensão de saída de banco de condensadores, numa primeira fase são verificados os limiares de tensão. Esta verificação é feita a partir do circuito integrado, LTC2935. Este circuito é um supervisor de baixas potências, serve para monitorar tensões V_{CC} de 3,15V. Quando o condensador associado a tensão de saída estiver no valor de 3,15V, o MOSFET que está colocado à RST (Reset Threshold) fecha, conseqüentemente, a saída VMCU aciona o microcontrolador, e posteriormente a tensão do banco de condensadores começa a descarregar. Ao atingir o valor de 2,25V, o MOSFET volta a abrir, permitindo o carregamento de banco de condensadores da saída V_{OUT} .

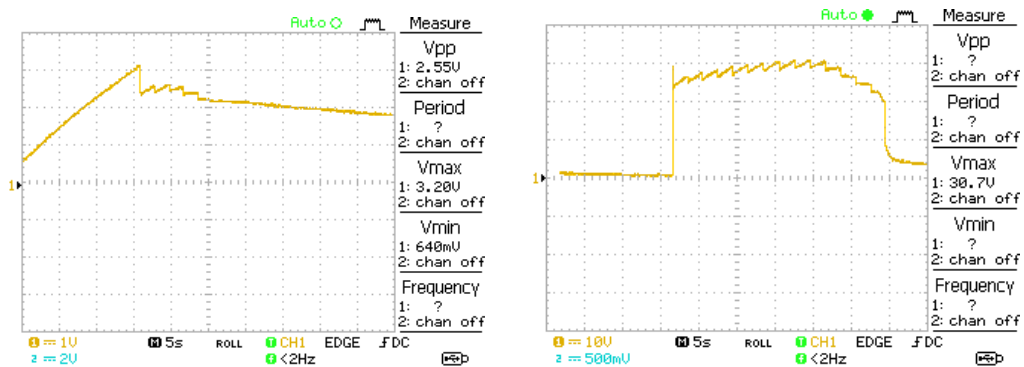


Figura 4.5 – Tensão de saída V_{OUT} , medidas através do osciloscópio.

Capítulo 5

5. Conclusão

Neste último capítulo, são apresentadas as considerações finais do trabalho desenvolvido e as possíveis realizações futuras.

5.1 Considerações finais

Cresce o número de sistemas eletrônicos de baixo consumo que apresentam a necessidade de autonomia energética. Visando solucionar as limitações energética apresentados nestes dispositivos, inúmeras investigações têm sido feitas. As técnicas de recolha de energia ambiente surgem como uma das soluções alternativas.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um módulo experimental, tendo em vista recolha de energia através de uma célula de Peltier, utilizando a diferença de temperatura entre a água de uma canalização, e a temperatura de um material de mudança de fase que armazena energia solar térmica.

De salientar que os testes experimentais não foram realizados como idealizados inicialmente, devido a irregularidade verificada nos equipamentos responsáveis pela medição de temperatura nas superfícies quente e fria da célula de Peltier. Entretanto, foram realizadas algumas experiências demonstrativas na fase final do trabalho, com a finalidade de compreender melhor o funcionamento do conversor LTC3108. As experiências foram realizadas usando o kit *Energy Harvesting* Multi-Source DC2080A, fabricada pela Analog Devices.

5.2 Trabalhos futuros

Embora esta dissertação ter sido desenvolvido com muita dedicação, é de conhecimento do autor o melhoramento de alguns pontos abordados neste trabalho.

Baseando no que foi apresentado, para trabalhos futuros, uma sequência natural é a realização de ensaios experimentais como idealizado inicialmente, com os equipamentos responsáveis pela medição de temperatura a funcionarem nas perfeitas condições, nomeadamente: termopares e ThermoBooster Pack acoplado ao Lanch Pad. Pois, sabendo os valores de temperatura nas superfícies da célula de Peltier, permitirá explorar o máximo do setup experimental, para o seu processo de validação.

Ainda no âmbito deste trabalho, outro especto importante, seria a idealização, construção e validação do circuito regulador de tensão, baseado no kit de *Energy Harvesting DC2080A*.

Uma outra sugestão para trabalhos futuros seria criar outras metodologias para aproveitamento da energia térmica, usando mais de uma célula de Peltier conectadas em série, com intuito de produzir uma quantidade maior de energia.

Referencias bibliográficas

- [1] J. M. L. P. Caldeira, J. J. P. C. Rodrigues, and P. Lorenz, “Intra-Mobility Support Solutions for Healthcare Wireless Sensor Networks–Handover Issues,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4339–4348, Nov. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2267729.
- [2] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, “Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011, doi: 10.1109/SURV.2011.060710.00094.
- [3] R. J. M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, “Micropower energy harvesting,” *Solid. State. Electron.*, vol. 53, no. 7, pp. 684–693, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.sse.2008.12.011.
- [4] R. M. Farias, L. A. O. Rocha, and E. D. Dos Santos, “Numerical Study of Reservoir Cooling by Means of Peltier Effect,” in *2009 3rd Southern Conference on Computational Modeling*, Nov. 2009, pp. 66–70, doi: 10.1109/MCSUL.2009.15.
- [5] D. Beretta *et al.*, “Thermoelectrics: From history, a window to the future,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 138, p. 100501, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.mser.2018.09.001.
- [6] M. Mohamed, A. Abdelmoula, C. El Hadi, and M. Abdessamad, “Study of the economical feasibility and the performance of thermoelectric devices under different conditions: Power generation,” in *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Oct. 2016, pp. 1–7, doi: 10.1109/CISTEM.2016.8066787.
- [7] J. R. Sootsman, D. Y. Chung, and M. G. Kanatzidis, “New and Old Concepts in Thermoelectric Materials,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 48, no. 46, pp. 8616–8639, Nov. 2009, doi: 10.1002/anie.200900598.
- [8] S. . Riffat and X. Ma, “Thermoelectrics: a review of present and potential applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, Jun. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.
- [9] E. Brownell and M. Hodes, “Optimal Design of Thermoelectric Generators Embedded in a Thermal Resistance Network,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 612–621, Apr. 2014, doi: 10.1109/TCPMT.2013.2295169.

- [10] D. Enescu, "Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications," in *Green Energy Advances*, IntechOpen, 2019.
- [11] A. Z. Sahin, K. G. Ismaila, B. S. Yilbas, and A. Al-Sharafi, "A review on the performance of photovoltaic/thermoelectric hybrid generators," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 5, pp. 3365–3394, Apr. 2020, doi: 10.1002/er.5139.
- [12] A. Nozariasbmarz *et al.*, "Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems," *Appl. Energy*, vol. 258, p. 114069, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114069.
- [13] O. H. Ando Junior, A. L. O. Maran, and N. C. Henao, "A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. March, pp. 376–393, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.052.
- [14] M. Lekic and G. Gardasevic, "IoT sensor integration to Node-RED platform," in *2018 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, Mar. 2018, vol. 2018-Janua, no. March, pp. 1–5, doi: 10.1109/INFOTEH.2018.8345544.
- [15] C. J. Garcia-Orellana, H. Gonzalez-Velasco, R. Gallardo-Caballero, M. Macias-Macias, and A. Garcia-Manso, "Practices of automotive electronics based on 'mbed' LPC1768," in *2016 Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, Jun. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/TAEE.2016.7528246.