



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Avaliação do potencial da aplicabilidade de geradores termoelétricos na gestão técnica de edifícios

João Eduardo Gonçalves Martinho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Luís Carlos Carvalho Pires
Co orientador: Prof. Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva

Covilhã, outubro de 2014

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível graças à contribuição de um vasto conjunto de pessoas. Desejo assim expressar a minha profunda gratidão àqueles cujo esforço contribuiu de alguma forma para a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer em primeiro lugar, aos meus orientadores, Professor Doutor Luís Carlos Carvalho Pires e ao Professor Doutor Pedro Nuno Dinho Pinto da Silva, por toda a confiança em mim depositada, disponibilidade oferecida, ajuda e conhecimentos constantes, contribuindo como incentivo para o desenvolvimento e aperfeiçoamento contínuo deste trabalho.

Agradeço também ao Sr. João Correia, técnico do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor da Universidade da Beira Interior, assim como ao Sr. José Paulo Guerra, assistente técnico do Departamento de Engenharia Electromecânica, pela acessibilidade, disponibilidade e todo auxílio dispensado com equipamento e material técnico, nomeadamente durante a preparação da unidade experimental.

A todos os meus colegas e amigos deixo também o meu apreço, pelo constante apoio e palavras de incentivo para continuar a trabalhar.

Por fim, quero também agradecer aos meus pais, irmã e família, toda a ajuda e força prestada neste percurso académico, contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Resumo

As preocupações a nível ambiental relacionadas com o elevado consumo energético, que tem vindo a sofrer um aumento ao longo dos anos, tornaram-se um assunto a ser colocado no topo das prioridades por parte das organizações ambientalistas e governamentais.

Sendo os edifícios um dos sectores que mais contribui para este cenário, torna-se necessário reduzir o consumo energético nos mesmos, fazendo uma gestão técnica mais eficiente da energia por eles consumida. Um controlo mais eficiente de sistemas de climatização ou iluminação, pode traduzir-se em grandes poupanças energéticas. Para isso, a automatização de edifícios tem vindo a tornar-se uma prática mais comum, onde através de uma rede de sensores é feito um controlo dos diversos equipamentos utilizados por estes sistemas. Estas redes sensoriais recorrem em geral a baterias para se manterem em constante funcionamento. No entanto o seu período de vida útil torna-se por vezes reduzido, dependendo da aplicação a que se destinam. Torna-se assim pertinente procurar uma solução alternativa a este problema, contribuindo o presente trabalho para o efeito.

Neste trabalho, pretendeu-se estudar e caracterizar um conversor termoelétrico, estudando a possibilidade de substituição de baterias de pequenos dispositivos electrónicos pelos mesmos. Os conversores termoelétricos são pequenos dispositivos que fazem uso da termoelectricidade, nomeadamente do efeito de Seebeck, produzindo energia através de pequenas diferenças de temperatura que se encontrem no ambiente. Foram realizados diversos ensaios com o objectivo de simular diferentes condições de funcionamento do conversor, caracterizando-o da melhor forma possível. Conclui-se ser possível obter valores de potência satisfatórios, assumindo-se como viável a sua utilização em dispositivos com baixos consumos energéticos.

Palavras-chave

Eficiência energética, automatização de edifícios, termoelectricidade, efeito de Seebeck, conversores termoelétricos.

Abstract

The environmental concerns related to the high energy consumption, which has experienced an increase over the years, have become a subject to be placed on the top priority by the environmentalists and government organizations.

Buildings are one of the sectors that most contribute to this scenario, it becomes necessary to reduce the energy consumption in them, making a more efficient technical management of energy consumed. More efficient control of HVAC and lighting systems can result in large energy savings. For this, building automation has become a more common practice, using a sensor network to check various equipments used by these systems. These sensory networks usually make use of batteries to remain in constant operation. However the period of its useful life it is sometimes reduced, depending on the intended application. It thus becomes possible to pursue an alternative solution to this problem, this paper contributes to the effect.

In this work, it was intended to study and characterize a thermoelectric converter, studying the possibility of replacing the batteries of small electronic devices for them. Thermoelectric converters are small devices that make use of thermoelectricity, particularly the Seebeck effect, producing energy from small temperature differences found in the environment. Several tests were performed in order to simulate different operating conditions of the converter, characterizing it as best as possible. It was concluded to be possible to obtain satisfactory values of power, taking as feasible their use in devices with low energy consumption.

Keywords

Energy efficiency, building automation, thermoelectricity, Seebeck effect, thermoelectric converters.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Lista de símbolos	xi
Lista de acrónimos	xiii
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Perspectiva geral	2
1.2 O problema em estudo e a sua relevância	5
1.3 Revisão bibliográfica	7
1.3.1 Trabalhos relacionados com a gestão técnica de energia	7
1.3.2 Trabalhos relacionados com a utilização de geradores termoelétricos	10
1.4 Objetivos e contribuição da dissertação	15
1.5 Visão geral e organização da dissertação	16
Capítulo 2 - Conversores termoelétricos	19
Termoeletricidade	19
2.1 História da termoeletricidade	20
2.2 Efeito de Seebeck	22
2.3 Efeito de Peltier	24
2.4 Efeito de Thomson	26
2.5 Transferência de calor	27
2.5.1 Condução	27
2.5.2 Convecção	29
2.5.3 Radiação	31
2.6 Dissipadores de calor	31
2.7 Conversores termoelétricos	33
2.8 Arrefecimento por peltier	34
2.9 Geradores termoelétricos	38
2.10 Figura de mérito	41
2.11 Aplicações	42

2.11.1	Termopar	43
2.11.2	Relógios de pulso	45
2.11.3	Pulseiras termoelétricas	46
2.11.4	Válvula electrónica para radiadores	47
2.11.5	Ventiladores	49
2.12	A automação de edifícios - Domótica	50
2.12.1	Redes sensoriais wireless	51
2.12.2	Funções e serviços da domótica	53
2.13	Nota conclusiva	56
Capítulo 3 - Estudo experimental		59
3.1	Unidade experimental	59
3.1.1	Caracterização/apresentação da unidade	59
3.2	Equipamento auxiliar	63
3.3	Descrição dos ensaios realizados	66
3.4	Ensaio com convecção natural	67
3.4.1	Ensaio em circuito aberto	67
3.4.2	Ensaio com carga e sem isolamento	68
3.4.3	Ensaio com carga e com isolamento	69
3.5	Ensaio em convecção forçada	70
3.6	Nota conclusiva	71
Capítulo 4 - Análise e discussão de resultados		73
4.1	Ensaio em convecção natural	73
4.1.1	Ensaio em circuito aberto	73
4.1.2	Ensaio com carga e sem isolamento	75
4.1.3	Ensaio com carga e com isolamento	78
4.2	Ensaio em convecção forçada	81
4.3	Nota conclusiva	86
Capítulo 5 - Conclusão		89
5.1	Recapitulação	89
5.2	Trabalho futuro	91
Referências bibliográficas		92

Anexos	96
Anexo A	97
Anexo B	98
Anexo C	100
Anexo D	102
Anexo E	104
Anexo F	106
Anexo G	108
Anexo H	110
Anexo I	112

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Projeção da energia total consumida a nível mundial entre 1990-2040 entre países membros da OECD e restantes.	2
Figura 1.2 - Energia final consumida por sector na Europa em 2009 (à esquerda) e Portugal (à direita).	3
Figura 1.3 - Utilização de energia final em edifícios domésticos por tipo de aplicação.	7
Figura 2.1 - Thomas Seebeck, Jean Peltier e William Thomson, respectivamente.	19
Figura 2.2 - Demonstração do efeito Seebeck.	20
Figura 2.3 - Anel de Seebeck com desvio da agulha magnética.	20
Figura 2.4 - Efeito Seebeck.	22
Figura 2.5 - Junção de dois materiais com coeficientes de Seebeck diferentes.	23
Figura 2.6 - Modos de funcionamento do efeito de Peltier.	25
Figura 2.7 - Fenómeno de transferência de calor.	27
Figura 2.8 - Transmissão de calor por condução.	28
Figura 2.9 - Transmissão de calor por convecção.	30
Figura 2.10 - Exemplos de dissipadores de calor com diferentes configurações.	32
Figura 2.11 - Dissipador de calor com ventilação forçada.	33
Figura 2.12 - Módulo termoelétrico.	34
Figura 2.13 - Módulo de Peltier e junção pn (par termoelétrico).	34
Figura 2.14 - Resistências elétricas numa junção PN de um conversor termoelétrico.	38
Figura 2.15 - Gerador termoelétrico com detalhe de uma junção pn.	39
Figura 2.16 - Figura de mérito (Z) para diferentes materiais e diferentes temperaturas.	42
Figura 2.17 - Termopar.	43
Figura 2.18 - Demonstração do efeito de Seebeck.	44
Figura 2.19 - Medição de temperatura utilizando um termopar.	44
Figura 2.20 - Relógio Seiko Thermic (a); corte transversal esquemático com os diversos constituintes (b); estrutura constituída pelos módulos termoelétricos (c); módulo termoelétrico (d).	46
Figura 2.21 - Pulseira termoelétrica Dyson Energy.	47
Figura 2.22 - Válvula iTRV.	48
Figura 2.23 - Componentes da tecnologia EnOcean de monitorização e controlo de temperatura.	49
Figura 2.24 - Transmissor WiTemp.	49
Figura 2.25 - Ventilador Ecofan e respectiva aplicação.	50
Figura 2.26 - Rede sensorial wireless.	52
Figura 2.27 - Tipos de sensores para controlo de iluminação.	54

Figura 2.28 - Sensores detetores de incêndio e gás, respectivamente	56
Figura 2.29 - Componentes de um sistema de detecção de inundação.	56
Figura 3.1 - Conversor termoelétrico RS1.0-127-05L.	60
Figura 3.2 - Engenho de furar utilizado na furação da chapa e superfície alhetada.	61
Figura 3.3 - Procedimento e material utilizado na abertura de rosca.	62
Figura 3.4 - Estrutura de suporte com respectivo módulo termoelétrico e material de interface.	62
Figura 3.5 - Material de interface térmico utilizado.	63
Figura 3.6 - Esquema da unidade experimental.	63
Figura 3.7 - Fonte de tensão e placa de aquecimento.	64
Figura 3.8 - Data logger Fluke 54II e termopar.	64
Figura 3.9 - Resistências elétricas.	65
Figura 3.10 - Multímetro Fluke 45 e Fluke 8840A.	65
Figura 3.11 - Ventiladores e fonte de tensão utilizados.	66
Figura 3.12 - Esquema da unidade de ensaio com convecção natural.	67
Figura 3.13 - Unidade de ensaio em circuito aberto.	67
Figura 3.14 - Esquema da unidade de ensaio com carga e convecção natural.	68
Figura 3.15 - Unidade experimental com orientação horizontal (à esquerda) e vertical (à direita)	69
Figura 3.16 - Disposição do módulo termoelétrico com material isolante (cortiça) na envolvente.	70
Figura 3.17 - Unidade experimental com ventilador na horizontal e vertical respectivamente.	71
Figura 4.1 Variação da tensão de saída do conversor termoelétrico para diferentes temperaturas impostas, e respectivos gradientes de temperatura (horizontal).	74
Figura 4.2 - Variação da tensão de saída do conversor termoelétrico para diferentes temperaturas impostas, e respectivos gradientes de temperatura (vertical).	74
Figura 4.3 - Variação da tensão de saída do módulo termoelétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal sem isolamento).	75
Figura 4.4 - Variação da potência do conversor termoelétrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal sem isolamento).	76
Figura 4.5 - Variação da tensão de saída do módulo termoelétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical sem isolamento).	77
Figura 4.6 - Variação da potência do conversor termoelétrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical sem isolamento).	77
Figura 4.7 - Variação da tensão de saída do módulo termoelétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com isolamento).	78
Figura 4.8 - Variação da potência do conversor termoelétrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com isolamento).	79

Figura 4.9 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com isolamento).	80
Figura 4.10 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com isolamento).	80
Figura 4.11 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 1).	81
Figura 4.12 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 1).	82
Figura 4.13 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 1).	83
Figura 4.14 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 1).	83
Figura 4.15 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 2).	84
Figura 4.16 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 2).	85
Figura 4.17 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 2).	85
Figura 4.18 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 2).	86

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Coeficientes de Seebeck para metais,ligas e semicondutores.	24
Tabela 2.2 - Materiais e respectiva condutividade térmica.	29
Tabela 2.3 - Propriedades termoelétricas à temperatura ambiente.	42
Tabela 2.4 - Tipos de Termopares e características.	45
Tabela 2.5 - Estados dos sensores wireless e respectivo consumo.	52
Tabela 3.1- Característica do módulo termoelétrico Melcor RS ST1.0-127-05L.	57

Lista de Símbolos

A	Área	[m ²]
h	Coeficiente de calor por convecção	[W/m ² K]
I	Intensidade da corrente eléctrica	A
l	Comprimento	[mm]
n	Número de junções de um conversor termoelétrico	
P	Potência	[W]
Q	Calor	[W/m ²]
\dot{Q}	Fluxo de calor	[W]
Q_c	Calor libertado por efeito de Peltier	[W/m ²]
Q_h	Calor absorvido por efeito de Peltier	[W/m ²]
Q_j	Calor libertado por efeito de Joule	[W/m ²]
Q_p	Calor resultante do efeito de Peltier	[W/m ²]
T_∞	Temperatura do escoamento não perturbado	[°C ou K]
T_s	Temperatura da superfície	[°C ou K]
Z	Figura de mérito	

Símbolos Gregos

σ	Constante de Stefan Boltzman	[W/m ² – K ⁴]
α_n	Coeficiente de Seebeck do material do tipo-n	[μ VK ⁻¹]
α_p	Coeficiente de Seebeck do material do tipo-p	[μ VK ⁻¹]

π_n	Coeficiente de Peltier do material do tipo-n	
π_p	Coeficiente de Peltier do material do tipo-p	
Δ	Diferença	
α	Coeficiente de Seebeck	$[\mu V K^{-1}]$
ε	Emissividade	
κ	Condutibilidade térmica	$[W / mK]$
π	Coeficiente de Peltier	
ρ	Resistividade elétrica	

Índices Inferiores

c	Cold
conv	Convecção
h	hot
jc	Junção fria
jh	Junção quente
jn	Junção material tipo n
jp	Junção material tipo p
n	Material tipo n
out	Saída
P	Peltier
p	Material tipo p
S	Seebeck

Lista de acrónimos

ADENE	Agência para a Energia
AWG	American Wire Gauge
ANSI	American National Standards Institute
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
DEM	Departamento de Engenharia Electromecânica
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EIA	Energy Information Administration
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PIR	Passive infrared sensor
TEC	Thermoelectric cooler
TEG	Thermoelectric generator
UBI	Universidade da Beira Interior
WSN	Wireless Sensor Network

Capítulo 1

Introdução

A busca por uma melhor qualidade de vida, faz do ser humano um ser constantemente insatisfeito e, conseqüentemente, surgem progressos a nível tecnológico. O desenvolvimento de equipamentos portáteis electrónicos, tais como sensores de redes e dispositivos autónomos em geral, criam uma grande procura de energia, que afecta o balanço energético global do planeta, trazendo conseqüências nefastas para a vida na terra.

Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento de interesse na utilização de dispositivos autónomos nas mais diversas áreas, desde a incorporação de sensores em edifícios, na indústria, implantes médicos, a qualquer outra aplicação onde os sensores sem fios se tornem uma vantagem. Este tipo de dispositivos recorrem a baterias, que embora se encontrem em contínuo desenvolvimento e aperfeiçoamento por parte de cientistas e engenheiros, ainda se encontram muito limitadas. Este factor condiciona de certa forma a utilização deste tipo de aparelhos, uma vez que diminui o seu período de vida útil, obrigando à substituição das mesmas com uma certa periodicidade e, conseqüentemente provocando um aumento nos custos associados à manutenção. Além disso, em determinadas aplicações onde é exigido um contínuo funcionamento, como o monitoramento de segurança, ou em zonas de difícil acesso, as baterias que acabam sem aviso prévio podem representar um problema grave.

Uma das melhores soluções para alimentar estes sensores e dispositivos autónomos é desenvolver sistemas que consigam aproveitar a energia do ambiente de forma sustentável, e suficiente para os alimentar.

Surge então o conceito de energy harvesting, que visa recolher esta energia disponível no ambiente, permitindo que seja utilizada pelos diversos dispositivos, e em alguns casos armazená-la para uma utilização posterior. Atualmente já existem disponíveis diversos sistemas desta natureza, como por exemplo as células solares e sistemas electromecânicos que convertem vibrações ou movimentos mecânicos em energia eléctrica. O interesse na busca por novos sistemas que consigam explorar novas fontes de energia é uma das prioridades na atualidade, nomeadamente a exploração da energia térmica, que se encontra disponível em qualquer lugar, e raramente é reaproveitada.

Na área dos edifícios, são produzidas diariamente grandes quantidades de calor em diferentes processos, como nas caldeiras de aquecimento, arrefecimento, fogões, radiadores, entre outros, que aproveitados conseguem produzir energia eléctrica, mesmo que em pequenas

quantidades. Esta técnica de produção de energia elétrica a partir de diferenças de temperatura é denominada por termoelectricidade. Os dispositivos termoeletricos de estado sólido são módulos cuja constituição se baseia na utilização de dois materiais semicondutores, que conseguem converter diretamente uma diferença de temperatura em eletricidade. Embora o objectivo desta dissertação incida na produção de energia elétrica com recurso a conversores termoeletricos, estes também são utilizados comumente em aplicações de arrefecimento/aquecimento, baseando-se no efeito de Peltier.

Esta dissertação visa explorar a possibilidade de aproveitamento de diferenças de temperatura para processos de recolha de energia, analisando eventuais aplicações para a gestão técnica de edifícios.

1.1 Perspectiva geral

A energia é um dos recursos mais importantes para a humanidade, sendo por isso um assunto que está no topo das prioridades e preocupações a nível mundial, por parte de cientistas e investigadores.

A procura de energia a nível mundial tem vindo a aumentar a um ritmo bastante acelerado ao longo dos últimos anos, derivado essencialmente do elevado crescimento demográfico, e ao aumento dos padrões na qualidade de vida do homem (Ghoniem, 2011). Segundo a Energy Information Administration (EIA), prevê-se um crescimento no consumo global de energia, de 56% entre 2010 e 2040, sofrendo um crescimento de 524 quadrilhões de Btu em 2010, para 630 quadrilhões em 2020, e 820 quadrilhões em 2040. Esta tendência pode ser observada no gráfico da Figura 1.1, onde se encontra uma comparação entre os países da OCDE e os restantes.



Figura 1.1 - Projeção da energia total consumida a nível mundial entre 1990-2040 entre países membros da OCDE e restantes. Fonte: EIA, 2013.

De entre os principais responsáveis por este elevado consumo de energia, encontram-se os edifícios, como se pode constatar na Figura 1.2. Estes, são responsáveis por mais de 40% da

energia total consumida no mundo, sendo os sistemas de aquecimento, refrigeração e iluminação, os maiores consumidores de energia, representando aproximadamente 25% das emissões de CO₂ totais no mundo. A qualidade dos edifícios e do conforto a eles associado tem aumentado substancialmente, uma vez que segundo Dounis et al. (2009) a população passa mais de 80% do seu tempo de vida em edifícios. Contudo, com a tecnologia actual no que diz respeito ao reaproveitamento de energia e exploração de fontes renováveis, o mundo poderia operar usando menos 30% de energia (Raspin, 2011).

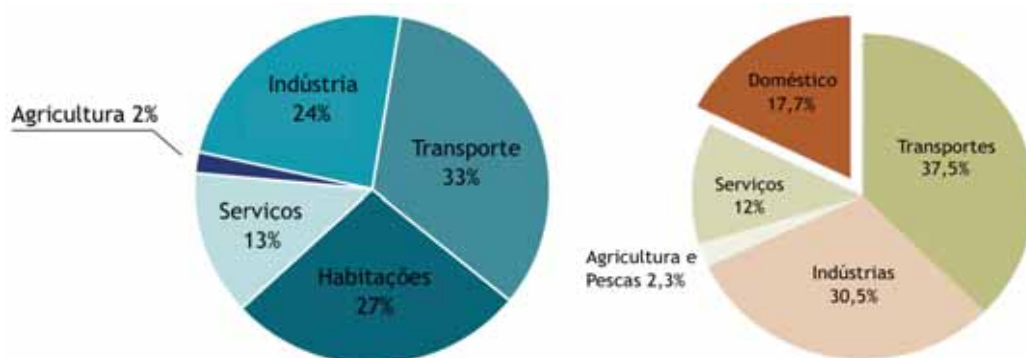


Figura 1.2 - Energia final consumida por sector na Europa em 2009 (à esquerda), e Portugal (à direita).
Fonte: DGEG.

Em Portugal, segundo a ADENE, sabe-se que em 2010 existiam cerca de 3,9 milhões de edifícios só para fins residenciais, contribuindo para 17,7% do consumo total de energia. Contabilizando todos os tipos de edifícios, isto é, também os de serviços, os consumos sobem para aproximadamente 29% de consumo de energia final, e são responsáveis por 62% do consumo de energia eléctrica total.

Com o intuito de contrariar esta tendência, a automatização dos edifícios é uma realidade cada vez mais presente e com elevada importância. Os sistemas de automação de edifícios são utilizados para controlar o ambiente interno de um edifício, como a temperatura, humidade ou iluminação, com o intuito de melhorar o conforto dos ocupantes, reduzindo simultaneamente os custos operacionais. Permitem fazer uma gestão de energia mais eficiente, mantendo ou incrementando as condições de conforto dos utilizadores e a sua segurança. Inicialmente começaram por ser utilizados unicamente em determinado tipo de edifícios, como escolas, hospitais ou grandes empresas, no entanto têm vindo a expandir-se para os restantes edifícios, sobretudo nas habitações domésticas (Osterlind, 2007).

Estes sistemas automatizados na sua fase inicial implicavam elevados custos para os proprietários, devido essencialmente à complexidade de instalação do sistema por todo o edifício, e respectiva cablagem necessária para fazer a ligação entre os diferentes elementos. Os sensores eram conectados aos actuadores através de cabos, que por sua vez se

encontravam conectados a uma unidade central de controlo, responsável pelas ações e gestão dos diferentes dispositivos.

Com o aparecimento da tecnologia wireless, este problema foi atenuado, permitindo criar de forma mais prática e económica sistemas de redes sensoriais wireless (WSN), podendo estes ser instalados em qualquer edifício já existente sem necessidade de passar cabos. Neste tipo de instalações, os diferentes elementos encontram-se alimentados através de baterias, o que os torna menos vantajosos em relação aos anteriores. Dado que estes sistemas possuem imensos elementos, nomeadamente os sensores que fazem a monitorização dos diferentes parâmetros internos de uma habitação, torna-se por vezes uma desvantagem, sobretudo nas zonas de difícil acesso em que os custos associados a esta substituição de baterias se podem tornar bastante dispendiosos. Assim, de forma a colmatar esta situação, é extremamente importante que estes elementos consumam o mínimo de energia possível (Osterlind, 2007).

As principais aplicações destes sistemas destinam-se sobretudo ao controlo dos sistemas AVAC, assim como realizar um controlo mais eficiente no que diz respeito à iluminação e melhorar a segurança das habitações.

No que diz respeito à climatização, torna-se vantajoso a instalação de sistemas de aquecimento, arrefecimento, ou ambos, que permitam a sua regulação e programação independente, pois dentro de qualquer habitação a distribuição de temperatura não é uniforme pelas diferentes áreas. Para fazer o controlo e monitorização dos diferentes parâmetros do meio, como a humidade e temperatura, são utilizados diversos sensores localizados em diferentes zonas. Estes sensores enviam a informação a uma unidade central, que por sua vez irá enviar informação aos diferentes actuadores (equipamentos de climatização) com determinada ação de acordo com a programação previamente definida pelo utilizador. Este controlo permite obter um maior conforto global, garantindo as temperaturas desejadas pelos diferentes utilizadores em cada área, permitindo também uma redução no consumo de energia, se esta for programada de forma eficiente com base no tipo de utilização dos diferentes utilizadores da habitação.

A iluminação é um dos parâmetros que contribui substancialmente para o conforto nas habitações e redução dos consumos energéticos. A possibilidade de se poder regular de forma automática a intensidade luminosa, ou acender ou apagar os pontos luz, torna-se bastante vantajoso para o utilizador controlar e garantir a satisfação das suas necessidades. A iluminação artificial numa habitação deve ser controlada de acordo com a iluminação natural proveniente do exterior, de forma a evitar gastos desnecessários. Porém, podem adicionalmente ser utilizados sensores de presença nas diferentes divisões da habitação, de forma a que a luz apenas seja acendida quando é detectado movimento, evitando assim que entre em funcionamento quando não é exigido. Neste último caso, deve ser analisado com

especial cuidado a nível da programação do tempo de funcionamento destes sensores, prevenindo que estes se encontrem ativos durante um período de tempo superior ao que é realmente necessário.

Ao nível da segurança, os sistemas de detecção de intrusos e alarmes são os mais utilizados e procurados por parte dos utilizadores. À semelhança dos parâmetros anteriores, a base destes são os sensores, em que por exemplo nos sistemas de intrusão são utilizados sensores de presença que detectam movimento, acionando um aviso sonoro. No caso da detecção de um incêndio, os sensores detetam a presença de fumos na divisão onde se encontra emitindo um sinal sonoro e comunicando de forma imediata ao quartel de bombeiros mais próximo.

1.2 O problema em estudo e a sua relevância

São diversas as temáticas que são alvo de pesquisa ou estudos científicos, e tanto a gestão técnica e eficiente da energia nos edifícios, como a produção de energia a partir de fontes disponíveis no ambiente não fogem à exceção.

Os edifícios são o centro da nossa atividade social e económica, sendo os principais responsáveis pelos elevados níveis de CO₂ enviados para a atmosfera (Pineda, 2011). Assim, torna-se essencial estudar e implementar mecanismos que possam fazer uma melhor gestão da energia utilizada, nomeadamente através da automação e controlo de processos que por vezes nem sempre operam na forma mais eficiente.

Como foi referido na secção anterior, a automatização de edifícios é uma realidade cada vez mais presente no quotidiano da população, com o objectivo de facilitar e melhorar o dia a dia do ser humano. No entanto, uma vez que todos estes sensores e dispositivos que formam as redes sensoriais domésticas necessitam de energia para se encontrarem em contínuo funcionamento, devem ser encontradas formas de alimentar estes dispositivos de uma maneira permanente e com menores custos de operação.

Dado que grande parte da energia consumida pelos edifícios é desperdiçada nos diferentes processos, torna-se pertinente realizar o aproveitamento dessa mesma energia desaproveitada. O aproveitamento de energia com recurso a fontes disponíveis no ambiente, pode desempenhar um papel fundamental para a produção de energia para alimentar este tipo de sistemas, reduzindo a dependência energética proveniente de baterias. Este conceito denominado por energy harvesting, tem crescido nas últimas décadas e tem sido alvo de diversas pesquisas e estudos científicos. Pode ser definido como um processo de produção de energia em microescala, que se baseia na recolha de pequenas quantidades de energia a partir de uma ou mais fontes naturais, que iriam ser desperdiçadas sob a forma de calor, vibração, luminosidade ou movimento e, proceder ao seu armazenamento temporário. Esta energia armazenada irá servir para alimentar determinadas aplicações e dispositivos

electrónicos responsáveis pela realização de tarefas específicas. Normalmente as aplicações a que se destina são aplicações que consomem um valor de energia eléctrica muito reduzido e de forma intermitente, tratando-se normalmente de sensores ou pequenos circuitos de controlo de dispositivos.

Desde o início do século XIX que o aproveitamento de gradientes de temperatura para produção de energia eléctrica se tornou um assunto com particular importância. Este fenómeno de conversão de energia, denominado por termoelectricidade representa uma das tecnologias com mais elevado potencial para o futuro. Começou a ser estudado em 1823 por Thomas Johann Seebeck, em que relatou diversas experiências que relacionavam a temperatura com as propriedades eléctricas dos condutores, sendo os seus estudos continuados anos mais tarde por Jean Peltier e William Thomson.

Os dispositivos termoeléctricos, que como o próprio nome indica fazem uso do efeito termoeléctrico, criam uma diferença de potencial quando existe uma diferença de temperatura entre as suas faces e, embora a sua eficiência seja reduzida, o seu campo de aplicações é cada vez mais abrangente. Este tipo de dispositivos pode também servir para fins de aquecimento ou arrefecimento de determinado objecto, fazendo uso do efeito de Peltier, em que uma das suas faces irá absorver calor e a outra libertar. Como principais vantagens, estes conversores termoeléctricos possuem uma elevada fiabilidade uma vez que não possuem partes mecânicas móveis, possuem dimensões reduzidas podendo assumir diversos tamanhos adaptando-se melhor à aplicação pretendida, não emitem qualquer tipo de ruído em funcionamento, e não exigem intervenções relativas a manutenções (Zheng,2013).

Tendo em conta as grandes quantidades de calor que são desperdiçadas nos processos atuais para produção de energia, baseados na utilização de combustíveis fósseis, ou qualquer outro processo em que ocorram gradientes térmicos, tem feito com que os dispositivos termoeléctricos tenham recebido uma especial atenção nestes últimos anos. Como se pode constatar no gráfico da Figura 1.3 disponibilizado pela comissão europeia em 2011, no caso particular dos edifícios domésticos, as aplicações que consomem mais energia destinam-se a fins de aquecimento e arrefecimento, criando portanto a oportunidade ideal para aproveitar alguma energia que iria ser desperdiçada sob a forma de calor.

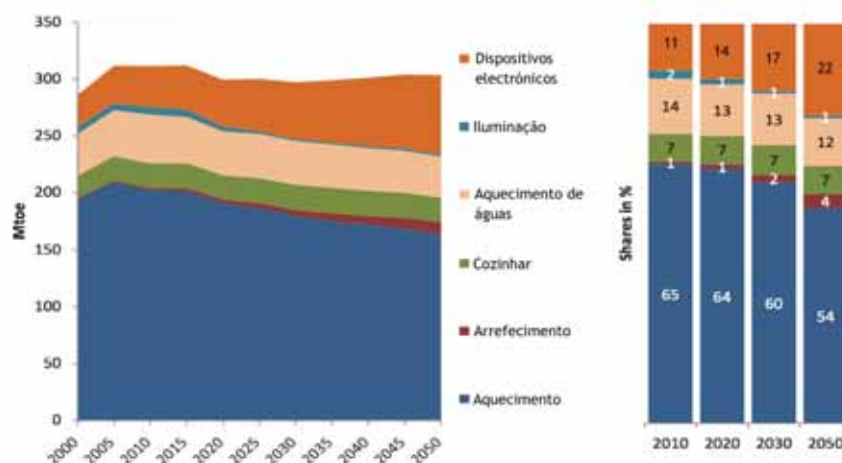


Figura 1.3 - Utilização de energia final em edifícios domésticos por tipo de aplicação. Fonte: European Commission, 2011.

Torna-se então pertinente realizar um estudo sobre a viabilidade da substituição das baterias utilizadas nos diferentes elementos que formam as redes sensoriais wireless, por conversores termoelétricos.

1.3 Revisão bibliográfica

Na secção que agora se inicia far-se-á uma revisão bibliográfica elaborada no âmbito do presente estudo e que permite o seu enquadramento no contexto de investigações anteriores.

Assim sendo, de seguida serão apresentados alguns trabalhos relativos à importância da utilização de sistemas de automação nos edifícios para uma gestão mais eficiente da energia e redução de custos, assim como estudos em que foram investigadas as potencialidades da utilização de módulos termoelétricos para a geração de energia elétrica.

1.3.1 Trabalhos relacionados com a gestão técnica de energia

A gestão técnica de energia nos edifícios tem sido motivo de estudo por parte de alguns autores. A análise da literatura permite dizer que a grande maioria dos trabalhos existentes sobre este tema se relaciona com automatização dos edifícios com recurso a redes sensoriais, em que é feito um controlo de diferentes parâmetros no ambiente interno da habitação, nomeadamente a nível da climatização, em que é feito o controlo da temperatura e humidade, e também ao nível da iluminação.

Argawal et al. (2010) apresentam um estudo relativamente aos sistemas de controlo automatizados de climatização nos edifícios. Os autores começam por referir que uma boa gestão energética destes sistemas pode conduzir a poupanças significativas de consumo

energético, mencionando que a maioria destes sistemas funciona em horários fixos previamente programados, contrariamente ao que deveria ser a realidade de funcionarem exclusivamente quando necessários de acordo com a taxa de ocupação de utilizadores do edifício. Com esta finalidade, os autores propõem a introdução de sensores de presença wireless de baixo custo nas diversas divisões, com o objectivo de realizar uma gestão mais efetiva da climatização, determinando de forma independente quais os equipamentos que devem ser acionados no interior do edificio de forma a garantir o conforto aos ocupantes. No sentido de analisar as vantagens da utilização destes sensores, nomeadamente ao nível de ganhos de poupança de energia, foram implementado em vários escritórios durante um período experimental de duas semanas. De acordo com os resultados obtidos foi estimado que o período de duração da bateria deste sensor é de cinco anos em funcionamento contínuo, isto é, detectando a presença de utilizadores, estimando-se ainda uma poupança energética situada entre os 10-15%. Os autores começam por fazer uma abordagem relativa ao consumo efetivo nos edifícios nos Estados Unidos, salientando a fração de energia associada aos sistemas de climatização, e a importância de se fazer uma gestão mais eficiente destes sistemas.

Delaney et al. (2009) criaram uma ferramenta capaz de analisar a eficiência energética dos sistemas de iluminação nos edifícios, assim como as poupanças que são possíveis realizar fazendo uma melhor gestão deste parâmetro. Adicionalmente, esta ferramenta denominada LightWiSe (Lighting Wireless Sensor), indica as áreas onde o controlo da iluminação pode ser optimizado, e quantifica a energia que pode ser poupada substituindo o sistema atual por outra solução. Para isso, os autores utilizaram uma rede sensorial wireless (WSN), indicando como principais vantagens a sua flexibilidade e portabilidade, e também o facto de esta poder ser instalada em diferentes tipologias de divisões, adaptando-se às mesmas através da colocação de mais ou menos sensores. Os sensores utilizados são sensores infravermelhos passivos (PIR) espalhados pelas diversas áreas, sendo possível determinar quando se torna necessário ativar os meios de iluminação pela detecção da presença humana, fazendo o registo da duração que estes se encontram ativos. Caso os sensores não detectem a presença humana numa divisão e a iluminação ainda se encontra ativa, o LightWise irá registar essa informação indicando a quanto tempo a iluminação deveria ter sido desativada. Esta ferramenta avalia ainda qualquer outra forma de desperdício de energia, como por exemplo nas situações em que a luz natural é suficiente para não se tornar necessário ativar sistemas de iluminação artificial. Com esta informação, esta ferramenta estima a energia que poderia ser economizada caso o sistema de controlo da iluminação estivesse melhor optimizado. Foram realizados testes em diversos escritórios de uma empresa, que vieram comprovar a eficácia da ferramenta, onde se pode concluir que é possível poupar até 58% de energia.

No trabalho de Dounis e Caraiscos (2008) é realizado um estado-da-arte dos sistemas de automação em edifícios. À semelhança de alguns trabalhos mencionados anteriormente,

primeiramente é feita uma introdução ao problema, onde é referenciado a evolução do consumo de energia por parte dos edifícios no que diz respeito aos sistemas de climatização, iluminação e aplicações electrónicas. De seguida são abordados aspectos relacionados com as condições de conforto para os utilizadores, assim como a importância da existência de sistemas de controlo para garantir essas mesmas condições. Os autores abordam ainda a evolução dos sistemas inteligentes automatizados para o controlo destes parâmetros nos edifícios, realizando no final do estudo uma simulação em TRNSYS/Matlab que permite demonstrar a eficácia destes sistemas na gestão dos parâmetros de acordo com as preferências de cada utilizador.

Osterlind et al. (2007) analisaram a possibilidade da utilização de redes de sensores wireless para a automatização de edifícios, contrariamente aos sistemas convencionais de sensores alimentados por cabo. Como principais vantagens desta escolha são apresentadas a redução dos custos de instalações, uma vez que não é necessário recorrer a cabos entre os diversos elementos de um sistema automatizado, e a sua fácil implementação, especialmente na reabilitação de edifícios, pois a sua complexidade é bastante reduzida. Neste estudo foi testado experimentalmente a criação de uma rede de sensores wireless, onde ficou demonstrado ser possível e fiável a utilização destes sensores nos sistemas automatizados de controlo nos edifícios.

Doukas et al. (2007) apresentam um modelo de decisão baseado num conjunto de regras para um sistema inteligente de gestão de energia nos edifícios. Neste trabalho é analisado o impacto deste modelo no consumo de energia, assim como a sua eficácia em manter os parâmetros da qualidade do ambiente interno num edifício localizado na Grécia nos níveis desejados, garantindo a máxima poupança de energia. Este modelo permite controlar como os parâmetros do ambiente interno variam ao longo do dia, realizando diagnósticos contínuos destas condições internas, gerenciando e otimizando a utilização da energia para ativar ou desativar os diversos equipamentos responsáveis em manter os parâmetros nos valores desejados.

Bourgeois et al. (2006) realizaram um estudo comparando o impacto total de energia de um edifício com controlo manual e automático da iluminação. Com o intuito de estimar o valor de utilização de iluminação em condições dinâmicas, isto é, tendo em conta as ações humanas de ajuste da iluminação face às condições físicas, foram utilizados os softwares DAYSIM e Lightswitch Wizard. Como estes softwares se destinam unicamente à iluminação e se pretendia fazer uma comparação entre o impacto total de energia, recorreu-se aos software ESP-r que contabiliza também a energia respeitante à climatização. As simulações foram realizadas para o período de um ano, onde os resultados obtidos demonstram ser possível poupar até 40% de energia primária.

1.3.2 Trabalhos relacionados com a utilização de geradores termoelétricos

A utilização de módulos termoelétricos em ambientes domésticos e industriais para geração de energia elétrica tem sido motivo de estudo por parte de alguns autores. A análise da literatura permite dizer que a grande maioria dos trabalhos existentes sobre este tema se relaciona com o reaproveitamento de calor que é dissipado e desaproveitado nos edifícios, com recurso a conversores termoelétricos para a geração de energia elétrica.

Wang et al. (2013), desenvolveram um sistema capaz de produzir de energia elétrica, recorrendo a um gerador termoelétrico, com a finalidade de substituir as baterias utilizadas nos sensores de redes wireless (WSN). Estes sensores são bastante utilizados nos edifícios para realizarem uma monitorização dos diversos parâmetros internos, tais como temperatura, humidade, qualidade do ar, iluminação artificial, etc, e ao mesmo tempo fazer uma gestão de energia. Os autores começam por realizar uma caracterização do desempenho dos geradores termoelétricos baseados em telureto de bismuto, comparando esses resultados com os fornecidos pelos fabricantes. É também construído em laboratório um protótipo, com o intuito de poder estudar em ambiente controlado, a eficácia deste sistema para a finalidade a que se destina. Na solução proposta pelos autores, este protótipo é constituído por cinco elementos, sendo eles, o elemento termoelétrico TEG (gerador de energia); um circuito conversor DC-DC elevador de tensão, cuja finalidade é elevar a tensão de saída dos TEG, de forma a conseguir obter tensão suficiente para o funcionamento dos sensores; uma unidade de armazenamento de energia, em que os autores recorrem a capacitores de dupla camada; um circuito de regulação de tensão de saída, de forma a extrair energia dos capacitores para alimentação dos sensores; e os próprios sensores. Com este trabalho, ficou demonstrado ser possível produzir energia suficiente para manter em funcionamento sensores wireless, a partir de geradores termoelétricos, indicando como sugestão de aplicação, a colocação dos mesmos nos radiadores de parede, cujas temperaturas médias de funcionamento são de 60°C.

Com um trabalho semelhante, Huang et al. (2011), estudaram também a possibilidade da substituição das baterias utilizadas nos sensores wireless por módulos termoelétricos. Por forma a validar esta possibilidade, os autores colocaram o sensor wireless com o respectivo módulo termoelétrico em cima de um radiador de parede, fazendo-o transmitir informação a um computador central. A experiência foi realizada durante 30 minutos, por forma a registar a variação dos gradientes de temperatura verificados entre a face em contacto com o radiador, e a face oposta em contacto com o ambiente. Os resultados obtidos foram positivos, demonstrando ser possível transmitir dados de forma fiável, até uma distância de 15 metros da central, com os gradientes de temperatura registados. Apesar de o teste ter sido bem sucedido, os autores afirmam ser necessário a utilização de um circuito auxiliar, para fazer arrançar o sensor de forma autónoma, enquanto o gradiente de temperatura verificado no

módulo termoelectrico é insuficiente para produzir energia em quantidades suficientes, para o colocar em funcionamento. São apontadas como principais vantagens, o facto deste sistema não exigir qualquer tipo de manutenção, podendo operar por longos períodos de tempo, evitando custos de intervenções e das próprias baterias.

No trabalho de Dalola et al. (2008), é apresentado a criação de um sensor wireless autónomo, com transmissão de dados por rádio frequência, e com um módulo termoelectrico. O objectivo deste sensor é realizar a leitura da temperatura da fonte de calor, gravando essa informação numa memória não volátil, e transferindo-a por rádio frequência (RF) a uma unidade de leitura. Durante as leituras, o módulo termoelectrico vai utilizar a energia proveniente da fonte de calor, produzindo energia eléctrica, estando acoplado a um circuito elevador de tensão DC-DC, de forma a elevar a tensão produzida, tornando-a suficiente para manter em funcionamento o sensor sem recorrer a outras fontes externas. A fiabilidade da informação transmitida pelo sensor de temperatura foi verificada, comparando os resultados com os valores obtidos por uma termoresistência.

Zheng et al. (2013) estudaram a possibilidade da criação de um sistema de cogeração sustentável e fiável, recorrendo a conversores termoelectricos, com o intuito de melhorar a eficiência energética no sector doméstico. O facto de serem dispositivos de estado sólido, não possuindo partes móveis e assim requererem baixa manutenção, são apresentados como principais factores favoráveis a utilização deste tipo de conversores. Embora já existam alguns sistemas que façam uso deste tipo de conversores termoelectricos, os autores crêem que ainda existe muito trabalho de investigação a ser realizado neste campo. Este sistema tem a particularidade de fazer um melhor aproveitamento de energia, utilizando-a na sua totalidade para produção de energia eléctrica e simultaneamente fazer o aquecimento de águas sanitárias. Neste trabalho é feita uma especial referência à importância da seleção do material dos semicondutores que formam os pares termoelectricos utilizados nos conversores, devendo esta seleção ser feita de acordo com as temperaturas de funcionamento do caso de estudo. Os autores propõem assim um sistema que faça o aproveitamento de calor libertado por fontes de calor existentes no ambiente doméstico, como por exemplo uma caldeira, fogões, uma lareira ou qualquer outra fonte de calor, podendo ainda recorrer-se ao aproveitamento de energia solar. O sistema testado foi concebido de forma a encontrar-se integrado com a caldeira e respectivo sistema de abastecimento de água doméstico. De acordo com os resultados obtidos, é possível obter uma potência máxima de saída de 80W para uma diferença de temperatura de 200°C entre as faces do módulo, conseguindo-se valores de aproximadamente 4% de eficiência no processo de conversão. O custo de instalação deste tipo de sistemas pode ser recuperado ao fim de sensivelmente 4 anos, podendo ainda reduzir as taxas de emissões de CO₂, através da produção de energia eléctrica e aquecimento de águas com recurso a energias “limpas”.

Inayat et al. (2012) demonstram a possibilidade de produção de energia elétrica, com recurso à diferença de temperatura que se verifica entre o meio interior e exterior de um edifício. Os autores realizaram um estudo relativo à integração de materiais termoelétricos no interior de materiais de separação de ambientes, nomeadamente em janelas nas envolventes dos edifícios. Energia elétrica pode ser produzida, aproveitando a diferença de temperatura verificada entre o meio exterior e o meio interior, especialmente em regiões geográficas onde o clima seja predominantemente quente. Neste estudo os materiais termoelétricos utilizados foram telureto de bismuto e telureto de antimónio, os quais foram depositados numa superfície acrílica (plexiglas), através do processo de deposição física de vapor. Os resultados obtidos foram bastante promissores, conseguindo-se obter valores de potência satisfatórios.

Devido à crise energética mundial, e sendo os edifícios os maiores responsáveis pela mesma, tem-se verificado um aumento no nível de poluição e conseqüente degradação ambiental, tornando-se urgente procurar alternativas sustentáveis para produção de energia elétrica sem recurso a queima de combustíveis fósseis. Assim, Yang (2011), criou um sistema solar híbrido, que combina o aproveitamento da energia solar através de painéis fotovoltaicos, com módulos termoelétricos para produção de energia elétrica, e aquecimento de águas sanitárias. Este novo sistema é um sistema multicamadas que se instala nas envolventes dos edifícios à semelhança dos atuais. É formado por uma camada de células fotovoltaicas monocristalinas de silício, módulos termoelétricos constituídos por telureto de bismuto (Bi_2Te_3), e tubagens para circulação de água em cobre cobertas por uma matriz de polietileno HDPE revestidos com pó de liga de alumínio de forma a controlar a temperatura do painel. Estas camadas encontram-se suportadas mecanicamente por uma estrutura construída com materiais poliméricos recicláveis, servindo também para minimizar as perdas de calor na zona de contacto do edifício. Yang, comparou a eficiência na conversão de energia deste sistema híbrido com os painéis solares convencionais, assim como o aproveitamento e produção de energia elétrica e térmica para o aquecimento de águas. Os resultados obtidos indicaram que este novo sistema apresenta uma melhoria significativa nestes três campos, em relação aos painéis fotovoltaicos tradicionais, obtendo-se resultados mais próximos da previsão teórica realizada.

Qiu et al. (2009), realizaram um estudo relativo à aplicação de conversores termoelétricos à base de PbSnTe , em equipamentos de combustão domésticos. O intuito deste estudo consistiu na demonstração da possibilidade de produção de energia elétrica, em quantidades suficientes, para alimentar estes mesmos equipamentos ou para efeitos de microgeração. Os autores aplicaram dois conversores termoelétricos num forno a gás natural, um na parte superior e outro na inferior. As potências obtidas comprovaram ser possível alimentar todos os componentes elétricos de um sistema de aquecimento doméstico, e ainda armazenar energia em excesso em baterias ou injecta-la na rede doméstica. Para além disso, foi ainda

desenvolvido um modelo matemático para sistemas de combustão, considerando várias irreversibilidades no processo de conversão direta de energia térmica para elétrica.

Também Champier et al. (2009), aplicaram em laboratório módulos termoelétricos, num fogão doméstico a biomassa, com o intuito de produzir energia em quantidade suficiente, para alimentar a ventoinha do fogão e gerar iluminação. O facto do fogão possuir um sistema de ventilação, melhora a relação ar-combustível, realizando assim uma combustão mais completa. Dado que a temperatura obtida no fogão na fase inicial de funcionamento é extremamente baixa, não é possível produzir-se energia a partir do módulo termoelétrico. Assim sendo, torna-se necessário carregar uma bateria, enquanto o módulo está a produzir energia, para utilizar nestas situações. Outro factor a ter em conta, consiste na temperatura instável durante o funcionamento do fogão, o que provoca uma tensão de saída do módulo também instável. De forma a contornar esta situação, os autores adicionaram ao circuito um conversor DC-DC, estabilizando assim a tensão de saída do módulo. Os resultados obtidos em laboratório, demonstraram ser possível com este sistema produzir cerca de 8W de potência, dos quais fazendo um balanço energético, 2W vão alimentar um LED para iluminação, 1W o sistema de ventilação, e a restante será armazenada numa bateria. Os autores neste estudo, demonstram a eficácia de módulos termoelétricos de telureto de bismuto na produção de energia, realçando a importância na optimização do sistema, nomeadamente a nível da escolha dos permutadores de calor a utilizar.

Nuwayhid et al. (2003), procuraram uma solução para produção de energia elétrica, nas regiões onde durante o inverno, o fornecimento desta é instável, e por vezes inexistente. À semelhança de Zheng (2013), os autores aplicaram dispositivos de Peltier, a funcionar como geradores termoelétricos, num típico fogão de combustão a diesel/lenha, existentes nas habitações da região. Uma vez que estas regiões são normalmente pobres, os autores pretenderam demonstrar uma alternativa simples, barata e eficiente para os habitantes possuírem energia elétrica nas suas casas, afim de realizarem as necessidades mais básicas do quotidiano. Foi feita uma análise do sistema, estudando a zona mais adequada para a localização dos módulos, de acordo com as temperaturas de funcionamento dos fogões, assim como um estudo sobre o comportamento dos diferentes tipos de módulos nessas condições. Com essa informação, os autores apresentam três alternativas para os elementos termoelétricos mais adequados a esta aplicação, podendo passar pela utilização de geradores termoelétricos constituídos por telureto de bismuto disponíveis no mercado, a fabricação dos próprios módulos termoelétricos em Bi_2Te_3 , ou ainda utilização de módulos de Peltier a funcionar como geradores termoelétricos também baseados em Bi_2Te_3 . Da análise realizada ao comportamento destas soluções, os autores concluíram que a solução que apresenta uma melhor relação custo/benefício são os dispositivos de Peltier, apontando como factor preponderante o seu preço no mercado.

Um estudo semelhante já havia sido realizado por Killander (1996), em que foram realizados testes em regiões remotas da Suíça, onde por vezes a rede de energia elétrica é inexistente. Killander, desenvolveu um protótipo utilizando um único gerador termoelétrico, que iria aproveitar o calor do fogão para gerar energia elétrica. Foram realizados experimentos na colocação do conversor termoelétrico em três localizações diferentes na habitação, com diferentes gamas de temperaturas, sendo elas: na parte traseira do fogão, na parte superior do fogão, e ainda na chaminé de exaustão do mesmo. O autor aconselha a colocação do módulos na parte traseira inferior esquerda, pois para além de ser a região em que se atinge maiores temperaturas, esta também não interfere com as tarefas diárias dos ocupantes na utilização do fogão. Os ocupantes da habitação, em que estes testes foram realizados, afirmaram que para além de possuírem energia elétrica capaz de iluminar a habitação e alimentar uma televisão, verificaram uma diminuição no consumo de matéria prima que o fogão utiliza. Tal factor se deve à pequena ventoinha utilizada para arrefecer o dissipador de calor do módulo termoelétrico, que provoca uma circulação de ar pela habitação, melhorando assim o conforto térmico.

Maneewan et al. (2003), apresentam um estudo relativo a um novo conceito de design de telhados de edifícios, para produção de energia elétrica, com recurso a energia solar. Este conceito é intitulado como “*colector solar termoelétrico para telhados*”, e é composto por um vidro acrílico transparente, uma placa de cobre, módulos termoelétricos e um dissipador de calor. A radiação solar incidente aquece a placa de cobre, de forma a criar um gradiente de temperatura entre as faces do módulo termoelétrico, produzindo uma corrente. Esta corrente, é utilizada para alimentar uma ventoinha, que por sua vez irá arrefecer os módulos termoelétricos. Neste estudo, os autores conseguiram produzir cerca de 1,2 W de potência, com uma radiação solar de 800 W/m^2 , e uma temperatura ambiente a variar entre os 30 a 35°C. A velocidade de escoamento do ar, provocada pela ventoinha utilizada foi 1,7 m/s. Os autores referem que este conceito aparenta ser uma boa alternativa para vários propósitos, como para a produção de energia elétrica em áreas remotas, redução de ganhos de calor para a habitação através do telhado, e até mesmo para ventilação dos espaços interiores.

Rockendorf et al. (1999), analisam e comparam detalhadamente o desempenho de um gerador termoelétrico com seguimento solar, combinando um colector solar com um gerador termoelétrico, com um sistema híbrido fotovoltaico para produção de energia com seguimento solar, em que combina a utilização de células fotovoltaicas com um colector solar.

1.4 Objetivos e contribuição da dissertação

Do que foi exposto nas subsecções anteriores resulta que:

A automatização dos edifícios é um assunto de elevado interesse que tem vindo a aumentar com o decorrer dos anos, como consequência da melhoria da qualidade de vida associada ao desenvolvimento tecnológico. Cientistas e engenheiros reúnem esforços contínuos de forma a melhorar estes sistemas, simplificando-os de forma a reduzir os custos dos diversos equipamentos e consequentemente da sua instalação.

Esta automatização tem como finalidade realizar uma gestão técnica da energia nos edifícios, implementando métodos de controlo nos principais sistemas consumidores de energia: a climatização e iluminação. Este controlo é realizado através de redes sensoriais, maioritariamente wireless, que permitem obter uma maior flexibilidade e simplicidade de instalação. No entanto, apresentam como desvantagem a utilização de baterias para armazenar energia, que consoante o tipo de sensor e utilização que possui, pode consumir-se muito rapidamente.

A utilização de módulos termoelétricos com a finalidade de produzir energia elétrica, tem vindo a aumentar substancialmente nos últimos anos. Esta utilização tem sido alvo de diversos estudos no sector dos edifícios, uma vez que de acordo com o que foi exposto anteriormente têm vindo a possuir cada vez mais equipamentos electrónicos.

Prevê-se que no futuro, estes conversores possam vir a fazer parte integrante dos edifícios, com o intuito de alimentar aplicações específicas ou determinados aparelhos electrónicos, substituindo as baterias, reduzindo alguns problemas relativos à autonomia dos equipamentos, e eventuais custos associados a manutenções.

Torna-se portanto pertinente a realização de um estudo aprofundado sobre esta temática, podendo assim definir-se de forma resumida os objectivos do presente trabalho, que são:

- Estudar os efeitos termoelétricos que estes conversores fazem uso, abordando os conceitos teóricos adjacentes aos mesmos.
- Abordar as diferentes tipologias destes conversores, assim como as suas principais aplicações.
- Preparar a instalação experimental, nomeadamente a estrutura de apoio aos ensaios do conversor termoelétrico, pertencente ao Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor do DEM/UBI.
- Realizar diferentes conjuntos de ensaios, de forma a caracterizar o desempenho de um conversor termoelétrico, onde irão ser variados os parâmetros que influenciam o

funcionamento destes conversores, nomeadamente a temperatura imposta nas suas faces, assim como as resistências de carga.

- Avaliar os resultados obtidos relativamente à potência que se conseguiu produzir em laboratório, estudando a viabilidade da utilização destes conversores para algumas aplicações electrónicas comuns em edifícios.

1.5 Visão geral e organização da dissertação

Compõem a presente dissertação 5 capítulos, cuja organização se descreve de seguida.

No capítulo 1 que apresenta como título “Introdução” é realizada uma breve introdução à temática do trabalho. Aqui é descrita uma perspectiva geral relativamente à situação energética mundial, atribuindo especial destaque ao sector dos edifícios. Neste contexto, é introduzida a necessidade da realização de uma melhor gestão técnica de energia nos edifícios, com recurso a automatização dos mesmos. Neste capítulo é exposto o problema, de forma a apresentar os pontos mais importantes para, seguidamente, apresentar os objectivos da dissertação. Por fim, é efectuada uma revisão bibliográfica que permite o enquadramento do trabalho no contexto de trabalhos anteriores.

Inicia-se o capítulo 2 com a definição do conceito da termoelectricidade, apresentando a sua história, seguindo-se a exposição e descrição com maior pormenor dos principais efeitos subjacentes à mesma e os diferentes mecanismos de transferência de calor. De seguida são introduzidos os conversores termoelétricos, onde é realizada uma descrição dos mesmos, referindo os seus possíveis modos de funcionamento, as suas tipologias e as suas principais aplicações. O capítulo termina com uma breve descrição relativamente à automatização dos edifícios com o objectivo de realizar uma melhor gestão técnica da energia nos sistemas que mais influenciam os consumos de energia, apresentando a tipologia destes sistemas e equipamentos utilizados pelos mesmos.

O capítulo 3 intitulado por “estudo experimental”, compreende a descrição de toda a instalação experimental empregue no âmbito do presente trabalho. São descritos os diversos equipamentos utilizados, assim como a construção da estrutura de apoio aos ensaios no Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor do DEM/UBI. Neste capítulo são expostos os diferentes tipos de ensaios realizados na caracterização do conversor termoelétrico, e que visaram conhecer a sua resposta um conjunto diversificado de situações.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos nos diferentes ensaios, realizando o seu tratamento e conseqüente análise, com o intuito de avaliar o conversor termoelétrico, ao nível da tensão, corrente e potência eléctrica que este produz. São ainda indicadas algumas aplicações práticas para este conversor no âmbito dos edifícios.

No capítulo 5, que se apresenta como “Conclusão”, são revistos os objectivos propostos no âmbito da presente dissertação. Faz-se uma análise geral ao trabalho desenvolvido e são fornecidas algumas indicações para trabalho a desenvolver no futuro.

Capítulo 2

Conversores termoelétricos

Termoeletricidade

A termoeletricidade é um processo que se baseia na conversão de energia térmica em energia elétrica. É um conjunto de fenômenos físicos que relacionam a temperatura com as propriedades elétricas dos materiais (Piedade, 1997). Segundo (Chandler, 2010), trata-se de um processo bidirecional, ou seja, pode ser produzida energia elétrica a partir de uma diferença de temperatura entre um lado de um material e o outro, ou pode ser criada uma diferença de temperatura entre os dois lados de um material através da passagem de uma corrente elétrica através do mesmo.

São vários os fenômenos termoelétricos existentes, no entanto no estudo realizado nesta dissertação apenas vão ser considerados os mais importantes, o efeito Seebeck, o efeito Peltier e o efeito Thomson. Estes fenômenos foram descobertos como o próprio nome indica por Thomas Johann Seebeck, Jean Peltier e William Thomson respectivamente, representados na Figura 2.1, sendo abordados com mais detalhe nos seguintes subcapítulos.



Figura 2.1 - Thomas Seebeck, Jean Peltier e William Thomson , respectivamente.

2.1 História da termoeletricidade

Os fundamentos e teorias relativos a efeitos termoeletricos têm vindo a ser desenvolvidos e estabelecidos ao longo do tempo por vários cientistas. No século XIX, em 1821, Seebeck, observou que uma força electromotriz pode ser produzida pelo aquecimento de uma junção formada por dois materiais condutores eléctricos diferentes (Goldsmid, 2009). Este efeito, representado na Figura 2.2, ao qual foi atribuído o nome de efeito de Seebeck, pode ser facilmente demonstrado fazendo uma junção entre dois fios de materiais diferentes, como por exemplo cobre e ferro. Com recurso a um galvanómetro ou um voltímetro sensível nas restantes extremidades, ao aquecer a junção feita pelos dois materiais, poderá verificar-se o aparecimento de uma pequena tensão no galvanómetro. Constatou-se que a tensão termoeletrica produzida, é directamente proporcional à diferença de temperatura entre o ponto de junção dos dois materiais, e as extremidades ligadas ao voltímetro. Esta descoberta teve particular importância, uma vez que é a base de construção dos atuais termopares.



Figura 2.2 - Demonstração do efeito Seebeck.

Seebeck nasceu em 1770, no seio de uma família abastada alemã, onde exerciam a profissão de mercadores em Reval. Formou-se em medicina em 1802 pela Universidade de Gottingen, tendo optado por continuar a aprender física em vez de exercer medicina (Velmre,2007). Anos mais tarde, em 1823, continuou a aprofundar os seus conhecimentos na área da termoeletricidade, tendo constatado que ao aquecer uma das junções de dois materiais condutores (A e B na Figura 2.3), formando um circuito fechado em forma de anel, uma agulha magnética situada nas proximidades desse anel era desviada (Piedade,1997).



Figura 2.3 - Anel de Seebeck com desvio da agulha magnética.

Em 1834, o físico francês Jean Peltier, observou o segundo fenômeno termoelétrico. Peltier utilizou uma montagem semelhante à de Seebeck, no entanto aplicou um procedimento contrário, fazendo passar uma corrente elétrica pela junção de dois condutores. Observou que ao utilizar um gerador de corrente para forçar a passagem de uma corrente elétrica através da junção de dois condutores, esta junção sofria uma alteração de temperatura. Este fenômeno ao qual foi atribuído o nome de efeito de Peltier, foi difícil de demonstrar, uma vez que a utilização de materiais condutores metálicos, envolve sempre a produção de calor resultante do efeito de Joule. Embora Peltier tenha andado próximo das experiências de Seebeck, não relacionou a sua descoberta com este. Foi Lenz quem mais tarde demonstrou que a temperatura da junção pode absorver ou libertar calor quando percorrida por uma corrente elétrica. Experimentalmente, Lenz conseguiu arrefecer água colocada na junção de dois condutores, até produzir gelo, graças a uma corrente elétrica na junção. De seguida, invertendo o sentido da corrente, aqueceu a junção até o gelo derreter.

Jean Charles Peltier nasceu em França, em 1785, tendo vindo a falecer em Paris em 1845. Abandonou a sua profissão de relojoeiro aos 30 anos, para se dedicar à investigação científica no campo da eletricidade. Os seus numerosos estudos foram dedicados essencialmente à eletricidade atmosférica, nomeadamente relâmpagos, intensidade luminosa destas descargas, temperatura da água no estado de levitação térmica e ainda o estudo do ponto de ebulição a grandes altitudes. No entanto, o seu nome ficará sempre associado à sua grande descoberta experimental conhecida por efeito de Peltier (Communications, 2010).

Em 1847, William Thomson, também conhecido como Lord Kelvin, estudou do ponto de vista termodinâmico os efeitos de Seebeck e Peltier, descobrindo que estes efeitos estavam dependentes de propriedades dos materiais que eram relacionáveis através dos coeficientes de Seebeck e Peltier.

Segundo Thomson, num material condutor homogêneo, percorrido por uma corrente elétrica (com intensidade I), para além da libertação de calor por efeito de Joule, proporcional ao quadrado da corrente elétrica (I^2), existe a libertação ou a absorção de calor proporcional a corrente I , desde que exista um gradiente de temperatura no material (Piedade, 1997). A este efeito foi atribuído o nome de efeito Thomson.

William Thomson, físico e matemático, nasceu em 1824 na Inglaterra, tendo falecido em 1907. Destacou-se com o seu trabalho de análise matemática de fenômenos de eletricidade, assim como a formulação da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, na Universidade de Glasgow. Para além disso, é conhecido como Lord Kelvin, devido ao facto de ter determinado o valor correto do zero absoluto.

2.2 Efeito de Seebeck

O efeito Seebeck é definido como o fenómeno em que uma diferença de temperatura entre as junções de dois materiais condutores diferentes, provoca o aparecimento de uma diferença de potencial (ΔV). Este efeito é quantificado pelo coeficiente de Seebeck (α) e é expresso em $[\mu V K^{-1}]$:

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

Este efeito encontra-se relacionado com o movimento de eletrões, isto é, quando um material ou um semiconductor é aquecido numa das suas extremidades e arrefecido na outra, os eletrões tendem a deslocar-se para a região mais fria. Isto deve-se ao facto dos eletrões na região com a temperatura mais elevada tornarem-se mais energéticos, deslocando-se assim para a zona onde os níveis de energia são mais reduzidos (Figura 2.4). Assim, a zona mais quente fica com excesso de iões positivos, e a zona fria com excesso de eletrões. O equilíbrio é atingido, quando o campo elétrico obtido pela concentração destas cargas evita o movimento de eletrões (Gonçalves, 2008).

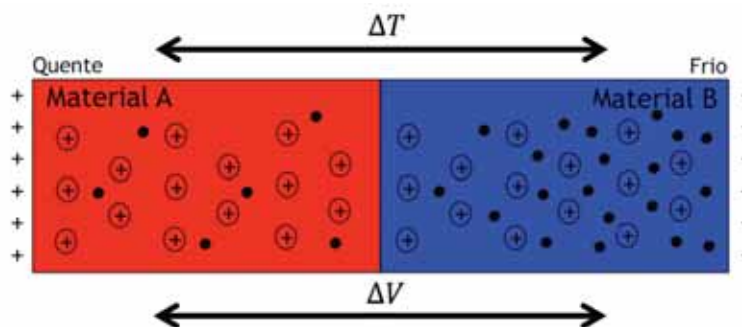


Figura 2.4 - Efeito de Seebeck.

O coeficiente de Seebeck pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo do sentido de deslocação dos electrões. Caso os eletrões se movam da região quente para a região fria, o coeficiente de Seebeck é positivo, caso se movam da região fria para a região quente, é negativo.

Uma corrente elétrica origina-se, quando dois materiais com coeficiente de Seebeck diferentes estão conectados entre si, num circuito fechado, onde nas suas junções existe uma diferença de temperatura. Tal fenómeno acontece, pois os eletrões tentam deslocar-se de um condutor para o outro (Figura 2.5).

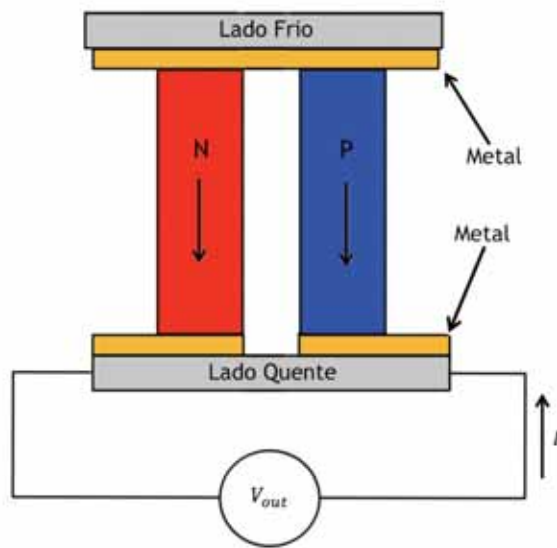


Figura 2.5 - Junção de dois materiais com coeficientes de Seebeck diferentes.

Os valores de tensão elétrica obtidos por este efeito são normalmente reduzidos, conseguindo alguns dispositivos que fazem uso deste efeito produzir alguns milivolts, quando a diferença de temperatura é suficientemente grande.

Este efeito é bastante utilizado em aplicações industriais, como a siderurgia e metalurgia, em processos onde seja necessário medições de temperatura com precisão, e também em pequenas aplicações de aproveitamento e geração de energia elétrica (Gonçalves, 2008; Antunes, 2011).

Os valores típicos do coeficiente de Seebeck podem ser definidos como valor absoluto, ou em relação a outro material de referência. Usualmente é determinado com referência a outro material, porque se torna mais fácil definir o seu valor. No caso da Tabela 2.1 o material de comparação é a Platina, onde caso se pretenda conhecer o valor real absoluto do coeficiente de Seebeck, deve-se subtrair aos valores da tabela, o valor absoluto do coeficiente Seebeck para a platina ($5 \mu V/K$).

Tabela 2.1 - Coeficientes de Seebeck para metais, ligas e semicondutores, à temperatura de 0°C, medido relativamente à platina.

Metais/Ligas e outros materiais	Coeficiente de Seebeck [$\mu V/K$]	Semicondutores	Coeficiente de Seebeck [$\mu V/K$]
Antimónio	47	Se	900
Níquel Crómio	25	Te	500
Cádmio	7,5	Si	440
Tungsténio	7,5	Ge	300
Ouro	6,5	Bi ₂ Te ₃ (Tipo n)	-230
Prata	6,5	Bi ₂ xSb _x Te ₃ (Tipo p)	300
Cobre	6,5	Sb ₂ Te ₃ (Tipo p)	185
Ródio	6	PbTe	-180
Tântalo	4,5	Pb ₀₃ Ge ₃₉ Se ₅₈	1670
Chumbo	4	Pb ₀₆ Ge ₃₆ Se ₅₈	1410
Alumínio	3,5	Pb ₀₉ Ge ₃₃ Se ₅₈	-1360
Carvão	3	Pb ₁₃ Ge ₂₉ Se ₅₈	-1710
Mercúrio	0,6	Pb ₁₅ Ge ₃₇ Se ₅₈	-1990
Platina	0	SnSb ₄ Te ₇	25
Sódio	-2	SnBi ₄ Te ₇	120
KOH	-9	SnBi ₃ Sb ₁ Te ₇	151
Níquel	-15	SnBi _{2,5} Sb _{1,5} Te ₇	110
Constantan (Cu Ni Mn Fe)	-35	SnBi ₂ Sb ₂ Te ₇	90
Bismuto	-72	PbBi ₄ Te ₇	-53

Fonte: Adaptado de Moffat, 1997.

2.3 Efeito de Peltier

O efeito de Peltier ocorre com o estímulo oposto ao do efeito de Seebeck, isto é, quando uma ou mais junções formadas por dois materiais diferentes, um do tipo-n e outro tipo-p, são percorridas por uma corrente eléctrica, é libertada ou absorvida energia térmica nessa junção. A energia térmica é libertada ou absorvida, dependendo do sentido da corrente que o percorre, sendo esta proporcional à mesma.

Quando uma corrente eléctrica passa de um semiconductor do tipo-n para um do tipo-p, irá ser absorvida energia do meio. A temperatura do metal condutor que interliga os dois materiais,

T_c diminui, e o calor é absorvido do ambiente. Esta absorção de calor ocorre, quando os electrões passam de um nível mais baixo de energia, no material do tipo-p, para o material do tipo-n através do metal condutor que os interliga. O calor absorvido percorre os materiais semicondutores através do movimento dos electrões até à outra extremidade da junção, T_h , onde é libertado. Este processo encontra-se representado na Figura 2.6 a).

Caso se inverta o sentido da corrente, passando esta do material semiconductor do tipo-p para o material do tipo-n, vai ocorrer a libertação de energia térmica, o que provoca um aquecimento do meio onde se encontra (Figura 2.6 b)). Este efeito é denominado por efeito de Peltier, e torna-se por vezes difícil de explicar, uma vez que a passagem de corrente eléctrica num condutor ou semiconductor é sempre acompanhada pela libertação de calor por efeito de Joule (Fernandes, 2012).

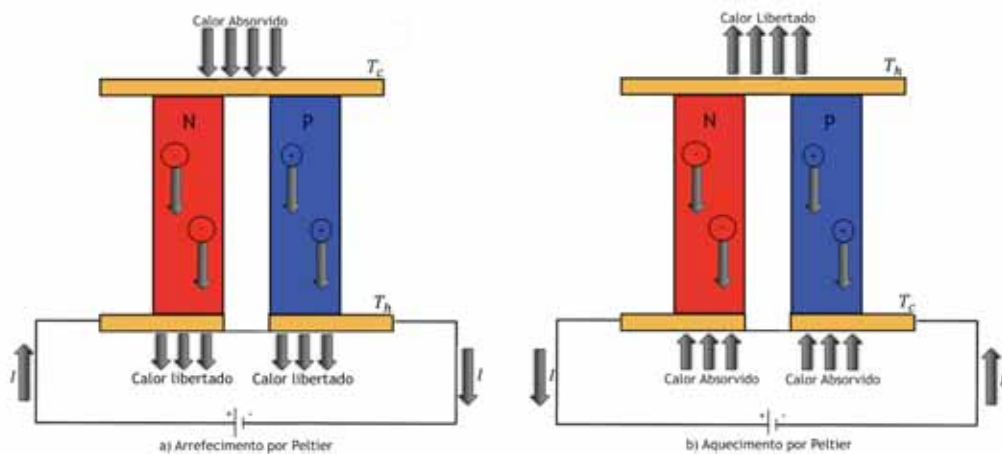


Figura 2.6 - Modos de funcionamento do efeito de Peltier.

O calor resultante do efeito Peltier (Q_P), é obtido pela equação 2.2:

$$Q_P = \pm \pi \cdot I = \pm \alpha \cdot I \cdot T \quad (2.2)$$

Onde

Q_P - Taxa de calor produzido ou absorvido por efeito Peltier por unidade de área da junção, expresso em (W/m^2);

π - Coeficiente de Peltier;

I - Intensidade da corrente eléctrica.

α - Coeficiente de Seebeck;

T - Temperatura absoluta em ($^{\circ}C$).

Este calor (Q_p), pode assumir o valor positivo ou negativo, conforme o sistema absorva ou liberte calor respectivamente.

Caso absorva, é dado por:

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I \quad (2.3)$$

Caso a junção fria dissipe calor:

$$Q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (2.4)$$

Os dispositivos de Peltier, que irão ser abordados em seguida com mais detalhe, são formados por várias junções, funcionando através da circulação de electrões do metal. Estas junções são feitas com materiais diferentes, uma do tipo-n e outra do tipo-p, estando ligadas electricamente em série e termicamente em paralelo.

Este efeito termoelétrico tem diversas aplicações em vários sectores da electrónica, nomeadamente para o controlo de temperatura de componentes e circuitos. A nível da indústria, é utilizado em pequenos frigoríficos sem compressor (Carvalho, 2012).

2.4 Efeito de Thomson

O efeito de Thomson descreve o aquecimento ou arrefecimento de um condutor elétrico, quando este é atravessado por uma corrente elétrica e exposto a um gradiente térmico. Este efeito relaciona os coeficientes de Seebeck e Peltier, sendo representado pela equação 2.5:

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

Onde

T - Temperatura absoluta da junção.

Este efeito é geralmente desprezado para os dispositivos termoelétricos, uma vez que o calor absorvido ou dissipado por efeito Thomson tem proporções bastante inferiores ao produzido por efeito Peltier.

2.5 Transferência de calor

O fenómeno de transferência de calor verifica-se sempre que exista um gradiente térmico entre diferentes materiais ou faces distintas de um material, ocorrendo transferência de energia sob a forma de calor do elemento que se encontra com uma temperatura mais elevada para o que se encontra com uma temperatura mais baixa (Holman, 2009).

Por exemplo, um corpo quando colocado num meio a uma temperatura diferente da que possui, irá receber ou perder energia, aumentando ou diminuindo a sua energia térmica até atingir o equilíbrio térmico. Esta energia térmica que é transferida do corpo para o ambiente, ou vice-versa, é designada de calor. Esta transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos diferentes:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

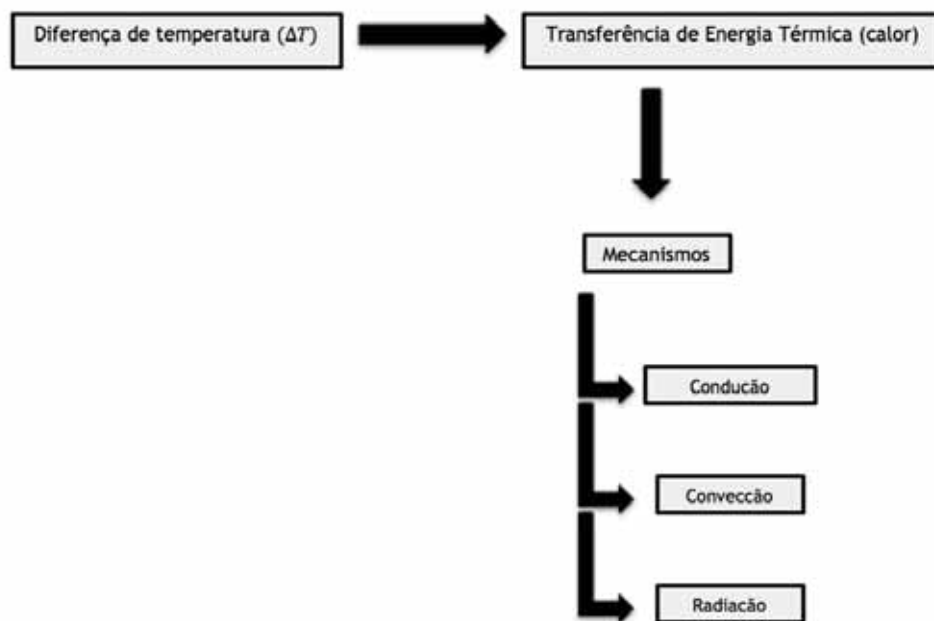


Figura 2.7 - Fenómeno de transferência de calor.

2.5.1 Condução

A condução de calor é o mecanismo que pode ser definido como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região com temperatura elevada para outra com temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido, ou gasoso), ou entre meios diferentes em contacto direto. As partículas mais energéticas, isto é, as que se encontram a temperatura

mais elevada, vão transferir parte da sua energia resultante das interações entre elas, para partículas adjacentes menos energéticas (Cengel, 2003).

Consideremos como exemplo, a transferência de calor através de uma barra com a sua área lateral isolada termicamente, em que uma das suas extremidade é aquecida, como representado na figura 2.8.

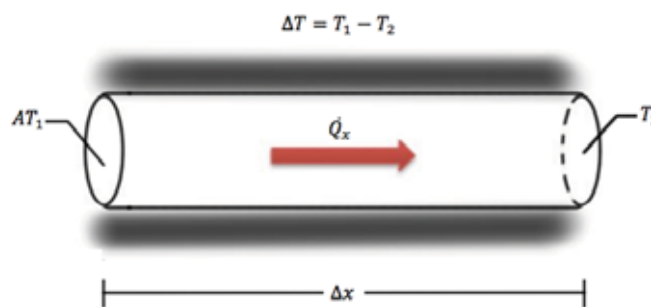


Figura 2.8 - Transmissão de calor por condução.

O fluxo de calor transferido por condução térmica, pode ser obtido através da equação 2.6, também conhecida como Lei de Fourier:

$$\dot{Q}_x = -\kappa \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

Onde:

\dot{Q}_x - Fluxo de calor por condução (W);

κ - Condutibilidade térmica do material (W/mK);

A - Área de secção transversal, através da qual o calor flui por condução, medida perpendicularmente à direcção do fluxo (m²);

$\frac{dT}{dx}$ - Gradiente de temperatura, na direcção x do fluxo de calor.

A condutibilidade térmica (κ), é um dos parâmetro mais importantes quando se analisa a transmissão de calor através de um determinado elemento. É uma propriedade física de cada material, e exprime a quantidade de calor que pode ser transferida através da sua secção. Este factor κ , é expresso em [W/mK], sendo definido como a potencia térmica que é transferida, por unidade de área, ao longo de uma espessura unitária, sujeita a uma diferença de temperatura unitária.

Os valores de κ diferem significativamente de material para material, dependendo da sua constituição química, estado físico e temperatura. Caso apresente um valor elevado, diz-se que o material é um bom condutor térmico, caso contrário, quando o seu valor é reduzido considera-se como bom isolante térmico. Na Tabela 2.2 apresentam-se os alguns exemplos de valores para a condutibilidade térmica dos materiais mais comuns.

Tabela 2.2 - Materiais e respectiva condutibilidade térmica.

Material	Condutibilidade térmica κ [W/mK]
Prata	426
Cobre	398
Alumínio	237
Tungsténio	178
Ferro	80,3
Vidro	0,72 - 0,86
Água	0,61
Tijolo	0,4 - 0,8
Madeira (pinho)	0,11 - 0,14
Fibra de vidro	0,046
Espuma de Poliestireno	0,033
Ar	0,026
Telureto de Bismuto	1,8

Fonte: Adaptado de Carvalho, 2012

2.5.2 Convecção

O mecanismo de transmissão de calor por convecção consiste na forma de transferência de energia entre a superfície de um elemento sólido para o líquido ou gás adjacente que se encontre em movimento (Cengel, 2003).

Esta forma de transferência de calor pode ocorrer de duas formas distintas:

- Convecção natural;
- Convecção forçada.

Na convecção natural, o movimento dos fluidos flui naturalmente, devido às diferenças de densidade ou temperatura. A diferença de temperaturas gera diferenças de densidade no seio

do fluido que poderá ser suficientemente para induzir um movimento ascendente do fluido mais quente, e descendente se o fluido arrefece por contacto com uma superfície mais fria.

Na convecção forçada, o movimento dos fluidos é artificial, sendo provocado por agentes externos, como por exemplo através de um sistema de bombas, ventiladores, etc.

A taxa de calor transferida por convecção para seio de um fluido (Figura 2.9) é dada pela Lei de Newton do arrefecimento.

$$\dot{Q}_{conv} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

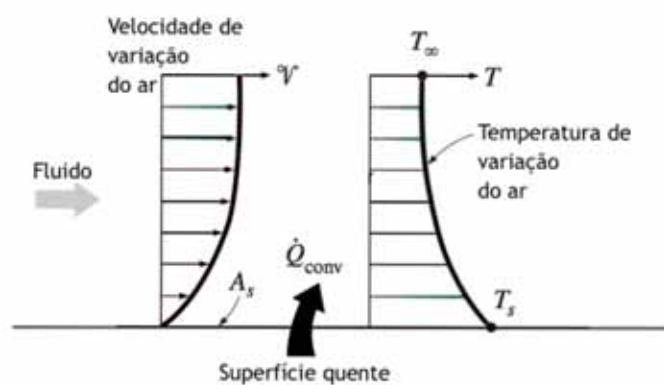


Figura 2.9 - Transmissão de calor por convecção.

Onde:

A - Área de superfície de permuta (m^2);

h - Coeficiente de calor por convecção (W/m^2K);

T_s - Temperatura da superfície de permuta (quente) ($^{\circ}C$ ou K);

T_∞ - Temperatura do escoamento não perturbado ($^{\circ}C$ ou K).

Em termos de fluxo de calor pode ser expresso pela equação 2.8:

$$\dot{Q}_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.8)$$

2.5.3 Radiação

A transferência de calor por radiação pode ser definida como o processo pelo qual o calor é transferido, de uma superfície com elevada temperatura para uma superfície com temperatura mais baixa, encontrando-se estas separadas no espaço. Uma vez que todos os corpos, ou superfícies com temperaturas superiores ao zero absoluto emitem radiação electromagnética, a energia é assim transferida sob a forma de ondas electromagnéticas. Essas ondas são emitidas pelo objecto, não precisando de um meio material para se propagarem.

A taxa de emissão de uma superfície de área A e emissividade ε , é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.9)$$

Onde:

T - Temperatura da superfície em (K);

σ - Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²-K⁴).

2.6 Dissipadores de calor

O crescente desenvolvimento na área da electrónica, provocou um aumento significativo nas concentrações do calor gerado pelos componentes electrónicos, derivado essencialmente ao aumento da sua potência e redução de tamanho.

Quando um equipamento electrónico em funcionamento gera calor, e este calor não é aproveitado de forma útil, significa que grande parte da energia produzida pelo equipamento está a ser desperdiçada para o ambiente. Este calor não aproveitado, contribui para o aquecimento do aparelho, comprometendo assim o seu modo correto de funcionamento e a sua integridade, encurtando o período de vida do mesmo. Para colmatar a necessidade da dissipação do calor gerado por um componente electrónico, um conversor termoelétrico ou qualquer outro objecto que se deseje refrigerar, são utilizados dispositivos cujo objectivo é absorver e dissipar o calor desse componente, através do contacto térmico direto (condução) e convecção. Estes dispositivos são denominados dissipadores de calor, e possuem diversas configurações, como pode ser observado na Figura 2.10.

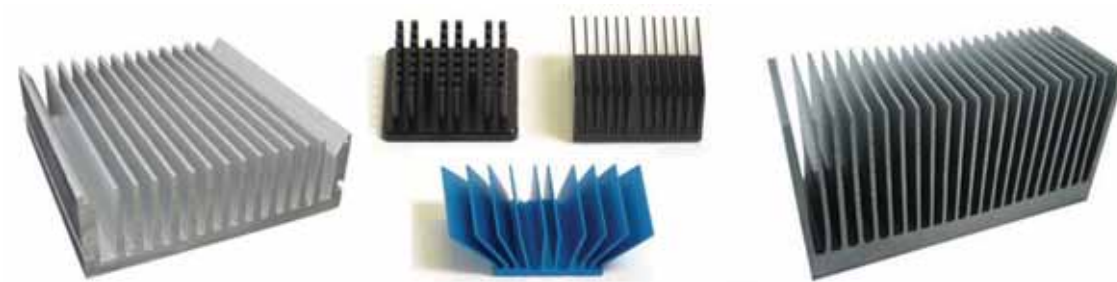


Figura 2.10 - Exemplos de dissipadores de calor com diferentes configurações.

O desempenho dos dissipadores de calor resulta da combinação de diversos factores, tais como:

- Tipo de material utilizado;
- Geometria;
- Dimensões e espaçamentos de alhetas.
- Tipo de convecção.

De forma a aumentar o seu rendimento, os dissipadores de calor possuem normalmente uma superfície estendida, ou alhetas, aumentando assim a superfície de contacto entre o dissipador e o fluido adjacente onde o calor se irá dissipar. A transferência de calor na superfície estendida ocorre por condução no interior do sólido, e por convecção na superfície das alhetas (Souza, 2007).

Os materiais mais comuns utilizados na construção destes dissipadores, são materiais com boa capacidade de condução térmica, normalmente alumínio ou ligas onde o alumínio é o componente principal ($237 [W/mK]$). Por vezes, para determinadas aplicações é utilizado o cobre ($398 [W/mK]$), uma vez que possui um coeficiente de condutibilidade térmica superior ao do alumínio. No entanto, o preço deste material é mais elevado, o que se traduz num custo superior destes dissipadores.

Alguns dissipadores de calor possuem componentes acoplados que permitem aumentar a velocidade de escoamento do fluido pelas alhetas, como por exemplo um ventilador, ou qualquer dispositivo que implique uma ventilação forçada. Estes dispositivos vão melhorar as trocas térmicas, por convecção forçada, permitindo uma melhor dissipação de calor (Figura 2.11).



Figura 2.11 - Dissipador de calor com ventilação forçada.

Uma vez que os conversores termoelétricos são componentes que utilizam na sua fabricação materiais semicondutores com boa condutibilidade térmica, e produzem uma grande quantidade de calor por área devido às suas dimensões reduzidas, torna-se indispensável, a utilização de dissipadores de calor, de preferência com ventilação forçada. Para além da vantagem de se conseguir obter uma temperatura mais baixa na face fria, que se traduz num maior gradiente de temperatura no conversor significando um melhor desempenho, prolonga-se também o período de vida útil do componente.

2.7 Conversores termoelétricos

Os conversores termoelétricos, também designados por módulos termoelétricos, são dispositivos que funcionam com base nos efeitos de Seebeck e de Peltier. São dispositivos que convertem a energia elétrica num gradiente de temperatura, ou vice-versa. Na base da sua fabricação são utilizados materiais semicondutores, uma vez que estes não possuem um comportamento tão linear como certos metais e ligas (utilizados na fabricação de termopares), variando a sua condutibilidade térmica com a temperatura, permitindo obter valores de tensão superiores. São constituídos por vários pares termoelétricos de materiais semicondutores diferentes, um do tipo-p e outro do tipo-n, que se encontram ligados electricamente em série, através de placas condutoras metálicas (geralmente em cobre), e termicamente em paralelo através de duas placas de cerâmica planas, à base de óxido ou nitrato de alumínio, que permitem estabelecer o contacto térmico do conversor com o restante sistema e manter a integridade física do módulo.

Estes dispositivos possuem inúmeras vantagens, dado que não produzem ruído ou vibrações no seu modo de funcionamento, e não possuem partes mecânicas móveis, o que lhes confere um elevado grau de fiabilidade, necessitando de menos manutenções (Riffat, 2006).

Na Figura 2.12, encontra-se representado de forma esquemática, o aspecto construtivo de um módulo termoelétrico.

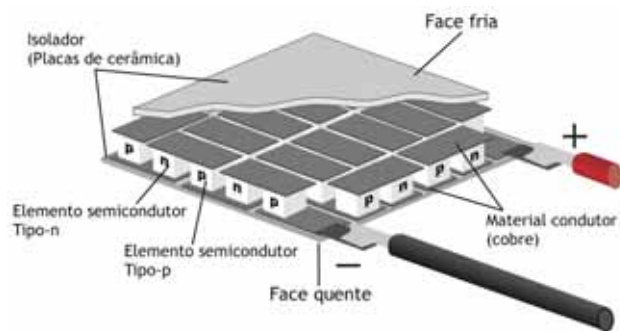


Figura 2.12 - Módulo termoelétrico. Fonte: Kryotherm, adaptado.

Estes conversores termoelétricos possuem dois modos de funcionamento distintos, de acordo com o efeito termoelétrico que estejam a utilizar. Caso façam uso do efeito de Peltier, comportam-se como uma bomba de calor, sendo designados por refrigeradores termoelétricos (TEC). Por outro lado, caso façam uso do efeito de Seebeck, comportam-se como máquinas térmicas, sendo designados por geradores termoelétricos (TEG).

2.8 Arrefecimento por peltier

Os conversores termoelétricos utilizados para arrefecimento Peltier, denominados também como refrigeradores termoelétricos ou de Peltier, como o próprio nome indica, fazem uso do efeito de Peliter. São dispositivos de estado sólido (sem partes móveis), que convertem a energia elétrica num gradiente de temperatura. São constituídos por uma estrutura colunar de elementos termoelétricos (semicondutores do tipo-p e tipo-n) ligados em série através de junções metálicas, que vai permitir a circulação da corrente elétrica por todos os elementos termoelétricos que lhe estão associados. (Figura 2.13). Estes elementos termoelétricos encontram-se isolados por duas placas de cerâmica paralelas, que possuem boa condutividade térmica e baixa resistividade elétrica.

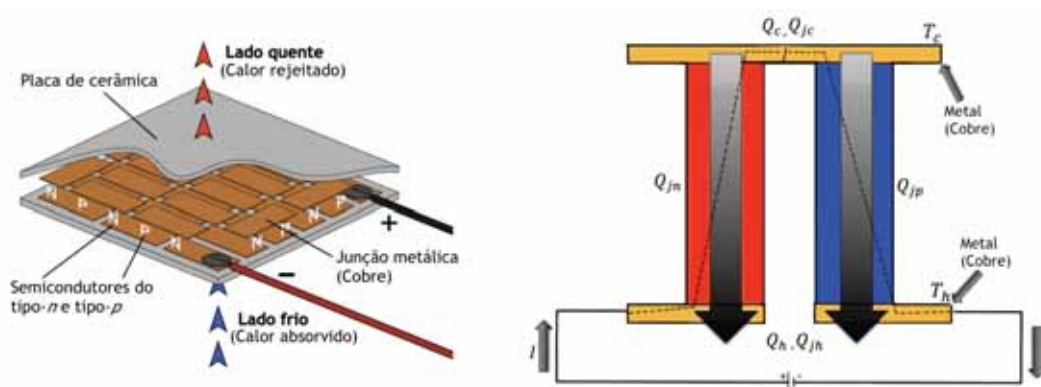


Figura 2.13 - Módulo de Peltier e junção pn (par termoelétrico).

Quando estes dispositivos são percorridos por uma corrente elétrica, esta entra pelo terminal positivo (+), percorre todos os elementos termoelétricos em série, e sai pelo terminal negativo (-) (Figura 2.13). Os elementos termoelétricos do tipo-n, possuem coeficiente de Seebeck negativo, enquanto os do tipo-p, positivo. A corrente ao atravessar a junção *metal-n*, liberta energia térmica por efeito Peltier, aquecendo a parte inferior do módulo. Na parte superior verifica-se na junção *n-metal* e na junção *metal-p*, a absorção calor. Por fim, na base do dispositivo, a corrente ao atravessar a junção *p-metal* liberta calor (Gonçalves, 2008). Caso seja invertido o sentido da corrente elétrica, o lado do módulo termoelétrico que arrefecia passa a quente, e vice-versa. Graças a esta característica dos TEC, estes podem ser utilizados tanto para aquecimento, como para refrigeração.

Em suma, as junções termoelétricas superiores e inferiores destes conversores termoelétricos vão absorver e libertar calor por efeito Peltier (Q_c) e (Q_h) respectivamente. Este calor absorvido ou libertado, é proporcional à soma dos coeficientes de Peltier dos materiais da junção (π), que por sua vez, são proporcionais aos coeficientes de Seebeck (α) e à temperatura ($\pi = \alpha \cdot T$). Assim sendo, a potência térmica absorvida ou libertada podem ser expressas pelas seguintes equações:

$$Q_c = Q_{nc} + Q_{pc} = (\pi_n + \pi_p) \cdot I = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I \quad (2.10)$$

e

$$Q_h = Q_{nh} + Q_{ph} = (\pi_n + \pi_p) \cdot I = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_h \cdot I \quad (2.11)$$

Por outro lado, a corrente elétrica ao atravessar os diferentes elementos termoelétricos (contactos metálicos e os semicondutores tipo-n e tipo-p), vai ser libertado calor por efeito de Joule (representados na Figura 2.13 por ($Q_{jn}, Q_{jc}, Q_{jp}, Q_{jh}$)).

$$Q_j = R \cdot I^2 \quad (2.12)$$

com,

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.13)$$

Como se pode constatar pelas equações, a energia libertada por efeito de Joule, depende não só da corrente elétrica (I), mas também das dimensões dos diversos elementos do dispositivo (comprimento l , secção S) e da resistividade elétrica dos materiais (ρ).

Assim sendo, com o intuito de reduzir a quantidade de calor produzido por efeito de Joule, permitindo o arrefecimento da face fria do dispositivo, torna-se fulcral a utilização de materiais com baixa resistividade elétrica na fabricação dos dispositivos Peltier.

Uma vez que uma das faces do módulo vai libertar calor e a outra absorver, vai gerar-se uma diferença de potencial por efeito Seebeck entre as duas faces do dispositivo. De forma a anular esta diferença de potencial, deve ser fornecida ao dispositivo uma maior potência, sendo a tensão de alimentação de um módulo de Peltier, dada pela soma da tensão de Seebeck (V_S) e a queda na resistência interna (V_r).

$$V_i = V_r + V_S \quad (2.14)$$

Sendo,

$$V_r = R \cdot I \quad (2.15)$$

e,

$$V_S = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

Um outro aspecto a ter em conta na seleção dos materiais a utilizar na fabricação de dispositivos de Peltier, é a condutibilidade térmica (κ). Quanto menor for a condutibilidade térmica, menor será a energia térmica transferida do lado quente para o lado frio do dispositivo (Gonçalves, 2008). Assim, deve dar-se primazia a utilização de materiais com baixa condutibilidade térmica, afim de diminuir o fluxo de calor que é gerado nos dispositivos de Peltier, provocado pela diferença de temperatura entre as faces. Este fluxo de calor (Q_K), gerado pela condução térmica, depende da diferença de temperatura (ΔT), das dimensões dos materiais termoelétricos (comprimento l , secção S) e condutibilidade térmica do material (κ_t).

$$Q_K = \kappa_t \cdot \Delta T \quad (2.17)$$

com,

$$\kappa_t = (\kappa_p + \kappa_n) \quad (2.18)$$

e,

$$R_t = \frac{1}{\kappa_t} \quad (2.19)$$

Onde

Q_K - Fluxo de energia térmica em (W);

κ - Condutância térmica em (W/mK);

R_t - Resistência térmica em (°C/W).

K_p e K_n - Condutância térmica do semicondutor do tipo-p e tipo-n respectivamente.

Na análise destes dispositivos de Peltier, deve-se ter ainda em conta, uma resistência elétrica e térmica adicional, resultante do contacto entre os semicondutores e o metal (junção metal-n e metal-p), à qual se designa por resistência de contacto (R_c). Esta resistência de contacto é proporcional à resistividade do contacto (ρ_c), e inversamente proporcional à secção de contacto (S).

$$R_c = \frac{\rho_c}{S} \quad (2.20)$$

A resistência interna elétrica do dispositivo de Peltier (R_{Pelt}), resulta das somas das diversas resistências, representadas na Figura 3.3, obtida por:

$$R_{Pelt} = R_n + R_p + 4R_c + 2R_j \quad (2.21)$$

Em que:

R_n - Resistência interna do elemento termoelétrico do tipo-n;

R_p - Resistência interna do elemento termoelétrico do tipo-p;

R_c - Resistência de contacto entre os materiais termoelétricos e o metal da junção;

R_j - Resistência interna do material metálico da junção (geralmente desprezável devido apresentar baixos valores).

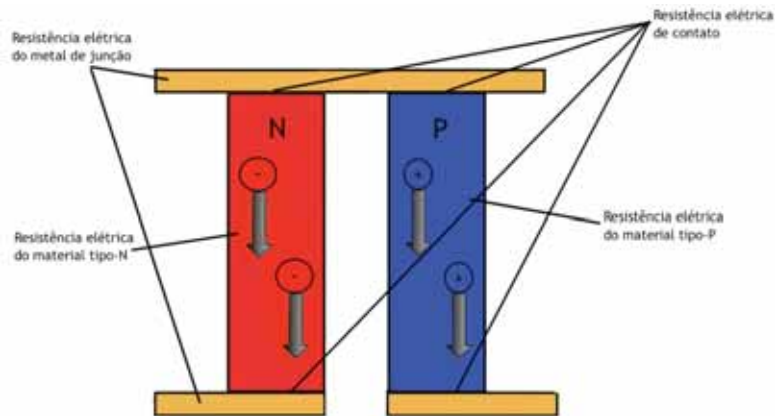


Figura 2.14 - Resistências elétricas numa junção pn de um conversor termoelétrico.

Considerando então todos os aspectos referenciados anteriormente (efeito Peltier, Joule, energia conduzida pelo próprio dispositivo), a quantidade de energia que um dispositivo Peltier absorve do exterior no lado frio é dado pela seguinte equação de equilíbrio de energia:

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2 - \kappa(T_h - T_c) \quad (2.22)$$

Nas aplicações de refrigeração, de forma a evitar o sobreaquecimento do dispositivo de Peltier, o lado quente do dispositivo encontra-se em contacto com um dissipador de calor, transmitindo ao ambiente a energia gerada. Nestes dispositivos, um aumento da temperatura no lado quente, irá causar um aumento na temperatura no lado frio, dado a manter-se a diferença de temperatura entre as duas fases, garantindo o estado estacionário. Analogamente ao que se passa no lado frio, a equação de equilíbrio que traduz a quantidade de energia libertada no lado quente do dispositivo de Peltier é dada por:

$$Q_h = (\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - \kappa(T_h - T_c) \quad (2.23)$$

Constata-se pela observação direta, das equações do calor absorvido pelo dispositivo no lado frio (Q_c), e o calor libertado pelo lado quente (Q_h), que a energia libertada no lado quente é maior que a energia absorvida no lado frio.

2.9 Geradores termoelétricos

Quando os conversores termoelétricos funcionam como geradores de energia elétrica, estão a fazer uso do efeito de Seebeck. Estes geradores termoelétricos, TEG, convertem energia térmica em energia elétrica, aproveitando a diferença de temperatura que se verifica entre

os lados quente e frio do conversor. À semelhança dos refrigeradores termoelétricos, estes conversores são formados por vários pares termoelétricos de semicondutores, do tipo-n e tipo-p, interligados nas suas junções por ligas metálicas condutoras, geralmente de cobre. Estas junções encontram-se colocadas entre duas placas cerâmicas, que possuem uma baixa condutividade térmica, conferindo uma boa robustez mecânica ao módulo.

Cada uma destas junções, produz uma diferença de potencial elétrico muito reduzido, na ordem de algumas centenas de milivolts ($\cong 400\mu V/^{\circ}C$ no caso de se utilizar como materiais termoelétricos, teluretos de bismuto e antimónio (Gonçalves,2008), sendo esta proporcional à diferença de temperatura entre os lados quente e frio do dispositivo. De forma a obter uma tensão de saída do gerador termoelétrico mais elevada, são utilizadas várias junções pn ligadas em série, sendo esta tensão obtida multiplicando a diferença de potencial de cada junção, pelo número de junções totais (n) do conversor.

$$V_{out} = n.(\alpha_p - \alpha_n). \Delta T \quad (2.24)$$

Onde $(\alpha_p - \alpha_n)$ corresponde ao coeficiente de Seebeck dos materiais semicondutores utilizados, tipo-p e tipo-n respectivamente, e ΔT à diferença de temperatura entre as faces.

Quando estes conversores estão a funcionar como geradores, não possuem qualquer tipo de fonte de alimentação DC externa, apenas uma carga, como pode ser observado na Figura 2.15.

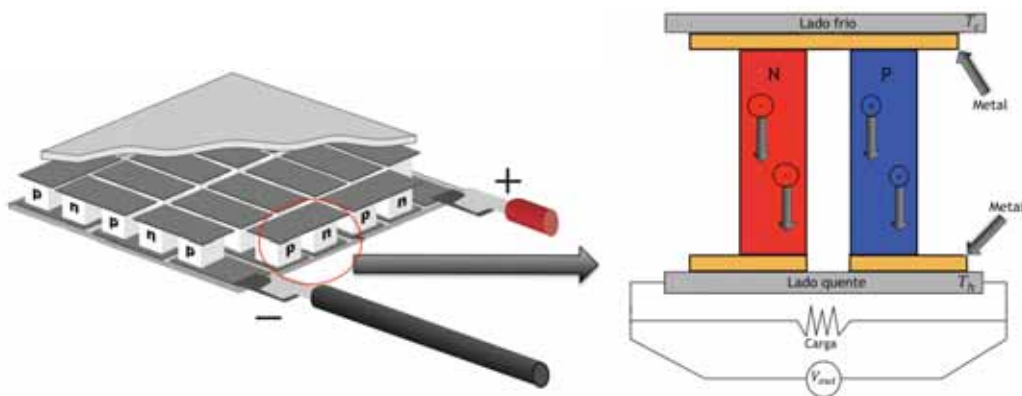


Figura 2.15 - Gerador termoelétrico com detalhe de uma junção pn.

A potencia de saída de um gerador termoelétrico depende não só do valor da tensão elétrica de saída (V_{out}), mas também do valor da sua resistência interna (R_i), cuja fórmula é semelhante à enunciada anteriormente nos dispositivos de Peltier.

$$R_i = R_{Pelt} = R_n + R_p + 4R_c + 2R_j \quad (2.25)$$

Onde,

R_n - Resistência interna do elemento termoeletrico do tipo-n;

R_p - Resistência interna do elemento termoeletrico do tipo-p;

R_c - Resistência de contacto entre os materiais termoeletricos e o metal da junção;

R_j - Resistência interna do material metálico da junção (geralmente desprezável devido a apresentar baixos valores).

Com,

$$R_n = \rho_n \cdot \frac{l}{S} \quad (2.26)$$

Normalmente os fabricantes deste tipo de módulos termoeletricos fornecem o valor da resistência interna, considerando todas as outras resistências R_n , R_p , R_c .

Dado isto, é possível calcular a potência elétrica máxima gerada (P_{MAX}) em plena carga, obtida quando a resistência interna do conversor é igual à resistência da carga associada.

$$P_{MAX} = \frac{V_{out}^2}{4 \cdot R_i} = \frac{(n \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T)^2}{4 \cdot n(R_n + R_p + 4R_c + 2R_j)} \quad (2.27)$$

De forma a manter a diferença de temperatura constante no conversor termoeletrico, e este continuar a debitar corrente elétrica (I), será necessário fornecer calor ao lado quente do módulo (Q_h), e remover do lado frio (Q_c). As equações que quantificam essa energia térmica são:

$$Q_h = \kappa \cdot \Delta T + (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2 \quad (2.28)$$

e

$$Q_c = \kappa \cdot \Delta T + (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T \cdot I + \frac{1}{2} R \cdot I^2 \quad (2.29)$$

Os materiais termoelétricos utilizados na fabricação destes dispositivos, devem possuir elevados coeficientes de Seebeck (α), de forma a obter tensões de saída mais elevadas, baixa resistividade elétrica (ρ), que proporciona baixa resistência interna, e baixa condutibilidade térmica (κ), de forma a que a energia térmica exigida para alimentar o gerador seja minimizada. Para além disso, deve ser tomado em conta o parâmetro ZT , utilizado para quantificar o desempenho dos geradores.

2.10 Figura de mérito

A figura de mérito é responsável pela caracterização da eficiência dos sistemas termoelétricos, sendo por isso utilizada a nível mundial por cientistas e engenheiros quando se pretende estabelecer uma relação de comparação entre estes sistemas (Bangert, 2006). Este conceito é representado usualmente por Z , e relaciona três tipos de grandezas: propriedades elétricas e térmicas dos materiais, assim como a temperatura absoluta de funcionamento. A figura de mérito é definida da seguinte forma:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho\kappa} \quad (2.30)$$

Onde α representa o coeficiente de Seebeck, ρ a resistividade elétrica e κ a condutibilidade térmica. Uma vez que esta não é constante com a temperatura, é muitas vezes representada de forma adimensional, sendo calculada pela seguinte equação para uma determinada temperatura:

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho\kappa} \quad (2.31)$$

Os materiais que possuem uma boa figura de mérito, são portanto os mais indicados para utilizar nos conversores termoelétricos, uma vez que apresentam uma eficiência de conversão de energia térmica para elétrica melhor. Quanto mais elevado for o coeficiente de Seebeck, mais elevados serão os valores de tensão de saída do conversor, tendo por isso um melhor desempenho. Deve ser também tomado em consideração a escolha de um material com baixa resistividade elétrica, proporcionando uma baixa resistência interna reduzindo o calor produzido por efeito de Joule, e uma baixa condutibilidade térmica. No entanto, a resistividade elétrica encontra-se interligada com a condutividade térmica, ou seja, um metal que possua baixa resistividade elétrica, possui uma elevada condutibilidade térmica tornando-o um excelente condutor. Deve portanto utilizar-se materiais que possuam uma boa relação entre as grandezas atrás mencionadas, traduzindo-se numa boa figura de mérito (à volta da unidade). Na Figura 2.16 encontram-se representadas as figuras de mérito para diferentes materiais a diferentes temperaturas.

termoelétricos são conversores de energia de estado sólido, cujo funcionamento não emite qualquer tipo de som ou vibração, possuindo pequenas dimensões e um peso reduzido. Estes são largamente utilizados como sensores, recuperadores de energia, e geradores de energia, podendo ser divididos de uma forma geral em dois grupos de aplicações distintas: de refrigeração, e de produção de energia. O facto de serem bastante fiáveis e requererem baixa manutenção, torna estes dispositivos bastante atrativos para utilizações em ambientes críticos, onde o acesso por vezes é limitado ou complicado por se tratarem de ambientes perigosos (Leonov,2007).

Nas subsecções seguintes, vão ser descritas de uma forma mais pormenorizada algumas das suas aplicações.

2.11.1 Termopar

Um exemplo de aplicação mais comum do efeito de Seebeck, são os termopares. Os termopares são sensores de temperatura bastante utilizados a nível industrial e em laboratórios, pois permitem uma ampla faixa de leitura de temperaturas.

Um termopar é formado por dois condutores metálicos diferentes, com coeficientes de Seebeck distintos (Figura 2.17). Usualmente estes dois materiais são soldados nas duas extremidades, ao qual se atribui a designação de junção de referência a uma, e junção quente ou de medição à outra. Ao aquecer uma destas junções, irá surgir uma corrente elétrica que fluirá pelo circuito.

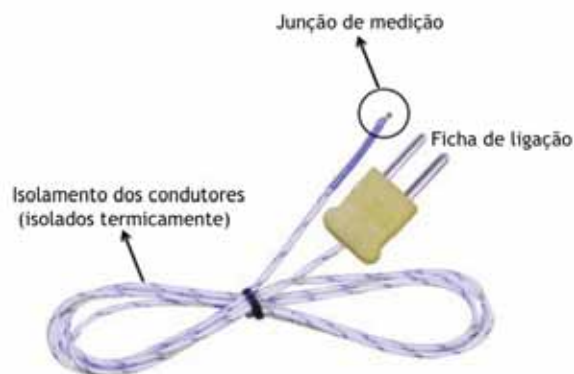


Figura 2.17 - Termopar.

Caso o circuito seja aberto em uma das extremidades, uma tensão elétrica de circuito aberto irá surgir, sendo esta proporcional à diferença de temperatura entre a extremidade soldada e a extremidade aberta. Esta tensão gerada pode ser quantificada a partir da seguinte expressão:

$$V = (\alpha_a - \alpha_b) \times (T_h - T_c) \quad (2.32)$$

onde:

α_a - Coeficiente Seebeck do material A do termopar;

α_b - Coeficiente Seebeck do material B do termopar;

T_h - Temperatura da junção quente;

T_c - Temperatura da junção fria.

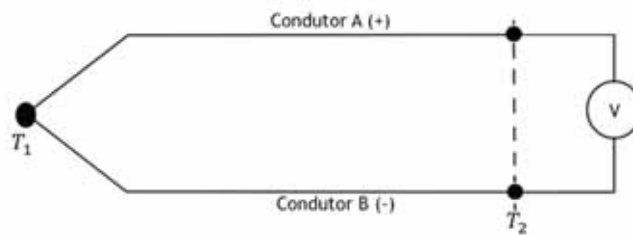


Figura 2.18 - Demonstração Efeito Seebeck.

Para um termopar conseguir efetuar uma medição de temperatura, torna-se necessário manter uma extremidade a uma temperatura fixa de referência (junção de referência), a partir da qual se determina a temperatura da outra junção, uma vez que estes sensores medem a diferença de temperatura entre dois pontos. Na prática, a junção de referência é mantida constante, por exemplo a 0°C, recorrendo a gelo fundente (Figura 2.19), ou então através de circuitos electrónicos.

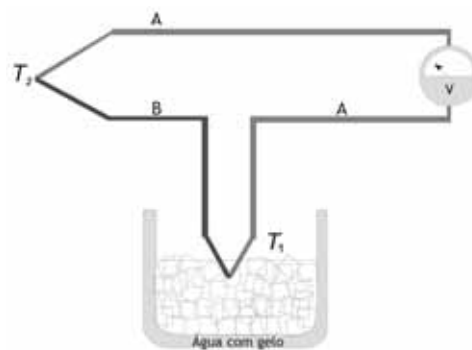


Figura 2.19 - Medição de temperatura utilizando um Termopar.

Existem vários tipos de termopares, sendo identificados através das letras T, J, K, E, N, R, S, B, de acordo com os metais condutores utilizados e o calibre dos fios utilizados, segundo a norma ANSI. Para cada aplicação deve ser escolhido o termopar mais adequado.

A Tabela 2.4 caracteriza os diferentes tipos de termopares, nomeadamente a sua constituição, faixa de temperaturas de utilização, a f.e.m produzida, assim como possíveis exemplos de aplicações.

Tabela 2.4 - Tipos de Termopares e características.

Tipo	Material/Ligas	Temperatura de Funcionamento [°C]	F.E.M Produzida [mV]	Aplicações
T	Cobre/Constantan Cu/CuNi	-200 a 370	-5,603 a 19,030	Criometria, indústrias de refrigeração, pesquisas agronómicas e ambientais, química e petroquímica
J	Ferro/Constantan Fe/CuNi	0 a 760	0 a 42,919	Centrais de energia, metalúrgica, química, petroquímica, indústria em geral.
E	Cromel/Constantan NiCr/CuNi	-200 a 870	-8,825 a 66,473	Química e petroquímica
K	Cromel/Alumen NiCr/NiAl	-200 a 1260	-5,891 a 51	Metalúrgica, siderúrgica, fundição, vidros, cerâmica, indústria em geral.
S	Platina 10% Ródio/Platina Pt10%Rh/Pt	0 a 1480	0 a 15,341	Siderurgia, fundição, cerâmica, vidro, pesquisas específicas.
R	Platina 13% Ródio/Platina Pt13%Rh/Pt	0 a 1480	0 a 17,169	Siderurgia, fundição, cerâmica, vidro, pesquisas específicas.
B	Platina 30% Ródio/Platina 6% Ródio Pt30% Rh/Pt Rh	870 a 1700	3,708 a 12,433	Vidro, siderurgia, altas temperaturas em geral.

Fonte: Maldonado, 2009.

2.11.2 Relógios de pulso

Os relógios de pulso que fazem uso da tecnologia termoelétrica fazem proveito da diferença de temperatura entre o corpo humano e o ambiente, recorrendo ao efeito Seebeck para produção de energia. Existem pelo menos dois fabricantes no mercado que construíram estes relógios, sendo eles a Seiko e a Citizen.

O modelo do fabricante Seiko, denominado por Thermic watch, foi produzido em 1998 e consegue produzir energia suficiente com uma diferença de temperatura de 1-3°C, para

manter em funcionamento o seu mecanismo eletrónico (opera a 1,5V) (Paradiso, 2005). A tampa traseira deste relógio funciona como fonte de calor, recebendo a temperatura do braço, enquanto que a estrutura onde se encontra inserido o mecanismo do relógio, estando em contacto com a temperatura ambiente representa a fonte fria. Este relógio faz uso de 10 módulos termoelétricos, cada um com 104 elementos térmicos ligados em série entre si, perfazendo as dimensões de 2x2mm e produzindo aproximadamente 200mV (N.I, 2001) (Figura 3.9d).

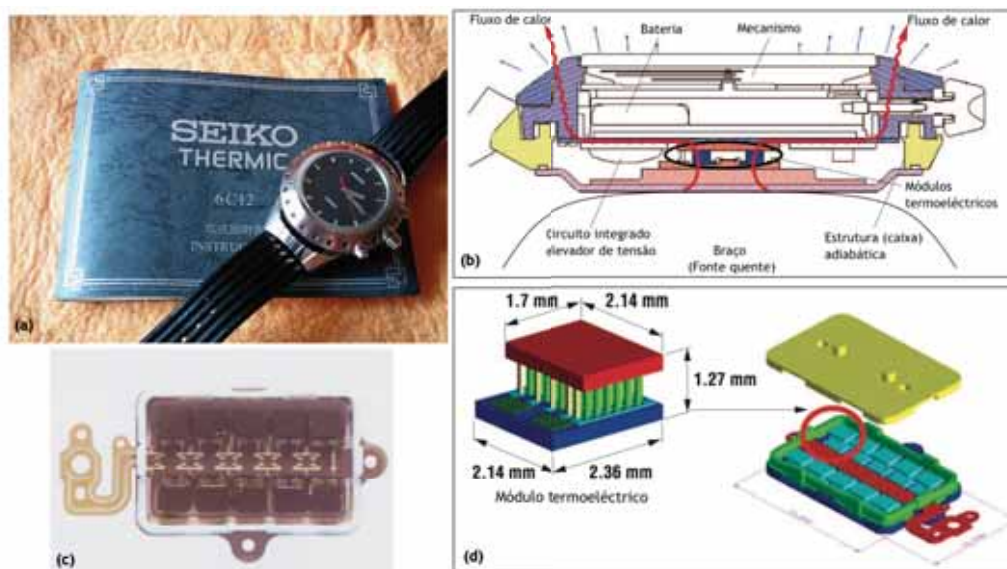


Figura 2.20 - Relógio Seiko Thermic (a); corte transversal esquemático com os diversos constituintes (b); estrutura constituída pelos módulos termoelétricos (c); módulo termoelétrico (d). Fonte: Adaptado Paradiso, 2005.

O relógio da Citizen, modelo Eco-Drive Thermo, possui um módulo termoelétrico com 1242 junções, produzindo uma tensão de 640mV com uma potência de $13,8\mu\text{W}$ por cada grau centígrado de diferença de temperatura (Bastos, 2010).

2.11.3 Pulseiras termoelétricas

Dyson Energy é o nome atribuído às pulseiras termoelétricas, desenvolvidas com a finalidade de produzir e armazenar energia, fazendo uso do efeito Seebeck.

À semelhança dos relógios de pulso, estas pulseiras possuem o mesmo princípio de funcionamento, com a diferença da substituição do mecanismo do relógio por baterias. Estas baterias têm o objectivo de armazenar a energia produzida pelo corpo humano, podendo ser utilizada através de uma porta mini-USB para alimentar diversos aparelhos electrónicos como por exemplo um telemóvel, conseguindo assim mais uns minutos de utilização. Esta tecnologia encontra-se representada na Figura 2.21, cujo design foi concebido por Mathieu Servais et al.



Figura 2.21 - Pulseira termoelétrica Dyson Energy. Fonte: Yanko Design.

2.11.4 Válvula electrónica para radiadores

A iTRV (intelligent thermostatic radiator valve), é uma tecnologia do fabricante Micropelt que permite ajustar e monitorizar a temperatura dos radiadores de parede dos edifícios, sem recorrer a baterias ou cabos de alimentação. Esta tecnologia faz proveito do gradiente de temperatura existente entre o radiador e a divisão onde se encontra, extraíndo energia através de um módulo termoelétrico. Este sistema possui um circuito auxiliar que permite estabilizar, armazenar e gerir a tensão produzida pelo conversor, que irá ser utilizada para manter o actuador em funcionamento, assim como para a comunicação wireless. Para além disso possui um motor e um sistema de controlo que permite manter o consumo de energia por parte do actuador o mais reduzido possível. A sua aplicação é bastante simples, passando apenas pela substituição das válvulas mecânicas manuais. Na Figura 2.22 encontra-se representada esta tecnologia, assim como os seus componentes.

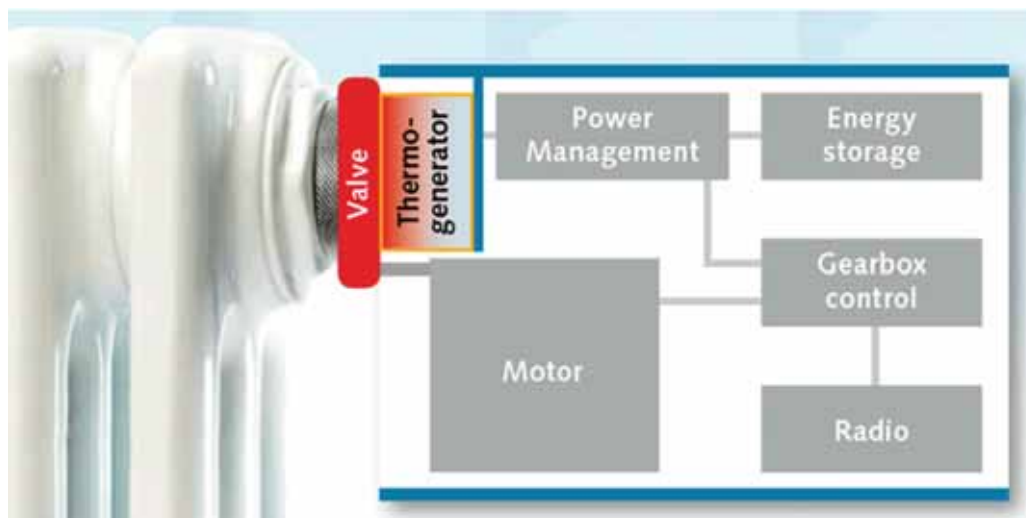


Figura 2.22 - Válvula iTRV. Fonte: Micropelt, 2006.

Em 2010 a EnOcean começou a desenvolver uma tecnologia semelhante a esta, produzindo actuadores wireless para aplicação em edifícios sem necessidade de baterias. O controlo remoto destas válvulas é feito através de sinais de rádio, comunicando a informação dos diferentes actuadores à unidade central. O seu princípio de funcionamento para produção de energia é semelhante ao da Micropelt, possuindo um conversor termoelétrico com as dimensões de $15 \times 15 \text{ (mm}^2\text{)}$. Este conversor encontra-se em contacto directo com o radiador ou o tubo de circulação de água quente, enquanto o lado frio possui um dissipador de calor em contacto com o meio ambiente. Este sistema possui um circuito elevador de tensão, o qual permite obter energia suficiente para colocar o actuador em funcionamento apenas com uma diferença de temperatura de 2°C , sendo esta previamente armazenada num condensador (EnOcean, 2010). O modo de funcionamento deste sistema encontra-se representado na Figura 2.23.



Figura 2.23 - Componentes da tecnologia EnOcean de monitorização e controlo de temperatura. Fonte: Adaptado de EnOcean Thermo Applications, 2010.

A nível industrial, a ABB criou um transmissor wireless de temperatura para aplicação em diferentes processos industriais, designado WiTemp. Este sensor à semelhança dos anteriores é completamente autónomo, produzindo e fazendo a gestão de energia através de módulos termoelétricos e respectivo circuito auxiliar. Segundo o fabricante, é necessário um ΔT mínimo de 30°C, sendo por isso aplicado no interior das tubagens industriais, aproveitando o calor gerado nos processos. Na Figura 2.24, pode-se observar um exemplo de aplicação desta tecnologia numa fábrica sediada na Inglaterra.



Figura 2.24 - Transmissor WiTemp. Fonte: Energy Harvesting Journal, June 2013.

2.11.5 Ventiladores

A Ecofan é uma ventoinha que contrariamente às ventoinhas tradicionais não possui qualquer ligação elétrica, sendo a energia necessária para o seu funcionamento produzida através de um conversor termoelétrico. Esta ventoinha é colocada no topo de qualquer fonte de calor, sendo maioritariamente utilizada nos típicos fogões domésticos a lenha ou a gás, salamandras, caldeiras, etc, como pode ser observado na Figura 2.25.



Figura 2.25 - Ventilador Ecofan e respectiva aplicação. Fonte: Gyroscope.

Esta ventoinha vai funcionar como dissipador de calor, transmitindo o calor libertado pela fonte quente desde a sua base em alumínio ao dispositivo termoelétrico que se encontra a meio desta. A diferença de temperatura entre a base e o topo da estrutura da ventoinha faz com que o conversor termoelétrico consiga produzir energia suficiente para colocar em funcionamento a ventoinha.

Esta tecnologia é bastante interessante para aplicação nos edifícios, sobretudo nos domésticos, uma vez que permite fazer o aquecimento da divisão onde se encontra instalada mais rapidamente, sem consumir qualquer tipo de energia extra, não trazendo qualquer custo acrescido ao utilizador.

2.12 A automação de edifícios - Domótica

Com o avançar dos anos, os edifícios têm vindo a tornar-se espaços cada vez mais complexos a nível tecnológico, devido essencialmente ao aumento nas exigências de serviços por parte dos utilizadores. O conceito de automatização de edifícios começou por ser utilizado inicialmente nos edifícios de serviços, no entanto foi alargado para as habitações, designando-se assim por domótica.

Os sistemas de automação de edifícios, surgiram inicialmente com a finalidade de realizar uma poupança na gestão técnica de energia, incidindo sobretudo no controlo e monitorização dos sistemas de climatização. Contudo, este conceito é atualmente aplicado ao controlo da iluminação, assim como ao nível de sistemas de segurança, seja a nível de detecção de situações de emergência como incêndios ou fugas de gás ou água, seja ao nível de detecção e sinalização de situações de intrusão, procurando proporcionar um maior nível de conforto aos ocupantes (Gonçalves Costa, 2010).

O termo domótica surge da junção da palavra “*domus*” (casa/domicílio) com a palavra robótica (controlo automatizado de algo), sendo que um sistema domótico consiste numa rede de comunicação entre diversos dispositivos, equipamentos e outros sistemas, com a

finalidade de obter informações sobre o ambiente interno de uma habitação, realizando determinadas ações com o intuito de o supervisionar ou gerir .

Estas redes são o elemento principal num sistema domótico, sendo as responsáveis por estabelecer a comunicação entre os diferentes dispositivos. A comunicação entre os diferentes elementos pode ser feita de diferentes formas, nomeadamente através de cabos entre os diferentes elementos ou através de sistemas wireless.

No âmbito dos objectivos desta dissertação torna-se pertinente abordar os sistemas de comunicação wireless, uma vez que estes são formados por diversos sensores alimentados a baterias, representando uma oportunidade na substituição das mesmas por conversores termoelétricos.

2.12.1 Redes sensoriais wireless

Com o aparecimento da tecnologia de comunicação wireless tornou-se mais simples realizar o monitoramento e controlo de ambientes onde a utilização por cabo se tornaria complexa, com custos elevados e em alguns casos até impossível. No caso de reabilitação de edifícios, a implementação destes sensores wireless torna-se uma grande vantagem, uma vez que não envolve a necessidade de passar cabos de alimentação pelas paredes, permitindo espalhar diversos sensores pelas diferentes áreas a monitorizar sem qualquer dificuldade. Outro caso que se torna bastante pertinente a utilização destas redes de sensores, são em ambientes de difícil acesso, onde uma instalação da alimentação para os diversos sensores seria um problema.

As redes sensoriais wireless são formadas por diversos nós, sendo cada nó constituído por sensores e actuadores. Estes, são dotados por uma capacidade de processamento (microcontroladores ou processadores), podendo conter vários tipos de memórias (programa, dados, memórias flash) , uma antena transmissora de sinal RF, e uma fonte de alimentação geralmente baterias ou painéis solares (Stankovic, 2006). Estes sensores são capazes de realizar funções simples como a leitura dos parâmetros do ambiente como temperaturas, pressão, humidade, à gravação de imagens, áudio ou vídeo, transmitindo esta informação a uma unidade central ou a outro nó da rede, que por sua vez irá executar a ação pretendida para a presente situação (Inman et al., 2009). Estas redes podem formar diversas topologias, sendo apresentado um exemplo na Figura 2.26.

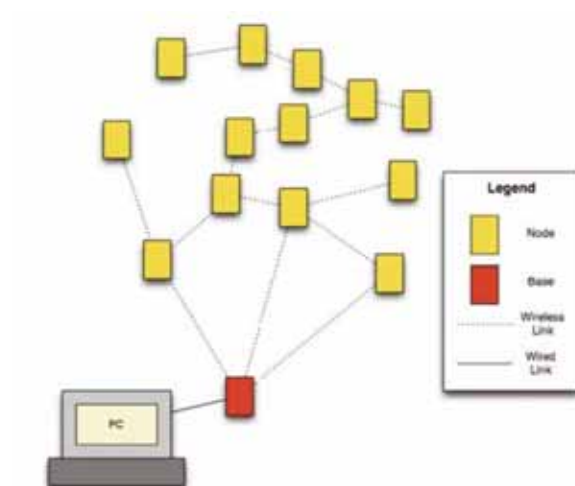


Figura 2.26 - Rede sensorial wireless.

Fonte: Inman et al., 2009.

Embora a utilização deste tipo de redes sensoriais wireless apresente vantagens face às redes alimentadas por cabo, o problema relacionado com a autonomia destes sensores tem sido um desafio constante para cientistas e engenheiros. As medições realizadas são efectuadas desde segundo a segundo, até horas, dependendo do processo ou fenómeno que se pretende compreender e monitorizar. Torna-se assim extremamente importante garantir uma autonomia elevada, evitando o risco da bateria “falhar” durante o funcionamento, comprometendo todo o sistema, e reduzir a necessidade de intervenções humanas para a substituição das mesmas, e consequentemente custos associados a estas manutenções.

Na Tabela 2.5 podem observar-se os consumos típicos destes sensores durante a realização das diferentes funções.

Tabela 2.5 - Estados dos sensores wireless e respectivo consumo.

Função	Duração (s)	Consumo (mW)
Stand-by (Sleep mode)	10^{-1} a 10^4	10^{-1} a 10^{-3}
Capturando informação (Polling)	10^{-5} a 1	10^{-4} a 100
Transmitindo informação (Transmitting)	10^{-6} a 1	1 a 100
Recebendo informação (Receiving)	10^{-3} a 2	10^{-1} a 1

Fonte: Inman et al., 2009.

2.12.2 Funções e serviços da domótica

Os sistemas de automação de edifícios são sistemas de controlo avançado, em que por meio de um sistema informatizado e uma rede inteligente de dispositivos electrónicos associados, garantem um maior conforto, segurança e eficiência (Indusmelec, 2013).

As principais funções deste tipo de sistemas são:

- Controlar;
- Monitorizar;
- Optimizar;
- Reportar.

Estas funções são aplicadas normalmente ao controlo da iluminação, climatização e sistemas de segurança, sendo descritas nos subcapítulos seguintes de forma mais pormenorizada.

A utilização de sistemas de automação de edifícios traz inúmeras vantagens na redução nos custos de energia, assim como na redução dos custos de operação e manutenção, apresentando-se de seguida essas vantagens:

- Monitorizar e analisar onde e quando a energia é consumida.
- Implementar sistemas de controlo de iluminação e ar condicionado, de modo a que estes funcionem em função da ocupação local.
- Programar e optimizar o funcionamento da iluminação e dos sistemas de ventilação visando a máxima eficiência energética.
- Sistemas de diagnóstico e controlo maximizam a utilização eficiente do equipamento, aumentando o retorno dos investimentos efectuados.
- Permitem uma gestão centralizada dos sistemas garantindo tempos de resposta mais eficazes e eficientes.
- Possibilidade de monitorização remota dos equipamentos.

2.12.2.1 Iluminação

Os sistemas de controlo de iluminação permitem determinar a quantidade de luz necessária a fornecer para determinado ambiente, acendendo, apagando e regulando a intensidade dos diversos pontos de luz de forma automática, garantindo sempre o bem estar e necessidades do utilizador na realização das suas tarefas. A iluminação deve ser regulada em função da

luminosidade proveniente do exterior, evitando que se ligue a luz sem realmente existir necessidade, e da mesma forma, o sistema deve fazer ligar a luz sempre que o nível de luminosidade baixe em relação ao nível programado (Bruno, 2008). Para além deste modo de controlo de luminosidade, existe a possibilidade da gestão da iluminação ser feita para cada divisão independente em função da presença de pessoas. Para isso, são colocados diversos sensores de presença nas divisões onde se pretende fazer o controlo. Na Figura 2.27 encontram-se os tipos de sensores utilizados no controlo de iluminação.



Figura 2.27 - Tipos de sensores para controlo de iluminação. Fonte:LeroyMerlin

Este tipo de controlo de iluminação é frequentemente utilizado na iluminação interior e exterior de edifícios comerciais ou industriais, contudo muitas habitações começam a incorporar este tipo de sistema. Para além do modo de funcionamento da iluminação automático, deve existir claro a possibilidade de o utilizador fazer o seu controlo manual.

2.12.2.2 Climatização

Os sistemas de controlo de climatização permitem fazer o controlo total ou independente dos diferentes equipamentos de aquecimento ou arrefecimento de um edifício. Este tipo de sistema pode funcionar em função do nível de ocupação do edifício, podendo ajustar a temperatura de acordo com parâmetros previamente programados.

No fundo, a gestão dos sistemas de climatização recorre a uma unidade de controlo, que compara um parâmetro do estado atual numa divisão do edifício (por exemplo a temperatura), e de forma automática e de acordo com parâmetros pré-estabelecidos, executa uma ação (por exemplo arrefecer ou aquecer). Estas unidades de controlo permitem realizar não só a leitura das variáveis a controlar (temperatura, humidade, pressão), assim como controlar os diferentes dispositivos da rede de controlo, ou seja os diferentes actuadores (válvulas, motores ou bombas) que irão executar as ações pretendidas.

A nível de climatização numa habitação torna-se também pertinente utilizar sistemas de climatização zonificados que permitam realizar a regulação e programação independente, uma vez que as condições térmicas numa divisão nem sempre são distribuídas de forma uniforme.

Segundo Bruno (2008), as formas de programação mais comumente praticadas são:

- Um nível de temperatura de conforto próximo de 21°C, como estado normal de funcionamento enquanto os utilizadores permaneçam na área; caso a climatização seja zonificada, e como forma de racionalização de energia, só as zonas em uso deverão estar a essa temperatura.
- Durante períodos curtos de ausência, ou durante os períodos de descanso, manter um nível de temperatura de economia a rondar os 18°C.
- Em períodos de ausência prolongada nas estações frias, como o caso de férias, manter um nível de temperatura anti-congelamento a rondar os 5°C, com o intuito de evitar que a água congele nas canalizações e provoque rupturas nas mesmas.

2.12.2.3 Segurança

Ao nível da segurança podem-se considerar dois tipos de sistemas possíveis: sistemas relacionados com a segurança relativos à intrusão, fazendo uso de detectores de presença, alarmes ou outras formas de dissuasão e aviso, e sistemas de proteção de segurança técnica, onde são aplicados detetores de incêndio, fugas de gás, fugas de água, etc.

Os sistemas relativos à intrusão, têm como principal função garantir maior segurança aos utilizadores do edifício, fazendo uso de técnicas de dissuasão para o intruso. Estes sistemas recorrem geralmente a sensores de presença e movimento, que ao detetarem a presença de alguém ativam um alarme sonoro, acionam meios de vídeo vigilância, e enviam uma mensagem automática para a esquadra mais próxima. Alguns tipos de sistemas, permitem a abertura e fecho de janelas e portas de forma a limitar os movimentos do intruso no interior do edifício, simulam a presença de ocupantes na habitação nos períodos de ausência, acendendo luzes, abrindo/fechar estores e ativar o sistema de rega.

Os sistemas de proteção relativos à segurança técnica, detetam incêndios pela presença de fumo ou por súbita subida de temperatura, detectam fugas de gás, que se torna bastante útil no caso de gases inodoros em que os ocupantes não se apercebem, e detectam fugas de água. Nestas situações o sistema para além da emissão de um aviso sonoro, realiza o corte de abastecimento, e em alguns casos permite a abertura de janelas e portas de forma a facilitar a saída dos ocupantes da habitação.

Apresentam-se na Figura 2.28 alguns tipos dos sensores de incêndio e gás, respectivamente, utilizados por estes sistemas.



Figura 2.28 - Sensores detetores de incêndio e gás, respectivamente.

No caso da instalação dos detetores de inundação ou fugas de água, são utilizados três componentes, sendo eles o próprio detetor, uma sonda e a respectiva fonte de alimentação, como representado na Figura 2.29.



Figura 2.29 - Componentes de um sistema de detecção de inundação.

2.13 Nota conclusiva

Abordou-se neste capítulo a temática relativa aos conversores termoelétricos. Foi apresentada a história da termoelectricidade, seguindo-se a exposição e descrição dos fenómenos termoelétricos que estão por base no funcionamento destes conversores. Posteriormente foram abordados os diferentes mecanismos de transferência de calor, referindo a importância da utilização de dissipadores de calor neste tipo de sistemas. De seguida, foi realizada uma descrição dos conversores termoelétricos, onde foram abordados os dois modos distintos de funcionamento dos mesmos, com as respectivas deduções das equações utilizadas, assim como a figura de mérito que quantifica o desempenho dos conversores. São também apresentadas algumas aplicações dos conversores. Na parte final deste capítulo é abordada a temática da automação de edifícios, com o objectivo de realizar uma gestão técnica da energia utilizada nos edifícios, sendo abordados os principais campos onde estes sistemas atuam, assim como os tipos de sensores e actuadores utilizados nos mesmos.

No capítulo seguinte far-se-á a apresentação do estudo experimental realizado, apresentando a unidade experimental, assim como todos os equipamentos auxiliares utilizados. Irão ser

descritos de forma pormenorizada os diferentes tipos de ensaios realizados assim como as condições associadas aos mesmos.

Capítulo 3

Estudo experimental

Este capítulo incide essencialmente no estudo, caracterização e aplicação de módulos termoelétricos para a produção de energia elétrica, visando apresentar o procedimento experimental desta dissertação.

O capítulo inicia-se com a caracterização da instalação experimental empregue no âmbito do presente trabalho, assim como a apresentação do módulo termoelétrico utilizado. De seguida são descritos os diversos componentes que irão servir de estrutura de apoio aos ensaios realizados. O estudo experimental realizado teve como objectivo conhecer o comportamento do módulo termoelétrico para diferentes condições de funcionamento. Pretendeu-se assim caracterizar o módulo termoelétrico, com o intuito de registar os valores de tensão e corrente, de forma a obter a potência produzida pelo módulo.

3.1 Unidade experimental

Na secção que agora se inicia far-se-á a apresentação da unidade experimental utilizada no âmbito do presente trabalho. Neste contexto, são apresentados os diversos equipamentos utilizados durante o procedimento experimental, nomeadamente a estrutura que irá servir de apoio aos ensaios do módulo termoelétrico, o próprio módulo termoelétrico, placa de aquecimento, assim como outros equipamentos de medição auxiliares. Serão também descritos os diferentes tipos de ensaios realizados, através da exposição da metodologia com o intuito da optimização do sistema. Os ensaios efectuados foram realizados nas instalações do Laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor do DEM/UBI.

3.1.1 Caracterização/apresentação da unidade

Para a realização do estudo experimental foram utilizados diversos equipamentos, sendo o mais importante o módulo termoelétrico. Este elemento foi escolhido com base nos diferentes módulos disponíveis na UBI, tratando-se de um dispositivo de Peltier (TEC), da marca Melcor (ST1.0-127-05L) do fornecedor RS Components. As características deste módulo são apresentadas na tabela 3.1. Na Figuras 3.1 são representadas as suas dimensões, assim como o conversor termoelétrico utilizado.

Tabela 3.1- Característica do módulo termoelétrico Melcor RS ST1.0-127-05L.

RS ST 1.0-127-05L	
Número de Junções (n)	127
Factor de Geometria (G)	0,078
Corrente máxima (Imax)	3,9 A
Tensão Máxima (Vmax)	15,4 V
Potência Máxima	33,4 W
Diferença máxima de temperatura (ΔT)	64 °C
Dimensões (AxBxCxD)	30 mm x 30 mm x 30 mm x 3,2 mm
Espessura do fio (AWG)	24

Fonte: Datasheet Melcor *Sealed Thermoelectric Coolers*

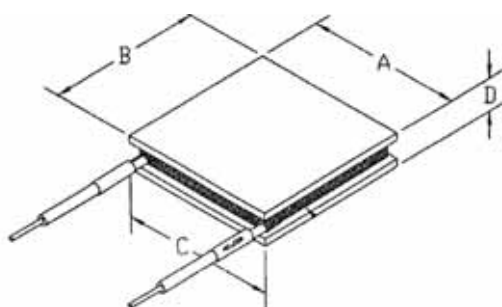


Figura 3.1 - Conversor termoelétrico RS1.0-127-05L.

Dado que estes módulos produzem valores de tensão e corrente relativamente baixos, na ordem dos milivolts e miliamperes, respectivamente, deve-se tentar promover a condução de calor pelas suas faces, e garantir que o contacto entre as diferentes superfícies seja o melhor possível, caso contrário o rendimento obtido poderá ser inferior ao esperado. Assim sendo, foi construída uma estrutura auxiliar de apoio aos ensaios.

3.1.1.1 Estrutura de apoio aos ensaios

Com o intuito de fixar e melhorar o contacto do módulo termoelétrico com a placa de aquecimento para a realização dos diferentes ensaios, procedeu-se à construção de uma estrutura de apoio. Esta estrutura tem como principal objectivo promover o melhor contacto possível do módulo com o dissipador de calor.

Pretendeu-se criar uma estrutura simples e eficiente, sendo esta formada essencialmente por dois elementos. A sua base, que consiste numa chapa de alumínio que irá estar em contacto com a placa de aquecimento e um dissipador de calor ou superfície alhetada que promove a dissipação de calor na face fria do módulo, garantindo assim uma maior diferença de temperatura entre as duas faces do módulo termoelétrico. Estes dois elementos encontram-se ligados através de quatro parafusos plásticos de forma a permitir a colocação do módulo termoelétrico no seu interior

A escolha do material para a chapa de base recaiu sobre o alumínio uma vez que este é um material bastante comum, leve, e um bom condutor de calor.

3.1.1.2 Construção da estrutura de apoio aos ensaios

A primeira fase de construção da estrutura de suporte foi a base. Uma vez escolhido o material para a chapa cuja função é servir de base, procedeu-se ao corte da mesma para as dimensões pretendidas, de forma a ficar com as mesmas dimensões da superfície alhetada (83mm x 68mm).

De seguida, para a abertura dos furos na chapa da base, assim como na superfície alhetada, para posterior aplicação dos parafusos plásticos, recorreu-se a um engenho de furar representado na Figura 3.2. Foi utilizada uma broca de 1,55mm durante este processo.



Figura 3.2 - Engenho de furar utilizado na furação da chapa e superfície alhetada.

Uma vez feita a furação, procedeu-se à abertura da rosca, utilizando-se uma rosca métrica de passo normal M2, passando no final um óleo de corte para retirar algumas aparas e lixo provocado pelo desbaste do alumínio. Este procedimento pode ser observado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Procedimento e material utilizado na abertura de rosca.

No final foi feito um polimento ligeiro ao material de forma a conferir um melhor contacto entre a base e a placa de aquecimento, diminuindo assim a resistência térmica provocada pela mesma, e também melhorar o aspecto visual. Pode-se observar na Figura 3.4 a estrutura de suporte final, já com o módulo colocado no seu interior, assim como o material de interface térmico.

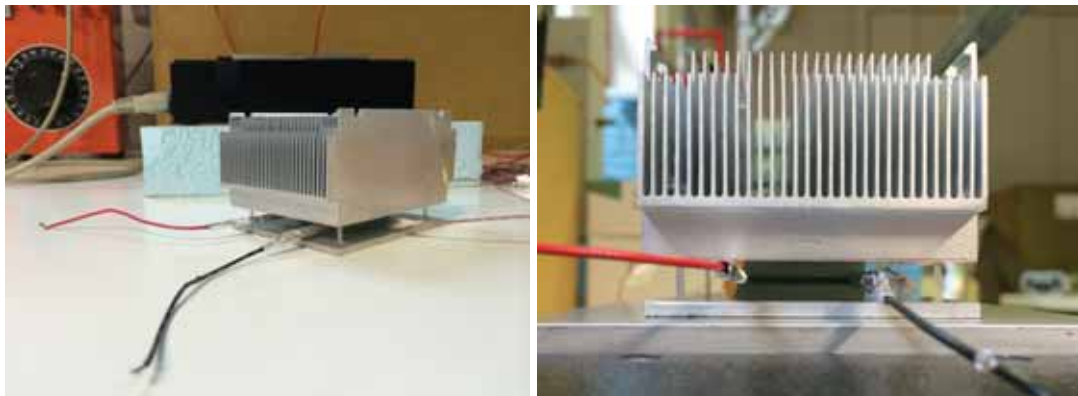


Figura 3.4 - Estrutura de suporte com respectivo módulo termoelétrico e material de interface.

3.1.1.3 Material de interface térmico

Com o objectivo de promover a condução de calor nas faces do módulo, e eliminar os intervalos de ar entre o módulo e os diferentes materiais da estrutura, foi utilizado um material de interface térmica, representado na Figura 3.5, melhorando assim a eficiência do fenómeno de transferência de calor. Este material deve ser aplicado com as superfícies devidamente limpas, aplicando uma pressão suficiente para eliminar as eventuais bolhas de ar que possam surgir.

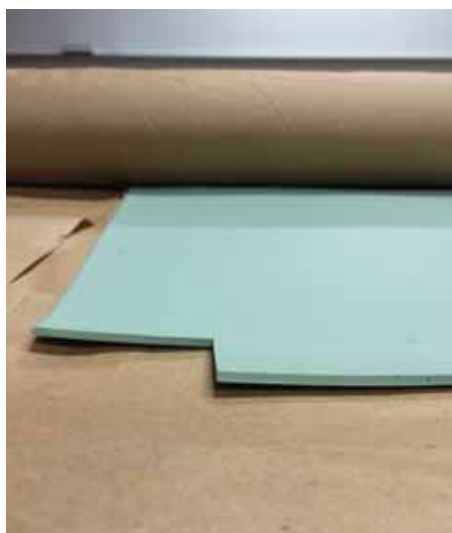


Figura 3.5 - Material de interface térmico utilizado.

Este material foi cortado com as dimensões das faces do módulo (30mm x 30mm), e colocado entre a face superior (face fria) do módulo e o dissipador de calor, e a face inferior (face quente) e a base de alumínio, como se pode observar na Figura 3.6.

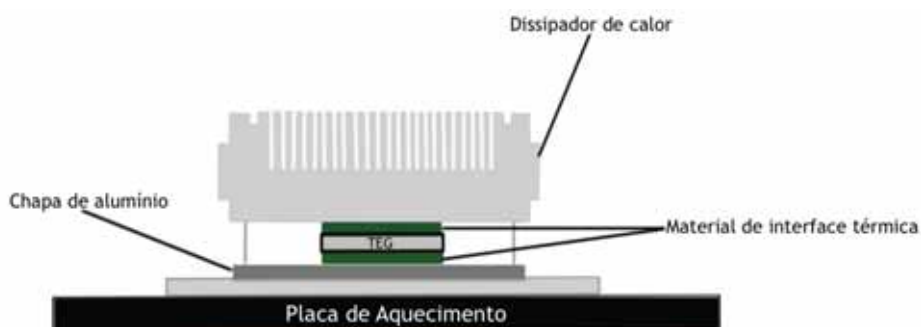


Figura 3.6 - Esquema da unidade experimental.

3.2 Equipamento auxiliar

Apresentadas as principais características construtivas do elemento, segue-se agora a descrição do conjunto dos restantes equipamentos que foram empregues na realização do estudo experimental.

Por forma a permitir a realização de ensaios experimentais em diferentes condições de temperatura, foi utilizada uma placa de aquecimento. Esta placa de aquecimento possui uma área de superfície de 140 cm², permitindo estabelecer temperaturas até 120 °C e fornecer uma potência máxima calorífica de 170 W. Esta faz parte de um equipamento de transferência de calor por convecção, modelo WL352 da marca Gunt Hamburg, pertencente ao laboratório de Termodinâmica Aplicada e Transmissão de Calor do DEM/UBI. A placa foi

ligada diretamente a uma fonte de tensão monofásica de tensão variável até 220V, permitindo assim conforme a tensão fornecida regular a temperatura da placa.



Figura 3.7 - Fonte de tensão e placa de aquecimento.

Com o intuito de realizar a monitorização da temperatura, recorreu-se a dois termopares do tipo T ligados a um data logger digital da Fluke Co., 54 II. Este equipamento permite a leitura de temperaturas provenientes de termopares do tipo J, K, T e E, em °C, °F ou Kelvin (K), possuindo uma função de deslocamento electrónico que permite a compensação de erros dos termopares melhorando a sua precisão geral (Fluke Co.).

A aplicação dos termopares foi feita em ambas as faces do módulo termoeletrico, sendo um aplicado na sua parte inferior e portanto na sua face quente, enquanto o outro foi colocado na parte superior, ou seja na sua face fria. Este tipo de termopar é formado por cobre e constantan, e permitiu fazer a leitura da temperatura de ambas as faces do módulo termoeletrico.



Figura 3.8 - Data logger Fluke 54II e termopar tipo T, empregue.

Para efeitos de medição da corrente elétrica produzida pelo módulo foi necessário simular uma carga no circuito. Desta forma, utilizaram-se 13 resistências elétricas com os valores de: $R = 1,3; 2,5; 4,2; 6; 8,6; 10,2; 12,4; 15,1; 18; 22,2; 32,8; 51,1$ e 100Ω .



Figura 3.9 - Resistências elétricas.

Com o intuito de quantificar a potência elétrica que o módulo termoeletrico consegue produzir, foram registadas a tensão e corrente elétrica fornecidas pelo mesmo, tendo-se utilizado para o efeito dois multímetros digitais, Fluke Co., 45 e Fluke Co., 8840A, respectivamente. Ambos possuem um intervalo de leitura de tensão DC de 0 a 10000 V apresentando precisão de 0.025%, e um intervalo de leitura de corrente de 0 mA a 10 A com uma precisão de 0,05%.



Figura 3.10 - Multímetro Fluke 45 e Fluke 8840A.

Para a realização dos ensaios experimentais com convecção forçada foram utilizados dois ventiladores da marca PAPST, ambos alimentados a 12V, possuindo as dimensões de (60mm x 60mm x 15mm). O ventilador 1 com a referência TYP 612FL possui uma potencia de 0,22 W, enquanto o ventilador 2 com referência TYP 612F possui uma potencia de 1,1 W. Para alimentar estes ventiladores recorreu-se a uma fonte de alimentação de corrente contínua da Diamond Antenna, GZV4000 (Figura 3.11) que permite variar a sua tensão entre 5 a 15 V.



Figura 3.11 - Ventiladores e fonte de tensão utilizados.

3.3 Descrição dos ensaios realizados

Os ensaios realizados tiveram como objectivo caracterizar o comportamento de um conversor termoelétrico, quantificando a potência elétrica que este consegue produzir, com o intuito de estudar potenciais aplicabilidades na gestão técnica de edifícios.

O estudo experimental divide-se essencialmente em dois tipos de ensaios:

- Ensaio em regime de convecção natural;
- Ensaio em regime de convecção forçada.

Para cada regime foram realizados diferentes ensaios, sendo em cada um deles testadas várias temperaturas impostas para a face quente do conversor termoelétrico, a fim de se poder caracterizar o desempenho do conversor com a variação de temperatura. Para além da temperatura, variou-se também a orientação da estrutura onde se encontra o conversor, com a finalidade de observar a existência de eventuais melhorias no seu desempenho, estabelecendo assim uma comparação entre a posição horizontal e a posição vertical.

Adicionalmente foi isolada toda a envolvente do conversor termoelétrico na sua estrutura, utilizando-se cortiça para o efeito. Este procedimento teve como objectivo minimizar a transferência de calor entre as duas superfícies (placa de aquecimento e dissipador de calor), conseguindo assim manter-se a superfície alhetada a uma temperatura mais baixa e consequentemente obter um maior gradiente de temperatura nas faces do conversor.

Para caracterizar o conversor termoelétrico, registaram-se os valores da tensão e corrente elétrica para as diversas situações descritas anteriormente.

Nas subsecções seguintes irão ser descritos os diferentes ensaios por ordem cronológica, enquanto no capítulo seguinte irão ser apresentados os resultados obtidos nos mesmos.

3.4 Ensaios com convecção natural

3.4.1 Ensaios em circuito aberto

Com este conjunto de ensaios pretendeu-se observar a diferença de potencial produzida em circuito aberto pelo conversor termoelétrico, para diferentes valores de temperaturas impostas, sendo estas: $T_h=50$; 60; 70 e 80 °C.

Este tipo de ensaios foram realizados com convecção natural, sendo feitas medições com o conversor com orientações horizontal e vertical. Na Figura 3.12 encontra-se representado de forma esquemática a unidade de ensaio.



Figura 3.12 - Esquema da unidade de ensaio com convecção natural.

Como se pode observar no esquema, os terminais do conversor termoelétrico foram ligados diretamente ao multímetro da Fluke Co. 45 descrito na secção anterior. A verde encontra-se representado o material de interface térmico, e a amarelo encontram-se os termopares utilizados, ligados ao data logger da Fluke Co. 54II para monitorização da temperatura na face quente e fria do conversor. Na Figura 3.13 apresenta-se a unidade de ensaio durante a realização dos testes.



Figura 3.13 - Unidade de ensaio em circuito aberto.

O procedimento experimental adoptado na realização destes ensaios foi o seguinte:

- Inicialmente começou por se ligar a fonte de alimentação nos 70 V, sendo necessário aguardar 1 hora para efeitos de estabilização de temperatura na placa de aquecimento, conseguindo obter-se assim uma temperatura na face quente do módulo de 50 °C.
- Dado isto, procedeu-se ao registo dos valores de tensão em circuito aberto para essa condição.
- Seguidamente alterou-se a tensão fornecida à placa de aquecimento pela fonte de alimentação para os 80 V, aguardando novamente 1 hora para estabilização da temperatura na face quente do módulo para 60 °C, registando-se o valor da tensão.
- O procedimento repetiu-se para as restantes temperaturas impostas.

Este procedimento foi utilizado para ambos os ensaios com orientação do conversor na horizontal e vertical.

3.4.2 Ensaios com carga e sem isolamento

Com o intuito de quantificar também a corrente eléctrica produzida pelo conversor termoeléctrico, foram realizados ensaios onde se adicionou uma carga ao circuito. Para isso, foram utilizadas 13 resistências eléctricas, sendo os seus valores: $R = 1,3; 2,5; 4,2; 6; 8,6; 10,2; 12,4; 15,1; 18; 22,2; 32,8; 51,1$ e 100Ω . À semelhança dos ensaios anteriores, foram impostas 4 temperaturas para a face quente de: $T_h = 50; 60; 70$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a unidade experimental ensaiada com ambas as orientações (horizontal e vertical) como se apresenta nas Figuras 3.14 e 3.15.

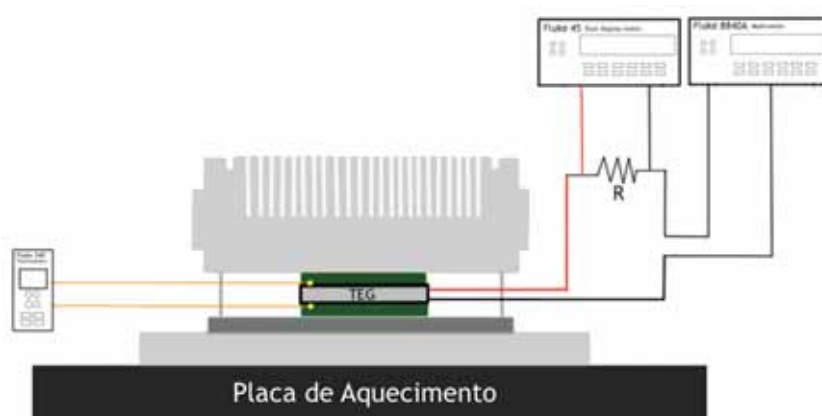


Figura 3.14 Esquema da unidade de ensaio com carga e convecção natural. -

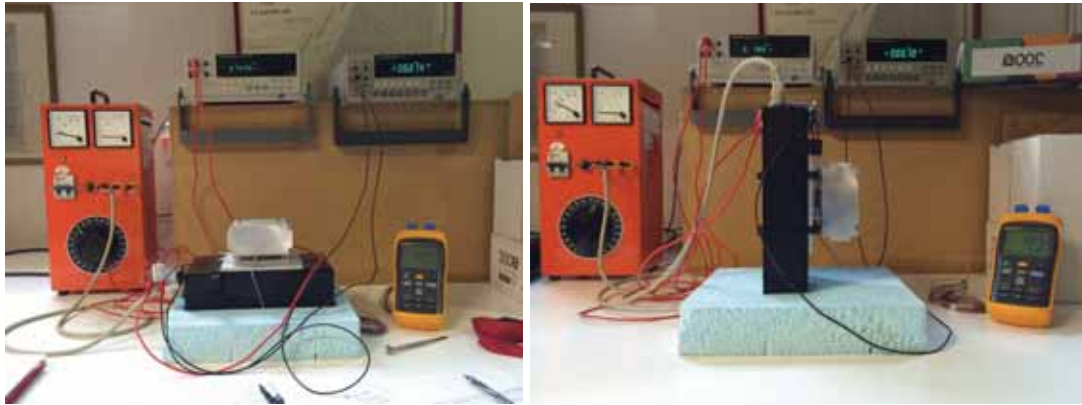


Figura 3.15 - Unidade experimental com orientação horizontal (à esquerda) e vertical (à direita).

O procedimento experimental nestes ensaios foi:

- Ligou-se a fonte de alimentação nos 70 V, aguardando-se 1 hora para efeitos de estabilização de temperatura na placa de aquecimento, conseguindo obter-se assim uma temperatura na face quente do módulo de 50 °C.
- Procedeu-se ao registo dos valores da tensão e corrente para essa temperatura e para a primeira resistência de 1,3 Ω .
- Substitui-se a resistência pela seguinte ($R=2,5 \Omega$), aguardando um período de 10 minutos para estabilização de temperatura e valores da tensão e corrente.
- Registaram-se os valores da tensão e corrente para a atual resistência.
- Repetiram-se novamente estes passos para as temperaturas e resistências seguintes.

3.4.3 Ensaio com carga e com isolamento

Na tentativa de otimizar o desempenho do conversor termoelétrico, repetiram-se os ensaios realizados anteriormente, desta vez utilizando isolamento na envolvente do conversor. Este isolamento tem como objectivo tentar minimizar a troca de calor entre a face quente e a face fria. Para isso, recorreu-se à cortiça, uma vez que este é um bom material isolante térmico. Na Figura 3.16 pode observar-se o conversor inserido no interior do isolante, assim como o aspecto final da unidade experimental.

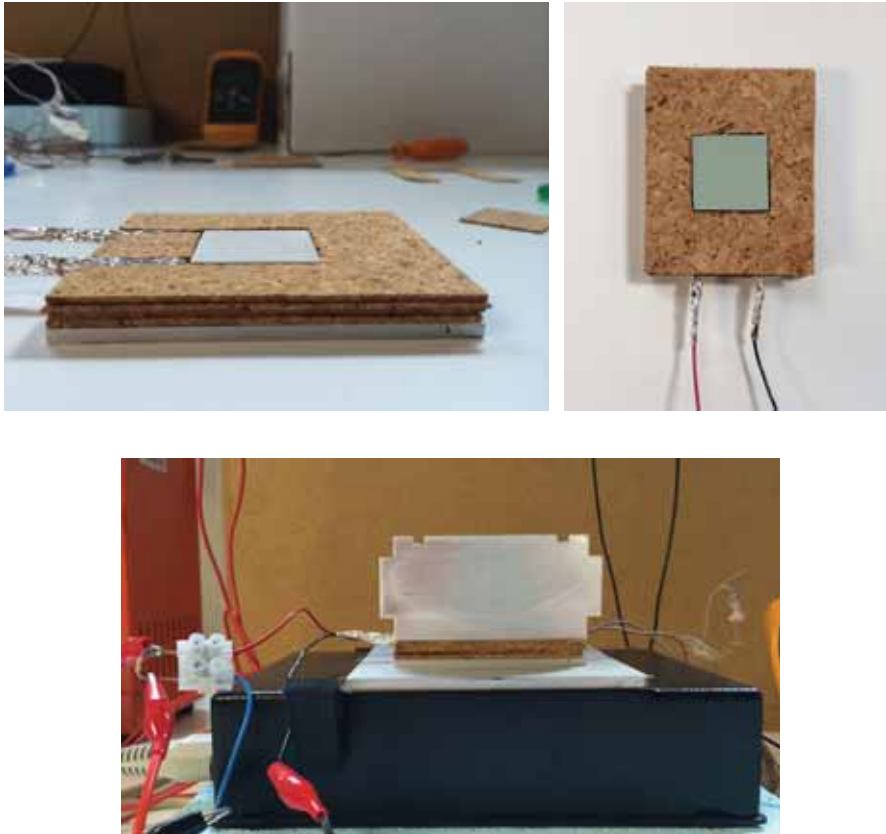


Figura 3.16 - Disposição do módulo termoeétrico com material isolante (cortiça) na envolvente.

O procedimento experimental para a realização destes ensaios foi igual ao dos ensaios anteriores.

3.5 Ensaios em convecção forçada

Nos sistemas em que o ar ou um fluido é o principal responsável pela dissipação de calor, torna-se importante acelerar o processo de escoamento do mesmo. Com essa finalidade, foi acrescentado um ventilador do tipo axial no topo do dissipador, conseguindo obter-se maiores gradientes de temperatura. Em relação aos tipos de ensaios anteriores, estes tornam o sistema mais eficiente, uma vez que possuem taxas de escoamento de calor mais elevadas, não dependendo só do fluxo de ar induzido pelo fenómeno de convecção natural para o dissipar.

Neste conjunto de ensaios em circulação forçada foram utilizados dois ventiladores com diferentes potências ($P_{Vent1}=0,22$ W e $P_{Vent2}=1,1$ W), fazendo um balanço energético no final para perceber se os ganhos de potência justificam o consumo dos mesmos. Para alimentar estes ventiladores recorreu-se a uma fonte de alimentação de corrente contínua da Diamond Antenna, GZV4000.

No primeiro grupo de ensaios com circulação forçada, foi utilizado um ventilador designado por ventilador 1. Este ventilador da marca PAPST, TYP 612FL possui uma potência de 0,22 W, e as dimensões de 60 mm x 60 mm x 15 mm. Na Figura 3.14 apresenta-se a unidade experimental com a respectiva fixação do ventilador ao dissipador de calor, para os ensaios realizados.



Figura 3.17 - Unidade experimental com ventilador na horizontal e vertical respectivamente.

No sentido de verificar se se observava uma melhoria na potência produzida pelo conversor termoelétrico, utilizou-se um ventilador com uma potência nominal superior de 1,1 W, denominado por ventilador 2, da PAPST TYP 612F, com as mesmas dimensões do ventilador 1.

Novamente, o procedimento experimental adoptado foi semelhante ao dos ensaios anteriores.

No capítulo seguinte irá ser apresentado o balanço energético entre estes dois ensaios, no sentido de se apurar se se torna vantajoso a utilização de um ventilador com as mesmas dimensões e potências nominais diferentes.

3.6 Nota conclusiva

Neste capítulo foi apresentada e caracterizada a unidade experimental utilizada no âmbito do presente trabalho. Neste contexto, numa primeira parte foram apresentados os diversos equipamentos utilizados durante o procedimento experimental, nomeadamente, o conversor termoelétrico e outros dispositivos auxiliares, sendo também apresentado todo o processo de construção da estrutura de apoio aos ensaios, assim como os materiais utilizados na mesma. De seguida, foram descritos os diferentes ensaios realizados neste estudo experimental, nomeadamente na caracterização do conversor termoelétrico. Foram abordadas as diferenças e alterações introduzidas, com o intuito de otimizar o desempenho do conversor.

No capítulo seguinte, apresentar-se-á os resultados obtidos experimentalmente, procedendo-se à sua análise e discussão.

Capítulo 4

Análise e discussão de resultados

A apresentação de resultados que agora se inicia pretende dar a conhecer o comportamento do elemento termoelétrico, através da variação dos parâmetros que influenciam o seu desempenho, nomeadamente a temperatura da sua face quente, assim como o regime de funcionamento. Dos ensaios realizados foram analisadas a tensão e corrente, sendo posteriormente efectuado o cálculo da potência elétrica.

Como já referido no capítulo anterior, realizaram-se cinco tipos de ensaios, sendo os resultados apresentados em dois grupos: ensaios com convecção natural e ensaios com convecção forçada.

Foram realizados ensaios com a unidade experimental com e sem isolamento, com orientação horizontal e vertical.

Cada grupo de testes é constituído por quatro ensaios, onde se variou a temperatura na face quente do conversor, correspondendo a 50, 60, 70 e 80 °C.

Durante a realização do trabalho experimental foi também registada a temperatura ambiente (T_0).

4.1 Ensaios em convecção natural

4.1.1 Ensaios em circuito aberto

Na análise dos resultados do conversor termoelétrico em circuito aberto foram analisados quatro ensaios para quatro temperaturas: $T_h=50$; 60; 70 e 80 °C.

O valor da temperatura ambiente registado aquando a realização destes ensaios foi: $T_0= 23$ °C.

Os resultados experimentais obtidos neste ensaio encontram-se no Anexo A da presente dissertação.

Apresentam-se aqui alguns gráficos relativos aos resultados obtidos.

Como se pode observar pelos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2, quanto maior for a temperatura imposta na face quente do conversor, maior será a tensão produzida pelo mesmo, devido ao gradiente de temperatura conseguido entre as faces ser também maior. Verifica-se que este comportamento é semelhante para ambas as orientações da unidade de ensaio, observando-se uma evolução linear e portanto uma relação de proporcionalidade direta entre estes parâmetros. Pode-se também constatar que a unidade de ensaio na posição vertical consegue produzir maiores gradientes de temperatura, graças a melhor dissipação de calor, obtendo-se um valor máximo de tensão de 411,8 mV para a posição vertical face aos 325,9 mV obtidos na horizontal.

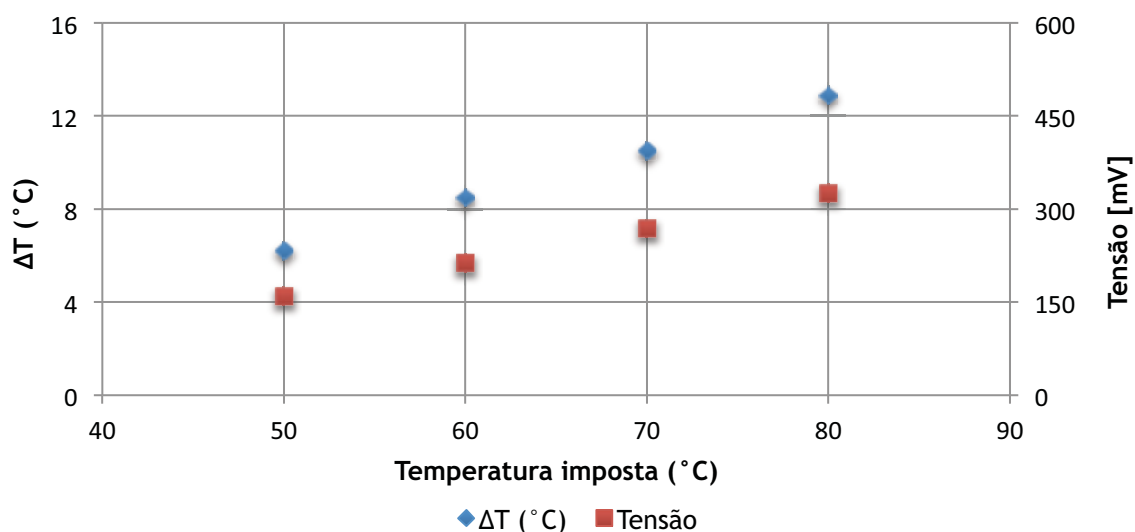


Figura 4.1 Variação da tensão de saída do conversor termoelétrico para diferentes temperaturas impostas, e respectivos gradientes de temperatura (horizontal).

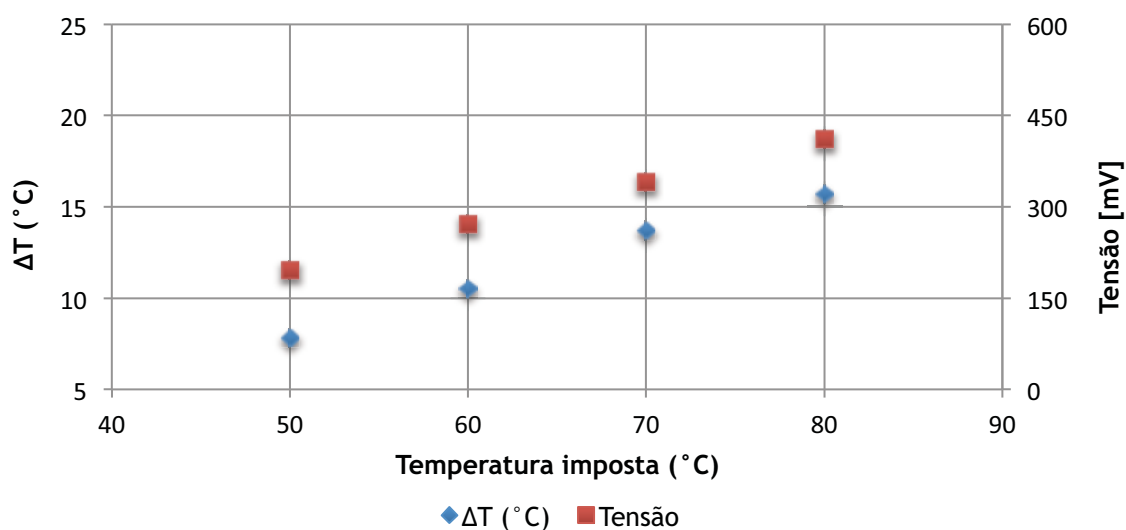


Figura 4.2 - Variação da tensão de saída do conversor termoelétrico para diferentes temperaturas impostas, e respectivos gradientes de temperatura (vertical).

4.1.2 Ensaio com carga e sem isolamento

Os resultados para este ensaio são apresentados nos Anexos B e C na tabela 4.3 e 4.4 para a orientação horizontal e vertical, respectivamente.

Como descrito anteriormente, para efeitos de medição da corrente elétrica, tornou-se necessário simular uma carga, usando para isso 13 resistências com os seguintes valores: $R = 1,3; 2,5; 4,2; 6; 8,6; 10,2; 12,4; 15,1; 18; 22,2; 32,8; 51,1$ e 100Ω .

O valor da temperatura ambiente registado aquando a realização destes ensaios foi: $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$

4.1.2.1 Ensaio com unidade experimental na horizontal

Apresenta-se na Figura 4.3 a relação entre a tensão e a corrente elétrica produzida pelo conversor termoelétrico. No gráfico encontram-se representados os diferentes valores experimentais obtidos para a tensão e corrente para diferentes valores de resistência. Pode-se concluir que quanto maior for o valor da resistência, menor será o valor da tensão que o conversor consegue produzir. Pelo contrário, a corrente elétrica aumenta com a diminuição do valor da resistência. Os valores das resistências encontram-se representados por ordem crescente da esquerda para a direita.

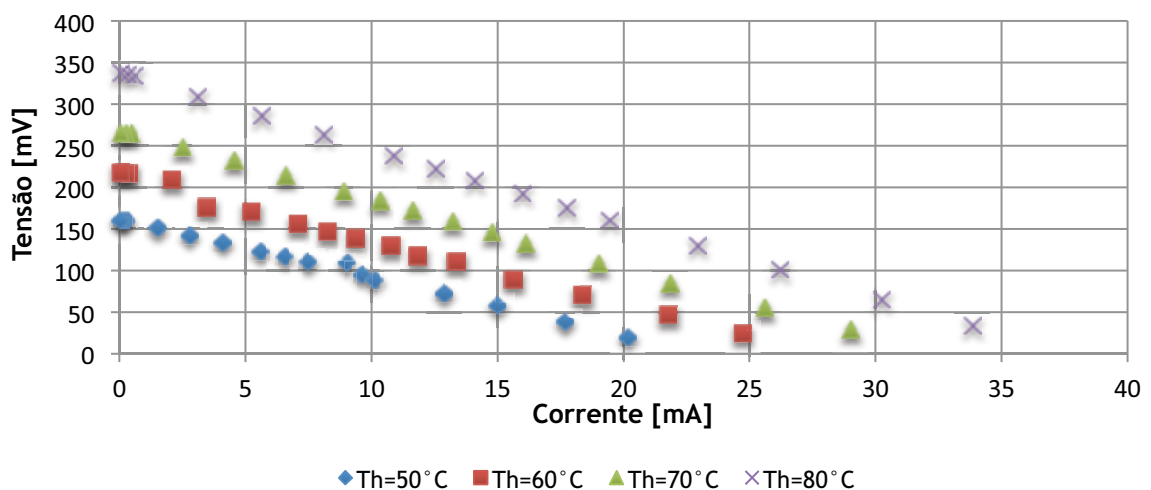


Figura 4.3 - Variação da tensão de saída do módulo termoelétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal sem isolamento).

Pretendeu-se, também determinar a potência elétrica obtida do conversor termoelétrico. Para isso, foi calculada através da expressão 4.1.

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \quad (4.1)$$

Na Figura 4.4 é exibida a variação da potência em função dos diferentes valores de resistência para as temperaturas impostas na face quente. Como se pode observar, a potência produzida é fortemente influenciada pelo valor da resistência de carga, sendo nestes ensaios máxima para o valor de $R=8,6 \Omega$.

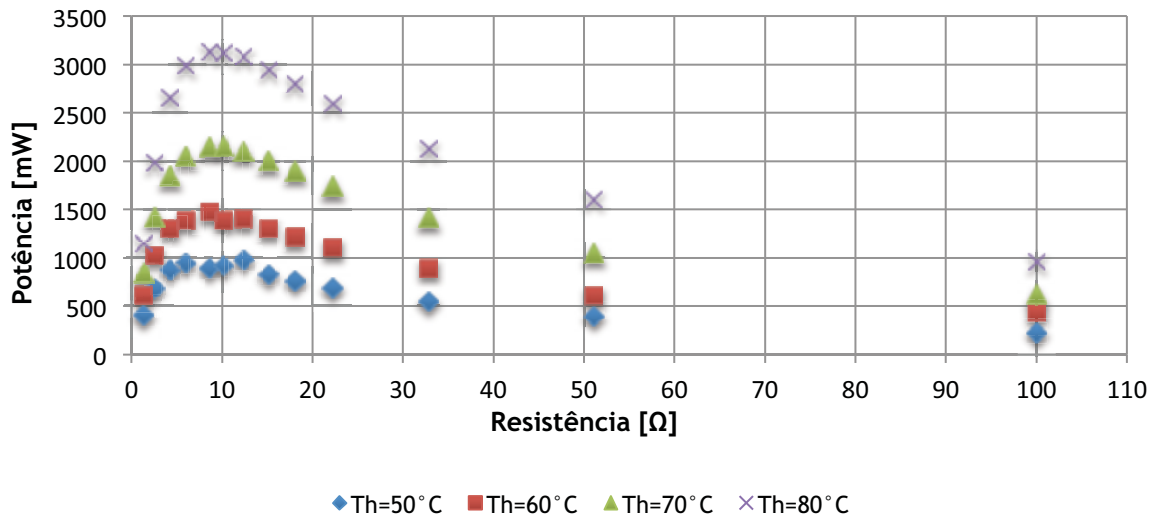


Figura 4.4 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal sem isolamento)..

4.1.2.2 Ensaios com unidade experimental na vertical

Apresentam-se na Figura 4.5 e 4.6 os gráficos relativos a estes ensaios com a orientação vertical.

Em relação ao gráfico representado na Figura 4.3, verificou-se uma ligeira melhoria no desempenho do conversor termoeletrico, sobretudo nos valores obtidos para a corrente elétrica. Conseguiu-se atingir valores de tensão próximos de 400mV para a temperatura de 80°C e um valor de resistência de 1,3 Ω, assim como uma corrente elétrica próxima de 50mA para o valor de resistência de 100 Ω.

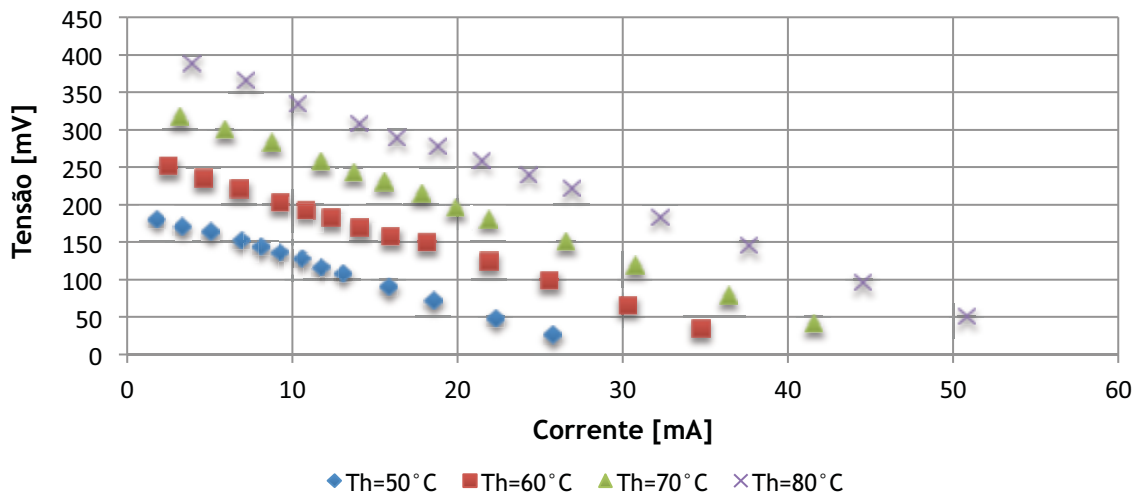


Figura 4.5 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical sem isolamento).

Tal como anteriormente, foi calculada a potência produzida pelo conversor e elaborado o respectivo gráfico sendo este apresentado na Figura 4.6. Como se pode observar, houve uma melhoria significativa na potência obtida, atingindo valores de aproximadamente 6000 mW para as resistências de 6 e 8,6 Ω com uma temperatura de 80 $^{\circ}\text{C}$ imposta na face quente. Observa-se uma tendência crescente até este valor, onde ocorre uma inversão, começando a sofrer um decréscimo gradual até à ultima resistência ensaiada de 100 Ω .

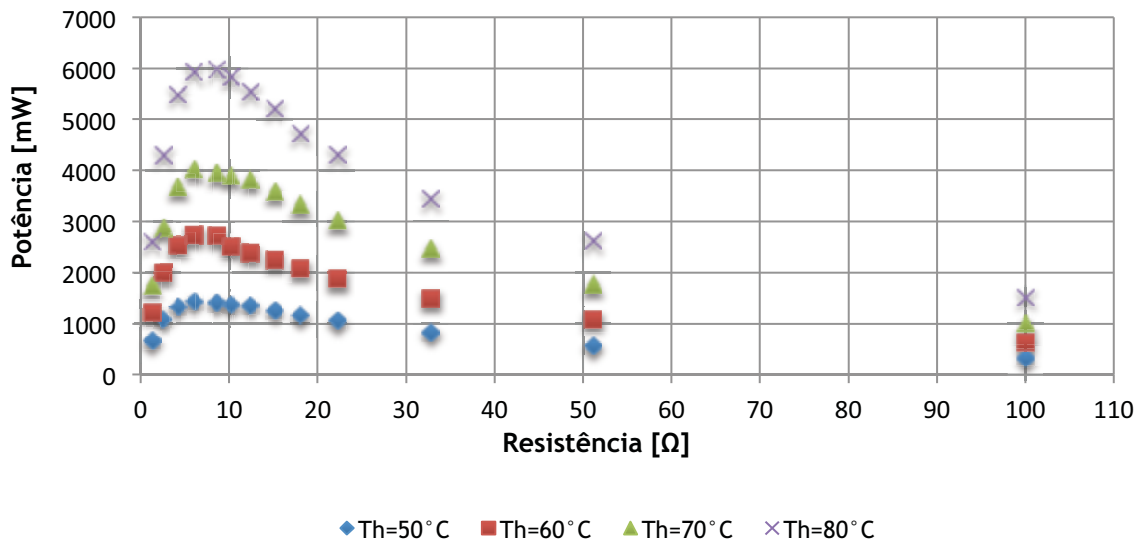


Figura 4.6 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical sem isolamento).

4.1.3 Ensaio com carga e com isolamento

À semelhança dos ensaios anteriores, as tabelas com os resultados destes ensaios encontram-se apresentados em anexo para as orientações da unidade experimental na horizontal e vertical, nos Anexos D e E respectivamente.

4.1.3.1 Ensaio com unidade experimental na horizontal

As Figuras 4.7 e 4.8 referem-se aos gráficos dos ensaios com orientação horizontal, onde os ensaios foram realizados registando-se uma temperatura ambiente de $T_0 = 23\text{ °C}$.

Na Figura 4.7 observam-se os resultados para a tensão e corrente elétrica obtidos experimentalmente. Mais uma vez, constata-se a relação de linearidade para ambas as grandezas, sofrendo a tensão um decréscimo conforme o valor da carga aumenta, enquanto para a corrente se observa o oposto.

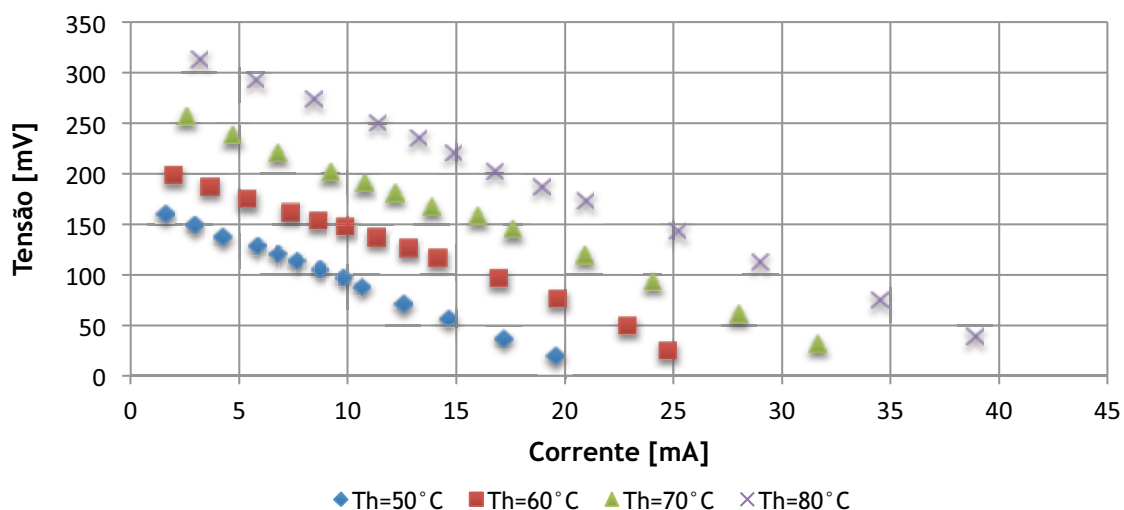


Figura 4.7 - Variação da tensão de saída do módulo termoeétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com isolamento).

Apresenta-se na Figura 4.8 os valores de potência obtidos para este conjunto de ensaios, verificando-se uma melhoria em relação aos ensaios anteriores nas mesmas condições (ensaio com carga sem isolamento na horizontal). Embora tenha sido realizada uma optimização à unidade experimental adicionando o isolamento ao conversor, os ensaios com carga sem isolamento na posição vertical obtiveram valores superiores aos realizados. Este facto explica-se devido à diferença de temperaturas obtidas nestes ensaios entre a face quente e face fria do conversor, ser menor do que as verificadas para os ensaios anteriores, podendo ser comprovado através das tabelas C e D em anexo.

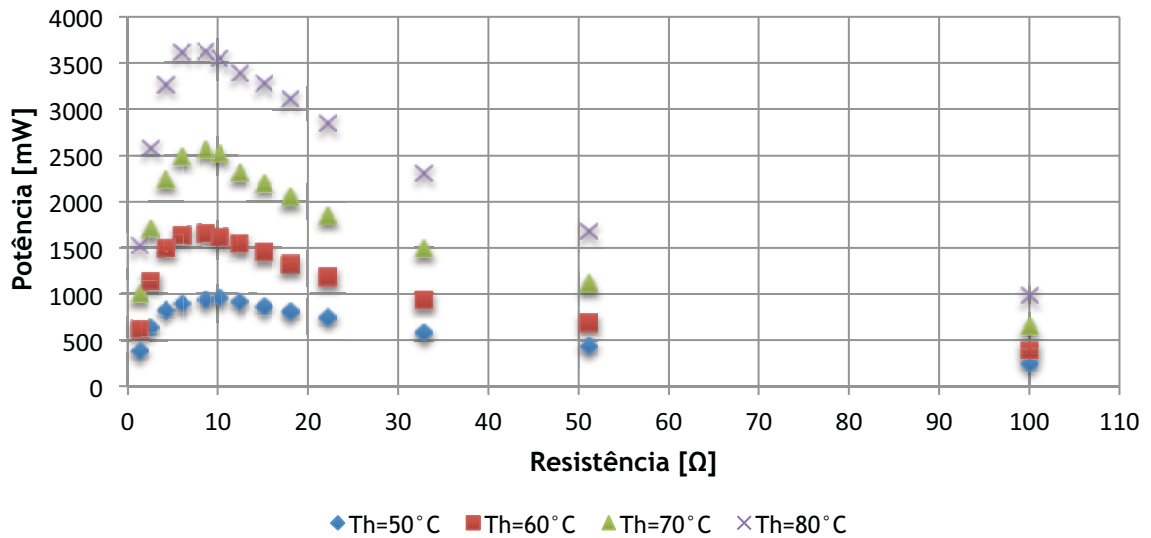


Figura 4.8 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com isolamento).

4.1.3.2 Ensaios com a unidade experimental na vertical

Devido a um problema técnico com um dos aparelhos de medição, nomeadamente o multímetro da Fluke Co. 8840A, houve um significativo intervalo de tempo entre os ensaios realizados na horizontal e vertical, sendo os primeiros realizados no mês de abril e os segundos no mês de junho, o que influenciou a temperatura ambiente no laboratório.

Nos ensaios realizados na vertical, a temperatura ambiente registada no laboratório foi de $T_0 = 27\text{ °C}$. Esta situação provocou uma alteração nos valores da temperatura da face fria do conversor termoeletrico, uma vez que diferença de temperatura entre a unidade experimental e a envolvente diminuiu. A quantidade de calor dissipado para o ambiente envolvente pelo dissipador de calor foi menor, e conseqüentemente a diferença de temperatura entre a face quente e fria foi menor, como se pode comparar pelas tabelas em anexo C, D e E. Uma vez que o gradiente de temperatura diminuiu, os valores da tensão e corrente obtidos também diminuíram em relação aos ensaios realizados anteriormente sem isolamento na vertical.

Como se observa no gráfico da Figura 4.9, estes ensaios demonstraram uma melhoria em relação à configuração horizontal (com isolamento), no entanto em relação aos ensaios anteriores da unidade experimental sem isolamento piorou.

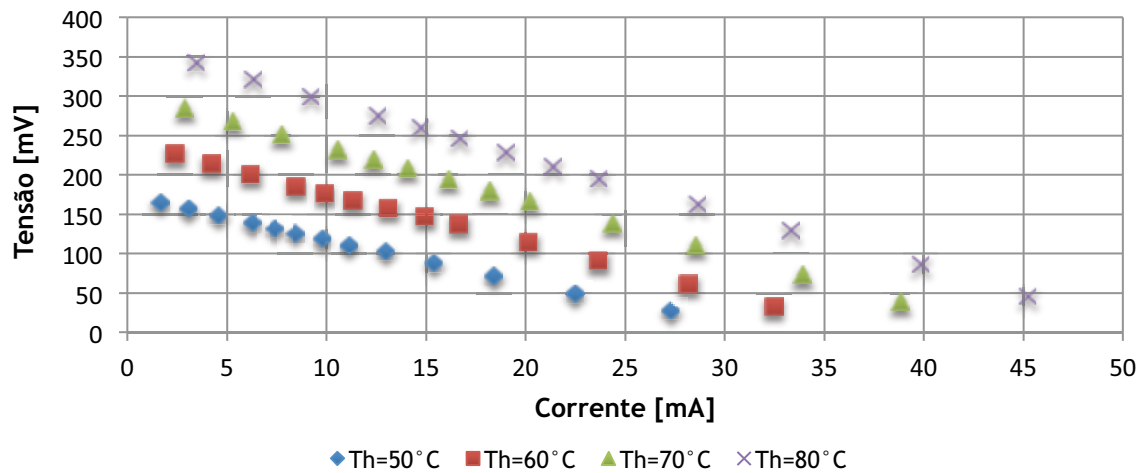


Figura 4.9 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com isolamento).

Da mesma forma, os valores da potência também diminuiram em relação aos ensaios na vertical com carga e sem isolamento, devido à mesma situação explicada anteriormente. Em relação aos ensaios realizados na horizontal com carga e com isolamento constatou-se uma melhoria.

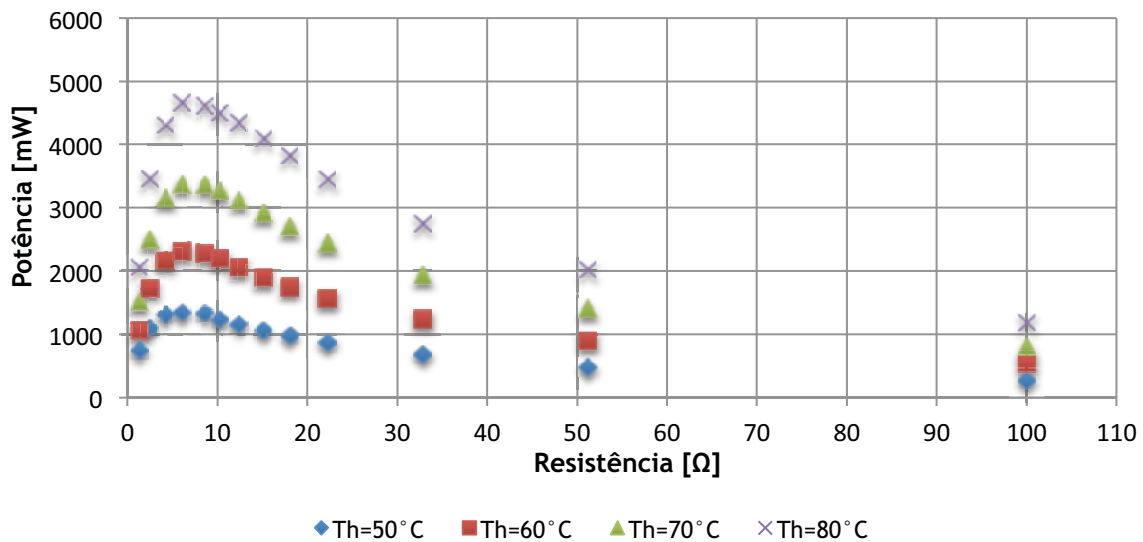


Figura 4.10 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com isolamento).

4.2 Ensaios em convecção forçada

Exibem-se agora nesta secção, os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados com convecção forçada.

Os ensaios realizados com convecção forçada descritos no capítulo anterior, foram realizados nas mesmas condições que os anteriores, fazendo variar a temperatura imposta na face quente e os valores das cargas simuladas. Tal como anteriormente, foi registada a temperatura ambiente no laboratório de Termodinâmica e Transmissão de Calor, apresentando esta o valor de $T_0 = 27\text{ °C}$.

Numa primeira fase serão apresentados os gráficos referentes aos resultados experimentais obtidos para o ventilador 1 ($P_{\text{Vent1}}=0,22\text{ W}$) com a unidade experimental na posição horizontal e de seguida vertical, sendo as tabelas com os valores obtidos experimentalmente anexadas nos anexos F e G, respectivamente. Seguidamente apresentam-se os gráficos resultantes dos ensaios realizados para o ventilador 2, cuja potência é ($P_{\text{Vent2}}=1,1\text{ W}$), para a orientação horizontal e vertical, cujos resultados se encontram nos anexos H e I.

4.2.1 Ensaios com ventilador 1 na horizontal

Na Figura 4.11, pode-se observar que os valores obtidos da tensão e corrente duplicaram em relação aos últimos ensaios realizados com convecção natural com isolamento. O comportamento destas grandezas mantém-se linear, conseguindo atingir um valor aproximado de 600mV para uma resistência de $1,3\ \Omega$ e um valor de aproximadamente 80 mA para uma resistência de $100\ \Omega$.

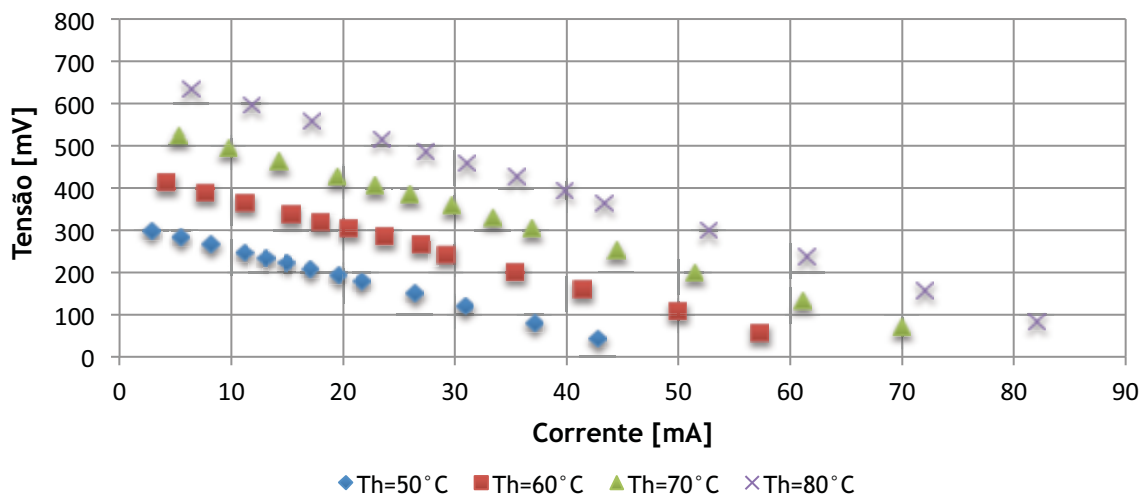


Figura 4.11 - Variação da tensão de saída do módulo termoeétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 1).

Da análise da Figura 4.12 ressalta que, os ganhos respeitantes à potência sofreram um aumento bastante acentuado, passando de sensivelmente 6000mW obtidos nos ensaios com carga sem isolamento na vertical (Figura 4.6) onde tinham sido obtidos os melhores resultados, para 16000 mW.

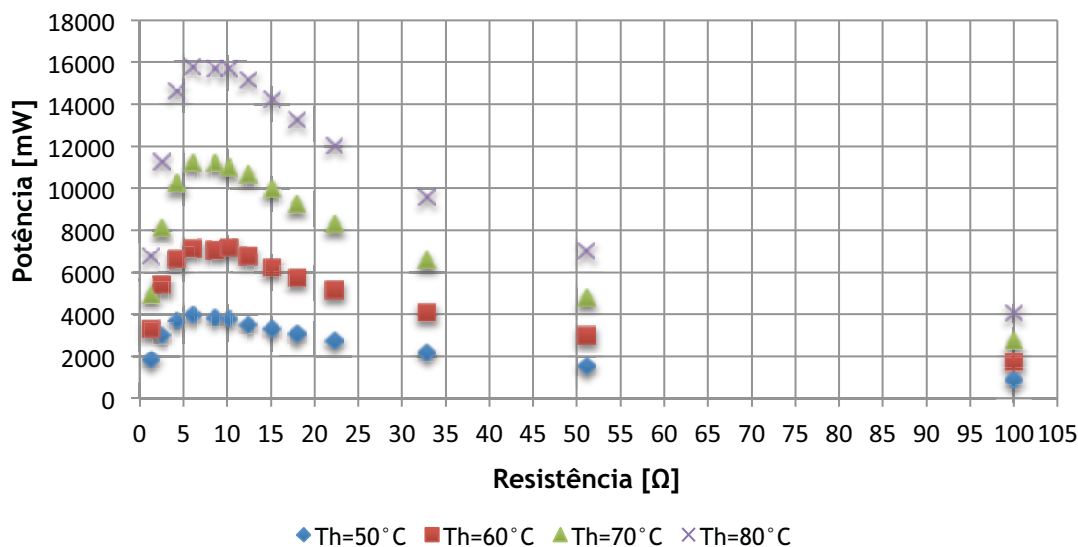


Figura 4.12 - Variação da potência do conversor termoelétrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 1).

4.2.2 Ensaios com ventilador 1 na vertical

Novamente, os resultados obtidos para os ensaios realizados com o ventilador 1 com a unidade experimental na vertical encontram-se representados pelas Figuras 4.13 e 4.14.

Como se pode observar na Figura 4.13, mais uma vez a tensão e a corrente produzidas pelo conversor melhoraram com a passagem da orientação horizontal para vertical. Verifica-se que tal sucede devido às diferenças de temperaturas entre as faces do conversor serem maiores, devido à melhor dissipação de calor. Tal como tem acontecido nos ensaios anteriores, a tensão e a corrente seguem uma tendência aproximadamente linear, diminuindo e aumentando com o aumento do valor da resistência, respectivamente.

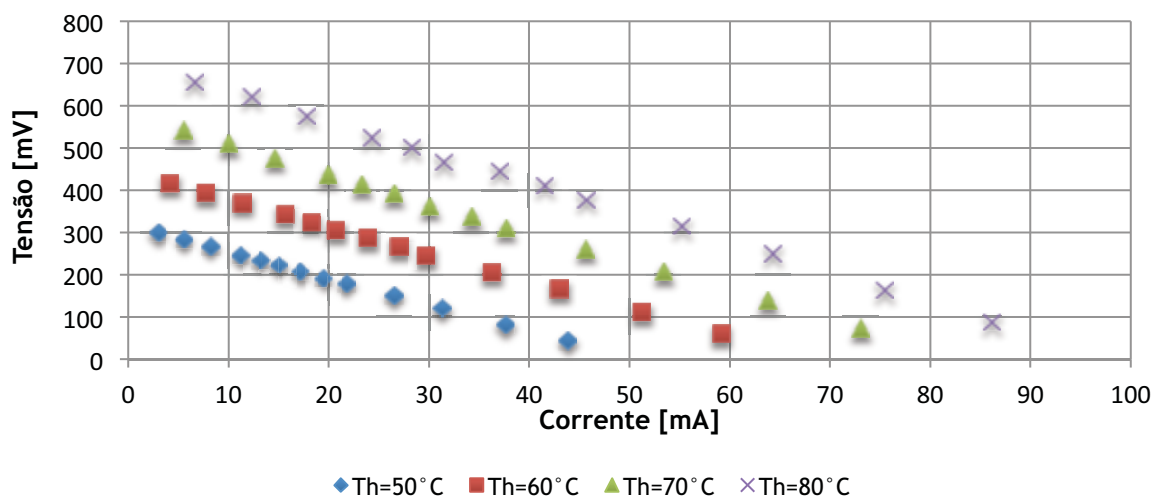


Figura 4.13 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 1).

Pela Figura 4.14 é possível observar um ganho de quase 2000 mW para o último ensaio com temperatura imposta de 80 °C, alterando unicamente a orientação da unidade experimental. A melhoria nos valores das potências obtidas é cada vez maior à medida que o valor da temperatura imposta aumenta, sendo máxima para o último ensaio de temperaturas, tendo-se mantido praticamente semelhante na temperatura imposta de 50 °C, havendo uma melhoria gradual para as restantes.

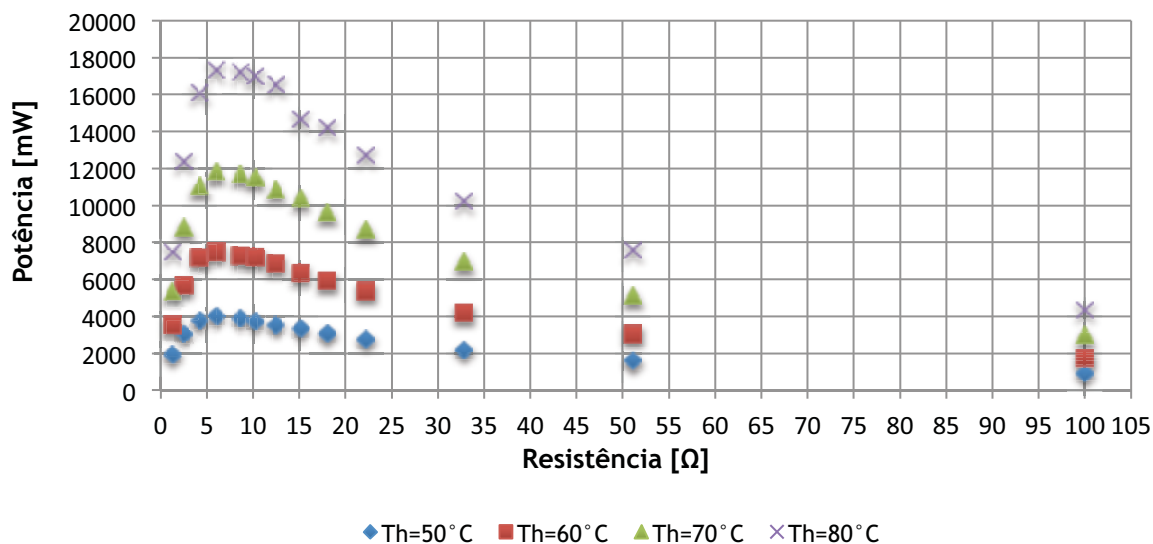


Figura 4.14 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 1).

4.2.3 Ensaios com ventilador 2 na horizontal

Com o objectivo de tentar melhorar o desempenho do conversor termoelétrico, foram realizados mais um grupo de ensaios, para outro ventilador com uma potência nominal de 1,1 W, superior ao ventilador 1.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 é possível observar que houve uma melhoria nos valores obtidos para a tensão, corrente e consequentemente potência, em relação aos ensaios realizados com o ventilador 1 para a orientação horizontal. Observa-se também que os resultados obtidos experimentalmente para estes ensaios na horizontal são bastante próximos dos obtidos para o ventilador 1 na vertical, obtendo-se valores para a potência próximos de 18000 mW.

Devido às diferenças das potências consumidas entre os ventiladores, conclui-se que não se torna vantajosa a substituição do ventilador 1 para o ventilador 2, uma vez que este consome mais 0,88 W, que subtraindo aos valores obtidos experimentalmente fazendo um balanço energético, vai traduzir-se em ganhos menores.

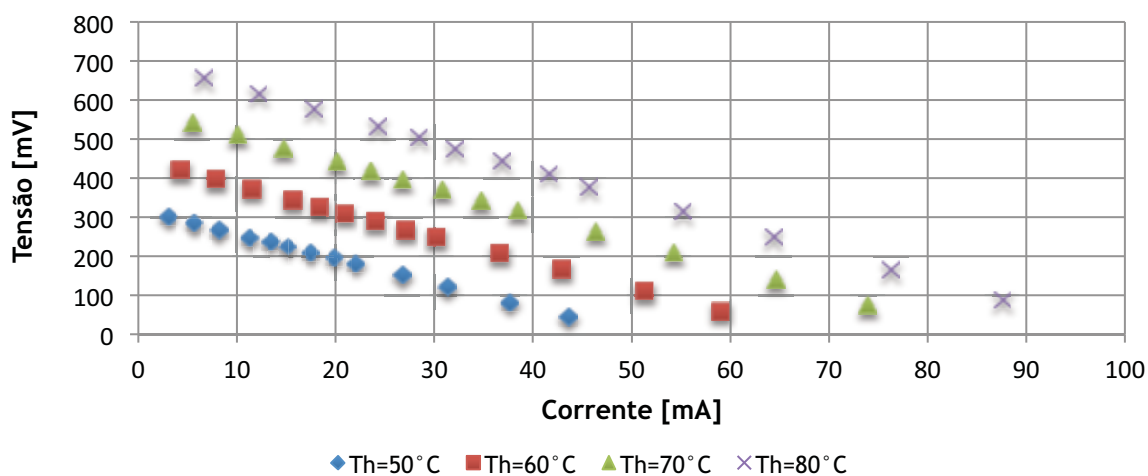


Figura 4.15 - Variação da tensão de saída do módulo termoelétrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na horizontal com ventilador 2).

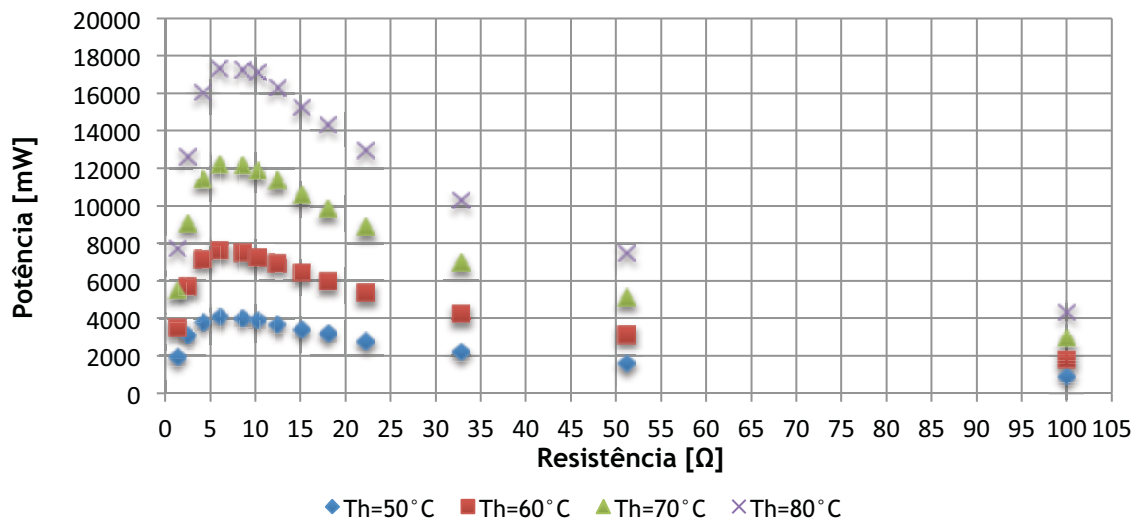


Figura 4.16 - Variação da potência do conversor termoeletrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas. (na horizontal com ventilador 2)

4.2.4 Ensaios com ventilador 2 na vertical

Através das Figuras 4.17 e 4.18, observa-se que a variação nos ensaios da posição horizontal e vertical da unidade experimental, traduziram algumas melhorias no desempenho do conversor, mas mais uma vez não suficientes para se adotar o ventilador 2 em detrimento do ventilador 1.

Foi neste conjunto de ensaios que se conseguiu obter o melhor valor de potência do conversor de aproximadamente 18000 mW (Figura 4.18), no entanto os ensaios que se traduzem mais vantajosos são os ensaios com o ventilador 1 nas mesmas condições.

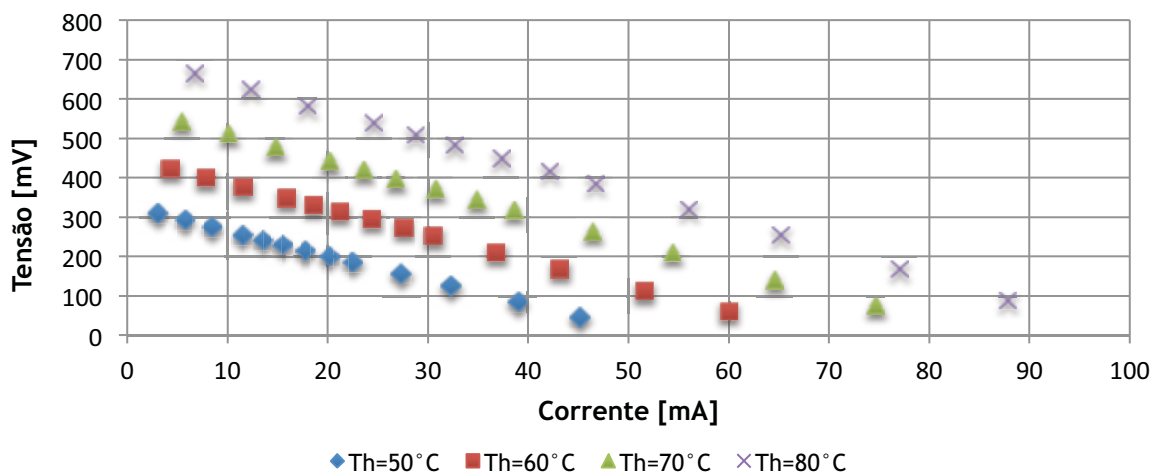


Figura 4.17 - Variação da tensão de saída do módulo termoeletrico em função da corrente de saída, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 2).

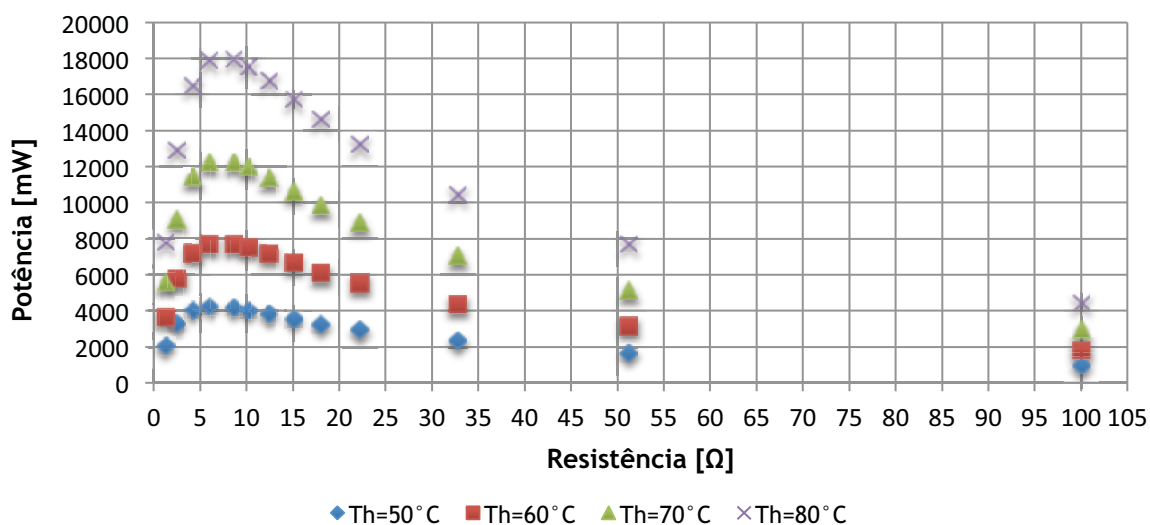


Figura 4.18 - Variação da potência do conversor termoelétrico em função de diferentes valores de carga, para diferentes temperaturas impostas (na vertical com ventilador 2).

4.3 Nota conclusiva

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados experimentais do estudo proposto a que o elemento termoelétrico foi submetido. Tentou-se conhecer e caracterizar o desempenho de um conversor termoelétrico, tendo sido realizados diversos ensaios onde se variaram diferentes parâmetros, nomeadamente a gama de temperaturas de funcionamento, a orientação do conversor e respectiva estrutura de apoio aos ensaios, assim como os mecanismos de transmissão de calor (convecção natural e convecção forçada).

Com a finalidade de impor ao elemento termoelétrico diferentes condições de temperatura a uma das suas faces simulando situações reais, foi empregue no estudo uma placa de aquecimento, em que através da utilização de termopares foi possível monitorizar as temperaturas em ambas as faces do conversor termoelétrico, determinando o valor de tensão a fornecer à placa para impor as temperaturas desejadas. O objectivo consistiu em criar um gradiente de temperatura entre as suas faces, observando o comportamento do conversor termoelétrico para diferentes temperaturas de funcionamento. No sentido de se tornar possível quantificar o desempenho do conversor, designadamente a potência elétrica que este consegue produzir, foi elaborado um circuito, onde foram empregues algumas resistências simulando uma carga, permitindo assim obter valores da tensão e corrente.

A apresentação e discussão dos resultados foi exposta de forma sequencial das diferentes alterações que foram efectuadas à unidade experimental tendo em vista a optimização do sistema, tendo-se dado início ao estudo com ensaios em circuito aberto com convecção natural. De seguida foram apresentados os resultados dos ensaios obtidos em circuito fechado, com e sem a unidade experimental isolada, na horizontal e na vertical, terminando com os ensaios em convecção forçada.

Da análise dos resultados, pode-se concluir que todas as alterações efectuadas ao sistema trouxeram melhorias no desempenho do conversor termoelétrico, umas mais significativas que outras, ressaltando a situação do período de interrupção dos ensaios, devido a uma avaria num dos aparelhos de medição da Fluke, que influenciou os resultados obtidos.

Os resultados apresentados para os valores de tensão e corrente revelaram que estes assumem um comportamento bastante linear, dependendo maioritariamente da carga que se encontra associada ao conversor termoelétrico. Verificou-se que quanto maior for o valor da resistência, menor será o valor da tensão que se consegue obter, enquanto que para a corrente ocorre a situação contrária, apresentando esta um comportamento crescente com o aumento da resistência. Os valores máximos obtidos para a tensão e corrente foram 665 mV e 89 mA respectivamente, tendo sido obtidos no último ensaio realizado no regime de convecção forçada para uma temperatura imposta na face quente do conversor de 80 °C. Para além de influenciar os valores da tensão e corrente, as diferentes resistências influenciam a temperatura a que se consegue manter o conversor. Pode-se também concluir analisando os resultados obtidos para os valores de potência, que esta assume um comportamento crescente com o aumento dos valores da resistência de carga até se utilizar uma resistência com um valor próximo da resistência interna do conversor, a partir da qual começa a inverter esta tendência, sofrendo um decréscimo gradual da mesma.

Fazendo uma análise em relação ao parâmetro de temperatura, observa-se que o desempenho do conversor é fortemente influenciado pela diferença de temperatura entre as faces do conversor. Quanto maior for o gradiente de temperatura, verifica-se uma melhoria no desempenho do conversor. Esta situação torna-se evidente observando os resultados obtidos nos ensaios em convecção natural e convecção forçada.

Em suma, pode afirmar-se que os resultados obtidos experimentalmente foram fortemente influenciados pelas temperaturas de funcionamento do conversor termoelétrico, nomeadamente devido às diferenças de temperatura entre as faces do conversor, assim como a resistência de carga que se encontrava associada. Torna-se assim pertinente na utilização destes conversores termoelétricos, recorrer a um sistema com convecção

forçada, promovendo a maior diferença de temperatura possível, assim como utilizar uma resistência de carga próxima da resistência interna do conversor.

Observou-se ser possível produzir valores de potência aceitáveis para aplicar estes conversores em diversos equipamentos electrónicos, nomeadamente os sensores wireless utilizados pelos diferentes sistemas de gestão técnica de energia dos edifícios, substituindo os seus sistemas de alimentação, nomeadamente as baterias.

Capítulo 5

Conclusão

A incorporação de conversores termoelétricos em dispositivos electrónicos com o intuito de substituir os atuais sistemas de alimentação, nomeadamente as baterias, pode constituir-se como uma importante solução para os problemas relacionados com a sua autonomia. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objectivo a caracterização de um conversor termoelétrico, com o intuito de avaliar o seu desempenho, verificando a potência que este consegue produzir, com intuito de estudar a fiabilidade de o implementar em sensores utilizados em sistemas automatizados que realizem gestão técnica dos edifícios.

Realiza-se neste último capítulo uma revisão ao trabalho que foi desenvolvido e apresentam-se algumas sugestões para trabalho futuro.

5.1 Recapitulação

Este trabalho apresenta como contribuição o estudo e caracterização de um conversor termoelétrico, com possível aplicação em dispositivos electrónicos, tais como sensores ou actuadores, utilizados nas redes automatizadas em edifícios.

Dado isto, o trabalho teve início com uma introdução à temática do problema em estudo, onde é realizada uma perspectiva geral relativamente à situação energética mundial, nomeadamente ao nível dos sectores dos edifícios, introduzindo a necessidade da realização de uma melhor gestão técnica de energia, com recurso a automatização dos mesmos. É também efectuada uma revisão bibliográfica relativamente a trabalhos anteriores, sobre a automatização de edifícios e aplicação de conversores termoelétricos, permitindo fazer o enquadramento deste trabalho.

Durante o decorrer do trabalho são abordados os diversos aspectos relacionados com a termoelectricidade, com a apresentação dos fenómenos de que fazem uso estes conversores, sendo dada especial importância ao efeito Seebeck, que está na base de funcionamento dos geradores termoelétricos. Para os diferentes tipos de conversores termoelétricos, são apresentadas as suas principais características, fazendo a distinção entre os mesmos, assim como as equações de governo, que permitem fazer um balanço energético de cada um deles. São ainda demonstradas algumas aplicações existentes destes conversores no mercado actual. Posteriormente, é abordado o conceito da automatização de edifícios, onde são referenciados os principais sistemas de controlo que

permitem realizar uma gestão técnica de energia em edifícios. É introduzido o conceito das redes domésticas sensoriais wireless, apresentando as vantagens na utilização desta tipologia, assim como a sua principal desvantagem em relação à autonomia dos diferentes elementos que a constituem.

De seguida, procedeu-se à realização do estudo experimental, tendo-se dado início com a descrição e caracterização da unidade experimental. Com o intuito de realizar os ensaios de forma mais precisa, minimizando eventuais perdas devido a problemas de mau contacto entre os diferentes elementos empregues no estudo, foi desenvolvida uma estrutura de apoio, que permitiu fixar o conversor termoelétrico com uma certa pressão entre a unidade de aquecimento e o dissipador de calor. Procedeu-se à descrição de todos os equipamentos utilizados neste trabalho, assim como os diferentes ensaios realizados, onde em cada um dos ensaios foram impostas diferentes temperaturas a uma das faces do conversor, assim como simuladas diferentes resistências de carga. Nas diferentes fases do estudo experimental, foram sendo introduzidas alterações ao sistema de forma gradual, tais como o uso de isolamento na envolvente do conversor, a alteração da sua posição de funcionamento (horizontal e vertical), assim como o mecanismo de transferência de calor (convecção natural e convecção forçada), observando a resposta do conversor termoelétrico.

Os resultados obtidos revelaram que os principais parâmetros que influenciam o desempenho deste tipo de conversores são a temperatura e a resistência de carga a eles associada. Em cada uma das fases dos diferentes ensaios, foram verificadas melhorias no desempenho do conversor, apresentando os ensaios realizados com a estrutura na vertical melhores valores de tensão e corrente, uma vez que a dissipação de calor é mais eficiente, permitindo obter maiores diferenças de temperatura entre as faces do conversor. O isolamento de cortiça também introduziu algumas melhorias, dado que minimizou a transferência de calor entre a placa de aquecimento e o dissipador de calor, promovendo uma maior diferença de temperatura entre as faces do conversor. O recurso à convecção forçada para a realização de transferência de calor do dissipador para o ambiente envolvente, foi a alteração que surtiu mais efeito, uma vez que aumentou de forma significativa a velocidade de escoamento. Deve salientar-se a questão do período de interrupção entre a realização dos ensaios, que influenciou de certa forma os resultados obtidos, uma vez que a temperatura do ar ambiente no laboratório aumentou, diminuindo a diferença de temperatura entre o sistema e o ambiente, e consequentemente prejudicando o escoamento entre estes.

Em suma, conseguiram-se obter valores bastante satisfatórios de potência do conversor termoelétrico, conseguindo fazer uma caracterização do mesmo para diferentes regimes e condições de funcionamento.

5.2 Trabalho futuro

Foram revistas na secção anterior as diferentes fases do trabalho desenvolvido. Do estudo realizado e conhecimento adquirido podem sugerir-se a realização de novos trabalhos relacionados com o âmbito deste trabalho. Expõem-se de seguida alguns aspectos a desenvolver no futuro.

Uma vez realizada a caracterização do conversor termoelétrico, nomeadamente ao nível da energia que este consegue produzir em determinadas condições de funcionamento, torna-se pertinente a realização de um estudo relativo à gestão dessa mesma energia recolhida. As fontes de energia nem sempre fornecem a mesma potência ao longo do tempo, e por vezes produzem-na em pequenas quantidades, que se tornam insuficientes para alimentar determinada aplicação. No sentido de tornar viável e eficaz a aplicação dos conversores termoelétricos em determinados dispositivos electrónicos, torna-se necessário a criação de um circuito de potência com recurso a conversores DC-DC e sistemas de armazenamento de energia. O objectivo deste circuito é garantir que o dispositivo se encontre sempre em pleno funcionamento, o que se torna essencial em dispositivos que façam o controlo e monitorização de determinados processos.

Outra proposta seria a realização de um estudo onde fossem aplicados diversos conversores termoelétricos em série, com o objectivo de comparar os ganhos que se conseguiriam obter, com vista a sua posterior utilização em aplicações que consumam energia em maior escala.

Referências bibliográficas

(EIA), E.I.A. *International Energy Outlook*, Annual Report, EUA 2013.

Dounis A. I., Caraiscos C., *Advanced control systems engineering for energy and confort management in a building environment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp.1246-61, 2009.

Anders A. *EnOcean Thermo Applications*. White paper, 2010.

Anon *NNDB*. [Online] Disponível em: <http://www.nndb.com/people/685/000097394/> [Acedido a 28 Março 2014].

Anon, *Gyroscope*. [Online] Disponível em: <http://www.gyroscope.com/d.asp?product=ECOFAN2> [Acedido a 10 Maio 2014].

Antunes, J.A.A., *Reaproveitamento de Calor para Geração de Energia Eléctrica no Automóvel*. Dissertação de mestrado. Universidade do Minho, 2011.

Bangert K., *Thermopower*, E-futures, 2010.

Bastos, S.A.M., *Pulseira para geração de energia*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, 2010.

Carvalho, C.A.R. *Estudo de viabilidade do aproveitamento do calor de escape para geração de energia eléctrica em automóveis*. Dissertação de mestrado, Universidade de Taubaté, 2012.

Cengel, Y.A., *Heat Transfer - A Practical Approach*. McGraw-Hill, 2003.

Chandler, D.L., 2010. [Online] Disponível em: <http://newsoffice.mit.edu/2010/explained-thermoelectricity-0427> [Acedido a 26 Março 2014].

Fluke Co. [Online] Disponível em: <http://www.fluke.com/fluke/ptpt/Multimetros-digitais/Fluke-45.htm?PID=56082> [Acedido a 2 Setembro 2014].

Champier D., Bedecarrats J.P., Rivaletto B.M, Strub R.F., *Thermoelectric power generation from biomass cook stoves*, Energy, pp.1-8, 2009.

Dajiang Yang, Huiming Yin, *Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 26, 2011.

Dan Inman, S.P., *Energy Harvesting Technologies*. Springer, 2009.

Declan T. Delaney, Gregory M.P. O'Hare, and Antonio G. Ruzzelli, *Evaluation of Energy-Efficiency in Lighting Systems using Sensor Network*, University College Dublin, 2009.

Denis Bourgeois, Christoph Reinhart, Iain Macdonald, *Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control*, Energy and Buildings, pp.814-23, 2006.

Fernandes, Alberto Emanuel Simões dos Santos, *Conversão de Energia com Células de Peltier*, Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

Fredrik Osterlind, Erik Pramsten, Daniel Roberthson, Joakim Eriksson, Niclas Finne, Thiemo Voigt, *Integrating Building Automation Systems and Wireless Sensor Networks*. IEEE, 2007.

Ghoniem, A., *Needs, resources and climate change: Clean efficient conversion technologies*, Progress in Energy and Combustion Science, vol. 37, pp.15-51, 2011.

Goldsmid, H.J., *Introduction to Thermoelectricity*. Springer, 2010.

Gonçalves, L.M.V., *Microssistema Termoeléctrico baseado em teluretos de bismuto e antimónio*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho, 2008..

Gonçalves, T.C., *Implementação de uma rede de domótica baseada em Ethernet e CANopen*, Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.

Gunter Rockendorf, Roland Sillmann, Lars Podlowski, Bernd Litzenburger, *PV-hybrid and thermoelectric collectors*, Solar Energy, vol. 67, pp.227-37, 1999.

Haris Doukas, Konstantinos D. Patlitzianas, Konstantinos Iatropoulos, John Psarras, *Intelligent building energy management system using rule sets*, Building and Environment, pp.3562-69, 2007.

Holman, J.P., *Heat Transfer*. McGraw-Hill, 2009.

Indusmelec, *Building Automation e Domótica: o futuro hoje*, 2013.

Joseph A. Paradiso, Thad Starner, *Human Generated Power for Mobile Electronics*, 2004.

K. Qiu, A.C.S. Hayden, *A Natural-Gas-Fired Thermoelectric Power Generation System*, Journal of Electronic Materials , vol. 38, pp.1315-19, 2009.

Killander, A., 390-393 *A stove-top generator for cold areas*, Stockholm: IEEE Institute of Technology, Sweden, 1996.

Kryotherm, 2014. [Online] Disponível em: <http://www.kryotherm.com> [Acedido a 20 Julho 2014].

Maldonado, L., *Termoresistividade*, Universidade do Desenvolvimento de Santa Catarina, 2009.

Matsuo Kishi, Takashi Yamanaka, Massao Kasuga, 2001. *N.I.* [Online] Disponível em: <http://www.natureinterface.com/e/ni03/P045-049/>, [Acedido a 19 de Maio de 2014].

Melcor, *Application notes for thermoelectric devices*. [Online] Disponível em: <http://in.rsdelivers.com/product/melcor/cp10-127-05l-rtv/334w-peltier-module-39a-154v/2382988.aspx> [Acedido a 14 março 2014].

Micropelt, *Micropelt iTRV*. [Online] Disponível em: <http://micropelt.com/itriv.php> [Acedido a 14 Julho 2014].

Moffat, R.J., 1997. [Online] Disponível em: <http://www.electronics-cooling.com/1997/01/notes-on-using-thermocouples/> [Acedido a 17 Abril 2014].

Murugavel Raju, M.G. *Energy Harvesting ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers*, White Paper, Texas Instruments, 2010.

Paradiso, J.A. *Energy scavenging for mobile and wireless electronics*, 2005.

Piedade, M., *Efeitos termoelétricos e suas aplicações*. I.S.T., 1997

Pineda, D.D. *Monolithic integration of VLS silicon nanowires into planar thermoelectric microgenerators*, Dissertação de mestrado, Universidade autónoma de Barcelona, 2011.

Qian Huang, Chao Lu, Mark Shaurette, Robert F. Cox, *Environmental thermal energy scavenging powered wireless sensor network for building monitoring*, EUA, Purdue University, 2011

R. Y. Nuwayhid, D.M. Rowe, G. Min, *Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply*, Renewable Energy, vol. 28, pp.205-22., 2003.

Raspin, J., *A chave para edifícios sustentáveis e com melhor relação custo-benefício: Intelligent energy*, Frost&Sullivan, 2011.

Ribeiro, B.J.F., *Um sistema distribuído para automação de espaços residenciais e de serviços*. Tese de doutoramento. Universidade da Beira Interior, 2008.

S. Dalola, V. Ferrari, M. Guizzetti, D. Marioli, E. Sardini, M. Serpelloni, A. Taroni, *Autonomous Sensor System with RF Link and Thermoelectric Generator for Power Harvesting*. IEEE, 2008.

S. Maneewan, J. Khedari, B. Zeghamati, J. Hirunlabh, J. Eakburanawat, *Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector*, Renewable Energy, vol. 29, pp.743-52, 2004.

S.B. Riffat, X.M.R.W., *Performance simulation and experimental testing of a novel thermoelectric heat pump system*, Applied Thermal Engineering, vol. 26, pp.494-501, 2005.

Salman Bin Inayat, M.M.H., *Power generation from thermoelectric system-embedded Plexiglas for green building technology*, 2012.

Seth, Yanko Design. [Online] Disponível em: <http://www.yankodesign.com/2009/06/18/the-power-of-my-wrist/> [Acedido em 9 Maio 2014].

Souza, D.H.C., *Otimização do uso de refrigeradores termoelétricos em processos de refrigeração*. Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, 2007.

Stankovic, J.A., *Wireless Sensor Networks*. University of Virginia, 2006.

V. Leonov, L.T.T..F.P..V.H., *Thermoelectric Converters of Human Warmth for Self-Powered Wireless Sensor Nodes*, Sensors journal, IEEE, vol. 7, pp.650-57, 2007.

Velmre E., *Thomas Johann Seebeck (1770-1831)*, Tallinn University of Technology, 2007.

Wensi Wang, V.C.N.W.M.H.B.O, *Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks*, International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013.

Winjgaards, D. *Lateral on-chip integrated peltier elements based on polycrystalline silicon-germanium*, 2003.

X. F. Zheng, Y.Y.Y.K.S. *A potencial candidate for the sustainable and realiable domestic energy generation - Thermoeletric cogeneration system*, Applied Thermal Engineering, vol. 53, pp.305-11, 2013.

Yuvraj Argawal, B.B.R.G.J.L.M.W.T.W. *Occupancy-Driven Energy Management for Smart Building Automation*, University of California, San Diego, 2010.

Zervos, H. *Applications for thermoelectric energy harvesters*, Energy Harvesting Journal, 2013.

ANEXOS

Anexo A - Grupo de ensaios em circuito aberto com circulação natural.

	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]
Horizontal	1	50	43,8	6,2	159,8
	2	60	51,5	8,5	213,36
	3	70	59,5	10,5	268,43
	4	80	67,1	12,9	325,9
	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]
Vertical	1	50	42,2	7,8	196,06
	2	60	49,5	10,5	271,65
	3	70	56,3	13,7	340,9
	4	80	64,3	15,7	411,8

Anexos B - Grupo de ensaios com carga na horizontal em circulação natural.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	43,8	6,2	19,32	19,08	368,6256
	2	60	51,6	8,4	24,73	24,48	605,3904
	3	70	59,4	10,6	29,28	29,01	849,4128
	4	80	67,2	12,8	34,14	33,84	1155,2976
2,5	1	50	43,8	6,2	36,94	17,03	629,0882
	2	60	51,6	8,4	47,27	21,77	1029,0679
	3	70	59,3	10,7	55,65	25,6	1424,64
	4	80	67,2	12,8	65,77	30,24	1988,8848
4,2	1	50	43,8	6,2	55,35	14,11	780,9885
	2	60	51,6	8,4	71,11	18,35	1304,8685
	3	70	59,3	10,7	84,67	21,83	1848,3461
	4	80	67,1	12,9	101,62	26,21	2663,46,02
6	1	50	43,7	6,3	70,14	12,07	846,5898
	2	60	51,5	8,5	89,02	15,62	1390,4924
	3	70	59,2	10,8	108,23	18,99	2055,2877
	4	80	67,1	12,9	130,61	22,92	2993,5812
8,6	1	50	43,7	6,3	88,72	10,1	896,072
	2	60	51,5	8,5	110,5	13,36	1476,28
	3	70	59,2	10,8	133,46	16,12	2151,3752
	4	80	67	13	161,07	19,44	3131,2008
10,2	1	50	43,7	6,3	95,53	9,61	918,0433
	2	60	51,5	8,5	117,52	11,84	1391,4368
	3	70	59,2	10,8	146,33	14,77	2161,2941
	4	80	67	13	175,87	17,76	3123,4512
12,4	1	50	43,6	6,4	104,82	8,53	894,1146
	2	60	51,4	8,6	130,28	10,77	1403,1156
	3	70	59,1	10,9	159,53	13,2	2105,796
	4	80	67	13	193,03	15,98	3084,6194
15,1	1	50	43,6	6,4	110,94	7,45	826,503

	2	60	51,4	8,6	139,27	9,36	1303,5672
	3	70	59,1	10,9	172,67	11,63	2008,1521
	4	80	67	13	208,84	14,1	2944,644
18	1	50	43,5	6,5	116,64	6,54	762,8256
	2	60	51,3	8,7	147,36	8,26	1217,1936
	3	70	59	11	183,95	10,33	1900,2035
	4	80	66,9	13,1	223,13	12,55	2800,2815
22,2	1	50	43,5	6,5	123,17	5,59	688,5203
	2	60	51,3	8,7	156,23	7,08	1106,1084
	3	70	59	11	195,77	8,89	1740,3953
	4	80	66,9	13,1	238,77	10,86	2593,0422
32,8	1	50	43,4	6,6	133,88	4,09	547,5692
	2	60	51,3	8,7	170,83	5,22	891,7326
	3	70	59	11	214,8	6,59	1415,532
	4	80	66,8	13,2	263,45	8,09	2131,3105
51,1	1	50	43,3	6,7	142,68	2,78	396,6504
	2	60	51,2	8,8	176,3	3,45	608,235
	3	70	58,9	11,1	232,11	4,55	1056,1005
	4	80	66,7	13,3	286,03	5,62	1607,4886
100	1	50	43,2	6,8	151,58	1,5	227,37
	2	60	51,1	8,9	209,2	2,08	435,136
	3	70	58,8	11,2	248,77	2,49	619,4373
	4	80	66,6	13,4	309,33	3,1	958,023

Anexo C - Grupo de ensaios com carga na vertical em circulação natural.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	42,8	7,2	26,03	25,75	670,2725
	2	60	49,6	10,4	35,03	34,74	1216,9422
	3	70	56,3	13,7	41,97	41,54	1743,4338
	4	80	64,8	15,2	51,28	50,82	2606,0496
2,5	1	50	42,7	7,3	48,45	22,29	1079,9505
	2	60	49,6	10,4	65,94	30,31	1998,6414
	3	70	56,3	13,7	79,15	36,39	2880,2685
	4	80	64,7	15,3	96,81	44,51	4309,0131
4,2	1	50	42,7	7,3	70,16	17,51	1228,5016
	2	60	49,5	10,5	99,1	25,53	2530,023
	3	70	56,2	13,8	119,46	30,74	3672,2004
	4	80	64,7	15,3	146,12	37,62	5497,0344
6	1	50	42,7	7,3	90,22	15,83	1428,1826
	2	60	49,4	10,6	124,88	21,9	2734,872
	3	70	56,2	13,8	151,43	26,56	4021,9808
	4	80	64,7	15,3	183,89	32,24	5928,6136
8,6	1	50	42,7	7,3	108,06	13,05	1410,183
	2	60	49,4	10,6	150,2	18,15	2726,13
	3	70	56,2	13,8	180,78	21,86	3951,8508
	4	80	64,5	15,5	221,21	26,77	5921,7917
10,2	1	50	42,6	7,4	116,47	11,75	1368,5225
	2	60	49,4	10,6	157,62	15,92	2509,3104
	3	70	56,1	13,9	196,4	19,84	3896,576
	4	80	64,5	15,5	240,23	24,27	5830,3821
12,4	1	50	42,5	7,5	128,02	10,59	1355,7318
	2	60	49,4	10,6	169,89	14,06	2388,6534
	3	70	56,1	13,9	214,83	17,79	3821,8257
	4	80	64,4	15,6	258,62	21,43	5542,2266
15,1	1	50	42,5	7,5	138,89	9,21	1260,7569

	2	60	49,3	10,7	182,79	12,32	2251,9728
	3	70	56	14	230,53	15,55	3584,7415
	4	80	64,4	15,6	278,07	18,77	5219,3739
18	1	50	42,5	7,5	144,53	8,1	1170,693
	2	60	49,3	10,7	192,7	10,83	2086,941
	3	70	56	14	243,47	13,7	3335,539
	4	80	64,4	15,6	289,7	16,33	4730,801
22,2	1	50	42,5	7,5	152,45	6,92	1054,954
	2	60	49,3	10,7	203,44	9,25	1881,82
	3	70	56	14	257,57	11,72	3018,7204
	4	80	64,2	15,8	307,95	14,02	4317,459
32,8	1	50	42,5	7,5	164,58	5,04	829,4832
	2	60	49,2	10,8	221,04	6,79	1500,8616
	3	70	55,9	14,1	283,79	8,71	2471,8109
	4	80	64,2	15,8	335,1	10,3	3451,53
51,1	1	50	42,3	7,7	171,21	3,35	573,5535
	2	60	49,1	10,9	235,28	4,6	1082,288
	3	70	55,8	14,2	300,15	5,89	1767,8835
	4	80	64,1	16	366,1	7,18	2628,598
100	1	50	42,2	7,8	181,36	1,8	326,448
	2	60	49	11	251,49	2,5	628,725
	3	70	55,7	14,6	317,62	3,18	1010,0316
	4	80	63,9	16,2	388,7	3,9	1515,93

Anexo D - Grupo de ensaios com carga e isolamento na horizontal em circulação natural.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	43,6	6,4	19,73	19,54	385,5242
	2	60	51,5	8,5	24,93	24,74	616,7682
	3	70	59,2	10,8	31,94	31,64	1010,5816
	4	80	67,1	12,9	39,22	38,9	1525,658
2,5	1	50	43,6	6,4	37,36	17,18	641,8448
	2	60	51,5	8,5	49,73	22,88	1137,8224
	3	70	59,1	10,9	60,89	28	1704,92
	4	80	67,1	12,9	74,88	34,49	2582,6112
4,2	1	50	43,6	6,4	56,74	14,62	829,5388
	2	60	51,5	8,5	76,24	19,66	1498,8784
	3	70	59,1	10,9	93,23	24,02	2239,3846
	4	80	67	13	112,62	29,02	3268,2324
6	1	50	43,5	6,5	71,61	12,55	898,7055
	2	60	51,4	8,6	96,58	16,95	1637,031
	3	70	59	11	119,2	20,91	2492,472
	4	80	67	13	143,67	25,19	3619,0473
8,6	1	50	43,5	6,5	88,19	10,65	939,2235
	2	60	51,4	8,6	117,11	14,14	1655,9354
	3	70	59	11	145,67	17,61	2565,2487
	4	80	66,9	13,1	173,27	20,93	3626,5411
10,2	1	50	43,4	6,6	97,37	9,82	956,1734
	2	60	51,3	8,7	126,73	12,78	1619,6094
	3	70	58,9	11,1	158,21	15,97	2526,6137
	4	80	66,9	13,1	187,49	18,93	3549,1857
12,4	1	50	43,4	6,6	105,27	8,71	916,9017
	2	60	51,3	8,7	136,92	11,32	1549,9344
	3	70	58,9	11,1	167,32	13,85	2317,382
	4	80	66,9	13,1	202,68	16,76	3396,9168
15,1	1	50	43,4	6,6	113,75	7,66	871,325

	2	60	51,3	8,7	147,88	9,88	1461,0544
	3	70	58,9	11,1	180,81	12,18	2202,2658
	4	80	66,9	13,1	220,54	14,86	3277,2244
18	1	50	43,3	6,7	120,57	6,76	815,0532
	2	60	51,2	8,8	153,73	8,63	1326,6899
	3	70	58,8	11,2	191,03	10,74	2051,6622
	4	80	66,8	13,2	235,27	13,23	3112,6221
22,2	1	50	43,3	6,7	128,54	5,84	750,6736
	2	60	51,2	8,8	161,86	7,35	1189,671
	3	70	58,8	11,2	202,07	9,18	1855,0026
	4	80	66,7	13,3	250,41	11,38	2849,6658
32,8	1	50	43,2	6,8	138,03	4,23	583,8669
	2	60	51,1	8,9	175,07	5,36	938,3752
	3	70	58,8	11,2	221,07	6,78	1498,8546
	4	80	66,7	13,3	274,24	8,42	2309,1008
51,1	1	50	43,1	6,9	149,44	2,93	437,8592
	2	60	51	9	187,33	3,66	685,6278
	3	70	58,7	11,3	238,33	4,68	1115,3844
	4	80	66,6	13,4	293,17	5,74	1682,7958
100	1	50	43	7	159,76	1,58	252,4208
	2	60	51	9	198,86	1,98	393,7428
	3	70	58,6	11,4	256,64	2,56	656,9984
	4	80	66,5	13,5	313,23	3,14	983,5422

Anexo E - Grupo de ensaios com carga e isolamento na vertical em circulação natural.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	43,2	6,8	27,56	27,28	751,8368
	2	60	51,3	8,7	32,79	32,46	1064,3634
	3	70	59,1	10,9	39,2	38,82	1521,744
	4	80	66,4	13,6	45,73	45,22	2067,9106
2,5	1	50	43,1	6,9	48,83	22,47	1097,2101
	2	60	51,3	8,7	61,34	28,17	1727,9478
	3	70	59,1	10,9	73,69	33,9	2498,091
	4	80	66,3	13,7	86,78	39,84	3457,3152
4,2	1	50	43,1	6,9	71,52	18,38	1314,5376
	2	60	51,2	8,8	91,62	23,62	2164,0644
	3	70	59	11	110,72	28,53	3158,8416
	4	80	66,3	13,7	129,33	33,31	4307,9823
6	1	50	43,1	6,9	87,75	15,37	1348,7175
	2	60	51,1	8,9	114,84	20,14	2312,8776
	3	70	59	11	138,74	24,34	3376,9316
	4	80	66,3	13,7	162,97	28,6	4660,942
8,6	1	50	43,1	6,9	103,09	12,96	1336,0464
	2	60	51,1	8,9	137,45	16,63	2285,7935
	3	70	59	11	166,77	20,18	3365,4186
	4	80	66,2	13,8	195,16	23,65	4615,534
10,2	1	50	43	7	111,16	11,14	1238,3224
	2	60	51,1	8,9	147,59	14,91	2200,5669
	3	70	58,9	11,1	180,11	18,2	3278,002
	4	80	66,2	13,8	211,01	21,34	4502,9534
12,4	1	50	42,9	7,1	118,87	9,77	1161,3599
	2	60	51,1	8,9	157,89	13,07	2063,6223
	3	70	58,9	11,1	194,18	16,1	3126,298
	4	80	66,1	13,9	228,88	18,99	4346,4312
15,1	1	50	42,9	7,1	125,94	8,42	1060,4148

	2	60	51	9	167,91	11,33	1902,4203
	3	70	58,8	11,2	208,12	14,04	2922,0048
	4	80	66,1	13,9	246,42	16,64	4100,4288
18	1	50	42,9	7,1	132,26	7,41	980,0466
	2	60	51	9	176,42	9,91	1748,3222
	3	70	58,8	11,2	219,56	12,36	2713,7616
	4	80	66,1	13,9	260,65	14,68	3826,342
22,2	1	50	42,9	7,1	138,83	6,28	871,8524
	2	60	51	9	185,72	8,45	1569,334
	3	70	58,8	11,2	231,72	10,55	2444,646
	4	80	66	14	274,85	12,53	3443,8705
32,8	1	50	42,9	7,1	149,26	4,58	683,6108
	2	60	50,9	9,1	200,88	6,17	1239,4296
	3	70	58,7	11,3	251,27	7,72	1939,8044
	4	80	66	14	299,48	9,2	2755,216
51,1	1	50	42,8	7,2	156,69	3,07	481,0383
	2	60	50,8	9,2	214,06	4,2	899,052
	3	70	58,6	11,4	268,24	5,26	1410,9424
	4	80	65,9	14,1	320,9	6,31	2024,879
100	1	50	42,7	7,3	165,47	1,63	269,7161
	2	60	50,7	9,3	227,01	2,38	540,2838
	3	70	58,5	11,5	284,84	2,85	811,794
	4	80	65,8	14,2	342,5	3,44	1178,2

Anexo F - Grupo de ensaios para ventilador 1 na horizontal com circulação forçada.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	38,7	11,3	43,12	42,76	1843,8112
	2	60	44,3	15,7	57,72	57,25	3304,47
	3	70	50,2	19,8	70,57	69,98	4938,4886
	4	80	56,2	23,8	82,75	82,04	6788,81
2,5	1	50	38,6	11,4	80,63	37,09	2990,5667
	2	60	44,1	15,9	108,37	49,93	5410,9141
	3	70	50	20	132,7	61,09	8106,643
	4	80	55,9	24,1	156,57	72,01	11274,6057
4,2	1	50	38,4	11,6	119,53	30,84	3686,3052
	2	60	43,9	16,1	160,32	41,39	6635,6448
	3	70	49,8	20,2	199,29	51,4	10243,506
	4	80	55,6	24,4	238,29	61,46	14645,3034
6	1	50	38,3	11,7	150,52	26,41	3975,2332
	2	60	43,8	16,2	201,52	35,4	7133,808
	3	70	49,5	20,5	252,88	44,43	11235,4584
	4	80	55,4	24,6	300,04	52,68	15806,1072
8,6	1	50	38,3	11,7	178,47	21,64	3862,0908
	2	60	43,7	16,3	241,5	29,19	7049,385
	3	70	49,4	20,6	304,47	36,86	11222,7642
	4	80	55	25	362,8	43,31	15712,868
10,2	1	50	38,2	11,8	193,76	19,55	3788,008
	2	60	43,6	16,4	266,7	26,93	7182,231
	3	70	49,2	20,8	330,2	33,37	11018,774
	4	80	54,8	25,2	394,24	39,81	15694,6944
12,4	1	50	38,1	11,9	206,52	17,06	3523,2312
	2	60	43,6	16,4	286,4	23,71	6790,544
	3	70	49	21	358,9	29,72	10666,508
	4	80	54,7	25,3	427,6	35,46	15162,696

15,1	1	50	38,1	11,9	221,93	14,95	3317,8535
	2	60	43,5	16,5	303,61	20,47	6214,8967
	3	70	48,9	21,1	384,6	25,94	9976,524
	4	80	54,5	25,5	459,3	31	14238,3
18	1	50	38	12	233,82	13,1	3063,042
	2	60	43,3	16,7	319,6	17,97	5743,212
	3	70	48,8	21,2	405,8	22,82	9260,356
	4	80	54,4	25,6	485,9	27,34	13284,506
22,2	1	50	37,9	12,1	246,35	11,21	2761,5835
	2	60	43,3	16,7	337,3	15,34	5174,182
	3	70	48,8	21,2	427,1	19,43	8298,553
	4	80	54,3	25,7	514,3	23,41	12039,763
32,8	1	50	37,8	12,2	266,91	8,16	2177,9856
	2	60	43,2	16,8	365,5	11,23	4104,565
	3	70	48,7	21,3	463,1	14,24	6594,544
	4	80	54,3	25,7	558,8	17,18	9600,184
51,1	1	50	37,7	12,3	283,76	5,46	1549,3296
	2	60	43,1	16,9	389,6	7,66	2984,336
	3	70	48,6	21,4	494,6	9,72	4807,512
	4	80	54,1	25,9	597,5	11,75	7020,625
100	1	50	37,7	12,3	298,95	2,87	857,9865
	2	60	43	17	413,4	4,15	1715,61
	3	70	48,5	21,5	524,7	5,26	2759,922
	4	80	53,9	26,1	635,5	6,38	4054,49

Anexo G - Grupo de ensaios para ventilador 1 na vertical com circulação forçada.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	38,6	11,4	44,23	43,83	1938,6009
	2	60	44,2	15,8	59,77	59,2	3538,384
	3	70	49,8	20,2	73,74	73,02	5384,4948
	4	80	55,2	24,8	87,01	86,12	7493,3012
2,5	1	50	38,5	11,5	81,66	37,58	3068,7828
	2	60	44	16	111,33	51,21	5701,2093
	3	70	49,5	20,5	138,72	63,77	8846,1744
	4	80	54,8	25,2	164,16	75,42	12380,9472
4,2	1	50	38,3	11,7	121,46	31,28	3799,2688
	2	60	43,8	16,2	166,98	43	7180,14
	3	70	49,2	20,8	207,37	53,38	11069,4106
	4	80	54,5	25,5	250,29	64,33	16101,1557
6	1	50	38,2	11,8	151,22	26,53	4011,8666
	2	60	43,7	16,3	206,47	36,27	7488,6669
	3	70	49	21	259,77	45,6	11845,512
	4	80	54,3	25,7	314,36	55,16	17340,0976
8,6	1	50	38,2	11,8	179,87	21,76	3913,9712
	2	60	43,6	16,4	245,27	29,69	7282,0663
	3	70	49	21	310,82	37,68	11711,6976
	4	80	54,2	25,8	376,9	45,68	17216,792
10,2	1	50	38,1	11,9	192,66	19,46	3749,1636
	2	60	43,5	16,5	267,25	27,01	7218,4225
	3	70	48,8	21,2	337,9	34,21	11559,559
	4	80	54	26	410	41,51	17019,1
12,4	1	50	38	12	207,15	17,16	3554,694
	2	60	43,5	16,5	287,78	23,87	6869,3086
	3	70	48,7	21,3	362,4	30,06	10893,744
	4	80	53,9	26,1	445,9	37,04	16516,136
15,1	1	50	38	12	222,21	14,99	3330,9279

	2	60	43,4	16,6	306,64	20,7	6347,448
	3	70	48,6	21,4	392,6	26,51	10407,826
	4	80	43,9	26,1	465,9	31,48	14666,532
18	1	50	37,9	12,1	234,38	13,19	3091,4722
	2	60	43,2	16,8	324,7	18,27	5932,269
	3	70	48,5	21,5	413,7	23,31	9643,347
	4	80	53,9	26,1	501,9	28,28	14193,732
22,2	1	50	37,8	12,2	247,35	11,25	2782,6875
	2	60	43,1	16,9	343,5	15,65	5375,775
	3	70	48,3	21,7	436,8	19,89	8687,952
	4	80	53,8	26,2	523,9	24,28	12720,292
32,8	1	50	37,7	12,3	267,34	8,22	2197,5348
	2	60	43,1	16,9	369,6	11,36	4198,656
	3	70	48,2	21,8	475,5	14,63	6956,565
	4	80	53,4	26,6	576,3	17,74	10223,562
51,1	1	50	37,6	12,4	284,92	5,58	1589,8536
	2	60	42,9	17,1	393,8	7,74	3048,012
	3	70	48	22	510,1	10,04	5121,404
	4	80	53,4	26,6	620,9	12,23	7593,607
100	1	50	37,6	12,4	300,58	3,01	904,7458
	2	60	42,9	17,1	416,7	4,18	1741,806
	3	70	47,8	22,2	542,5	5,49	2978,325
	4	80	53,2	26,8	656,7	6,6	4334,22

Anexo H - Grupo de ensaios para ventilador 2 na horizontal com circulação forçada.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	38,4	11,6	43,99	43,57	1916,6443
	2	60	44,1	15,9	59,54	58,96	3510,4784
	3	70	49,7	20,3	74,69	73,92	5521,0848
	4	80	55,2	24,8	88,34	87,53	7732,4002
2,5	1	50	38,3	11,7	81,82	37,62	3078,0684
	2	60	43,9	16,1	111,74	51,23	5724,4402
	3	70	49,4	20,6	140,36	64,62	9070,0632
	4	80	55	25	165,68	76,24	12631,4432
4,2	1	50	38,2	11,8	121,41	31,25	3794,0625
	2	60	43,6	16,4	166,71	42,88	7148,5248
	3	70	49,2	20,8	210,44	54,25	11416,37
	4	80	54,7	25,3	249,81	64,34	16072,7754
6	1	50	38	12	152,3	26,72	4069,456
	2	60	43,5	16,5	208,56	36,62	7637,4672
	3	70	48,9	21,1	263,81	46,32	12219,6792
	4	80	54,5	25,5	314,08	55,13	17315,2304
8,6	1	50	37,9	12,1	181,88	21,98	3997,7224
	2	60	43,4	16,6	249,12	30,15	7510,968
	3	70	48,7	21,3	317,27	38,41	12186,3407
	4	80	54,1	25,9	378,3	45,62	17258,046
10,2	1	50	37,8	12,2	196,67	19,87	3907,8329
	2	60	43,3	16,7	267,74	27,08	7250,3992
	3	70	48,6	21,4	343,3	34,69	11909,077
	4	80	54	26	411,5	41,59	17114,285
12,4	1	50	37,8	12,2	210,49	17,43	3668,8407
	2	60	43,2	16,8	289,76	24,01	6957,1376
	3	70	48,5	21,5	370,3	30,73	11379,319
	4	80	54	26	443,7	36,76	16310,412
15,1	1	50	37,8	12,2	224,38	15,13	3394,8694

	2	60	43,1	16,9	309,29	20,87	6454,8823
	3	70	48,3	21,7	396,7	26,72	10599,824
	4	80	53,9	26,1	475,8	32,07	15258,906
18	1	50	37,7	12,3	238,25	13,4	3192,55
	2	60	43,1	16,9	326,1	18,34	5980,674
	3	70	48,2	21,8	418,6	23,57	9866,402
	4	80	53,6	26,4	504,7	28,41	14338,527
22,2	1	50	37,7	12,3	247,73	11,27	2791,9171
	2	60	43	17	343,7	15,65	5378,905
	3	70	48,2	21,8	442	20,11	8888,62
	4	80	53,5	26,5	533,6	24,29	12961,144
32,8	1	50	37,6	12,4	266,88	8,2	2188,416
	2	60	42,8	17,2	372,5	11,46	4268,85
	3	70	48,1	21,9	477,2	14,67	7000,524
	4	80	53,4	26,6	578,9	17,8	10304,42
51,1	1	50	37,5	12,5	285,92	5,62	1606,8704
	2	60	42,7	17,3	397,7	7,82	3110,014
	3	70	48	22	510,8	10,05	5133,54
	4	80	53,3	26,7	616,9	12,13	7482,997
100	1	50	37,5	12,5	300,9	3,02	908,718
	2	60	42,7	17,3	421,3	4,23	1782,099
	3	70	47,8	22,2	542,4	5,44	2950,656
	4	80	53	27	657,1	6,59	4330,289

Anexo I - Grupo de ensaios para ventilador 2 na vertical com circulação forçada.

Resistência (Ω)	Ensaio	T_h ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência [mW]
1,3	1	50	38,2	11,8	45,55	45,13	2055,6715
	2	60	43,9	16,1	60,55	60,05	3636,0275
	3	70	49,6	20,4	75,24	74,62	5614,4088
	4	80	55	25	88,75	87,79	7791,3625
2,5	1	50	38	12	84,55	38,93	3291,5315
	2	60	43,9	16,1	112,1	51,6	5784,36
	3	70	49,2	20,8	140,51	65,56	9071,3256
	4	80	54,6	25,4	167,64	77,01	12909,9564
4,2	1	50	37,9	12,1	125,2	32,29	4042,708
	2	60	43,7	16,3	167,18	43,1	7205,458
	3	70	48,9	21,1	210,59	54,32	11439,2488
	4	80	54,3	25,7	253,56	65,17	16524,5052
6	1	50	37,8	12,2	155,81	27,34	4259,8454
	2	60	43,5	16,5	209,25	36,75	7689,9375
	3	70	48,8	21,2	264,32	46,39	12261,8048
	4	80	54,1	25,9	319,4	56,02	17892,788
8,6	1	50	37,7	12,3	186,18	22,48	4185,3264
	2	60	43,2	16,8	252,61	30,55	7717,2355
	3	70	48,6	21,4	318,06	38,55	12261,213
	4	80	53,8	26,2	385	46,65	17960,25
10,2	1	50	37,6	12,4	199,94	20,18	4034,7892
	2	60	43,1	16,9	272,94	27,58	7527,6852
	3	70	48,5	21,5	344,4	34,85	12002,34
	4	80	53,6	26,4	416,3	42,13	17538,719
12,4	1	50	37,6	12,4	214,76	17,77	3816,2852
	2	60	43	17	294,26	24,37	7171,8473
	3	70	48,4	21,6	371,2	30,74	11410,688
	4	80	53,5	26,5	449	37,3	16747,7
15,1	1	50	37,5	12,5	229,17	15,45	3540,6765

	2	60	42,9	17,1	314,67	21,22	6677,2974
	3	70	48,3	21,7	396,8	26,73	10606,464
	4	80	53,5	26,5	482,5	32,61	15734,325
18	1	50	37,5	12,5	241,32	13,56	3272,2992
	2	60	42,9	17,1	330	18,55	6121,5
	3	70	48,2	21,8	419	23,58	9880,02
	4	80	53,4	26,6	509,5	28,71	14627,745
22,2	1	50	37,4	12,6	254,56	11,57	2945,2592
	2	60	42,9	17,1	348,7	15,87	5533,869
	3	70	48,1	21,9	442,5	20,16	8920,8
	4	80	53,2	26,8	539,2	24,59	13258,928
32,8	1	50	37,3	12,7	275,31	8,45	2326,3695
	2	60	42,8	17,2	376,7	11,58	4362,186
	3	70	48	22	478,9	14,74	7058,986
	4	80	53,1	26,9	582,3	17,93	10440,639
51,1	1	50	37,3	12,7	292,14	5,72	1671,0408
	2	60	42,7	17,3	400,7	7,88	3157,516
	3	70	47,9	22,1	512,4	10,07	5159,868
	4	80	52,9	27,1	625,1	12,31	7694,981
100	1	50	37,2	12,8	308,67	3,09	953,7903
	2	60	42,6	17,4	423,7	4,27	1809,199
	3	70	47,8	22,2	542,4	5,44	2950,656
	4	80	52,8	27,2	664,9	6,68	4441,532