



**Alberto Emanuel Simões dos Santos
Fernandes**

Licenciatura em Engenharia Electrotécnica – Sistemas de
Potência

Conversão de Energia com Células de Peltier

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis - Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis (MERCEUS)

Juri: Presidente: Doutor Fernando José Almeida Vieira do Coito – FCT/UNL
Vogais: Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves – FCT/UNL (co-Orientador)
Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev – FCT/UNL (Orientador)
Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto – FCT/UNL (Arguente)

Alberto Emanuel Simões dos Santos Fernandes
Licenciatura em Engenharia Electrotécnica – Sistemas de Potência

Conversão de Energia com Células de Peltier

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Energias Renováveis - Conversão Eléctrica e Utilização
Sustentáveis (MERCEUS)

Juri: Presidente: Doutor Fernando José Almeida Vieira do Coito – FCT/UNL
Vogais: Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves – FCT/UNL (co-Orientador)
Doutor Stanimir Stoyanov Valtchev – FCT/UNL (Orientador)
Doutora Anabela Monteiro Gonçalves Pronto – FCT/UNL (Arguente)

Fevereiro de 2012

Conversão de Energia com Células de Peltier

“Copyright” Alberto Emanuel Simões dos Santos Fernandes, da FCT/UNL e da UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço ao Orientador desta dissertação, Professor Stanimir Valtchev o apoio, disponibilidade, empenho, rigor, exigência e compreensão demonstrados durante a produção deste trabalho. Este agradecimento é extensível ao Co-orientador, Professor Mário Ventim Neves por me fazer acreditar que era possível concluir esta tarefa.

Agradeço a todos os Professores do Mestrado em Energias Renováveis da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, evidenciando o Senhor Professor Leão Rodrigues pelas suas aulas cheias de interesse, aprendizagem e humanização.

Agradeço ao Continente Hipermercados, nas pessoas de Luís Alves, responsável pelo Sector de Manutenção, pelos conhecimentos que me transmitiu, pela grande disponibilidade que sempre demonstrou, pela completa abertura e ajuda ao desenvolvimento da dissertação, e também à D. Ana Ferreira, Responsável pelo Departamento de Recursos Humanos pela compreensão e abertura da Empresa à comunidade em que está inserida, partilhando uma cultura de empresa salutar.

À minha família pela paciência e apoio que sempre demonstrou, principalmente à minha Esposa Adélia, que sempre me motivou empenhando-se e substituindo-me nas tarefas inerentes a uma família, e aos meus filhos, Vasco e Joana, que souberam compreender as necessidades e expectativas do Pai em relação ao curso e ao desenvolvimento e execução da dissertação. À minha irmã Rosa pela ajuda extraordinária. À minha colega Cristina Alberto, sempre disponível para colaborar.

Não quero deixar de tecer, aqui, uma referência à memória de **Eurico Sidónio Gouveia Xavier Lopes da Fonseca**, que em 1970 me influenciou, indirectamente, sobre o meu futuro, quando assisti a uma Conferência por si dinamizada sobre a viagem do homem à Lua, Apolo XI e tomei a decisão de enveredar por uma carreira profissional ligada à tecnologia, ingressando no Curso Geral de Electricidade da Escola Industrial e Comercial de Tomar.

Resumo

Uma das áreas de preocupação da actualidade é o desafio energético, a nível mundial, europeu e principalmente em Portugal. Nas conjunturas económicas e financeiras que atravessamos, a dependência energética de terceiros, a redução de custos operacionais é de principal importância para o relançamento económico do País.

No entanto, devemos também ter em foco que muitas organizações têm de otimizar os recursos, com enfoque nos custos energéticos. Há que olhar para todas as formas de redução de custos com a necessária optimização de processos, equipamentos e métodos.

A recuperação de desperdícios, muitas das vezes despercebidos, é uma das áreas que pode e deve ter impacto na redução da factura energética. É neste envolvimento que o estudo agora apresentado tem a sua actividade, utilizando desperdícios térmicos de um processo produtivo e recuperando essa forma de energia, transformando-a em electricidade. É uma oportunidade de recuperação das perdas energéticas relacionadas com a utilização dos equipamentos, tendo indirectamente impacto no rendimento dos processos e redução da factura ambiental através da redução de emissão de gases de efeito de estufa, reduzindo a dependência do petróleo.

Dois materiais diferentes em contacto um com o outro criam uma tensão entre os materiais que depende da diferença de temperatura entre eles. Esse efeito é reversível e permite forçar a diferença de temperaturas à custa da energia eléctrica, ou obter energia eléctrica à custa da diferença térmica. Utilizando esta última, este trabalho consiste em investigar a possibilidade de utilizar este efeito, sendo a diferença térmica forçada por utilização de fluido a uma certa temperatura, num ambiente industrial e a temperatura ambiente.

Esta conversão insere-se na recuperação de perdas térmicas não recuperadas, em processos produtivos e industriais. A implementação de um gerador termoeléctrico, com células de Peltier, actuando por efeito de Seebeck permite atingir esse objectivo.

Termos chave (*keywords*) – termoelectricidade, Peltier, Seebeck, recuperação de energia, processo de melhoria.

Abstract

Today's main concern is the energy challenge, worldwide, in Europe and especially in Portugal. In the current economic and financial areas which are controlled by the energy dependence, the reducing operating costs are one of the major issues for the economic recovery of Portugal.

However, we must also be aware that many organizations need to optimize resources, focusing on energy costs. We must promote all kinds of cost reduction as well as improve the process equipment and methods.

The reuse of waste, most of the times dumped or thrown away is one of the areas that can and should have an impact on reducing the energy bill. This is the topic and leitmotiv of this research: using thermal waste of a production process and transforming it into electricity. It is an opportunity to recover and reusing the energy waste (from the use of equipment) with an indirect impact on the process efficiency and to reduce the environment cost not only by reducing the amount of greenhouse gases but also the dependence on oil.

Two different materials in contact with one another create a voltage which depends on the temperature difference between them. This effect is reversible and by means of electrical energy, it is possible to control the difference of the temperature and the materials or to get energy from the thermal difference. Having this motto as a starting point, this work researches the possibility of taking advantage of this effect and using it – using heat from a fluid at a certain temperature in an industrial or in a common environment; this is possible due to the reuse of thermal waste in industrial processes.

This goal can be achieved by the implementation of a thermoelectric generator with Peltier cells, working by the Seebeck effect.

Key terms (keywords) - thermoelectric, Peltier, Seebeck, energy recovery, process improvement.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Projecto de Dissertação	2
1.2.1. Justificação da Escolha do Tema.....	2
1.3. Motivação.....	3
1.4. Objectivos.....	4
1.5. Revisão de Literatura.....	5
1.6. Procedimento Metodológico	5
1.7. Resultados Esperados	8
2. Noções Básicas e Estado da Arte.....	9
2.1. Introdução.....	9
2.2. Termoelectricidade	10
2.2.1. Introdução.....	10
2.2.2. História da evolução da Termoelectricidade	10
2.2.3. Figura de Mérito	18
2.3. Materiais utilizados no fabrico de Geradores Termoeléctricos	23
2.3.1. Materiais correntes	23
2.3.2. Materiais em fase de pesquisa e desenvolvimento	25
2.4. Transmissão Térmica	30
2.5. Materiais e Aplicações	30
2.5.1. Alumínio.....	30
2.5.2. Massa Térmica (Thermal Compound).....	31
2.5.3. Dissipadores Térmicos	32
2.6. Aplicações de Geradores Termoeléctricos	34
2.6.1. Termopares.....	34
2.6.2. Relógios de pulso	37

2.6.3.	Pulseiras termoelétricas - Energia no meu pulso	38
2.6.4.	Refrigeradores	39
2.6.5.	Circuladores de Ar.....	41
2.6.6.	Termo-geradores para automóveis e veículos pesados.....	42
3.	Aplicação do Gerador Termoelétrico na recuperação de energia térmica de um processo industrial	46
3.1.	Introdução.....	46
3.2.	Descrição da aplicação	49
3.3.	Recolha de dados e informação	49
3.4.	Fase de Projecto do Dispositivo	55
3.5.	Procedimento de Ensaio	55
3.6.	Fases da construção do dispositivo e dos Ensaios.....	63
3.7.	Recolha de Dados dos Ensaios	71
3.8.	Verificação dos Objectivos Estabelecidos.....	83
4.	Conclusões e perspectivas de Desenvolvimento Futuro	85
4.1.	Introdução.....	85
4.2.	Conclusões	85
4.3.	Perspectivas de Desenvolvimento Futuro	86
	Referencias Bibliográficas e Informáticas	89
	Anexos	92
	Anexo A.....	93
	Anexo B	95
	Anexo C.....	97

Índice das Figuras

Figura 1.1 Síntese esquemática da organização da dissertação	7
Figura 2.1 a) Thomas Seebeck; b) Jean Peltier e c) Lord Kelvin	10
Figura 2.2 Anel de Seebeck com o desvio de uma agulha magnética após aquecimento de uma das junções de dois materiais diferentes.	11
Figura 2.3 Esquema básico de um termopar	13
Figura 2.4 Deslocação de electrões de uma fonte quente para uma fonte fria	15
Figura 2.5 Efeito de Peltier numa junção, com inversão do sentido da corrente eléctrica.	16
Figura 2.6 Relação da figura de mérito com a temperatura de algumas ligas	19
Figura 2.7 Materiais termoeléctricos com a melhor figura de mérito (ZT)	21
Figura 2.8 A estrutura cristalina da skutterudita	26
Figura 2.9 Diminuição da condutividade térmica em Skutteruditas pela introdução de mecanismos de preenchimento de diversos	28
Figura 2.10 Fundamentação para a utilização de massa térmica	32
Figura 2.11 Aplicação da massa Térmica	32
Figura 2.12 Exemplos de Dissipadores de calor (heat sink)	33
Figura 2.13 Termopar	34
Figura 2.14 Conceito de relógio de pulso térmico	37
Figura 2.15 Micro dispositivo termoeléctrico desenvolvido pela Seiko para os seus relógios Termoeléctricos.	38
Figura 2.16 Utilização da Dyson Energy Bracelet	39
Figura 2.17 Refrigerador / aquecedor para garrafas, copos e latas com alimentação por porta USB	40
Figura 2.18 Carrinho de transporte alimentação quente / frio	40
Figura 2.19 Circulador de ar	41
Figura 2.20 Utilização de uma ventoinha de circulação de ar	42
Figura 2.21 Assento climatizado utilizando células de Peltier	43
Figura 2.22 Gerador Termoeléctrico colocado no sistema de exaustão dos veículos GM.	44
Figura 2.23 Gerador Termoeléctrico desenvolvido pela Ford e BMW.	45
Figura 3.1 Bombas de compressão do gás R404.	48
Figura 3.2 Torre de refrigeração do gás R404.	48
Figura 3.3 Termómetro de infravermelhos com laser.	49
Figura 3.4 Localização da tubagem e torre de arrefecimento	50

Figura 3.5 Pontos de medição da temperatura na tubagem do Continente	50
Figura 3.6 Tubo octogonal com células de Peltier em cada uma das faces.	53
Figura 3.7 Secção octogonal do tubo de alumínio com as células de Peltier nas faces.	53
Figura 3.8 Secção do tubo octogonal.	54
Figura 3.9 Pormenor do dissipador e da célula de Peltier.	54
Figura 3.10 Circuito de aquecimento.	56
Figura 3.11 Colocação das resistências de aquecimento.	57
Figura 3.12 Fixação das resistências à placa de alumínio com grampo de aperto – placa de alumínio invertida em relação à posição normal.	57
Figura 3.13 Suporte de Teflon, onde será colocada a placa de alumínio com as resistências.	58
Figura 3.14 Montagem do conjunto - chapa de alumínio, resistências, suporte em teflon.	58
Figura 3.15 Suporte: a) vista frontal b) vista de cima; c) vista de topo; d) vista de topo com a montagem em posição vertical.	59
Figura 3.16 Suporte do dispositivo.	60
Figura 3.17 Pormenor da furação do suporte do dispositivo.	60
Figura 3.18 Vista lateral do dispositivo de simulação.	61
Figura 3.19 Vista de cima do dispositivo de simulação.	61
Figura 3.20 Painel de controlo e medição.	62
Figura 3.21 Tubo octogonal com a instalação dos 8 termogeradores.	63
Figura 3.22 a) Placas em nylon; b) Base do suporte em nylon com reforço em perfil de alumínio.	63
Figura 3.23 Suportes em acrílico para a base do dispositivo.	64
Figura 3.24 a) fixação do dispositivo à base de suporte; b) vista lateral da base de suporte, já com o dispositivo fixado.	64
Figura 3.25 a) resistências eléctricas de aquecimento; b) colocação das resistências eléctricas, fixadas ao alumínio.	65
Figura 3.26 a) furação na base em nylon para instalação das resistências; b) colocação do termostato na base de alumínio.	65
Figura 3.27 a) pastilha de Peltier fixada no dissipador de calor; b) fixação da pastilha de Peltier ao dispositivo.	66
Figura 3.28 a) vista de cima do dissipador de calor já instalado; b) base de controlo e medição - ligações eléctricas.	66
Figura 3.29 a) base de controlo e medição - vista de cima; b) célula de Peltier e dissipador de calor - vista de lado.	67
Figura 3.30 Dispositivo de simulação do tubo octogonal.	67
Figura 3.31 Dispositivo de simulação do tubo octogonal.	68
Figura 3.32 Pormenor do dissipador.	68

Figura 3.33 Painel de medição e controlo do dispositivo.	69
Figura 3.34 Fonte de alimentação utilizada nos ensaios.	69
Figura 3.35 medição da temperatura, durante os ensaios efectuados.	70
Figura 3.36 Pormenor do dissipador de calor com a célula de Peltier por baixo.	70
Figura 3.37 Localização, no dispositivo, dos pontos de medição da temperatura.	71
Figura 3.38 medições efectuadas simulando cada uma das faces diferentes do octogono.	71
Figura 3.39 Posição do dispositivo em fase de teste. a) horizontal; b) 45° com a horizontal; c) vertical; d) 45° com a vertical; e) horizontal invertido.	72
Figura 4.1 Tubo octogonal com dissipador de calor em forma de anel.	86
Figura 4.2 Tubo octogonal com dissipador de calor em forma de anel - circulação de ar frio e quente.	87
Figura 4.3 Comparação entre um gerador termoeléctrico normal e um em tecnologia thin film (fonte: (Design, 2011))	87
Figura 4.4 - Gerador Termoeléctrico construído em filme fino (fase de produção) (fonte: (Design, 2011))	88

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Coeficientes de Seebeck para metais e ligas (esquerda) e semicondutores. O termo de comparação é a Platina.	14
Tabela 2.2 Coeficiente de Seebeck e Figura de Mérito (à temperatura ambiente).....	20
Tabela 2.3 Características dos materiais utilizados em dispositivos termoelétricos.	24
Tabela 2.4 Propriedades termoelétricas de alguns materiais e ligas.....	25
Tabela 2.5 Condutividade térmica do alumínio	31
Tabela 2.6 Tipos de Termopares e suas características principais	35
Tabela 2.7 Características físicas dos termopares	36
Tabela 3.1 Tabela de recolha de dados da temperatura exterior do tubo transportador do fluido R404.	51
Tabela 3.2 Ensaio com o dispositivo na horizontal.....	74
Tabela 3.3 Ensaio com o dispositivo num ângulo de 45° com a horizontal	75
Tabela 3.4 Ensaio com o dispositivo vertical.....	76
Tabela 3.5 Ensaio com o dispositivo a 45° com a vertical	77
Tabela 3.6 Ensaio com o dispositivo na horizontal (invertido - dissipador para baixo)	78
Tabela 3.7 Calculo da Potência máxima no tubo octogonal.....	79
Tabela 3.8 Potência máxima no tubo octogonal numa posição vertical.....	80
Tabela 3.9 Custos associados ao projecto	81

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

\vec{q}	Fluxo de calor
h_{Conv}	Coefficiente de transmissão de calor por convecção
T_f	Temperatura do fluido
T_w	Temperatura da superfície
q_{Conv}	Fluxo de calor por convecção
ΔT	Diferença de temperaturas
A	Área
E_{ABx}	Força Electromotriz entre o corpo A e B na junção x
I	Intensidade da corrente eléctrica
j_x	Gradiente de corrente eléctrica x
k	Condutividade térmica de um material
P	Potência Eléctrica
P_a	Pressão
P_t	Potência térmica
q	Quantidade de calor libertado
q_x	Calor
T_c	Temperatura fria (cold)
T_h	Temperatura quente (hot)
T_x	Temperatura do corpo x
U	Tensão
W	Calor produzido ou absorvido
Z	Figura de Mérito
ZT	Figura de Mérito a uma determinada temperatura
α	Coefficiente de Seebeck
β	Coefficiente de Thomson
Π	Coefficiente de Peltier
ρ	Resistividade eléctrica
E	Poder emissivo da superfície
ε	Emissividade da superfície
η	Rendimento (em percentagem, multiplicar por 100)
θ	Resistência térmica
κ	Condutividade térmica
σ	Constante de Steffan Boltzman

1. Introdução

1.1. Introdução

O crescente aumento do custo dos combustíveis fósseis (carvão, crude ou mesmo gás natural) leva a um aumento sucessivo do preço da electricidade. Em Portugal, onde parte da energia eléctrica é produzida em centrais térmicas, tem-se verificado que a sociedade está cada vez mais dependente da disponibilidade de energia. Nas sociedades modernas, a energia é um dos factores que condiciona o desenvolvimento económico, financeiro, os transportes, o ambiente, as relações internacionais, a gestão de empresas, as famílias, o Estado, etc.

Os recursos energéticos são limitados por várias características tais como o custo de aquisição desses recursos, transporte (quanto mais longe estão as fontes de produção de energia, mais cara ela fica) bem como outros factores não controláveis, como a origem dos combustíveis fósseis (América do Sul – carvão; extremo-orientes – petróleo e gás natural).

A utilização racional da energia é uma das características que têm vindo a ser implementadas face aos problemas atrás focados, sendo um processo simples de melhoria do rendimento dos equipamentos mas também de redução da dependência energética. A utilização mais eficiente do calor, em processos industriais é uma das principais áreas de actuação dos processos industriais para se obter grande economia de energia.

Torna-se assim, importante, desenvolver uma atitude pró-activa e atempada na poupança de energia, através da recuperação de energia e consequentemente melhorar o rendimento energético das actividades que consomem energia nomeadamente nos equipamentos que transformam energia eléctrica em térmica.

Neste particular, a utilização da energia térmica expelida por equipamentos industriais e lançada na atmosfera, reveste-se de uma importância fundamental. O aproveitamento das perdas de calor inevitáveis associadas ao processo produtivo, associado aos gases de exaustão será a base de partida para o desenvolvimento da investigação versada na dissertação.

O efeito da termoelectricidade (estudado por Peltier, Seebeck, Thomson e outros) gera uma diferença de potencial entre dois materiais diferentes, que se encontram em contacto, mas a temperaturas diferentes.

Mais do que um factor de inovação, uma vez que o efeito termoeléctrico é utilizado em diversas aplicações que vão desde gerar energia para relógios de pulso, gerar energia eléctrica a partir de candeeiros de petróleo / gás, aquecimento / arrefecimento de fardas militares, assentos de automóveis, geradores de energia eléctrica a partir dos gases de escape de viaturas automóveis, etc., este meio para

além das vantagens imediatas, vai ao encontro da poupança / recuperação de energia, tão necessária nas economias do País.

Assim, esta abordagem através de uma utilização inovadora, permitirá ganhos no rendimento, redução dos custos de produção e recuperação de energia. A poupança de energia permitirá ganhar tempo para o desenvolvimento de tecnologia destinada à produção de energia a partir de fontes renováveis, reduzindo, simultaneamente, as emissões de gases acidificantes e gases com efeito de estufa.

Pretende-se estudar um sistema de recuperação da energia térmica perdida na exaustão, transformando-a em energia eléctrica por meio de dispositivos denominado células de Peltier.

1.2. Projecto de Dissertação

1.2.1. Justificação da Escolha do Tema

O choque petrolífero de 1973 teve como consequência que o consumo de diversas formas de energia apresentasse comportamentos erráticos. Em muitos países foram desenvolvidas acções conducentes a uma política de redução dos consumos energéticos. Em muitas indústrias procuraram-se alternativas à electricidade como energia primária.

A crise petrolífera e o constante aumento da matéria-prima, e instabilidade de preços, as preocupações ambientais e o desenvolvimento tecnológico levaram ao surgimento de energias alternativas e renováveis, que trouxeram a vantagem de não depender do petróleo.

Em Portugal, desde a crise de 1973 que foram introduzidas como energias primárias, e principalmente nas centrais de geração de energia eléctrica, o carvão, importado da América do Sul. Embora a dependência da flutuação do preço do petróleo fosse ainda uma preocupação, uma vez que em 2004 a dependência do petróleo ainda se localizava na ordem dos 95%, a utilização do carvão tornou-se uma forma também poluente, contribuindo de forma maciça para o aumento de CO₂ libertado para a atmosfera e consequente aumento do efeito de estufa. A introdução de gás natural através de gasodutos construídos desde o Norte de África, onde se localizam as ricas jazidas deste recurso energético veio ajudar na redução dos gases de efeito de estufa, visto que mundialmente passou a ser uma preocupação a manutenção de condições de vida para as gerações vindouras. É nesta fase que se dá início à divulgação das denominadas energias renováveis, das quais fazem parte as eólicas que aproveitam a energia dos ventos, a solar, que aproveitam quer a energia térmica para produção de aquecimento de um fluido, quer a fotovoltaica para produção de energia eléctrica. Também a energia das ondas faz a sua aparição mas com projectos de investigação, encontrando-se,

ainda, numa fase embrionária de desenvolvimento. A energia renovável bio, da qual faz parte a biomassa, o biogás e os biocombustíveis, dão, no virar do século, os primeiros passos na sua implementação em Portugal, sendo que a biomassa é aquela que, do ponto de vista de recursos, tem maior probabilidade de crescer, embora muito haja ainda por utilizar. A energia geotérmica teve uma aplicação particular, nomeadamente em áreas vulcanológicas (Açores) e pesquisa-se a sua aplicação a bombas de calor para uso doméstico ou pequeno uso. Sendo Portugal um País localizado no sul da Europa, tendo cerca de 5 meses propícios à chuva, a utilização da energia hídrica como fonte de energia deveria estar bastante desenvolvida em relação à utilização de combustíveis fósseis para a produção de energia. Acontece que, por uma série de factores, entre os quais se destaca as alterações climáticas, estes 5 meses de potencial chuva foram-se alterando e a vantagem competitiva de ter as barragens cheias, levou inclusive a anos em que Portugal teve de recorrer à importação de energia eléctrica durante o inverno, por as barragens se encontrarem com um nível de armazenamento de água inferior ao mínimo esperado para aquela época do ano. Segundo os números da DGEG de 2007, já com a introdução de energias alternativas e gás natural, a dependência do País de fornecedores de energia era ainda de 82,9% dos quais 54% correspondem à importação de petróleo, mantendo-se este como o combustível principal base de fornecimento de energia primária.

Mas não só de energia renovável, cujo objectivo principal seja a produção de energia eléctrica, devem ser dirigidos os esforços para reduzir a dependência energética do petróleo. Uma das áreas que ainda não está muito divulgada é a de recuperação de energia e aumento do rendimento dos processos produtivos. Os desperdícios acumulados em qualquer processo produtivo, se contabilizados podem representar até 20% dos custos energéticos de uma empresa (dados de 2005 do Eurostat). É dentro desta temática da recuperação de energia que se desenvolve o presente trabalho, procurando a partir do diagnóstico já existente e listagem de desperdícios e ineficiências, procurar formas de utilização da energia perdida bem como, simultaneamente, aumentar o rendimento de um determinado processo.

1.3. Motivação

As denominadas células ou módulos de Peltier são dispositivos semicondutores que produzem energia tendo como base uma fonte de calor. Embora as aplicações práticas que se conhecem estejam mais relacionadas com o efeito contrário – a geração de uma fonte térmica (quente ou fria) e sua utilização – pretende-se contribuir para gerar energia eléctrica partindo de um fluido quente. A tarefa não sendo relativamente fácil de efectuar, se bem que existam aplicações destinadas à indústria automóvel desenvolvidas nesse sentido, tem, no entanto, a dificuldade acrescida da limitação no

desenvolvimento tecnológico das referidas células ou módulos, ao fraco rendimento que habitualmente, estes projectos estão associados, ou mesmo o factor económico de recuperação do investimento, factor de decisão preponderante na implementação deste projecto.

Com a aplicação desta tecnologia pretende-se reaproveitar o calor perdido nos gases de compressão de um sistema de frio industrial, e transformá-lo em energia eléctrica para utilização, numa fase posterior. Esta tecnologia, permitirá melhorar o rendimento do processo, pela redução da energia eléctrica consumida para arrefecimento da temperatura do gás, consequente aumento do rendimento do sistema como um todo, redução na emissão de CO₂ para a atmosfera. Todas estas vantagens terão também impacto nos custos de manutenção do equipamento, indirectamente, uma vez que a redução dos tempos de funcionamento leva a que a substituição de *peças de desgaste* seja reequacionada e consequentemente mais espaçada.

A principal contribuição desta dissertação é demonstrar que este conceito para aplicação futura em processos industriais é possível, apenas e só dependente do retorno do investimento inicial que é necessário efectuar.

1.4. Objectivos

O modelo apresentado nesta Dissertação apresenta uma solução que visa sobretudo melhorar a utilização da energia através da redução de desperdícios. Apenas a consciencialização de todos os agentes envolvidos na necessidade de trabalhar efectivamente no rendimento energético, com base na informação disponível no momento e devidamente sustentada, é já um grande passo no sentido de adaptar as formas de trabalho a uma realidade cada vez mais competitiva, para além de despertar consciências (principalmente de quem paga) para um problema que por si só, não se resolve.

Os objectivos fundamentais a atingir com o presente desenvolvimento são:

- Estudar as propriedades dos dispositivos de Peltier e a sua adequabilidade a um sistema de geração termoeléctrico a instalar na exaustão de um equipamento industrial;
- Desenvolver e propor um sistema de recuperação de energia de um equipamento industrial através de um gerador termoeléctrico;
- Produção de energia eléctrica partindo de um desperdício térmico;
- Aumento do rendimento de um processo produtivo;
- Redução dos custos associados à energia;
- Aumento do rendimento energético;
- Redução da emissão de CO₂ através da redução do consumo eléctrico.

- No caso de inviabilidade do projecto, apontar potenciais estudos ou desenvolvimentos que permitam ultrapassar as limitações identificadas;

1.5. Revisão de Literatura

A partir do momento em que ficou estabelecido o tema da dissertação, foi-se acompanhando os desenvolvimentos que se vão fazendo de modo não só a manter uma actualização, mas sobretudo para identificar e analisar todo o material pertinente.

Numa fase inicial, as referências desenvolvidas e pesquisadas consistem em teses de mestrado, apresentações em palestras e conferências internacionais, *artigos apresentados* por especialistas. Alargando a pesquisa fora da área da termoelectricidade foi possível recolher alguma informação sobre geradores termoeléctricos na indústria automóvel e novas pesquisas nas áreas de materiais termoeléctricos.

Para uma segunda fase de recolha de informação que permitiu o registo do denominado “*state of art*” foi direccionado para áreas que estavam próximas, uma vez que a utilização de um gerador termoeléctrico com este tipo de dispositivos é inovador, no campo de aplicação industrial.

A especificação necessária ao desenvolvimento numa fase mais avançada da dissertação levaram-me a considerar efectuar uma nova recolha de informação, com o objectivo de identificar novos desenvolvimentos na área de pesquisa (termoelectricidade), novos estudos (testes / dissertações), mas também para contextualizar a investigação e avaliar o meu próprio conhecimento sobre o tema.

1.6. Procedimento Metodológico

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, tendo estes o seguinte conteúdo:

No capítulo um, introdução é proposto o tema, a motivação que gerou os objectivos propostos bem como o que se pretende alcançar com o presente projecto.

No segundo capítulo apresentam-se os conceitos relacionados com a termoelectricidade, a sua evolução ao longo do tempo, os efeitos termoeléctricos mais conhecidos, os geradores termoeléctricos bem como uma parte relacionada com os materiais mais utilizados e em fase de desenvolvimento que, como veremos, são o factor chave de desenvolvimento futuro do projecto. A transmissão térmica, conceito importante para a compreensão dos efeitos envolvidos no sistema de recuperação de energia.

O emprego dos geradores termoelétricos e o seu nível de desenvolvimento é aqui descrito, não esquecendo as investigações que estão a ser desenvolvidas nesta matéria e concretamente a optimização das características termoelétricas de materiais estruturados (Skuterudittes).

O terceiro capítulo é um capítulo de concretização, no qual se apresentam as principais áreas de intervenção com a apresentação do projecto de recuperação de energia. Inicia com uma breve introdução à empresa que, gentilmente se disponibilizou, no âmbito da integração na comunidade onde está inserida, no apoio a esta dissertação, através da facilitação de recolha de dados e processos. São apresentados os cálculos conducentes aos objectivos traçados bem como a análise financeira de implementação do projecto que demonstram o funcionamento, desempenho e rendimento dos geradores termoelétricos propostos.

Finalmente, no capítulo quatro, apresentam-se as conclusões e as perspectivas de desenvolvimento futuro, com resposta aos objectivos propostos.

Esta sequência, que pode ser visualizada sob a forma de fluxograma na Figura 1.1, é fundamental para que, a compreensão e desenvolvimento do projecto levasse a que se tentasse atingir os objectivos pretendidos de forma sustentada e com a qualidade pretendida para os resultados finais. Este foi um trabalho de construção faseada.

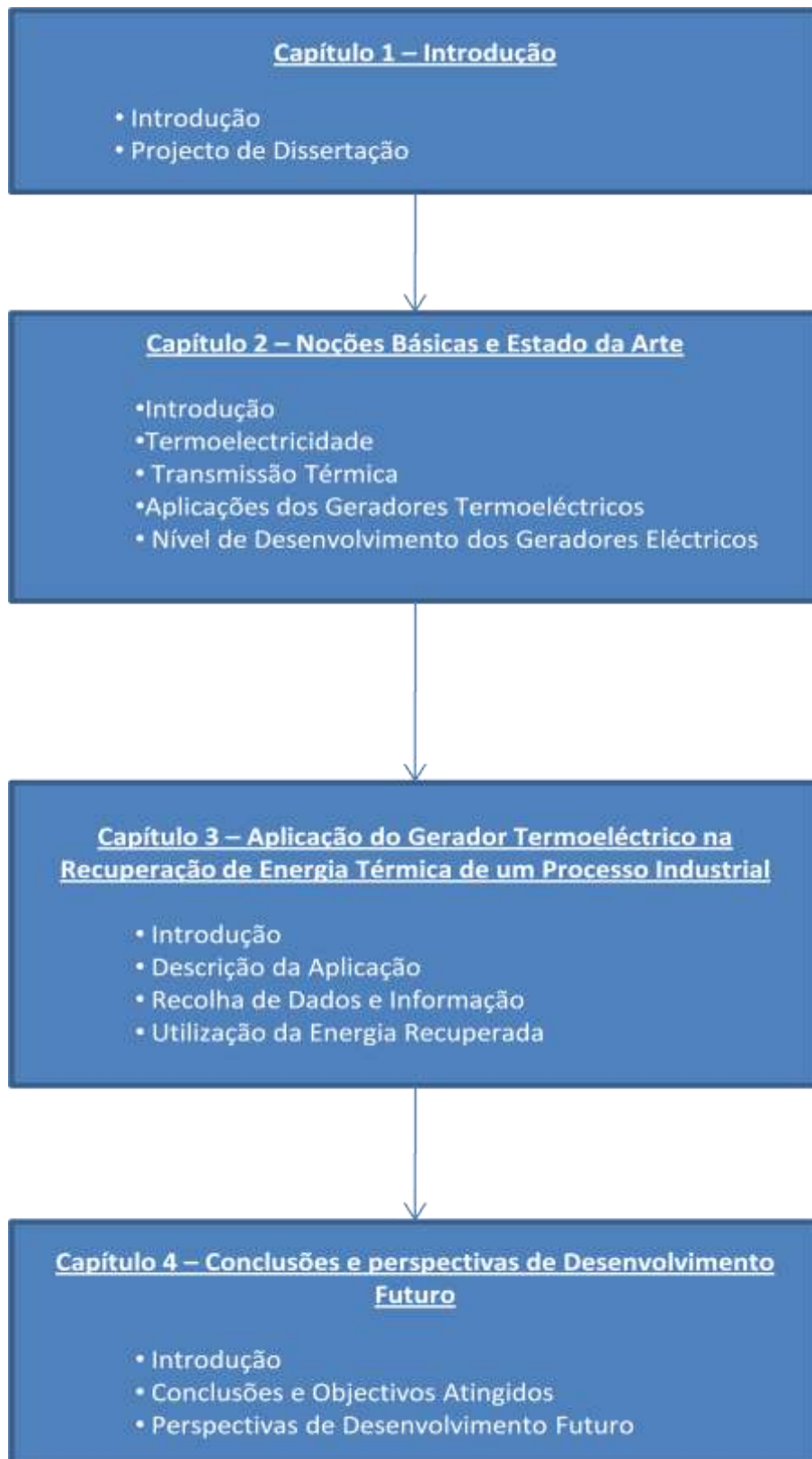


Figura 1.1 Síntese esquemática da organização da dissertação.

1.7. Resultados Esperados

De acordo com os objectivos descritos, pretende-se atingir, no final do estudo os seguintes resultados:

- Aumento do rendimento do processo (global) pela redução dos desperdícios energéticos;
- Redução do consumo de energia eléctrica no processo;
- Redução de custos de manutenção preventiva do equipamento;
- Redução da emissão de CO₂;

2. Noções Básicas e Estado da Arte

2.1. Introdução

Neste capítulo pretende-se efectuar uma abordagem aos conceitos teóricos relacionados com a termoelectricidade, com o seu desenvolvimento histórico e também incluindo toda a informação considerada mais relevante nesta área para uma compreensão mais fácil do desenvolvimento do projecto.

Deste modo, faz-se uma retrospectiva da evolução dos principais conceitos ao longo do desenvolvimento desta teoria – termoelectricidade – e que sustentam as mais variadas aplicações que representam a aplicação prática das inovações que notabilizaram os pioneiros nestas descobertas. De salientar que o perfeito conhecimento destes conceitos, sustentam metodologias nem sempre de aplicação economicamente viáveis

A utilização dos dispositivos termoeléctricos tem vindo a crescer e a desenvolver-se com a pesquisa e introdução de novos materiais, novas técnicas e aplicações diferentes daquelas que foram desenvolvidas no decorrer do século passado. A velocidade dos avanços tecnológicos e das mudanças nos cenários implica uma continuidade das pesquisas realizadas. Pelo descrito este é apenas e só um passo inicial para a elaboração de um exercício, não tendo intenção de ser conclusivo em relação à temática.

Pretende-se neste capítulo apresentar de forma abrangente, mas necessariamente sintética o estado do conhecimento, o nível mais elevado a que chegou a técnica e aplicação do efeito de Seebeck, passando da fase de pesquisa e descoberta para a aplicação prática, consolidando informações dispersas, bem como documentar o que está a ser feito actualmente, num documento homogéneo e conciso. É possível verificar que existe uma forte tendência mundial em se dar uma prioridade elevada no desenvolvimento de tecnologias que contribuem para formas de geração de energia, alternativas às habituais, de forma sustentada e conferindo uma maior preocupação ambiental.

O estado da arte, nesta dissertação contemplará uma análise crítica e reflexiva, integrando informações geradas por outros autores, devidamente referenciados, e ao mesmo tempo efectuar-se-á o relacionamento com a temática que se encontra a ser estudada integrando, também, uma reflexão como consequência da argumentação e conclusões sobre o tema em si.

Integra este estado da arte para além das **aplicações dos geradores termoeléctricos**, uma focagem no **nível de desenvolvimento dos geradores termoeléctricos**, dando assim importância à utilização, ao conceito, às características e ao desenvolvimento da Geração de energia eléctrica a partir de uma fonte de calor, pelo efeito de Seebeck.

2.2. Termoelectricidade

2.2.1. Introdução

Termoelectricidade é um conjunto de fenómenos físicos que relacionam a temperatura com as propriedades eléctricas dos materiais (Piedade, 1997). Esta relação permite a transformação directa de um gradiente de calor em electricidade ou vice-versa.

Nos materiais condutores podem observar-se vários efeitos termoeléctricos, sendo de considerar apenas os mais importantes, que tomaram o nome dos seus inventores, cujas imagens podem ser vistas na figura 2.1:

- Efeito de Thomson;
- Efeito de Seebeck e
- Efeito de Peltier.



Figura 2.1 a) Thomas Seebeck; b) Jean Peltier e c) Lord Kelvin

O efeito de Seebeck tem particular interesse na construção de termopares que, de facto, são conversores termoeléctricos de energia térmica em energia eléctrica. Também este efeito é o princípio que é utilizado nos denominados geradores termoeléctricos. Os efeitos de Thomson e de Peltier são usados na construção de dispositivos termoeléctricos utilizados para a conversão de energia eléctrica em energia térmica, ou bombas de calor (sistemas reversíveis que são capazes de transportar calor de uma fonte térmica para outra, à custa de energia eléctrica).

Em todos os efeitos, há uma relação entre a temperatura e a electricidade.

2.2.2. História da evolução da Termoelectricidade

O conceito de termoelectricidade resulta da junção de duas palavras: “termo” que significa temperatura e “electricidade” (do grego elektron, “âmbar”) que é um termo geral que engloba uma grande variedade de fenómenos resultantes da presença e do fluxo da carga eléctrica (Pinto, 2010).

A termoelectricidade tem a sua origem em Alessandro Volta (1800), físico italiano. Volta concluiu que a electricidade causadora dos espasmos nas pernas de sapo, estudadas por Luigi Galvani (1780), era devida a um contacto entre dois metais diferentes. Essa conclusão foi a precursora do princípio da termoelectricidade (Anacleto, 2007).

Os primeiros fenómenos relacionados com a termoelectricidade foram descobertos no século XIX, por T. J. Seebeck. A ligação de dois elementos condutores, ligados aos terminais de um galvanómetro e sujeito a uma variação de temperatura, provoca o surgimento de uma diferença de potencial, indicada no galvanómetro. Ao conjunto dos elementos ligados e sujeitos a uma variação de temperatura, foi dado o nome de termopar (Thomas Seebeck nasceu em 1770 e morreu em 1831).

Thomas Seebeck nasce no seio de uma abastada família de mercadores alemães sediada em Reval. Estuda medicina na Universidade de Göttingen, licenciando-se em 1802. Porém, prefere continuar a aprender física em vez de exercer a carreira de médico (Pinto, 2010).

Em 1823, Thomas Seebeck relatou diversas experiências que tinha realizado e que relacionavam a temperatura com as propriedades eléctricas dos condutores. Notou que, ao aquecer uma das junções de dois materiais condutores (A e B na figura 2.2, abaixo), que formam um circuito fechado, em forma de anel, conseguia desviar uma agulha magnética, situada perto do anel¹ (Piedade P. M., 1997).

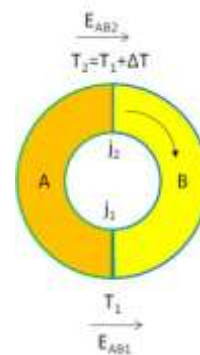


Figura 2.2 Anel de Seebeck com o desvio de uma agulha magnética após aquecimento de uma das junções de dois materiais diferentes.

(fonte - www.corbisimages.com)

¹ Seebeck julgava inicialmente, que a temperatura originava um campo magnético. Desconhecia-se nesta altura, que a corrente eléctrica pode gerar um campo magnético.

Cerca de 13 anos depois, um francês de nome J. Peltier, relojoeiro de profissão, verificou o efeito contrário ao de Steebeck. Peltier, utilizou uma montagem idêntica, mas inverteu o procedimento. Em vez de haver uma variação de temperatura no termopar, foi injectada uma corrente eléctrica no local do galvanómetro tendo verificado que o termopar sofria uma variação de temperatura. Peltier teve alguma dificuldade em efectuar uma relação entre a corrente eléctrica e o calor absorvido / libertado dada a dissipação por efeito de Joule, que também acompanha a experiência.

Jean Charles Athanase Peltier nasceu em França, em 1785, tendo falecido em Paris em 1845. Foi um físico que se iniciou apenas aos 30 anos, terminando uma carreira como fabricante de relógios. Os seus estudos, que foram numerosos, foram dedicados, em grande parte, à electricidade atmosférica (relâmpagos), intensidade luminosa (das descargas atmosféricas), temperatura da água no estado de levitação térmica (spheroidal state) e também o estudo do ponto de ebulição a grandes altitudes. Mas o seu nome ficará sempre associado ao efeito térmico de juncos, num circuito eléctrico, a sua grande descoberta experimental conhecida por efeito Peltier (Communications, 2010).

Nem Peltier nem Seebeck verificaram um relacionamento entre as experiências que realizaram. Apenas Lord Kelvin, de seu nome W. Thomson, em 1855. Aplicando os conceitos termodinâmicos existentes à data, relacionou as experiências conduzidas por ambos os cientistas através dos coeficientes (de Seebeck e Peltier). Thomson também referenciou a existência de um terceiro fenómeno, neste caso aplicado a um condutor homogéneo.

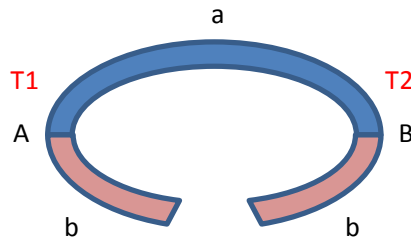
Este fenómeno que ficou conhecido por efeito de Thomson consiste na reversibilidade de aquecimento ou arrefecimento quando existe simultaneamente um fluxo de corrente eléctrica e um gradiente de temperatura.

Efeito de Seebeck

O efeito de Seebeck pode ser descrito através do ponto de vista de um termopar. Um termopar (transdutor – junção bimetálica que não necessita de qualquer fonte de alimentação externa, produzindo ele próprio um sinal analógico de corrente ou tensão, quando estimulado por alguma forma de energia, como por exemplo variação de temperatura), não é mais do que uma junção metálica de duas substâncias diferentes, ou ligas metálicas, que geram pequenas diferenças de potencial, da ordem de microvolts por grau de variação de temperatura ($\mu\text{V/K}$). Este efeito é medido por

comparação da localização da junção num ambiente mais quente (ou mais frio) em relação à temperatura ambiente e é ligado electricamente a uma carga resistiva.

Consideremos a Figura 2.3, em que o circuito é formado por dois condutores distintos.



A e B – junções
a – condutor do tipo a
b – condutor do tipo b

Figura 2.3 Esquema básico de um termopar

A e B formam a junção dos dois metais ou ligas metálicas e que se encontram às temperaturas T_1 e T_2 respectivamente. Considerando a relação entre as temperaturas de um termopar

$$T_1 > T_2$$

Surgirá uma tensão U que é desenvolvida aos terminais do circuito (circuito aberto) e é calculada em função da variação de temperatura

Equação 1 tensão eléctrica formada no termopar

$$U = \alpha (T_1 - T_2)$$

Em que U é a tensão [volts], T_1 e T_2 as temperaturas das junções do circuito termopar [k] e α o coeficiente de Seebeck. Determinando o valor deste em função das outras variáveis

Equação 2 coeficiente de Seebeck

$$\alpha = \frac{U}{(T_1 - T_2)}$$

ou considerando

Equação 3 Variação de temperatura

$$\Delta T = T1 - T2$$

vem que

Equação 4 Coeficiente de Seebeck

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T}$$

Este coeficiente para diferenças de temperatura pequenas é quase linear. Se a força electromotriz criada, circula no sentido dos ponteiros do relógio, então α é positivo, caso contrário é negativo. O coeficiente de Seebeck é medido em V/K ou em $\mu\text{V/K}$ face à grandeza do valor da forma electromotriz. O coeficiente de Seebeck é uma propriedade do material. Este coeficiente pode tomar valores positivos ou negativos (tabela 2.1). O valor e sinal deste coeficiente são explicados pela assimetria da distribuição de electrões à volta do nível de Fermi.

Tabela 2.1 Coeficientes de Seebeck para metais e ligas (esquerda) e semicondutores. O termo de comparação é a Platina.

Metais / Ligas e outros materiais	Coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V/K}$]	Semicondutores	Coeficiente de Seebeck [$\mu\text{V/K}$]
Antimónio	47	Se	900
Níquel crómio	25	Te	500
Cádmio	7.5	Si	440
Tungsténio	7.5	Ge	300
Ouro	6.5	Bi_2Te_3 (tipo n)	-230
Prata	6.5	$\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$ (tipo p)	300
Cobre	6.5	Sb_2Te_3 (tipo p)	185
Ródio	6.0	PbTe	-180
Tântalo	4.5	$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Chumbo	4.0	$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Alumínio	3.5	$\text{Pb}_{09}\text{Ge}_{33}\text{Se}_{58}$	-1360
Carvão	3.0	$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710
Mercúrio	0.6	$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990
Platina	0	SnBb_4Te_7	25
Sódio	-2.0	SnBi_4Te_7	120
KOH	-9.0	$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
Níquel	-15	$\text{SnBi}_{2.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_7$	110
Cu Ni Mn Fe (constantan)	-35	$\text{SnBi}_2\text{Sb}_2\text{Te}_7$	90
bismuto	-72	PbBi_4Te_7	-53

O surgimento da força electromotriz é fundamentado na deslocação dos electrões da camada de valência de uma substância (condutora – metal ou liga metálica), de um local com temperatura mais elevada para um local com temperatura mais baixa. Atente-se na Figura 2.4

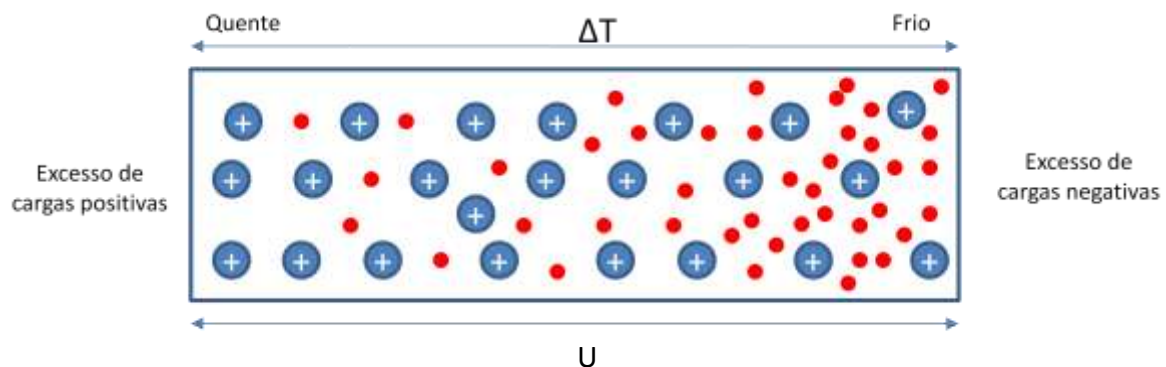


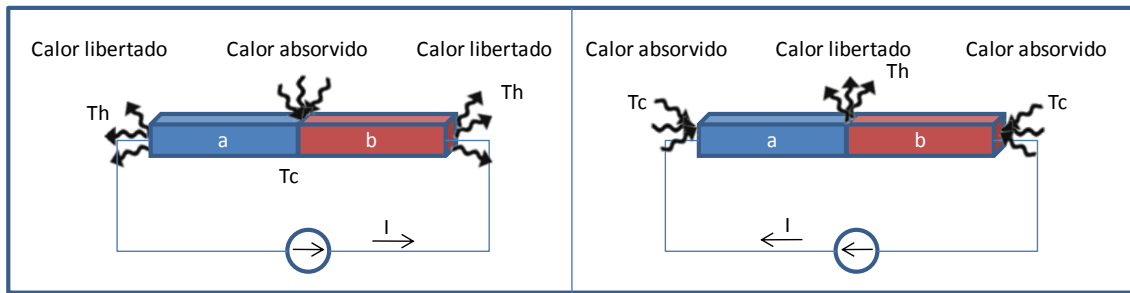
Figura 2.4 Deslocação de electrões de uma fonte quente para uma fonte fria

O condutor (metal, liga ou semiconductor) é aquecido numa das extremidades. A energia calorífica é transmitida aos electrões do nível de valência, que ao saltarem das suas orbitas, tornando-se electrões livres, iniciam uma deslocação para as zonas mais frias do condutor, onde encontram níveis de energia mais baixos. A zona aquecida fica com mais átomos sem electrões na camada de valência, ou seja com excesso de cargas positivas, enquanto as zonas mais frias ficam com um excesso de electrões livres. Esta migração de electrões livres pára quando é atingido o equilíbrio, ou seja a tensão (U) é superior à energia que os electrões possuem para se movimentar. Esta diferença de potencial continuará a existir até que se atinja um estado de equilíbrio dinâmico entre os electrões que fluem pelo gradiente de temperaturas entre a parte quente e a parte fria, e a repulsão electrostática devido ao excesso de cargas negativas na parte fria. Se se mantiver a fonte de calor, a migração de electrões continuará (condução térmica) até que seja atingido o equilíbrio do gradiente térmico.

Efeito de Peltier

O efeito de Peltier pode ser considerado o efeito oposto ao efeito de Seebeck. Se num circuito, constituído por dois materiais distintos, fizermos passar uma corrente eléctrica, de intensidade determinada, numa das junções há a libertação de calor enquanto que na outra junção há a absorção de calor. Este efeito surge devido à existência de uma força electromotriz na junção, originada pela diferente composição de cada um dos lados da junção. A corrente pode fluir em ambos os sentidos, sendo que num sentido o dispositivo absorve calor do meio onde se encontra, e quando se inverte o

sentido da corrente, a junção onde absorvia calor, passa a irradiar calor para o meio ambiente (ver Figura 2.5).



Th – Temperatura quente [°K]
Tc – Temperatura fria [°K]
a – material condutor do tipo a
b – material condutor do tipo b
I – corrente eléctrica [A]

Figura 2.5 Efeito de Peltier numa junção, com inversão do sentido da corrente eléctrica.

Sendo W o calor produzido ou absorvido, I a intensidade de corrente eléctrica e π o coeficiente de Peltier, o efeito demonstra que a relação entre estas grandezas é dada pela equação:

Equação 5 Calor libertado por efeito de Peltier

$$W = \pi \cdot I$$

Para explicar este fenómeno, o que normalmente se torna difícil, uma vez que a passagem de corrente eléctrica num condutor ou semiconductor é sempre acompanhada por libertação de calor por efeito de Joule, voltamos a focar na teoria electrónica de uma união entre dois condutores ou semicondutores distintos. Os electrões fluem, através da junção, até atingir um ponto de equilíbrio. Apenas os electrões com maior nível de energia conseguem saltar a junção devido à absorção de energia, criando nesta uma temperatura inferior. O efeito de Peltier resulta de uma alteração da entropia das cargas maioritárias que se movimentam no semiconductor através da junção. O efeito de Peltier, tal como o efeito de Seebeck não está relacionado com o potencial de contacto. Para uma corrente constante, o efeito é proporcional ao coeficiente relativo de Seebeck, bastante diferente do efeito de Joule que, é independente do sentido da corrente, do sinal, da existência ou não de junção, sendo irreversível.

Efeito de Thomson

O último dos efeitos termoelétricos relaciona a quantidade de calor q gerado num condutor, no qual se faz passar uma corrente eléctrica, existindo, simultaneamente uma diferença de temperatura ΔT , ou seja, demonstra que a transferência de calor é proporcional à corrente eléctrica e diferença de temperatura, num material termoelétrico. Segundo Thomson, num material condutor homogéneo, percorrido, por uma corrente eléctrica, para além de uma libertação de calor por efeito de Joule, existe libertação ou absorção de calor proporcional à intensidade de corrente, desde que exista um gradiente de temperatura no material (Piedade P. M., 1997).

Partindo do princípio que existe uma diferença de temperatura, então:

Equação 6 quantidade de calor libertado por efeito de Thomson

$$q = \beta I \Delta T$$

em que β é o coeficiente de Thomson e medido em V/°K. Embora o efeito de Thomson não seja de principal importância para os dispositivos termoelétricos, não deverá ser desprezado nos cálculos detalhados.

O efeito de Thomson também relaciona os efeitos anteriores, de Seebeck e de Peltier, através da relação:

Equação 7 relação entre o coeficiente de Peltier e o coeficiente de Seebeck

$$\pi = \alpha T$$

ou seja, o coeficiente de Peltier é igual ao coeficiente de Seebeck multiplicado pela temperatura absoluta. A única excepção é quando um supercondutor apresenta resistência zero à passagem da corrente eléctrica.

2.2.3. Figura de Mérito

Na comparação de sistemas termoelétricos, a dimensão que é utilizada é denominada “figura de mérito” (Z) e é o valor que todos os cientistas e engenheiros relacionados com o desenvolvimento das aplicações termoelétricas procuram (Bangert, 2006). Esta dimensão relaciona três tipos de grandezas: propriedades eléctricas, propriedades de transporte térmico do material e a temperatura absoluta de funcionamento. Um bom material termoelétrico possui uma boa figura de mérito.

É definida como a medida da capacidade dos materiais termoelétricos na transformação de energia térmica em energia eléctrica, para determinada temperatura, integrando o coeficiente de Seebeck α , a resistividade eléctrica ρ , e a condutividade térmica κ . É representada pela letra Z e é medido em K^{-1} .

Equação 8 Figura de Mérito de um material termoelétrico

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa}$$

A figura de mérito não é constante com a temperatura. Também é encontrado na literatura referência ao parâmetro figura de mérito (ZT – adimensional), calculado a uma determinada temperatura pela equação seguinte (Gonçalves, 2008):

Equação 9 Figura de Mérito para um material termoelétrico para uma determinada temperatura

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} T$$

A origem de “figura de mérito” foi representada no estudo teórico conduzido por Edmund Altenkirch, entre 1909 e 1911, que mostrou que os parâmetros mais importantes na comparação entre vários materiais termoelétricos eram o coeficiente de Seebeck, e as condutividades térmicas e eléctrica (esta última inversa da resistividade eléctrica, utilizada na fórmula de cálculo de ZT).

O valor da figura de mérito para os mais variados materiais foi quase sempre inferior à unidade (à temperatura ambiente (Gonçalves, 2008)). Têm sido desenvolvidas pesquisas no sentido de aumentar o valor de ZT , considerando-se a unidade como um valor para um bom material

termoeléctrico. Esta característica, ZT , é considerada quando na fase de desenho de qualquer dispositivo termoeléctrico, é necessário tomar a decisão sobre o material a utilizar.

Como pode ser visualizado na equação de cálculo da figura de mérito, este é dependente de três factores:

- Coeficiente de Seebeck
- Resistividade eléctrica
- Condutividade térmica

Um material para ser bom do ponto de vista termoeléctrico terá que possuir um elevado coeficiente de Seebeck e uma condutividade térmica e resistividade eléctrica baixa. A correlação entre estas três variáveis é difícil de encontrar num só material. Normalmente, um material que seja bom condutor da electricidade (resistividade eléctrica baixa) é também um bom condutor térmico. São exemplos os metais.

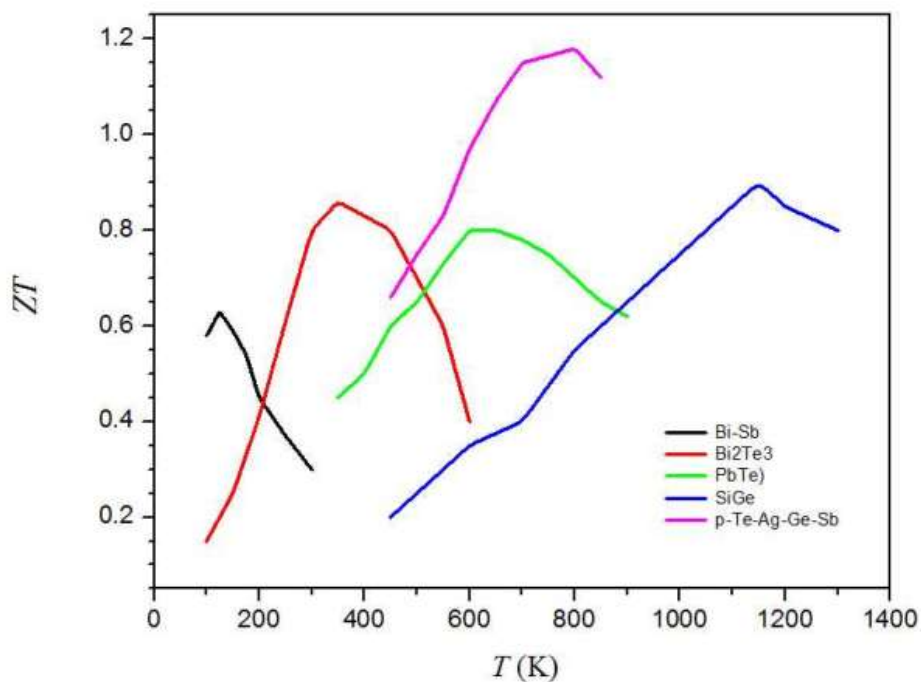


Figura 2.6 Relação da figura de mérito com a temperatura de algumas ligas

(fonte: <http://www.energyscience.ilstu.edu/areas/thermal.shtml>, consultada em 18 de Julho de 2011)

Após a publicação do trabalho de Altenkirch continuaram a ser efectuadas pesquisas na procura de uma liga perfeita, embora limitada pela lei de Wildman-Franz-Lorenz que relaciona directamente a condutividade eléctrica e condutividade térmica, em metais, a uma determinada temperatura, o que leva a que os esforços em aumentar a condutividade eléctrica também aumentam a condutividade térmica. Também os metais apresentam um coeficiente de Seebeck baixos, pelo que os resultados em termos de coeficiente de mérito eram baixos (Edu, 2011).

Os metais são caracterizados por valores geralmente baixos do coeficiente de Seebeck e condutividade térmica elevada, o que não pode ser compensado pela sua baixa resistividade eléctrica. Por outro lado, os materiais isolantes têm coeficientes de Seebeck elevados, mas não podem superar a condutividade eléctrica muito baixa.

Por sua vez, os semicondutores são posicionados na região da concorrência dos parâmetros individuais, e, portanto, a figura de mérito termoeléctrico resultante tem o seu máximo. O gráfico da figura 2.6 representa a variação da figura de mérito de algumas ligas com a temperatura. Este máximo é apoiado por coeficientes de Seebeck ainda que moderados e uma já boa condutividade térmica, limitada pela elevada condutividade eléctrica na região de concentrações elevadas dos transportadores.

Dentro dos semicondutores, a concentração de portadores óptimo, pode ser controlada com precisão por concentrações de dopagem adequada.

Tabela 2.2 Coeficiente de Seebeck e Figura de Mérito (à temperatura ambiente)

Elemento / Composto	Coef. Seebeck $\alpha(10^{-6} \text{ V/K})$	Figura de Mérito $\alpha^2\sigma/\sigma\kappa (10^{-3}\text{K}^{-1})$
$(\text{Bi}_{2x}\text{Sb}_x)\text{Te}_3$	210	1 – 3
Bi_2Te_3 (tipo p)	140	--
Si (tipo p)	1300	0.0001
Sb	48	0.03
Ni-Cr (80/20)	25	0.04
Cr	22	0.03
Ni	-20	0.04
Cu - Ni	-35	0.09
Bi	-68	0.3
Bi_2Te_3 (tipo n)	-110 a -250	1 - 3
$\text{Bi}_2(\text{Se}_x\text{Te}_{3-x})$	-250	--

Os melhores valores de ZT são obtidos em materiais semicondutores fortemente dopados, tais como nas ligas Bi_2Te_3 , PbTe e SiGe.

O desafio da pesquisa de novos materiais termoelétricos, toma o objectivo na procura de materiais que reúnam, simultaneamente, elevada condutividade eléctrica, alta taxa de conversão termoelétrica e baixa condutividade térmica.

Estas características são determinadas quer pela estrutura electrónica, quer pela distribuição dos portadores de carga (electrões ou buracos, conforme o material), não sendo assim, parâmetros controláveis independentes (Group, 2011).

O interesse em novos materiais termoelétricos, não é um tema novo mas a pesquisa de novos materiais está a aumentar e na próxima década será crítico o desenvolvimento neste campo.

A chave deste desenvolvimento encontra-se na sustentabilidade da figura de mérito $ZT > 1$, sendo necessário a colaboração entre químicos, físicos e engenheiros para a resolução deste paradigma, que tem já dado frutos com o surgimento das ligas com $ZT > 1$, tal como podem ser vistas na figura 2.7.

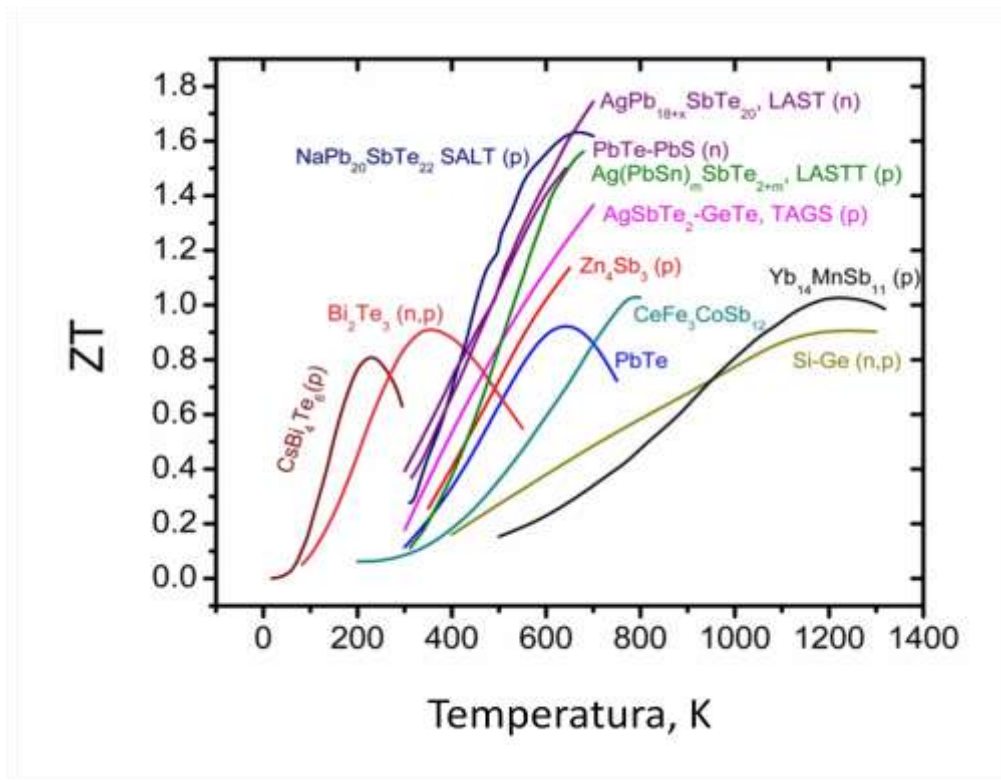


Figura 2.7 Materiais termoelétricos com a melhor figura de mérito (ZT)

Enquanto o telureto de bismuto (Bi_2Te_3) e várias ligas à base de Te são uma boa escolha para dispositivos termoelétricos de baixa temperatura, ligas de silício (Si) e silício-germânio (Si-Ge) são adequadas para temperaturas mais elevadas. Telureto de chumbo (PbTe) cobre a faixa intermediária.

Não existe limite teórico para o valor de ZT .

O valor apresentado da figura de mérito diverge de autor para autor, fundamentando cada um deles no processo de cálculo de ZT e na complexidade dos materiais empregues.

Dá-se como exemplo o gráfico da variação da figura de mérito em que apresenta um valor de 1,85 para a liga Bi_2Te_3 , mas considerando a estrutura atómica como uma super rede (superlattice). Estas estruturas de super redes (superlattices) contribuem para a mobilidade de electrões e de buracos que fazem o transporte da corrente eléctrica, e ao mesmo tempo dificultam o movimento dos fonões², responsáveis pelo transporte de calor conseguindo assim um aumento da figura de mérito (Bastos, 2010).

A figura de mérito é um factor que limita o rendimento da conversão térmica para eléctrica nos dispositivos termoeléctricos, pelo que a procura de materiais nesta corrida para a melhoria dos dispositivos termoeléctricos é o factor de sucesso e a chave do desenvolvimento futuro.

² Os fonões são partículas originadas quando a oscilação térmica das moléculas de uma onda acústica em um fluido se aproximam do zero absoluto, seu tom depende de vários factores, como a cinética do fluido e sua geometria. O estudo dos fonões é importante na física do estado sólido por facilitar a compreensão de muitas propriedades dos sólidos, como por exemplo o calor específico, a condução térmica, a condutividade eléctrica e a propagação do som.

2.3. Materiais utilizados no fabrico de Geradores Termoeléctricos

Como foi descrito anteriormente, todos os materiais possuem propriedades termoeléctricas. Pela definição de figura de mérito, alguns materiais podem não ter qualquer aplicação, mas outros podem e tendo em consideração as características fundamentais para ser um material termoeléctrico – condutividade térmica, resistividade eléctrica e coeficiente de Seebeck, assim terão uma maior ou menor aplicação. O desenvolvimento tecnológico e a Engenharia dos Materiais continuam na busca de um material com características termoeléctricas que permita uma figura de mérito muito superior àquela que hoje em dia é habitual. Novas aplicações serão abertas, principalmente com o aumento do rendimento de dispositivos de geração de energia eléctrica a partir dos desperdícios térmicos de processos industriais.

Há outras características na selecção de materiais para uma aplicação termoeléctrica – é desejável que o material tenha propriedades mecânicas e químicas estáveis ao longo de toda a gama de utilização de temperaturas. Para além disso é importante ter em consideração também, a taxa de oxidação, taxa de sublimação, entre outros, e dependentes da utilização que se tem em vista, o ambiente onde estará instalado, etc.

Por aquilo que se acabou de descrever, a selecção de um determinado material para ser utilizado num dispositivo termoeléctrico não depende apenas da comparação de características desse material, mas sim de um compromisso entre as várias (muitas) variáveis que é necessário ter em conta, confrontando os requisitos do sistema com a optimização do dispositivo perante as disponibilidades de mercado.

2.3.1. Materiais correntes

Em 2008 Bulusu e Walker efectuaram uma revisão aos modelos de materiais termoeléctricos utilizados desde a descoberta do efeito de Seebeck. Os primeiros materiais utilizados foram metais, mas a partir da descoberta dos semicondutores, foi verificado por Ioffe, em 1957 que os mesmos têm um grande coeficiente de Seebeck em parte devido à condutividade térmica face ao transporte de fónons (Jyrki Tervo, 2009).

Os materiais termoeléctricos podem ser classificados em 3 categorias: metais, semi-metais e semicondutores (Engelke, 2010). Na tabela abaixo podem ser comparadas as vantagens e desvantagens de cada um deles, tendo em consideração as 3 principais características para um material termoeléctrico:

Tabela 2.3 Características dos materiais utilizados em dispositivos termoelectrónicos.

Característica		Metais	Semi-metais (metaloides)	Semicondutores
Condutividade eléctrica	Vantagem	Alta	Idênticos aos metais e semicondutores. Podem ser adicionadas impurezas para melhorar ou aumentar as propriedades de condutividade eléctrica.	Dopagem aumenta esta característica
	Desvantagem	Varia como a condutividade térmica (razão constante); A altas temperaturas baixa, reduzindo a figura de mérito.	Cerca de 1/10 da verificada nos metais. É necessário fornecer energia para se tornarem condutores (intervalo entre a banda de valência e a banda de condução).	É necessário fornecer energia para se tornarem condutores (intervalo entre a banda de valência e a banda de condução).
Condutividade Térmica	Vantagem	Alta	Podem ser adicionadas impurezas para melhorar ou aumentar as propriedades térmicas	Condutividade térmica baixa. Pode ser alterada através da introdução de impurezas (dopagem).
	Desvantagem	Varia como a condutividade eléctrica (razão constante); Gradiente térmico pequeno		
Coeficiente de Seebeck	Vantagem	Alto	Alto. Podem ser adicionadas impurezas para melhorar ou aumentar as propriedades termoelectrónicas.	Muito alto
	Desvantagem	Não pode variar (devido à temperatura) uma vez que é dependente dos electrões livres – variação da condutividade térmica e condutividade eléctrica.		
Outras	Vantagem	Características mecânicas elevadas	Bastante utilizados em dispositivos termoelectrónicos devido ao seu rendimento e amplitude de aplicações. Figura de mérito de 10 a 100 vezes superior aos metais.	
	Desvantagem	Rendimento termoelectrónico pobre; Oxidação a altas temperaturas, maioritariamente não condutoras o que aumenta os problemas de contactos eléctricos.	Propriedades mecânicas baixas (idêntico a materiais cerâmicos) Custo das matérias-primas; Processo de fabricação difícil e oneroso.	Alguns materiais têm uma das características altas mas a figura de mérito baixa (caso do silício) devido às propriedades térmicas e eléctricas. Caros; Propriedades mecânicas muito pobres.

A nível de metais são utilizados, o níquel (Ni) e o crómio (Cr), ou sob a forma de ligas metálicas (Ni-Cr, Cu-Ni). Os semi-metais ou metaloides³ mais usuais são aqueles que se encontram na fronteira entre metais e não metais, da tabela periódica. São exemplos o boro (B), o silício (Si), o arsénio (As), o antimónio (Sb), o bismuto (Bi) e o telúrio (Te) (Engelke, 2010). Um dos materiais mais utilizados em dispositivos termoeléctricos é uma liga de bismuto e telúrio (Bi_2Te_3), sendo considerado material tipo p ou tipo n consoante a dopagem é efectuada com selénio (Se) ou antimónio (Sb). Outras ligas são a PbTe ou a ZnO_2 .

O mais utilizado é sem dúvida o Bi_2Te_3 , uma vez que provou ser bastante versátil quer no efeito de Peltier (arrefecimento) quer no efeito de Seebeck (geração de energia eléctrica). Ao nível dos semicondutores, são utilizados o silício (Si) e alguns dos seus derivados, quartzo, carboneto de silício, germânio e carbono (grafite e nanotubos de carbono).

Tabela 2.4 Propriedades termoeléctricas de alguns materiais e ligas.

Material	Símbolo	Coef. Seebeck α (μVK^{-1})	Resistividade ρ ($\mu\Omega\text{m}$)	Cond. térmica κ ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	Figura de mérito ZT (300K)
Níquel	Ni	-18	0.070	91	0.015
Crómio	Cr	18	0.13	94	0.008
Bismuto	Bi	-60	1.15	8.4	0.110
Antimónio	Sb	40	0.42	18.5	0.062
Telureto de bismuto (tipo n) [43]	Bi_2Te_3	-240	10	2.02	0.86
Telureto de antimónio [13]	Sb_2Te_3	92	3.23	1.63	0.48

A liga de bismuto telúrio (Bi_2Te_3) é ideal para funcionamento à temperatura ambiente (290-300°K). Acima desta temperatura, a diferença entre a banda de valência e a banda de condução aumenta e há uma condução caótica entre electrões e buracos, levando à redução drástica da figura de mérito, muito em parte pela redução do coeficiente de Seebeck.

2.3.2. Materiais em fase de pesquisa e desenvolvimento

Apesar de ter sido dado um grande salto qualitativo, em termos de rendimento energético, com o aparecimento dos semicondutores, o que é certo é que o desenvolvimento de determinadas

³ Designação dos elementos químicos que apresentam algumas, mas não todas, as propriedades físicas de um metal. Normalmente são melhores semicondutores do que condutores.

substâncias compósitas, mediante a dopagem selectiva a nível atómico, chegou a duplicar o rendimento dos dispositivos geradores termoeléctricos. As substâncias utilizadas nesta dopagem criaram outros problemas, a nível ambiental e de toxicidade para o homem. A aplicação de teluretos e de selenetos, teve um impacto grande em termos de limitações para utilização pública.

O desenvolvimento de estruturas denominadas super-redes (já faladas anteriormente), compostas por materiais em camadas alternadas de duas substâncias, contribuem para a mobilidade dos electrões de condução e, simultaneamente, reduzem a condutividade térmica através do movimento dos fonões. Conseguem-se assim, figuras de mérito bastante elevadas.

Estes materiais têm uma estrutura muito complexa e incluem materiais como boretos⁴ (YB68) e compostos de prata-tálio. Os átomos ou moléculas chocam entre si e actuam como fontes de distribuição de fonões, que reduzem a condutividade térmica.

As skutteruditas ($\text{ReTm}_4\text{M}_{12}$), são materiais contendo terras-raras (Re), metais de transição (Tm) e metaloides (M). Estes compostos com estruturas cristalinas e com resultados de conversão termoeléctricas muito boas. O nome de skutterudita vem do mineral obtido em Skutterud, na Noruega, e com a formula $(\text{Fe, Co, Ni})\text{As}_3$.

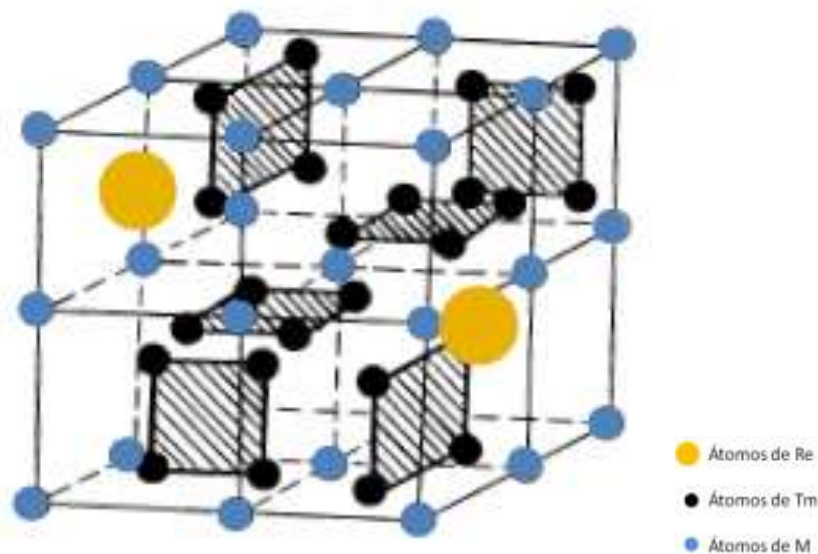


Figura 2.8 A estrutura cristalina da skutterudita
(fonte: Nanostructures in Skutteruditas, Ctirad Uher, 2011)

As skutteruditas têm propriedades interessantes para aplicações termoeléctricas, face ao interesse em novos materiais termoeléctricos cuja procura ou pesquisa tem sido guiada pela

⁴ Composto entre o elemento boro e um elemento menos electronegativo.

necessidade de elevado rendimento (performance) e regimes de temperatura mais exigentes (aplicação em automóveis e sistemas de transporte ou indústrias com desperdícios de calor a altas temperaturas) para os dispositivos termoeléctricos, não esquecendo as aplicações militares (Nolas, Morelli, & Tritt, 1999).

Outra vantagem deste material cúbico é que os monocristais (*single crystals*) não são necessários para investigar as propriedades de condutividade eléctrica e condutividade térmica, o que faz dele um material mais adaptado à aplicação em dispositivos termoeléctricos, caso os parâmetros apropriados possam ser alcançados.

A estrutura cristalina do skutterudita foi descoberta em 1928 por Ofledahl como sendo cúbica. Esta célula material pode ser compreendida como a junção de 8 pequenos cubos, formados por átomos de cobalto (Co). Em seis desses cubos (denominados “gaiolas” (A.P. GONÇALVES, 2008)) encontram-se preenchidos por “anéis” quadrados, planares, de arsénio (As), denominados “aniões”, cada um dos quais se encontra orientado paralelamente às arestas do cristal onde está inserido. Os átomos de As formam octaedros com átomos de Co no seu interior (Nolas, Morelli, & Tritt, 1999).

O objectivo da introdução dos átomos pesados é que estes vibrem de forma independente da estrutura cristalina, e introduzem novos modos de vibração dos fonões, que vão perturbar a propagação destes, sem alterar significativamente a propagação dos portadores de carga eléctrica. Ou seja, reduz-se a condutividade térmica sem alterar a condutividade eléctrica e assim, melhorar o coeficiente de Seebeck e a figura de mérito.

Nas duas “gaiolas” que ficam vazias são introduzidos dois átomos de elementos terras-raras, lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr) ou neodímio (Nd), tendo como resultado a redução da condutividade térmica devido à vibração que o elemento faz em relação ao elemento pesado colocado nas gaiolas adjacentes.

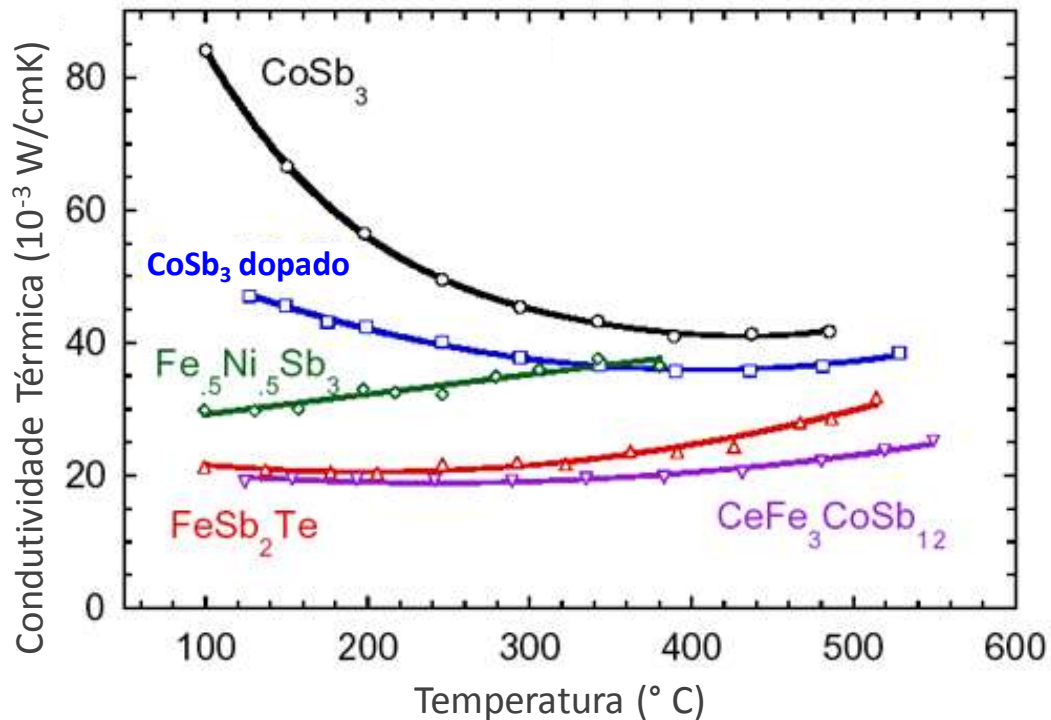


Figura 2.9 Diminuição da condutividade térmica em Skutteruditas pela introdução de mecanismos de preenchimento de diversos

Um dos problemas da utilização das skutteruditas é que a baixas temperaturas, a sua condutividade térmica é ainda elevada. Estão, ainda, a ser feitos esforços no sentido de serem desenvolvidas várias formulações de hipóteses, quer a nível experimental, quer a nível teórico, demonstrando que pode ser alcançado um desenvolvimento bastante significativo na conversão térmica / eléctrica, a partir de dispositivos termoeléctricos utilizando skutteruditas.

Tendo em conta a teoria termoeléctrica, os óxidos são considerados como não apropriados para dispositivos termoeléctricos devido à sua baixa mobilidade electrónica e comportarem-se como substâncias más condutoras eléctricas. Na pesquisa de materiais alternativos, um composto oxidado revelou características termoeléctricas que alteraram a linha de pensamento sobre os óxidos. Trata-se de NaCo_2O_4 , que apresenta ligações a nível iónico, enquanto que nos semicondutores são covalentes. Este óxido de cobalto apresenta características funcionais semelhantes ao semiconductor do tipo p. O facto de se tratar de óxidos torna este tipo de material como adequado para o funcionamento em altas temperaturas, uma vez que está eliminado o risco de oxidação, sendo assim, apropriado para aplicações industriais e aeronáuticas.

Outras características importantes que este tipo de material tem, são as propriedades mecânicas e estabilidade dos compostos, superiores aos semicondutores, para além da ausência de elementos tóxicos (Mieg, 2006). Em contraste com o material tipo p, em que os óxidos apresentam

excelentes propriedades termoelétricas, a pesquisa nos óxidos, de material tipo n não tem revelado grandes resultados. Os testes de alguns óxidos, dos quais se destacam ZnOAl e $Zn_5In_2O_8$, apresentaram uma figura de mérito inferior à unidade, carecendo de serem melhorados ou desenvolver pesquisas de novos óxidos.

É extremamente difícil controlar um sistema electrónico e um sistema de fonões simultaneamente, utilizando um único campo cristalino. Um cristal complexo composto por mais de dois nanoblocos com diferentes composições e simetrias estruturais é considerado eficaz para controlar o transporte de electrões e de transporte fonões separadamente (independentes um do outro) e, conseqüentemente, melhorar o rendimento de conversão total termoelétrica. O controlo das nanoestruturas através da integração de nanoblocos seria o caminho promissor para o desenvolvimento de novos sistemas termoelétricos à base de óxidos (Rowe, 2006).

2.4. Transmissão Térmica

A transferência de calor é o trânsito de energia térmica devida a uma diferença de temperaturas. A energia térmica está associada à translação, rotação, vibração e aos estados electrónicos dos átomos e moléculas que constituem a matéria. Existem 3 tipos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

- **Condução** - Transferência de calor num sólido ou fluido estático (gás ou líquido) devida ao movimento aleatório dos seus átomos, moléculas e/ou electrões constituintes.
- **Convecção** - Transferência de calor devida ao efeito combinado do movimento aleatório (microscópico) e do movimento macroscópico (advecção⁵) do fluido sobre uma superfície.
- **Radiação** - Energia que é emitida pela matéria devido a mudanças das configurações electrónicas dos seus átomos ou moléculas e que é transportada por ondas electromagnéticas (ou por fotões⁶).

A transmissão térmica mais importante para o presente projecto é sem dúvida a condução e a convecção, como será descrito mais adiante.

2.5. Materiais e Aplicações

2.5.1. Alumínio

O alumínio é um elemento químico cujo símbolo é Al. À temperatura ambiente é sólido, sendo o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre. O alumínio é um metal leve, macio, porém resistente mecânicamente, de aspecto metálico branco, que tem um revestimento fino de um óxido (alumina). Esse óxido é não reactivo e muito aderente e protege o alumínio de corrosão. Algumas propriedades do alumínio:

- Excelente condutor de calor (conforme tabela 2.5);
- Resistência à corrosão;
- Baixa densidade;
- Condutor de corrente eléctrica;
- Possui baixo ponto de fusão.

O alumínio é largamente utilizado em indústrias que requerem material resistente, leve e facilmente moldável.

⁵ Transmissão do calor, por meio de correntes horizontais, através de um líquido ou gás.

⁶ Partículas pontuais sem massa e caracterizada pelas mesmas grandezas que uma onda de radiação electromagnética. Tem um comprimento de onda, uma frequência e uma velocidade.

Tabela 2.5 Condutividade térmica do alumínio

Condições		Condutividade Térmica (W/m-K)
Temperatura (K)	Pressão (Pa)	
1	101325	4110
2		8180
3		21100
4		15700
5		18800
10		23500
20		11700
30		4950
40		2400
50		1350
100		302
200		237
300		237
400		240
500		236
600		231
800		218

2.5.2. Massa Térmica (Thermal Compound)

A massa térmica é um composto químico elaborado com elementos com propriedades de conduzir bem o calor. Componente de aplicação acessória, é formulado para reduzir significativamente a resistência de contacto térmica. Processa uma condutividade térmica elevada, quando comparada com fixação mecânica por contacto, criando um espaço de ar ainda que mínimo entre as duas superfícies, criando oxidação das mesmas e aumentam drasticamente a resistência térmica porque são maus condutores de calor. A aplicação da massa térmico pode ser visualizada nas figuras 2.10 e 2.11 tendo a vantagem descrita acima.

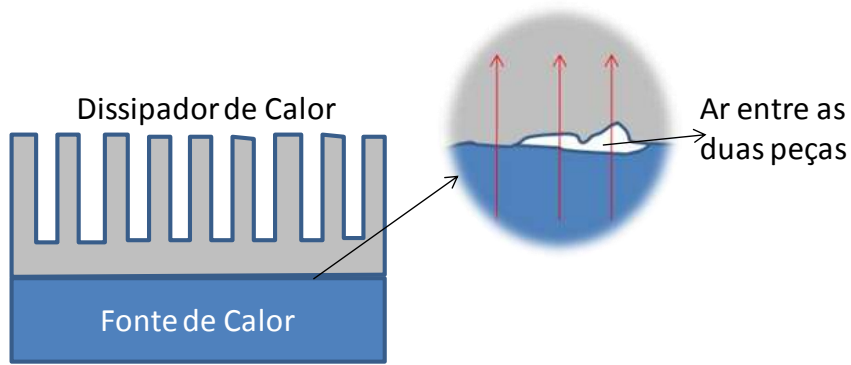


Figura 2.10 Fundamentação para a utilização de massa térmica

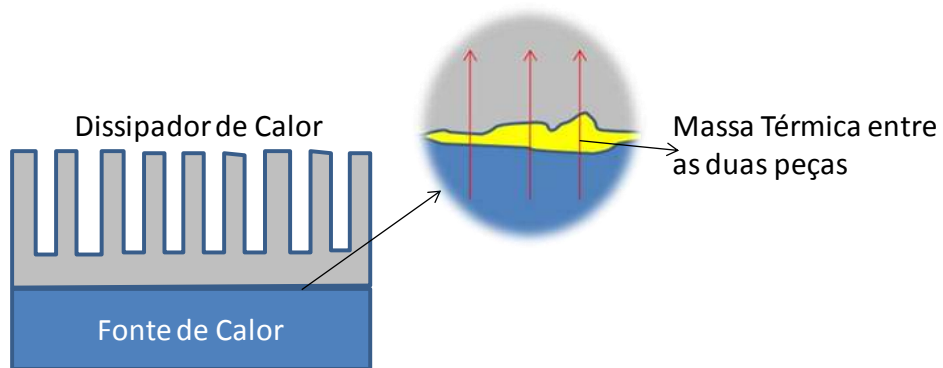


Figura 2.11 Aplicação da massa Térmica

2.5.3. Dissipadores Térmicos

Um dissipador térmico é um dispositivo que tem como objectivo ser capaz de absorver o calor de um objecto com o qual está em contacto térmico, sem uma mudança de fase ou uma mudança significativa na temperatura. Inicialmente existe uma fonte de calor, que transmite, por condução ao dissipador essa energia térmica, e este, por sua vez transmite esse calor ao meio em que está envolvido (normalmente ar, água ou qualquer outro elemento refrigerante e mesmo óleo). No caso de ser utilizada água, o dissipador de calor toma o nome de “cold plate” (placa fria). De forma a aumentar o seu rendimento, os dissipadores térmicos são desenhados para serem constituídos por aletas (ou asas), aumentando a superfície de contacto entre o dissipador e o fluido envolvente onde o calor se irá dissipar.



Figura 2.12 Exemplos de Dissipadores de calor (heat sink)

(fonte: (Answers Corporation, 2011))

O material mais comum na fabricação de dissipadores de calor é o alumínio, ou melhor, ligas em que o componente principal é o alumínio. Estas ligas, têm como principal objectivo melhorar o coeficiente de condutividade térmica, chegando a ter valores da ordem dos 230 W/m K. Também, em alguns casos particulares, os dissipadores de calor podem ser fabricados em cobre ou ligas deste material, uma vez que o coeficiente de condutividade térmica é muito mais elevado do que o do alumínio. No entanto o preço do cobre é muito mais elevado do que o do alumínio, aumentando significativamente o custo dos dissipadores de calor.

Um outro factor importante para o rendimento do dissipador de calor tem a ver com a sua cor. Esta situação é colocada nos dissipadores de calor em que a circulação do fluido é natural e a temperaturas superiores a 100°C. Para temperaturas inferiores (entre 0 e 100°C), a transmissão térmica por radiação é diminuta quando comparada com a transmissão por convecção, podendo ser desprezada. Em locais em que a convecção é baixa, a transmissão de calor por radiação pode ser um factor determinante para o rendimento do dispositivo. A utilização de preto-mate no dissipador de calor pode aumentar mais a radiação de calor do que algumas cores de dissipadores (alumínio, cobre, anodizados, etc). O caso mais crítico da utilização da cor é nos satélites, uma vez que um dissipador de calor, sujeito à radiação solar (6000 K) absorverá muita radiação térmica, enquanto se estiver virado para o espaço profundo, dissipará muita radiação térmica uma vez que as temperaturas são agora de apenas poucos graus Kelvin (Answers Corporation, 2011).

2.6. Aplicações de Geradores Termoeléctricos

São inúmeras as aplicações que utilizam o efeito de Seebeck ou de Peltier como princípio de funcionamento. Os geradores termoeléctricos podem ser usados para alimentar dispositivos eléctricos onde a potência é reduzida e na indústria aeroespacial. Mas também como sensores, ou como geradores de electricidade, recuperadores de energia, etc. Nas aplicações de Peltier temos os refrigeradores, os aquecedores, com aplicações na indústria automóvel.

Vamos descrever, mais pormenorizadamente algumas destas aplicações:

2.6.1. Termopares

Termopares são sensores usados para a medição de temperaturas. O princípio de funcionamento do termopar baseia-se no efeito Seebeck. Se dois metais dissimilares forem soldados nas duas extremidades e uma delas for aquecida, uma corrente contínua fluirá pelo circuito termoeléctrico. Se o circuito for aberto numa das extremidades, uma tensão eléctrica de circuito aberto aparecerá e estará directamente relacionada com a diferença de temperatura entre a extremidade soldada e a extremidade aberta com a composição dos dois metais, conforme o efeito de Seebeck descrito no capítulo 2. Os termopares podem ser produzidos em dimensões mínimas, para medições em pontos específicos, ou maiores para medições gerais de temperatura.

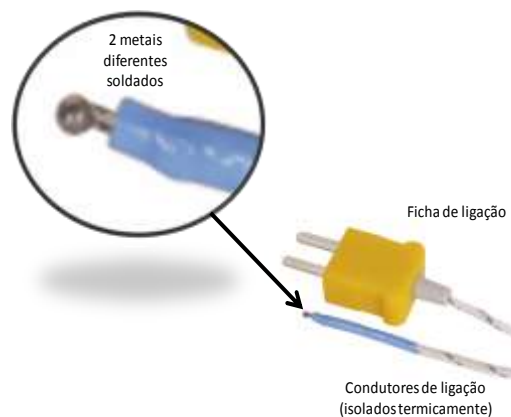


Figura 2.13 Termopar

Existem diferentes tipos de termopares, função dos metais utilizados e do calibre dos fios utilizados. Os tipos mais comuns de termopares são identificados através de letras (T, J, K, E, N, R, S, B), originalmente atribuídas pela Instrument Society of America (ISA).

Tabela 2.6 Tipos de Termopares e suas características principais

Tipos de Termopares	Intervalo de Temperatura de Funcionamento [°C]	Características Genéricas de Utilização
Cromel/Alumel NiCr/NiAl Tipo K	-200 a 1270	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes e inertes. • Limitações em vácuo e em atmosferas redutoras.
Ferro/Constantan Fe/CuNi Tipo J	0 a 750	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas redutoras, inertes e em vácuo. • Limitações em atmosferas oxidantes a elevadas temperaturas.
Cromel/Constantan NiCr/CuNi Tipo E	- 200 a 900	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes. • Limitações em atmosferas redutoras.
Cobre/Constantan Cu/CuNi Tipo T	- 200 a 350	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas húmidas. • Limitações em atmosferas oxidantes.
Platina 10% Ródio/Platina Pt10%Rh/Pt Tipo S	0 a 1450	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes • Sensível a contaminações
Platina 13% Ródio/Platina Pt13%Rh/Pt Tipo R	0 a 1450	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes • Sensível a contaminações
Platina 30% Ródio/Platina 6% Ródio Tipo B	0 a 1820	<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferas oxidantes ou inertes • Sensível a contaminações • Muito utilizado na industria Vidro.

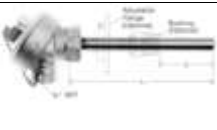

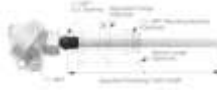

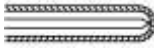
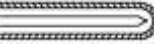
Um dos problemas dos termopares, prende-se com a identificação visual dos mesmos. Uma vez que podem ser de dimensões muito pequenas, os termopares são identificados pelo código de cores dos dois cabos que fisicamente cada termopar contém. Infelizmente não existe uma normalização a nível mundial, tendo os países mais industrializados desenvolvido a sua própria norma, o que levanta alguns problemas quando um termopar é utilizado num determinado equipamento e desconhecendo-se o código de cores, corre-se o risco de efectuar uma substituição por outro que não é adequado ou mal utilizado. Este é um problema que os responsáveis pela manutenção sentem e que tem impacto no seu rendimento (Unitemp, 2007).

Um exemplo é o termopar tipo J que nos Estados Unidos e no Japão, utilizam as mesmas cores – vermelho e branco – mas invertidas num e noutro país. O código de cores dos termopares pode ser visualizado no anexo C.

Existe uma variedade enorme de termopares, com gamas de aplicação muito grandes. Estas aplicações vão desde a medição de temperaturas em fornos de alta temperatura, a sondas para medição de temperatura em peças com cozimento ou recozimento, e outros onde se torna impossível o ser humano chegar ou a colocação de equipamentos de medição pode colocar em risco esses mesmos equipamentos.

Algumas características físicas dos Termopares podem ser visualizadas na tabela seguinte,

Tabela 2.7 Características físicas dos termopares

Característica	Tipo		Figura / Desenho	Observações
	Principal	Secundário		
Revestimento	Metálico	Ferroso		Alumínio, polipropileno
		Não Ferroso		
	Cerâmico	--		
Tipo de Junção	Exposta	--		<ul style="list-style-type: none"> • O termopar estende-se para além da bainha. • fornece uma resposta mais rápida. • Não é adequado para ambientes pressurizados ou corrosivos. • A humidade afecta o seu desempenho
	Ligada à Terra	--		<ul style="list-style-type: none"> • A junção do termopar faz parte integrante da bainha. • Tem bom tempo de resposta • Robusto • Menos dispendioso • Está sujeito a interferências de ruído • Está sujeito a retornos via terra.
	Isolada	--		<ul style="list-style-type: none"> • A junção do termopar está isolada da bainha e não ligada à terra. • Oferece melhor desempenho em condições de ruído. • Tempo de resposta mais lento do que nos termopares ligados à terra.

A escolha de um termopar para uma determinada aplicação, deve ser feita considerando todas as possíveis variáveis e normas exigidas pelo processo, das quais se destacam:

- A sua faixa de funcionamento, de modo a que este tenha uma boa resolução.
- Sensibilidade do transdutor em termos da grandeza física a medir.
- Frequência de resposta e frequência de ressonância do transdutor.
- Compatibilidade ambiental.

- Sensibilidade mínima, em termos de precisão da grandeza a medir.
- Rendimento.
- Robustez.
- Características funcionais eléctricas, nomeadamente, no que se refere á relação sinal/ruído.

Sendo um dispositivo de fácil manuseamento, contempla uma série de riscos e de incertezas que podem ser determinantes num processo que seja necessário um rigor científico elevado, sob pena de os resultados obtidos serem bastante díspares da realidade.

2.6.2. Relógios de pulso

Durante muito tempo o desenvolvimento de relógios recorrendo ao conceito de termoelectricidade foi sendo atrasado devido em parte à falta de miniaturização dos dispositivos térmicos conhecidos à época em que outras tecnologias foram utilizadas neste tipo de utilização.

Com a introdução de materiais semicondutores, nomeadamente o s dispositivos de bismuto telúrio (Bi_2Te_3), a companhia Seiko lançou um relógio de pulso denominado Seiko Termic, um relógio de pulso que utilizava a diferença de temperatura entre o corpo humano e a temperatura ambiente.

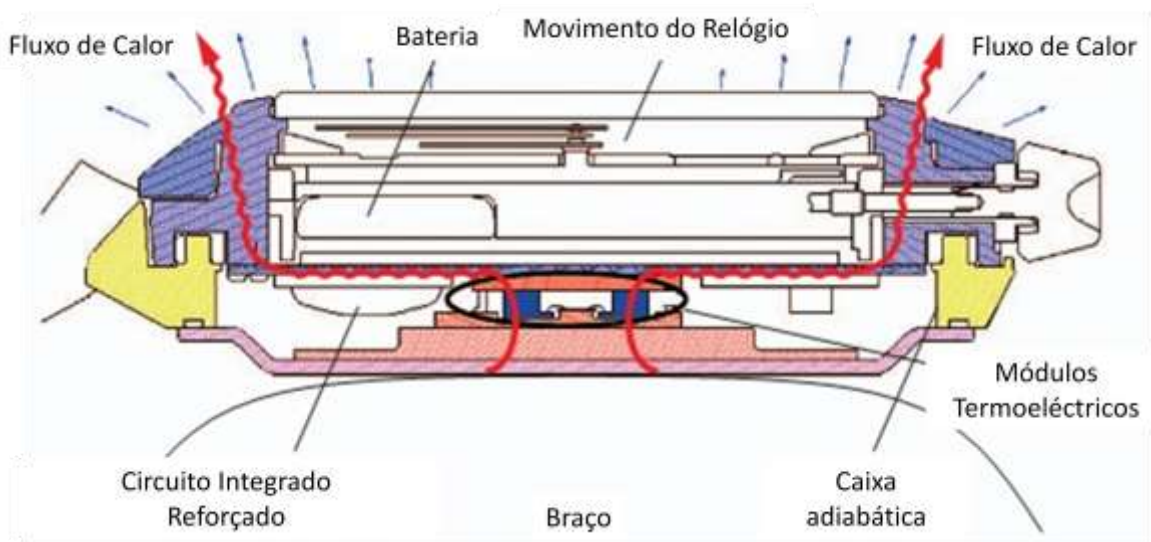


Figura 2.144 Conceito de relógio de pulso térmico

O princípio de funcionamento deste relógio térmico é explicado partindo da tampa traseira do relógio que recebe o calor do braço do utilizador como fonte de calor, enquanto a caixa onde o mecanismo se encontra inserido, e em contacto com o ambiente representa a temperatura mais baixa.

A diferença de temperatura de 1-3 °C é suficiente para gerar no dispositivo termoelétrico uma corrente eléctrica que fornece energia ao mecanismo eléctrico do relógio, que funciona com um cristal de quartzo (opera a 1,5V). A questão da miniaturização do dispositivo termoelétrico foi conseguida pela utilização de 10 circuitos integrados, cada um com 104 elementos térmicos ligados entre si num quadrado de 2x2 mm. As especificações necessárias para o funcionamento dentro do relógio de pulso, tais como resistência ao choque, localização dentro do dispositivo, levaram à utilização do mais pequeno dispositivo termoelétrico em forma de π (N.I., 2001).

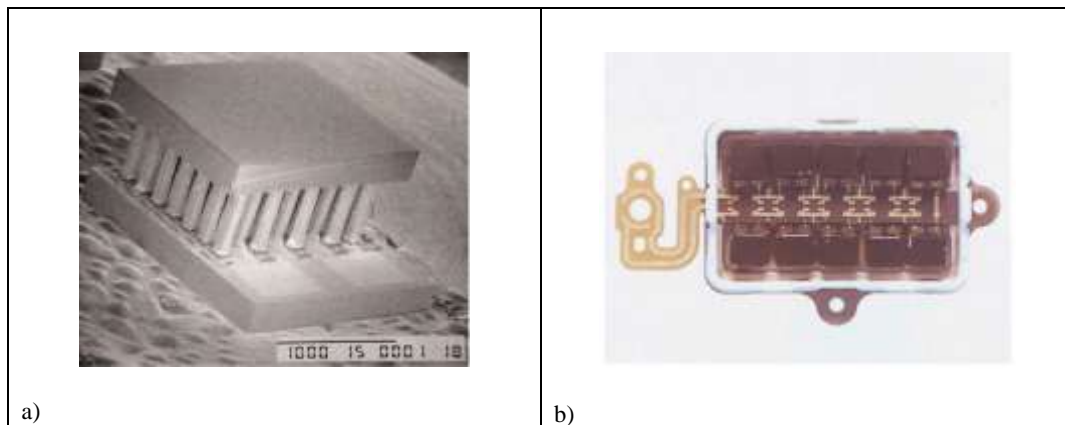


Figura 2.15 Micro dispositivo termoelétrico desenvolvido pela Seiko para os seus relógios Termoelétricos
a) dispositivo termoelétrico de 104 elementos b) unidade termoelétrica com 10 IC, para fornecimento de energia eléctrica ao relógio.
(fonte: (N.I., 2001))

2.6.3. Pulseiras termoelétricas - Energia no meu pulso

É assim que é denominado o dispositivo desenvolvido pela Dyson Energy, sob a forma de braçadeira para o pulso e que funciona segundo o efeito de Seebeck, para armazenar energia e assim fornecer para pequenos aparelhos eléctricos tais como telemóveis, ainda que por alguns minutos mais.

O princípio de funcionamento é idêntico ao descrito para os relógios de pulso, apenas com a substituição do mecanismo do relógio por baterias que armazenam a energia gerada.

Quando os utilizadores necessitam de recarregar a bateria do telemóvel ou de outro dispositivo eléctrico, basta ligar através de uma porta micro-USB (conector universal imposto aos construtores e fabricantes a partir de 2012) e poderá ter acesso a mais uns minutos de utilização (Mathieu Servais, 2011).

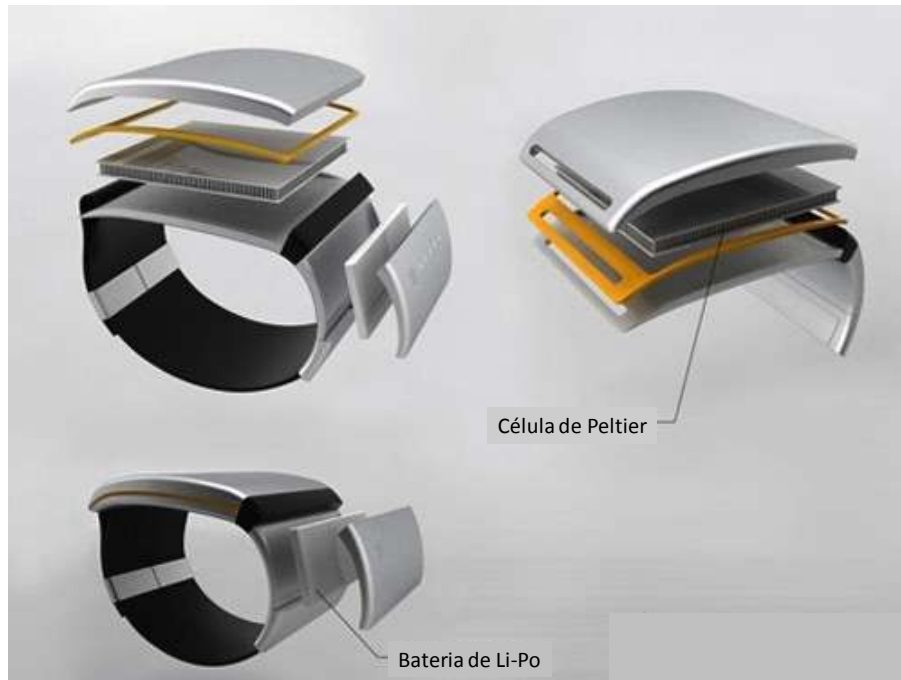


Figura 2.16 Utilização da Dyson Energy Bracelet
(fonte: (Mathieu Servais, 2011))

2.6.4. Refrigeradores

Os refrigeradores utilizam o efeito de Peltier para gerarem energia térmica. No caso dos refrigeradores, absorvem a temperatura mais elevada de um determinado espaço e transportam-no, através do dispositivo de Peltier, para um dissipador, que, por sua vez, o transfere para o meio ambiente onde está envolvido.

São vastas as aplicações de refrigeradores utilizando o efeito de Peltier: desde sistemas transportáveis, a sistemas utilizados para transporte de alimentação, etc, têm a vantagem de necessitarem de muito pouca energia eléctrica para funcionarem, não terem partes móveis, e terem uma vida útil bastante elevada, na ordem das 200 mil horas. Estas características permitem a aplicação destes sistemas por exemplo no transporte de vacinas ou de órgãos para transplantes e em sistemas de refrigeração para conservação de materiais deterioráveis em lugares remotos.



Figura 2.17 Refrigerador / aquecedor para garrafas, copos e latas com alimentação por porta USB
(fonte: (Gizmodo, 2007))

O dispositivo mostrado na Figura 2.17, é referenciado pelo vendedor como o melhor e mais eficiente dispositivo para refrigerar latas e garrafas, podendo chegar a uma variação de 18 / 20 F e para aquecimento de copos de café ou outro líquido, com uma variação de 20 / 22 F. A ligação por porta USB permite que seja ligado a um comum computador, portátil ou mesmo através de unidade de alimentação eléctrica com ligação por este tipo de ficha (Gizmodo, 2007).



Figura 2.18 Carrinho de transporte alimentação quente / frio
(fonte: (Electrolux, 2010))

O carrinho de Transporte de alimentação da Electólux, permite também a utilização para aquecimento e refrigeração de alimentos, podendo ser utilizado em empresas de distribuição, restaurantes, hospitais, Lares de Idosos, e mesmo na aviação civil. Tem a vantagem de que com uma pequena bateria aumentar bastante a autonomia de manutenção da temperatura, sem necessidade de ligação eléctrica. De salientar que este dispositivo também economiza energia, reduzindo a potência de 7,1 kW para uma potência de 1,8kW.

2.6.5. Circuladores de Ar

Os circuladores de ar têm o aspecto de uma comum ventoinha, no entanto não se encontram apetrechados de nenhuma ligação eléctrica. Utilizam o efeito de Seebeck para gerar energia eléctrica para o motor da ventoinha, e assim fazerem uma circulação de ar forçada pelo interior da sala onde se encontram. São utilizados com fogões de sala, tipo salamandras, a lenha ou a gás, e simplesmente são colocados no topo destes dispositivos de aquecimento.



Figura 2.19 Circulador de ar
(fonte: (Ecofan, 2007))

O objectivo principal é efectuar uma circulação forçada do ar aquecido pelo fogão de sala, a uma altura mais baixa, uma vez que o ar quente tem tendência a subir, levando mais tempo a sala a estar a uma temperatura média de conforto.



Figura 2.20 Utilização de uma ventoinha de circulação de ar
(fonte: (Ecofan, 2007))

2.6.6. Termo-geradores para automóveis e veículos pesados

Aquecimento / Refrigeração de Assentos Auto

Os primeiros assentos auto com aquecimento / refrigeração, utilizavam sistemas de resistências e ventilação para aquecimento e parte do ar condicionado ventilado para a refrigeração. Os primeiros assentos não eram silenciosos uma vez que utilizavam ventiladores para dispersar o ar frio / quente pelo assento. Outro sintoma que os clientes não gostaram foi a rigidez do assento em relação a outros assentos não climatizados, visto que a inserção de todo o sistema de climatização foi acompanhado de protecção mecânica e ocupou parte do espaço antes disponível para sistemas de conforto do corpo humano, na posição de sentado.

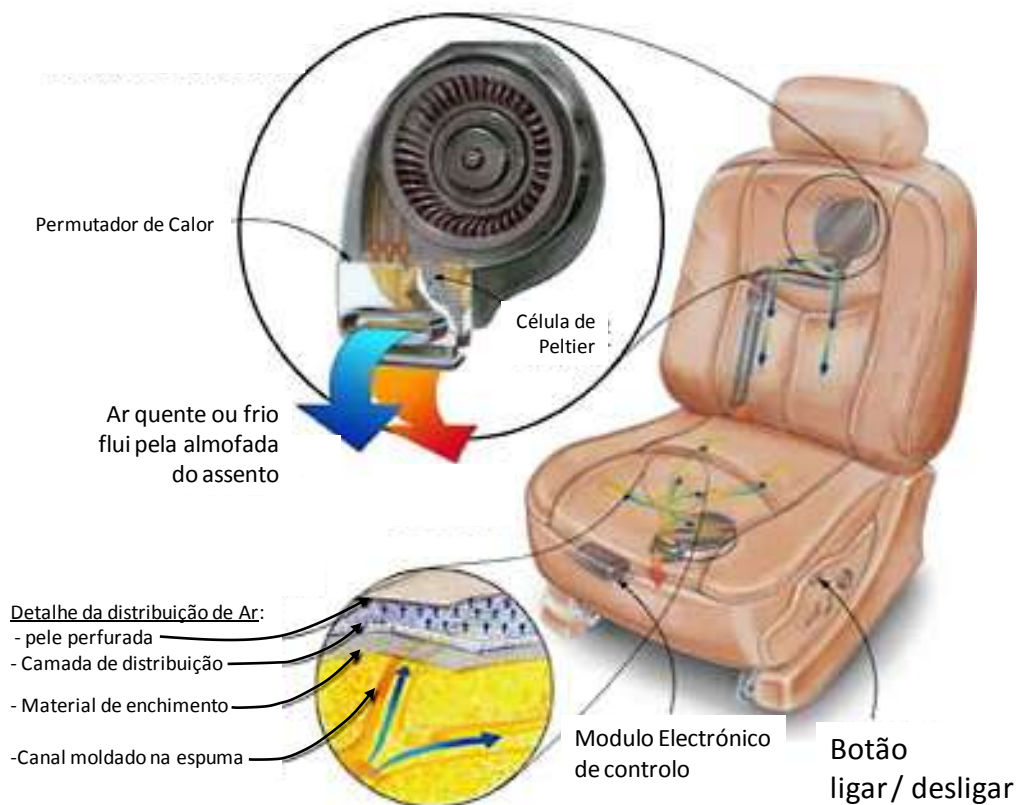


Figura 2.21 Assento climatizado utilizando células de Peltier
 (fonte: (Amerigon, 2011))

O assento climatizado (CCS – Climate Control Seat) permite que cada utilizador efectue o ajuste de temperatura que pretende, qualquer que seja a condição de tempo e em qualquer época do ano, utilizando para isso um microprocessador electrónico e sensores de temperatura colocados em posições que recolhem os dados térmicos para o microprocessador.

Estes assentos climatizados melhoram substancialmente o conforto dos passageiros, colocando o foco da climatização no assento do passageiro e não no ar interior do veículo. Estes assentos permitem também reduzir o consumo de energia, na utilização do ar condicionado, uma vez que a o mesmo pode ser regulado para uma temperatura ligeiramente mais elevada (condição de verão) ou mais baixa (condição de inverno), pela utilização dos dispositivos termoeléctricos nos assentos.

Geradores Termoelétricos

Os geradores termoelétricos são também utilizados na indústria automóvel para recuperação da energia térmica desperdiçada nos gases de escape. Várias marcas, desde a VW, à BMW e GM têm desenvolvido várias opções de recuperação desta energia, divulgando recuperação de cerca de 5% do consumo de fuel da viatura.

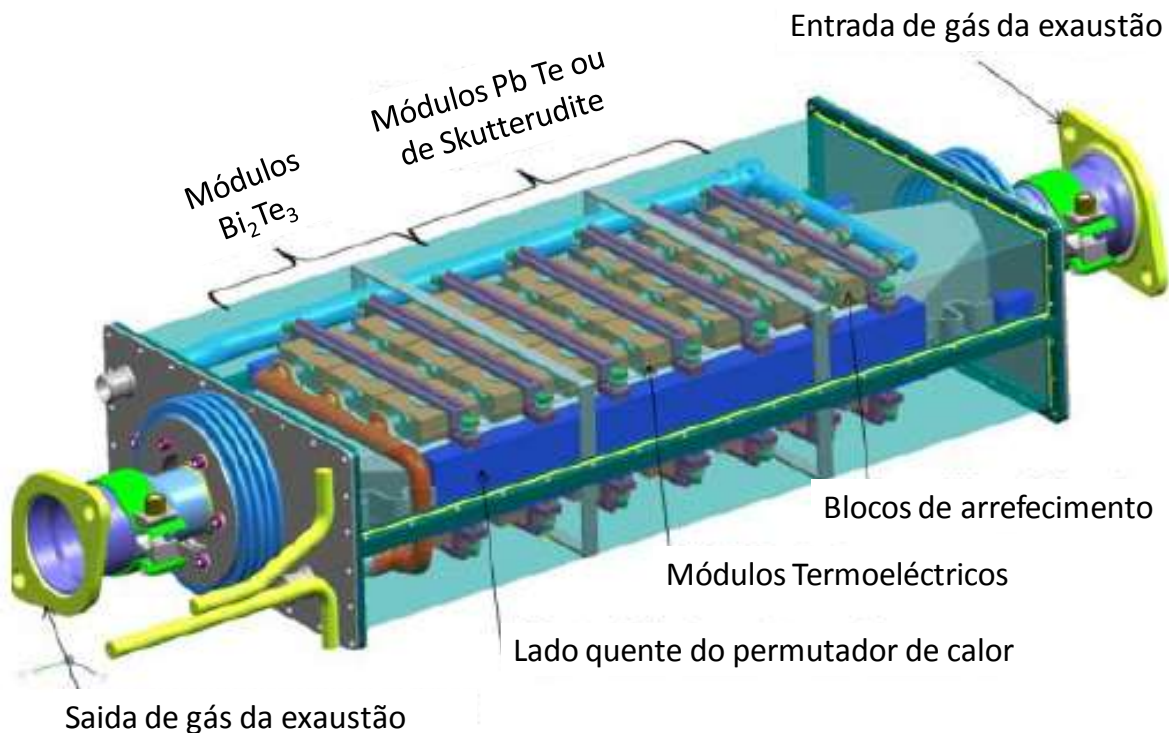


Figura 2.22 Gerador Termoelétrico colocado no sistema de exaustão dos veículos GM.

Alguns protótipos destes geradores termoelétricos foram desenvolvidos e testados por várias empresas construtoras de automóveis, tendo sido obtidos resultados que para além de indicarem oportunidades de melhoria com a introdução de novos materiais (caso dos Skutteruditas) deixam em aberto uma aplicação à produção em série de viaturas ligeiras.

O grande objectivo da implementação dos geradores termoelétricos partindo dos gases de escape é melhorarem o rendimento global do veículo, reduzindo o consumo de energia. Este objectivo torna-se mais importante ainda com as limitações de libertação de gases de efeito de estufa, imagem de amigos do ambiente para facilitar a venda, uma vez que a sensibilidade para a defesa do ambiente é já uma realidade.

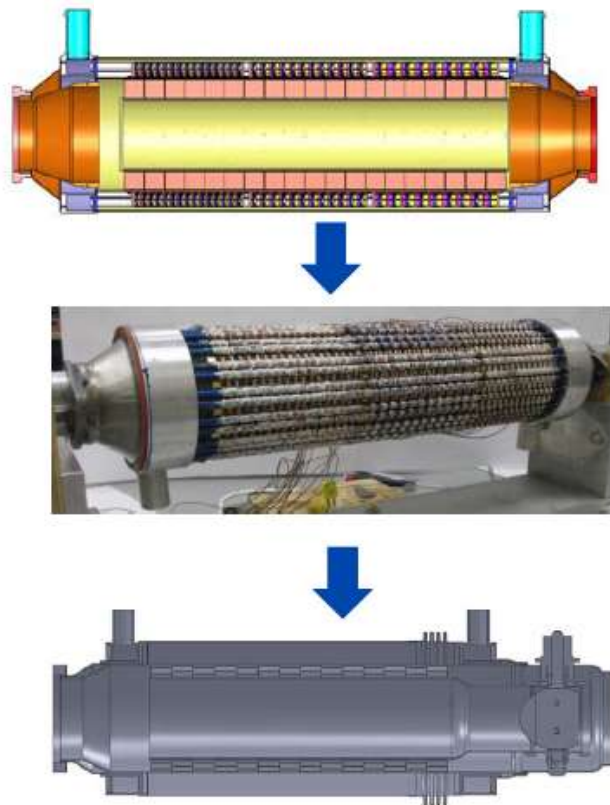


Figura 2.23 Gerador Termoelectrico desenvolvido pela Ford e BMW. (fonte: Ford Motor Co.)

A Ford e a BMW desenvolveram projectos idênticos, figura 2.23, em que a fonte quente de energia para os geradores termoelectricos eram os gases de escape, a temperaturas entre os 450 e 600°C, e a fonte fria, o fluido de arrefecimento do próprio motor, a uma temperatura de 80 a 100°C. Esta situação levantou de imediato o problema da temperatura elevada para os dispositivos termoelectricos, aumentando assim consideravelmente os custos associados aos sistemas.

Por sua vez, em 2009, a BMW ensaiou uma solução alternativa, utilizando como fonte de calor o fluido de arrefecimento do motor, integrando o gerador termoelectrico neste circuito, conseguindo em testes 250 W gerados e uma redução de gases de efeito de estufa, CO₂ na ordem dos 2%.

3. Aplicação do Gerador Termoeléctrico na recuperação de energia térmica de um processo industrial

3.1. Introdução

A aplicação do princípio do gerador termoeléctrico nos processos industriais para efectuar a recuperação da energia térmica poderá contribuir para a redução dos desperdícios energéticos que sempre existem numa organização.

Partindo da análise do processo, como primeiro passo na identificação das perdas e desperdícios energéticos, poderá estabelecer-se a prioridade e adaptação dos dispositivos – células de Peltier – transformando a energia térmica desperdiçada em electricidade.

Embora se saiba, que à partida, o rendimento de tais dispositivos está limitado, só a recuperação de um desperdício é, por si só, um benefício para a organização. Depois, perante os resultados, se saberá economicamente, se o mesmo será viável ou não.

Partindo do princípio que em um constrangimento num qualquer processo, seja ele produtivo ou de comando, controlo, primário, secundário ou outro, deverá estar sempre activo sob pena de introduzir perdas económicas. É exemplo disto a falta de energia eléctrica num processo de comando e controlo que inibe o acesso a dados decisores e consequentemente impede a tomada de decisão preponderante. Outro exemplo é a falta de energia em qualquer hospital, clínica e que existem, sistemas redundantes para garantir um rendimento eficiente de funcionamento. Os próprios aviões estão equipados com sistemas redundantes, em alguns casos quatro, para garantir o funcionamento da aeronave em condições em que os anteriores sistemas falharam.

A existência de um outro sistema, fornecedor de energia eléctrica, como suporte de outros sistemas fornecedores principais pode ser considerada não como um custo mas sim como um investimento e melhoria de um rendimento que cada vez mais depende da tecnologia e menos do factor de decisão humano.

Pretende-se neste capítulo estabelecer o estudo que indique se a implementação é possível, depois indicar o rendimento conseguido de acordo com a simulação efectuada e por fim, indicar alguns factores que contribuam para o processo de tomada de decisão dos responsáveis pela implementação.

A existência de um hipermercado no Montijo, localidade onde resido, facilitou a identificação de onde efectuar o estudo relacionado com a implementação dos dispositivos de recuperação de energia. Isto porque, sabia de antemão que os hipermercados são constituídos por vários departamentos que vão desde padaria a congelados e frescos. Inicialmente com tendência para a

utilização na área de padaria, com a recuperação da energia térmica perdida pelos fornos, cuja temperatura se situa aproximadamente nos 250°C, tal mostrou-se inviável de realizar o estudo devido a que o sistema de exaustão ser totalmente isolado termicamente e não haver possibilidade de retirar este isolamento sem danificar o mesmo criando um impacto nas actividades regulares do hipermercado.

Assim, e visitando o processo de refrigeração das câmaras frigoríficas, as quais utilizam o gás R404 como fonte primária de alimentação das bombas de calor, sendo depois expandido, transferindo a energia térmica para outro fluido e deixando este a cerca de 40°C. O gás é depois transportado para uma torre de arrefecimento onde a energia térmica é retirada através da circulação de ar com a pulverização de água a 15°C. A tubagem é de aço sem costura, com um diâmetro de 3 polegadas, coberto a primário anticorrosivo e tinta com um bom coeficiente de transmissão térmica.

Ao longo de todo o percurso existem secções de tubagem verticais e horizontais. Este sistema funciona 24 horas por dia, 7 dias por semana e 30 dias por mês, sendo a manutenção efectuada em paragens perfeitamente programadas e não mais prolongadas que 2 / 3 horas, sendo que as câmaras frigoríficas têm uma capacidade de retenção da temperatura de funcionamento de cerca de 4 a 5 horas. Todo o sistema é controlado por um sistema informático, através de várias sistemas de aquisição de dados em todo o processo e configuração de sistemas de tomada de decisão relativamente à entrada em funcionamento de equipamentos, saída de funcionamento de equipamentos, etc. Este processo revelou todo o potencial de aplicação de um sistema de recuperação de energia, uma vez que a falha de fornecimento de energia eléctrica ao sistema de aquisição de dados e actuadores, não é 100% fiável, tendo inclusivamente sujeito a ser roído e inutilizado por roedores (ratos). A energia eléctrica recuperada pode ser armazenada em baterias, próximo do local de utilização, evitando assim quebras por resistência e por efeito de Joule, que sempre acontecem.

Em anexo encontram-se os dados recolhidos da temperatura do tubo.

O R-404A (em anexo as características do gás) é uma mistura de 3 gases refrigerantes liquefeitos do tipo HFC (Hidrofluorcarbono) que não causa destruição da camada de Ozono. Tem baixa toxicidade, não é inflamável na presença de ar atmosférico em temperatura inferior a 100 °C e à pressão atmosférica. A pressão a que se encontra é baixa, não ultrapassando 2 bar.



Figura 3.1 Bombas de compressão do gás R404.



Figura 3.2 Torre de refrigeração do gás R404.

3.2. Descrição da aplicação

Pretende-se introduzir na tubagem do circuito de refrigeração, uma secção em alumínio octogonal com a colocação das células de Peltier, constituindo assim um gerador termoelétrico, utilizando como fonte primária de temperatura os cerca de 40 °C do fluido. A temperatura ambiente será a referência para a temperatura secundária a ter em conta na utilização dos geradores termoelétricos.

A primeira tarefa foi recolher informação sobre a gama de temperaturas que poderiam ser medidas no exterior do tubo e para tal, foi desenvolvido uma recolha de dados com o objectivo de referenciar a temperatura de funcionamento.

3.3. Recolha de dados e informação

Inicialmente efectuou-se a recolha dos dados necessários ao desenvolvimento do estudo, nomeadamente os relativos à fonte de energia. Foi medida a temperatura do tubo, no exterior do mesmo. Para tal foi utilizada um termómetro pistola de infravermelhos, com ponteiro laser, com uma amplitude de medições entre os -50 °C e os 280 °C $\pm 2\%$.



Figura 3.3 Termómetro de infravermelhos com laser.

Tendo em conta a localização da tubagem, no topo do edifício, conforme pode ser visualizado nas figura 3.4, a sua exposição à temperatura e intempérie, considerou-se que a variação da temperatura ambiente, principalmente no verão, com temperaturas máximas na ordem dos 30 / 34 °C, não teriam influência na temperatura de referência a ser utilizada no estudo.



Figura 3.4 Localização da tubagem e torre de arrefecimento
(fonte: Google Maps, consultado em Junho de 2011)

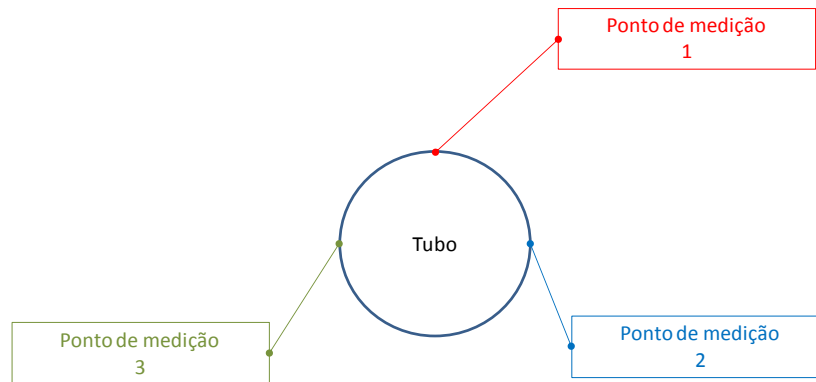


Figura 3.5 Pontos de medição da temperatura na tubagem do Continente

A utilização de três pontos de medição é fundamentada pela necessidade de validação da opção descrita de considerar sem qualquer tipo de impacto a variação da temperatura ambiente para a determinação da temperatura de referência a considerar no presente estudo.

Ficou estabelecido com o responsável da Manutenção da empresa a data de recolha dos dados e as respectivas autorizações para que tal fosse viável, uma vez que a empresa Continente Hipermercados é apenas uma das empresas âncora do Fórum Montijo e o acesso ao telhado carece de autorização prévia, garantindo deste modo que todas as pessoas que a ele acedem têm a informação e a formação necessárias para trabalharem naquele local bem como os dispositivos de segurança adequados.

Tabela 3.1 Tabela de recolha de dados da temperatura exterior do tubo transportador do fluido R404.

Ponto	Hora 1												Média	Máximo	mínimo
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55			
1	41,1	41	41,2	41,2	41,1	41,1	41,2	41	41,2	41,2	41,2	41,2	41,1	41,2	40,8
2	40,8	40,8	40,9	40,9	40,8	40,8	40,9	40,8	40,8	40,9	40,8	40,9	40,8		
3	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,8	40,9	40,8	40,9	40,8	40,8	40,8		
Média	40,8	40,9	41,0	41,0	40,9	40,9	41,0	40,9	40,9	41,0	40,9	41,0	40,9		

Ponto	Hora 2												Média	Máximo	mínimo	
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55				
1	41,2	41,2	41,3	41,2	41,2	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	40,8
2	41,1	41,1	41,1	41,1	41,2	41,1	41,1	41,1	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,1		
3	40,8	40,8	40,8	40,8	40,9	40,9	40,9	40,8	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9		
Média	41,03333	41,0	41,1	41,0	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1		

Ponto	Hora 3												Média	Máximo	mínimo	
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55				
1	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	41,3	40,8
2	41,1	41,1	41,2	41,1	41,2	41,1	41,2	41,1	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2		
3	40,9	40,8	40,8	40,8	40,8	40,9	40,9	40,9	40,9	41	40,9	40,9	40,9	40,9		
Média	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,2	41,1	41,1	41,1	41,1		

Ponto	Hora 4												Média	Máximo	mínimo	
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55				
1	41,3	41,2	41,3	41,3	41,2	41,2	41,2	41,2	41,3	41,3	41,2	41,2	41,2	41,2	41,3	40,8
2	41,1	41,1	41,1	41,1	41,2	41,1	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2	41,2		
3	40,9	40,8	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9	40,9		
Média	41,1	41,0	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1	41,1		

Média de todas as medições

Temperatura mais elevada

Temperatura mais baixa

Face aos cálculos da média acima indicado, será considerada a temperatura de 41,1 °C como temperatura de referência para os ensaios e cálculos a efectuar. Também se verifica uma estabilidade muito grande nas medições efectuadas e na diferença entre as temperaturas dos pontos 1 (com maior influência do sol e temperatura ambiente), 2 (também ao sol mas numa posição vertical) e 3 (maior parte do dia à sombra).

A utilização do calor libertado ao longo de todo o percurso do tubo é uma fonte de potencial aproveitamento, uma vez que este é dissipado directamente para o ar que o rodeia. Do ponto de vista técnico e de processo, esta dissipação é positiva uma vez que o fluido que circula dentro do tubo sofre um aumento de temperatura através da absorção de calor e é direccionado para uma torre de refrigeração para transmitir essa energia e reduzir a temperatura, voltando ao início do processo. A perda de temperatura ao longo do percurso fará com que a necessidade de gastar energia na torre de arrefecimento seja menor (embora mínima).

Com a utilização das células de Peltier, funcionando pelo efeito de Seebeck será possível a recuperação deste calor dissipado ao longo do percurso, recuperando-o e transformando-o em electricidade. A energia transformada poderá, então, ser utilizada ou armazenada em baterias, nomeadamente para os circuitos de comando e controlo da torre de refrigeração, o que sendo este um equipamento crítico, aumentará a robustez do processo e a eliminação de paragens não programadas devido à falta de energia (no circuito de comando e controlo).

Uma vez que as células de Peltier são apresentadas com as faces planas, inviabiliza, desde logo, a sua utilização directa no tubo de 3". Assim, terá de ser efectuada uma adaptação para que a aplicação seja viável. A adopção de um tubo octogonal parece ser a que melhor se adapta a este fim, pois aproxima a geometria da secção ao tubo redondo, disponibiliza 8 faces onde a aplicação das pastilhas de Peltier é possível, e permite que a fabricação do tubo seja efectuada em alumínio, através de quinagem, em folha única, com soldadura eléctrica. Tal adaptação pode ser vista nas figuras 3.6 a 3.9, adiante.

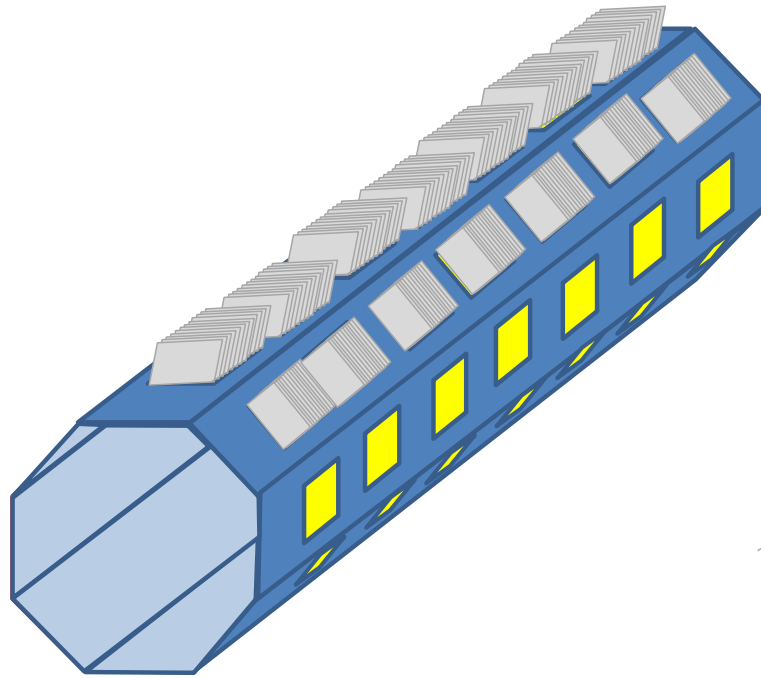


Figura 3.6 Tubo octogonal com células de Peltier em cada uma das faces.

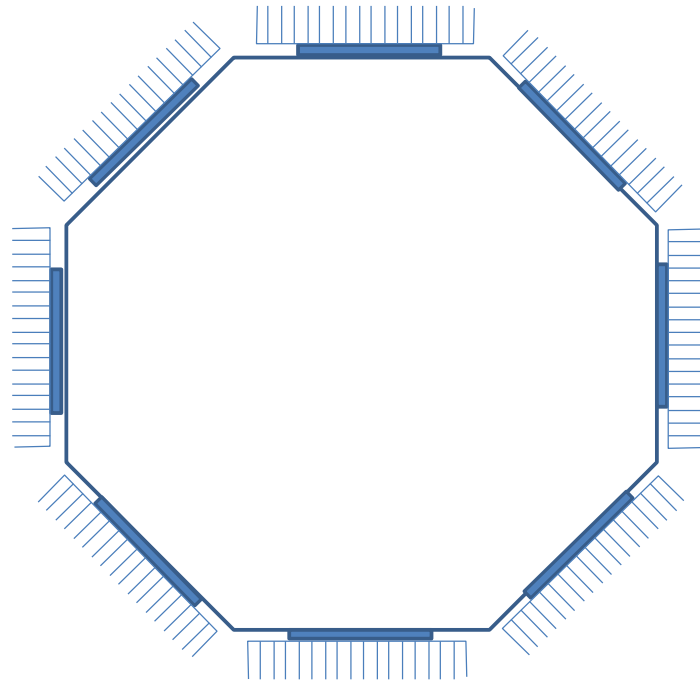


Figura 3.7 Secção octogonal do tubo de alumínio com as células de Peltier nas faces.

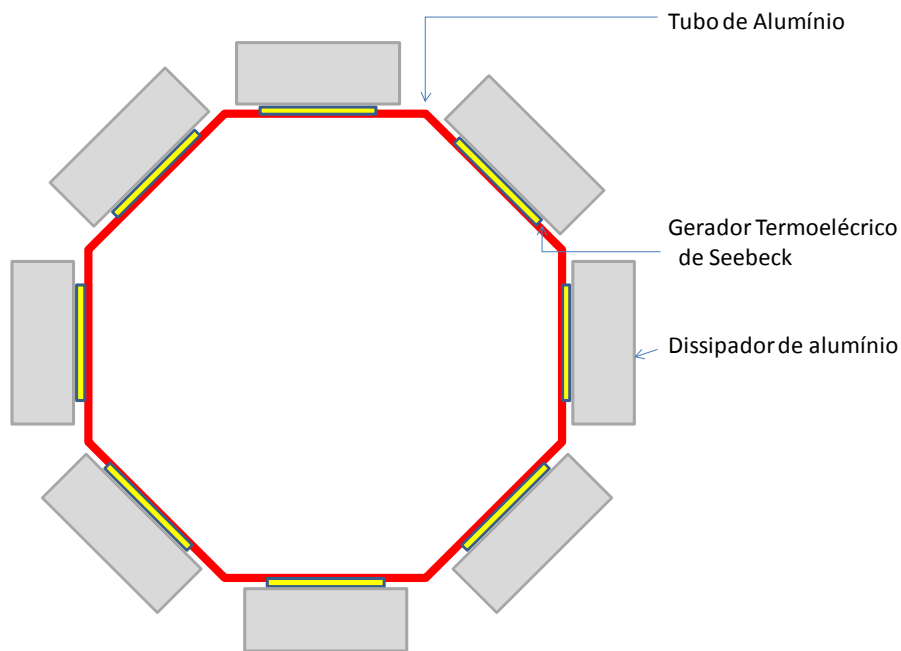


Figura 3.8 Seção do tubo octogonal.

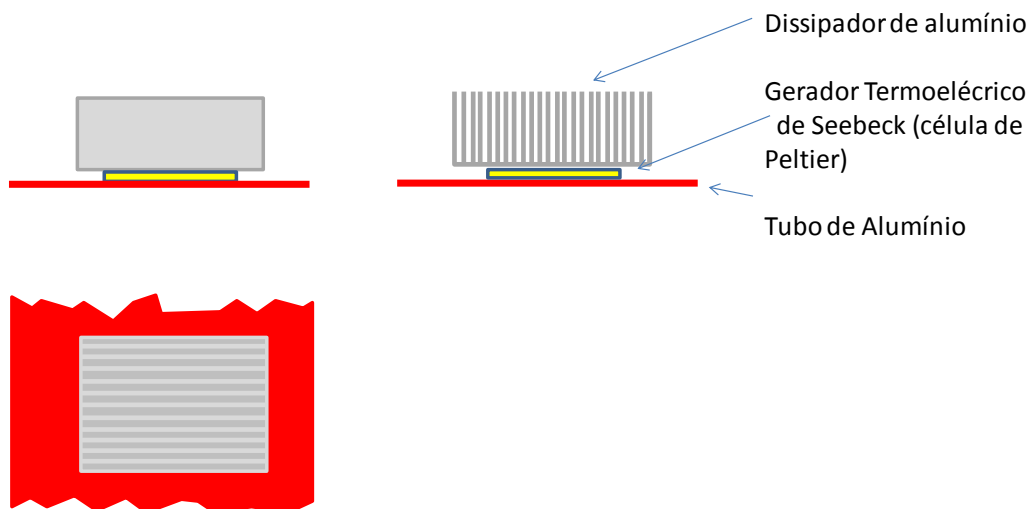


Figura 3.9 Pormenor do dissipador e da célula de Peltier.

O calor será transmitido por condução, através da parede do tubo octogonal, em alumínio, para a pastilha de Peltier, a qual funcionará como gerador termoelétrico, gerando energia eléctrica. Esta energia eléctrica será depois utilizada no processo de comando e controlo da torre de refrigeração e / ou iluminação, podendo a mesma ser armazenada em baterias instaladas para o efeito.

Para efectuar o cálculo do rendimento do gerador termoeléctrico, foi construído um dispositivo, cujo desenvolvimento passou pelo projecto, concepção e utilização, sendo efectuadas as medições de tensão, intensidade da corrente eléctrica, temperatura da célula de Peltier e temperatura do dissipador.

3.4. Fase de Projecto do Dispositivo

O projecto foi desenvolvido, tendo como objectivo a simulação da utilização do tubo octogonal, em pleno funcionamento. A sua estrutura deveria, então, contemplar uma fonte de calor, que por comodidade e flexibilidade seria eléctrica, e permitiria a adaptação a todas as faces do tubo octogonal. Passou-se então ao projecto do dispositivo, que se descreve abaixo.

3.5. Procedimento de Ensaio

Introdução

Pretende-se efectuar o estudo de um gerador termoeléctrico, cujo funcionamento é baseado no efeito de Seebeck. Para tal, é construído um dispositivo que simule as condições de funcionamento descritas de forma a recolher dados que validem, ou não, os objectivos estabelecidos.

Objectivo

Pretendendo-se simular a implementação de um tubo octogonal, o dispositivo a desenvolver terá de contemplar todas as 8 faces do tubo. Inicialmente será ensaiada a posição horizontal do tubo.

Procedimento Experimental

Para simular a temperatura do fluido que circula no interior do tubo será preparada uma fonte de aquecimento constituída por três resistências eléctricas que serão colocadas por baixo de uma placa de alumínio, com 5 mm de espessura. Na parte de cima da placa será colocada a pastilha de Peltier e depois o dissipador.

O circuito de carga será efectuado por um reóstato de 8Ω . Este circuito será protegido por um fusível de 5 A, garantindo que o circuito semiconductor da pastilha de Peltier não é destruído por aumento brusco da intensidade de corrente, ou por mau manuseamento do dispositivo.

A instrumentação a utilizar será constituída por um voltímetro e um amperímetro, no lado da carga e por voltímetro e amperímetro incorporado na fonte de alimentação, no lado do aquecimento.

No reóstato serão identificados pontos de leitura, correspondentes a um determinado valor da carga, a utilizar nas diversas medições a efectuar.

Circuito de aquecimento

Este circuito pretende simular a fonte de calor do circuito. O objectivo é atingir na superfície da placa de alumínio uma temperatura máxima de 60°C , temperatura que representa a média das medições efectuadas. O controlo da temperatura será efectuado por um termóstato bimetálico, de 60°C , colocado na placa de alumínio e intercalado no circuito de alimentação das resistências de aquecimento eléctricas.

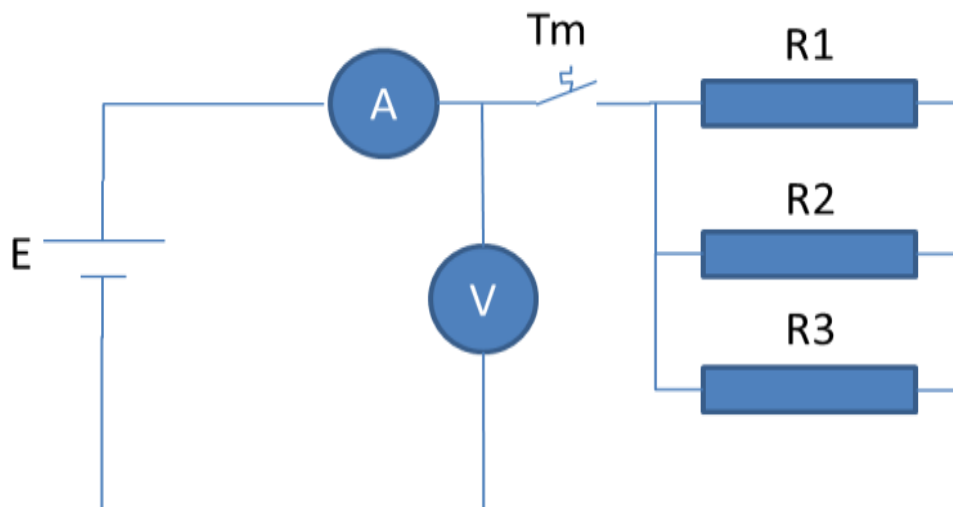


Figura 3.10 Circuito de aquecimento.

O circuito eléctrico de aquecimento, cujo esquema se encontra representado na figura 3.10, é alimentado a uma tensão de 12V, corrente contínua, é constituído por um conjunto de três resistências ligadas em paralelo, R1, R2 e R3. Inicialmente será ensaiado com uma fonte de alimentação debitando 1 A e posteriormente, com outra fonte até 3 ampère. Esta situação é fundamentada com a necessidade de ser atingida a temperatura máxima para a simulação pretendida.

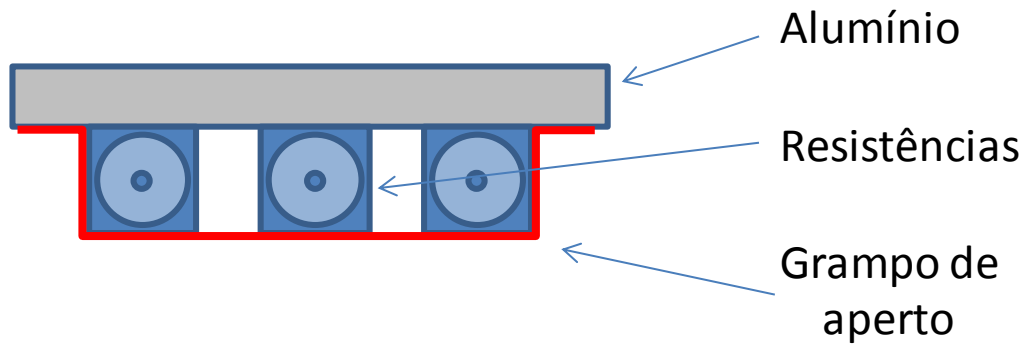


Figura 3.11 Colocação das resistências de aquecimento.

As resistências de aquecimento serão colocadas sob a placa de alumínio de 5 mm de espessura, fixadas por um grampo de aperto, com parafusos, que simula a parede do tubo onde serão colocados os dispositivos geradores termoelétricos, conforme esquema da figura 3.11, acima e 3.12 abaixo.

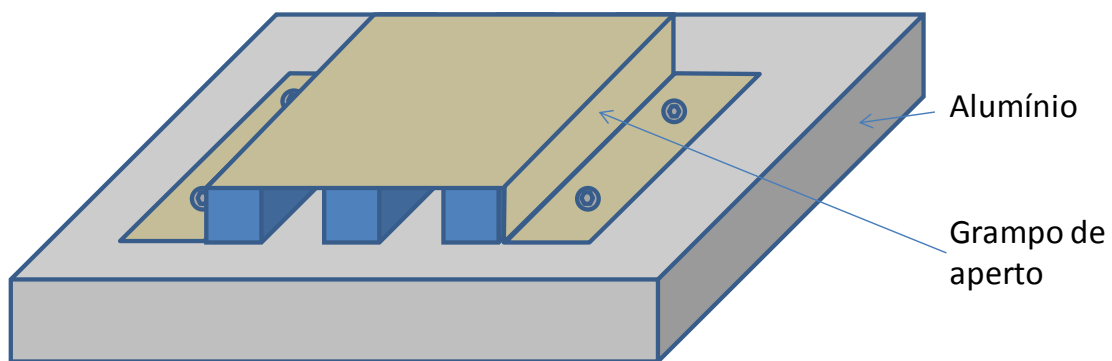


Figura 3.12 Fixação das resistências à placa de alumínio com grampo de aperto – placa de alumínio invertida em relação à posição normal.

Como se pretende que o calor seja direccionado todo para a placa de alumínio, as resistências serão envoltas em manta de tecido anti-fogo e isoladas por teflon, garantindo assim que o calor será direccionado só para a placa de alumínio.

A placa de alumínio será colocada num suporte de teflon, onde será efectuado o ajuste do isolamento, aquando da colocação da placa de alumínio, conforme esquemas das figura 3.13 e 3.14.

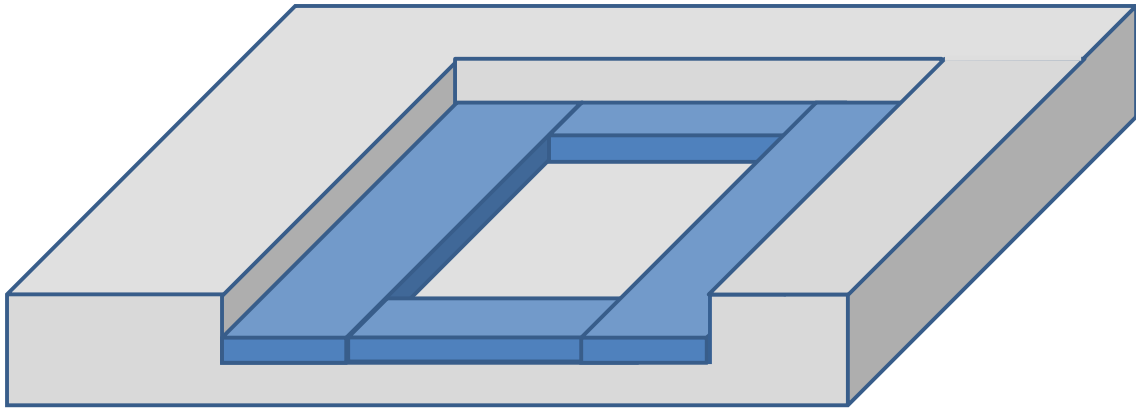


Figura 3.13 Suporte de Teflon, onde será colocada a placa de alumínio com as resistências.

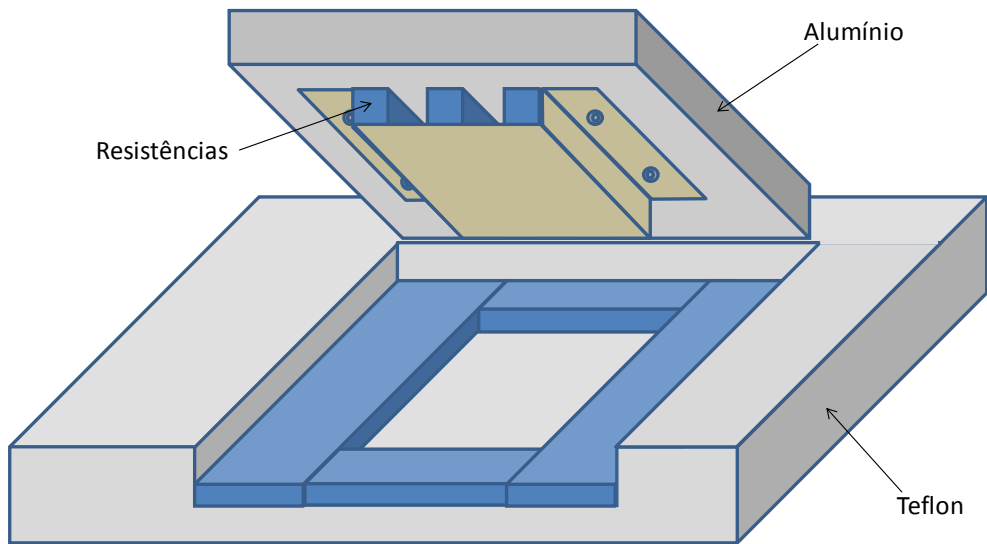


Figura 3.14 Montagem do conjunto - chapa de alumínio, resistências, suporte em teflon.

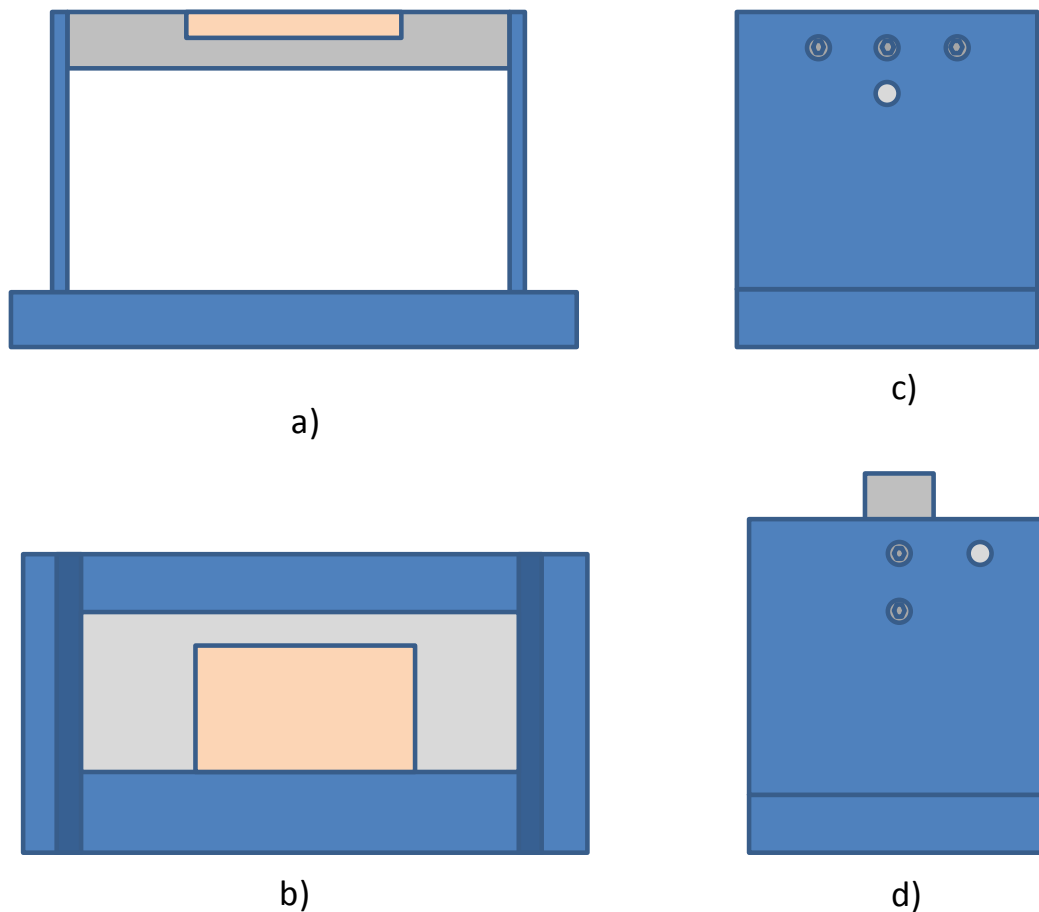
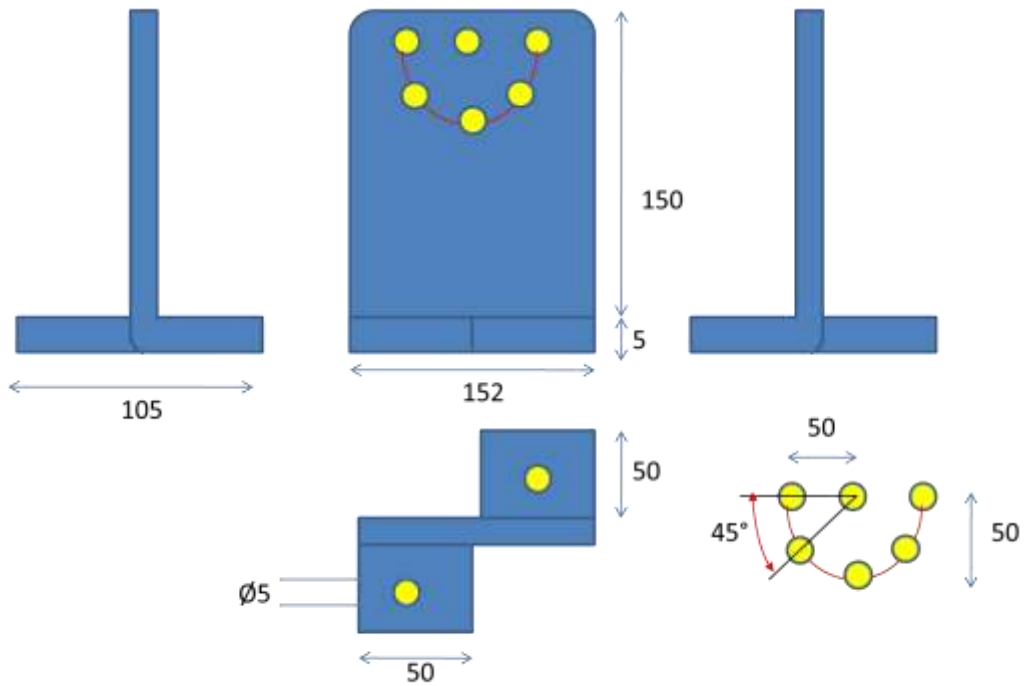


Figura 3.15 Suporte: a) vista frontal b) vista de cima; c) vista de topo; d) vista de topo com a montagem em posição vertical.

O suporte do dispositivo de simulação do tubo, será em acrílico transparente e será apoiado numa base de acrílico. Nesta base serão também instalados todos os dispositivos de ligação, de controlo e de medição (figura 3.15). Este suporte permitirá a rotação da base de alumínio simulando a colocação do gerador termoeléctrico em qualquer das oito faces do tubo octogonal (figuras 3.16 e 3.17).

No painel de controlo estarão colocadas as ligações para a instrumentação de medição bem como o potenciómetro rotativo de simulação de carga (figuras 3.19 e 3.20).

Este potenciómetro, de 8Ω , será utilizado para simular a variação da carga do circuito eléctrico, através do posicionamento em pontos pré-definidos. Estes pontos foram marcados na placa de acrílico, conforme pode ser visualizado nas figuras mais adiante (figura 3.33).



Placa em acrílico transparente, de 5 mm de espessura. Os furos são todos do mesmo diâmetro

Figura 3.16 Suporte do dispositivo.

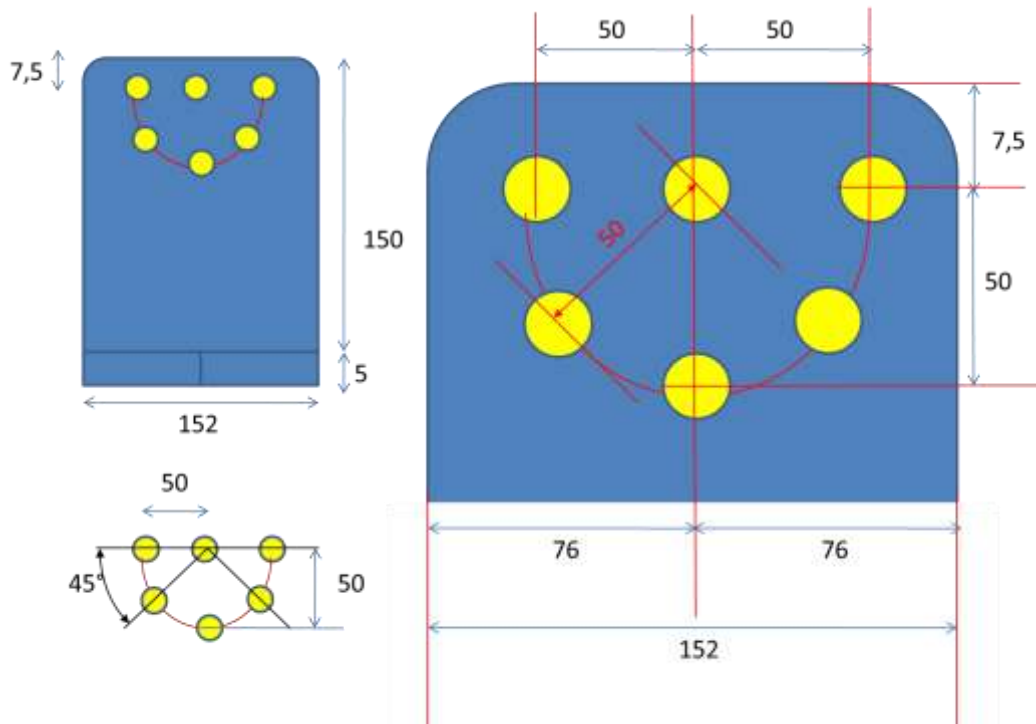


Figura 3.17 Pormenor da furação do suporte do dispositivo.

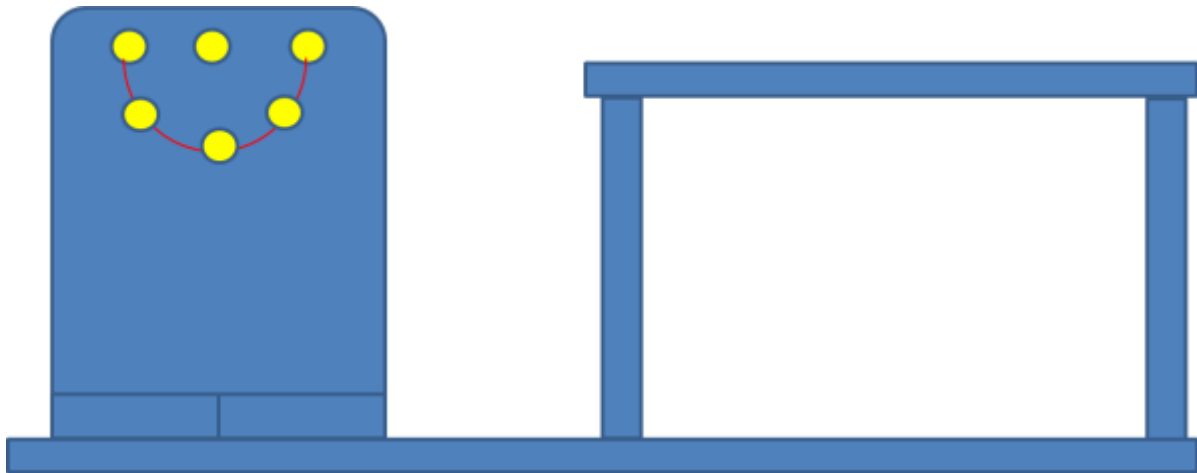


Figura 3.18 Vista lateral do dispositivo de simulação.

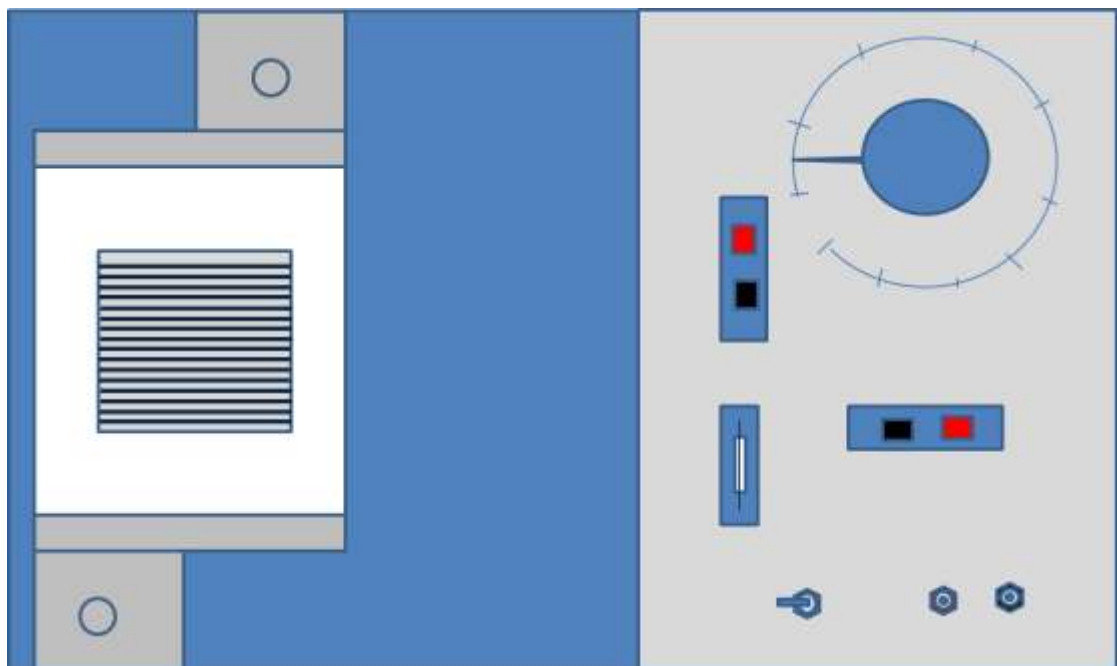


Figura 3.19 Vista de cima do dispositivo de simulação.

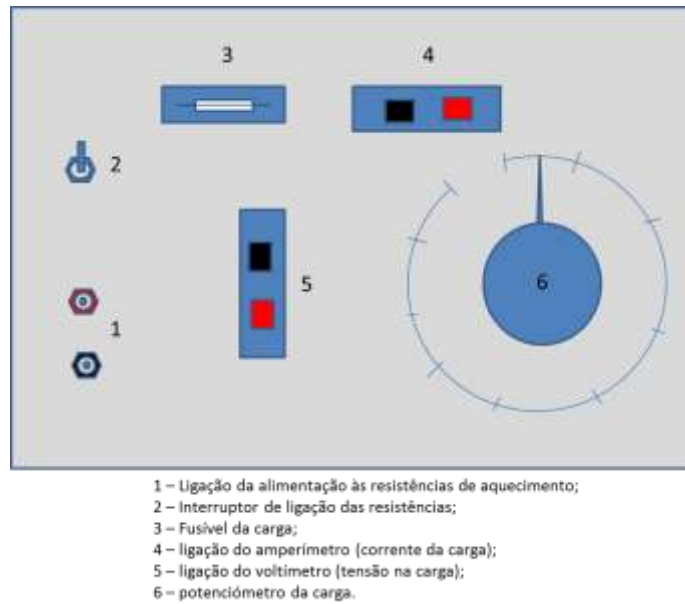


Figura 3.20 Painel de controlo e medição.

O dispositivo será ensaiado para cada uma das faces do octógono, sendo registadas as seguintes medições:

- Referência da resistência de carga
- Tensão na carga
- Corrente na carga
- Temperatura na base do dissipador
- Temperatura no topo do dissipador

as quais serão utilizadas para os cálculos de rendimento do sistema simulado.

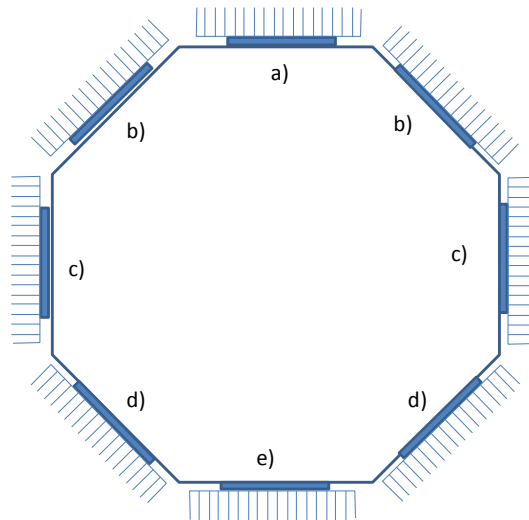
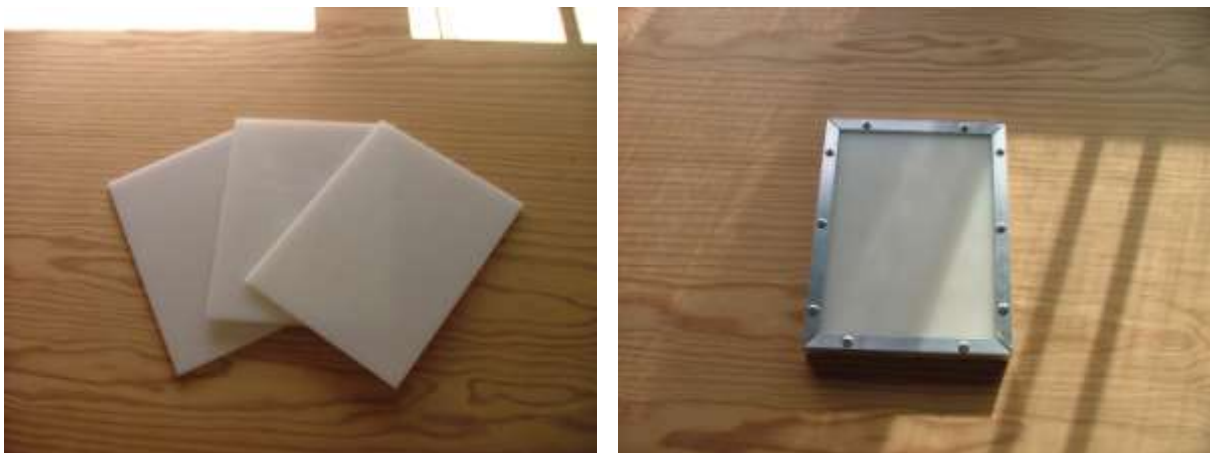


Figura 3.21 Tubo octogonal com a instalação dos 8 termogeradores.

Terminado o projecto, passou-se à construção do dispositivo, após a aquisição dos materiais necessários.

3.6. Fases da construção do dispositivo e dos Ensaiois



a)

b)

Figura 3.22 a) Placas em nylon; b) Base do suporte em nylon com reforço em perfil de alumínio.

A opção pela utilização do nylon (figura 3.22) como base para a colocação das resistências e do alumínio que simula o tubo, é fundamentada nas suas características térmicas, com um máximo de 100°C. Como a temperatura que se pretende simular é de 41 °C, a sua aplicação é viável. Uma alternativa pensada antes foi o teflon, sem dúvida um material com melhores características térmicas que o nylon, mas cujo preço se revelou proibitivo, na ordem das 5 vezes o preço do nylon.



a)



b)

Figura 3.23 Suportes em acrílico para a base do dispositivo: a) aletas de fixação; b) furação para posicionamento da base.



a)



b)

Figura 3.24 a) fixação do dispositivo à base de suporte; b) vista lateral da base de suporte, já com o dispositivo fixado.

As versatilidades de utilização do acrílico (figuras 3.23 e 3.24), associando as suas características mecânicas à facilidade de ser trabalhado, foram factores que foram tidos em conta na concepção do suporte, permitindo que a base do dispositivo rode segundo um eixo simulando as faces do tubo octogonal.

Foram utilizadas resistências cerâmicas acopladas por baixo da placa de alumínio que simula a parede do tubo octogonal (figura 3.25, a) e b)).

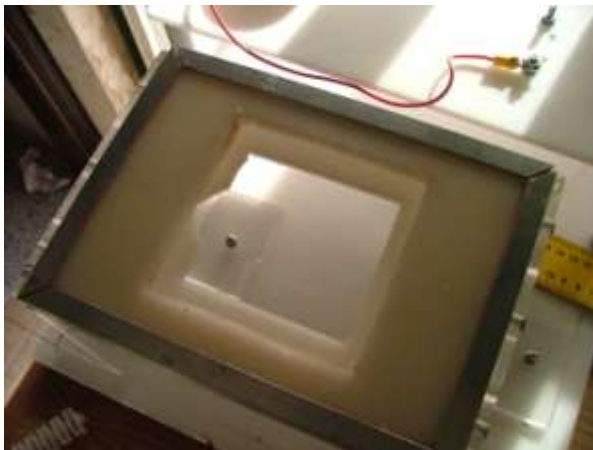


a)



b)

Figura 3.25 a) resistências eléctricas de aquecimento; b) colocação das resistências eléctricas, fixadas ao alumínio.



a)



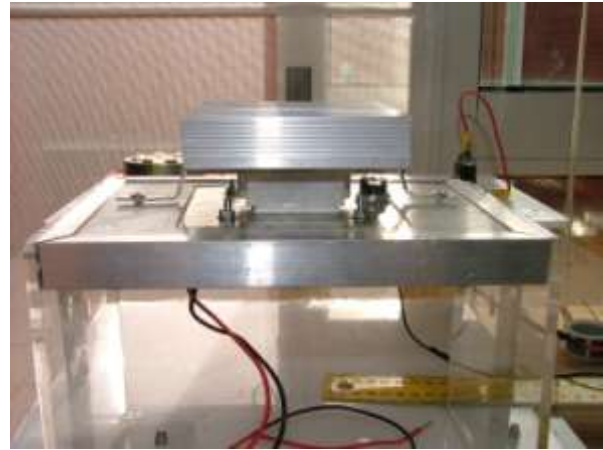
b)

Figura 3.26 a) furação na base em nylon para instalação das resistências; b) colocação do termostato na base de alumínio.

A instalação de um termostato, no circuito de aquecimento, como pode ser visualizado na figura 3.26, é uma protecção quer eléctrica, quer mecânica, para que o dispositivo não sofra aquecimentos superiores àqueles que são necessários, actuando no corte da corrente eléctrica de alimentação às resistências de aquecimento.



a)



b)

Figura 3.27 a) pastilha de Peltier fixada no dissipador de calor; b) fixação da pastilha de Peltier ao dispositivo.

Foi efectuada uma aplicação de massa térmica entre a célula de Peltier e a base de alumínio e também entre o dissipador de calor e a célula de Peltier, garantindo assim uma boa condutividade térmica entre os elementos que constituem o dispositivo gerador termoelétrico (figura 3.27).



a)



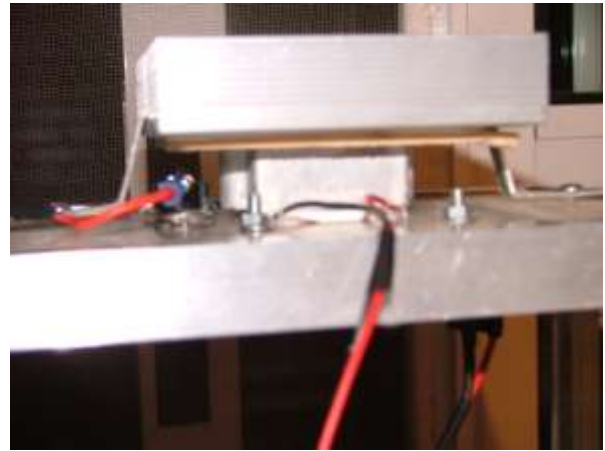
b)

Figura 3.28 a) vista de cima do dissipador de calor já instalado; b) base de controlo e medição - ligações eléctricas.

Depois da montagem da célula e respectivo dissipador, passou-se à montagem do circuito de comando e controlo (figura 3.28), ficando instalados na placa os pontos de ligação do amperímetro e voltímetro bem como o botão para ligar e desligar as resistências de aquecimento (figura 3.29).



a)



b)

Figura 3.29 a) base de controlo e medição - vista de cima; b) célula de Peltier e dissipador de calor - vista de lado.



Figura 3.30 Dispositivo de simulação do tubo octogonal.

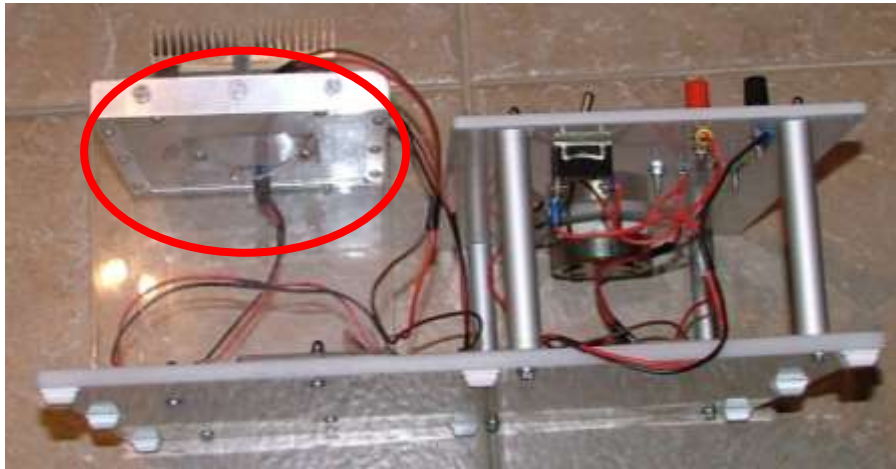


Figura 3.31 Dispositivo de simulação do tubo octogonal.

O dispositivo depois de terminado a sua construção apresenta o aspecto das figuras 3.31 a 3.33, podendo ser ensaiado de acordo com o explanado anteriormente, rodando a posição do suporte em torno da furação efectuada nos suportes de acrílico (figura 3.31, círculo vermelho).



Figura 3.32 Pormenor do dissipador.

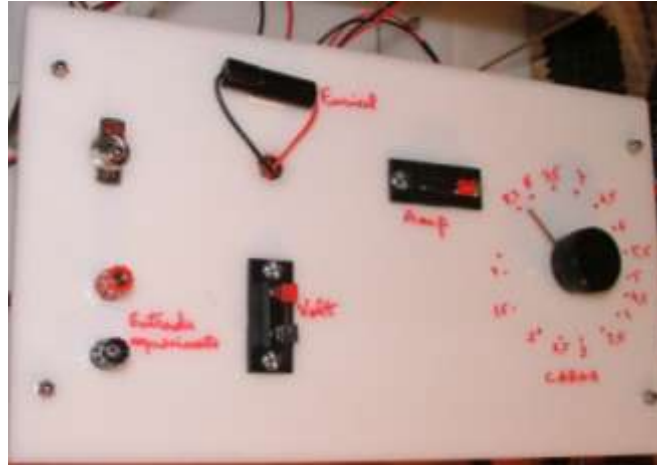


Figura 3.33 Pannel de medição e controlo do dispositivo.

Para a execução dos ensaios foi utilizada uma fonte de alimentação dupla, com capacidade de ajuste em tensão e intensidade medida, figura 3.34, sendo estes parâmetros ajustados para atingir a temperatura de referência de $41,1^{\circ}\text{C}$. O controlo desta temperatura foi efectuado por ajuste do termóstato instalado e calibrado para 40°C .

O ensaio foi efectuado em laboratório, sem movimentação da massa de ar em redor do dispositivo, o que desde logo leva à assumption de um erro face às condições práticas, em que a movimentação da massa de ar leva a um aumento substancial da transferência de calor, por convecção do dissipador para o ar, aumentando o rendimento do gerador termoelétrico.

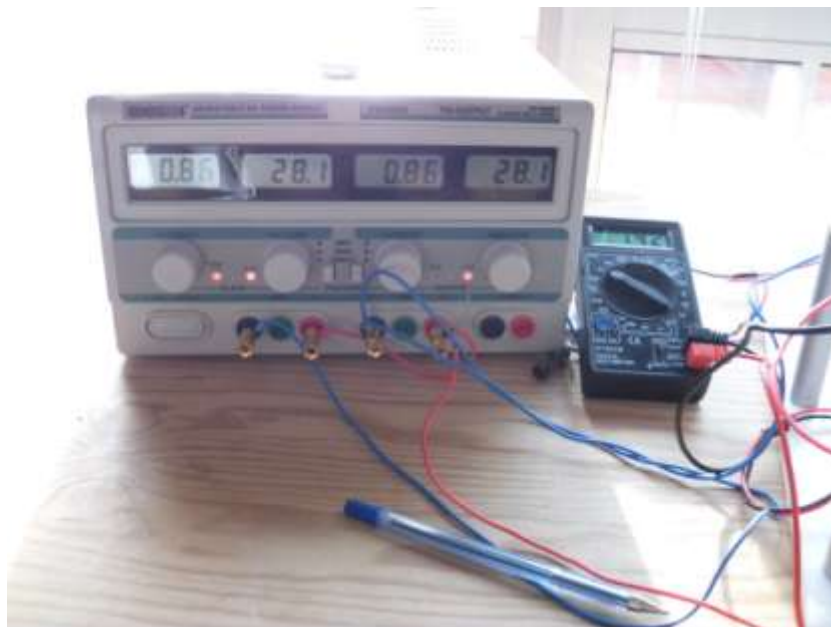


Figura 3.34 Fonte de alimentação utilizada nos ensaios.



Figura 3.35 Medição da temperatura, durante os ensaios efectuados.

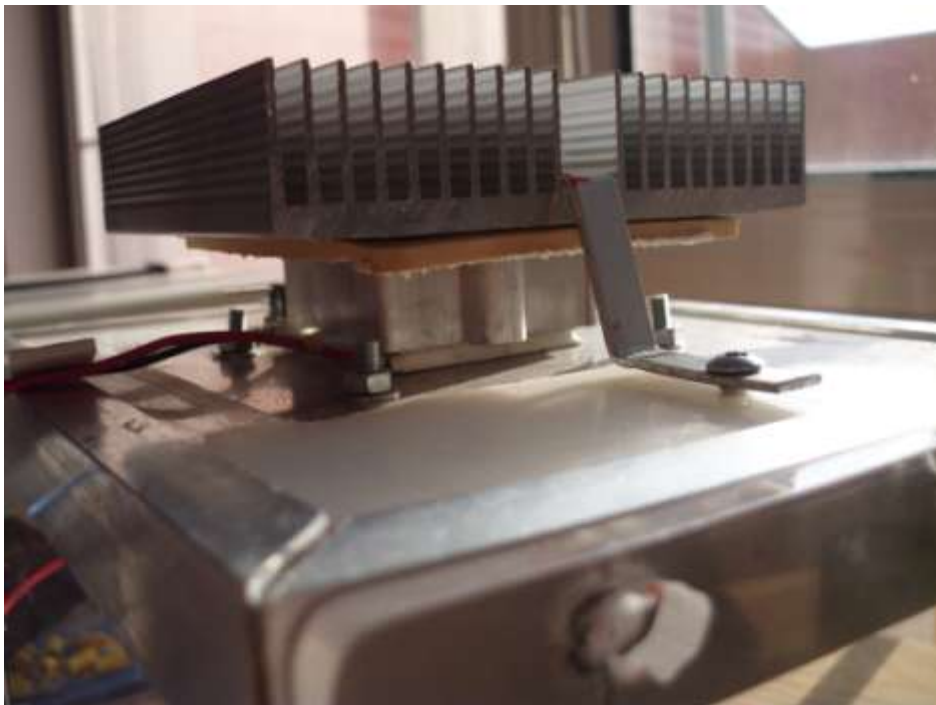


Figura 3.36 Pormenor do dissipador de calor com a célula de Peltier por baixo.

3.7. Recolha de Dados dos Ensaio

Para efectuar a recolha de dados e cálculo do rendimento do módulo, operando em condições descritas, foram definidos os pontos de recolha da temperatura, tensão e corrente.

Assim, para a temperatura, recolheu-se as seguintes temperaturas:

- Temperatura da chapa de alumínio, simulando a temperatura do tubo de alumínio;
- Temperatura da face da célula de Peltier, em contacto com o tubo de alumínio;
- Temperatura da face superior da célula de Peltier;
- Temperatura do dissipador, no seu topo.

Os pontos de leitura da temperatura encontram-se identificados na figura 3.37.



Figura 3.37 Localização, no dispositivo, dos pontos de medição da temperatura.

Assume-se que o erro associado às leituras efectuadas, devido à inexactidão do ponto de leitura e também ao erro do instrumento de medida, tem um impacto insignificante nas leituras efectuadas, bem como nos cálculos em que estes foram utilizados.

De seguida, referem-se as leituras efectuadas e cálculo de rendimento.

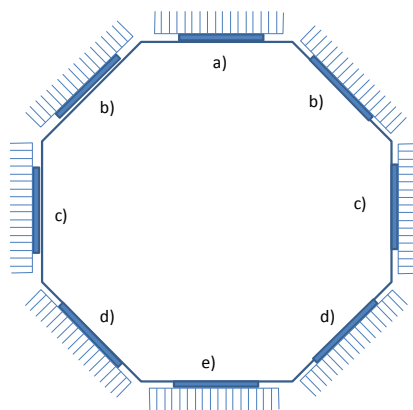
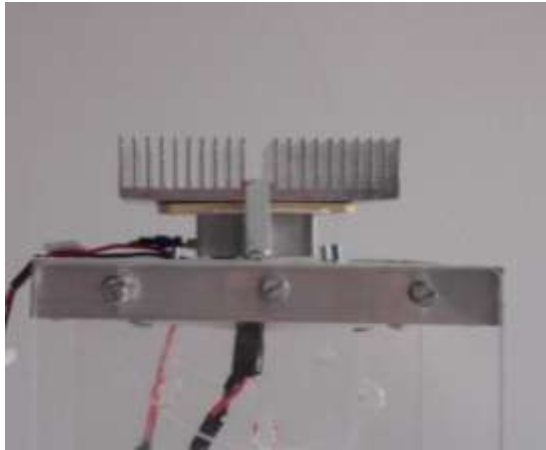


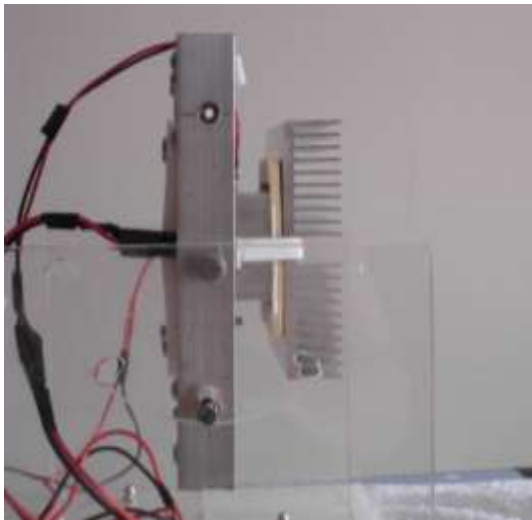
Figura 3.38 medições efectuadas simulando cada uma das faces diferentes do octógono.



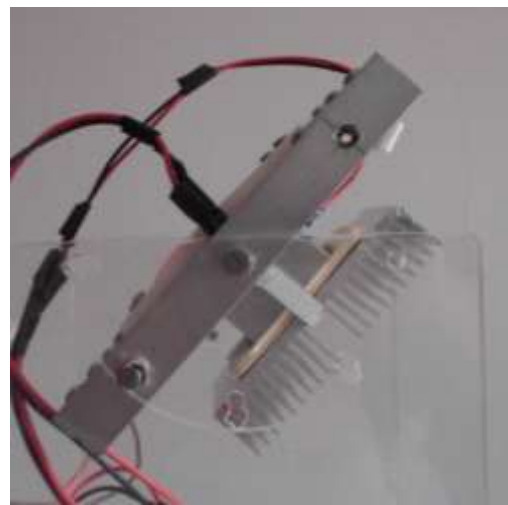
a)



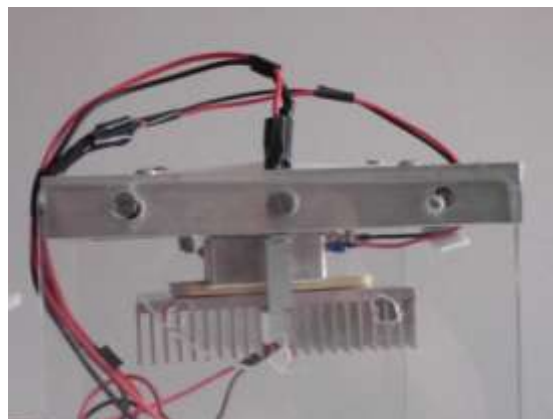
b)



c)



d)



e)

Figura 3.39 Posição do dispositivo em fase de teste. a) horizontal; b) 45° com a horizontal; c) vertical; d) 45° com a vertical; e) horizontal invertido.

Nas tabelas de recolha de dados, que se reproduzem de seguida (tabelas 3.2 a 3.6), os cálculos foram efectuados tendo em consideração as seguintes fórmulas:

- Potência eléctrica da Carga

$$P = U.I$$

- Potência Térmica

$$P_t = \frac{\Delta T}{\theta}$$

- Rendimento

$$\eta = \frac{P}{P_t}$$

Tabela 3.2 Ensaio com o dispositivo na horizontal

Ensaio da Célula de Peltier

1. Características do Ensaio

Posição do dispositivo	Horizontal a)
Tensão de alimentação das resistências de aquecimento	31,5 V
Corrente de alimentação das resistências de aquecimento	1,92 A

2. Medições Efectuadas

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Temp Tubo (base alum.) [°C]	Temp. Dissipador [°C]	
				Base	Topo
0,0	0	380	40,0	40,0	29,6
0,5	224	250	40,2	37,4	31,4
1,0	228	380	40,4	38,6	30,0
1,5	311	350	40,9	39,1	30,7
2,0	579	310	41,4	41,4	31,3
2,5	724	300	41,7	41,7	31,3
3,0	847	280	42,0	39,6	31,5
3,5	975	260	41,9	41,0	32,0
4,0	1054	250	41,8	39,8	32,2
4,5	1100	240	42,8	42,4	32,2
5,0	1103	210	42,8	42,7	32,5
5,5	1160	200	42,8	42,5	32,5
6,0	1260	200	42,8	42,8	32,3
6,5	1323	197	41,8	39,8	32,8
7,0	1448	189	41,2	39,8	33,3
7,5	1475	178	41,0	39,8	33,2
8,0	1503	172	41,1	39,8	31,9
8,3	1525	167	41,1	39,8	31,8
C. Aberto	2400	0	40,8	40,0	29,6

3. Cálculos de Potência e rendimento

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência da Carga [W]	Potência Térmica [W]	Rendimento [%]
0,0	0	380	0,0000	3,045	0,00%
0,5	224	250	0,0560	5,985	0,94%
1,0	228	380	0,0866	5,355	1,62%
1,5	311	350	0,1089	6,405	1,70%
2,0	579	310	0,1795	6,300	2,85%
2,5	724	300	0,2172	7,245	3,00%
3,0	847	280	0,2372	7,140	3,32%
3,5	975	260	0,2535	7,035	3,60%
4,0	1054	250	0,2635	7,035	3,75%
4,5	1100	240	0,2640	4,725	5,59%
5,0	1103	210	0,2316	5,145	4,50%
5,5	1160	200	0,2320	5,145	4,51%
6,0	1260	200	0,2520	5,040	5,00%
6,5	1323	197	0,2606	4,877	5,34%
7,0	1448	189	0,2737	4,387	6,24%
7,5	1475	178	0,2626	4,527	5,80%
8,0	1503	172	0,2585	5,927	4,36%
8,3	1525	167	0,2547	6,067	4,20%
C. Aberto	2400	0	0,0000	0,000	0,00%
		médias	0,217177	5,632	3,68%

Tabela 3.3 Ensaio com o dispositivo num ângulo de 45° com a horizontal

Ensaio da Célula de Peltier

1. Características do Ensaio

Posição do dispositivo	45° c/ horizontal
Tensão de alimentação das resistências de aquecimento	31,5 V
Corrente de alimentação das resistências de aquecimento	1,92 A

2. Medições Efectuadas

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Temp Tubo (base alum.) [°C]	Temp. Dissipador [°C]	
				Base	Topo
0,0	0	412	41,5	41,1	35,5
0,5	226	390	41,1	41,1	35,1
1,0	232	381	41,4	40,4	35,6
1,5	314	351	40,9	39,6	34,5
2,0	581	312	40,9	40,4	34,8
2,5	726	301	41,8	41,4	35,9
3,0	849	281	41,5	40,5	36,2
3,5	979	262	41,8	41,5	35,4
4,0	1057	253	41,7	40,0	35,4
4,5	1102	242	42,5	42,5	35,2
5,0	1105	212	42,5	41,5	34,7
5,5	1164	202	41,2	39,2	35,3
6,0	1262	201	41,9	39,9	35,4
6,5	1326	199	41,1	40,1	35,5
7,0	1450	190	41,3	39,3	35,1
7,5	1477	180	41,5	41,5	35,9
8,0	1507	173	41,6	40,6	36,0
8,3	1528	169	42,1	41,1	36,6
C. Aberto	2480	0	42,0	41,1	35,5

3. Cálculos de Potência e rendimento

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência da Carga [W]	Potência Térmica [W]	Rendimento [%]
0,0	0	412	0	0	0,00%
0,5	226	390	0,088140	6,300	1,40%
1,0	232	381	0,088392	5,040	1,75%
1,5	314	351	0,110057	5,355	2,06%
2,0	581	312	0,181272	5,880	3,08%
2,5	726	301	0,218526	5,775	3,78%
3,0	849	281	0,238145	4,515	5,27%
3,5	979	262	0,256498	6,405	4,00%
4,0	1057	253	0,267421	4,830	5,54%
4,5	1102	242	0,266684	7,665	3,48%
5,0	1105	212	0,234260	7,140	3,28%
5,5	1164	202	0,235128	4,095	5,74%
6,0	1262	201	0,253031	4,725	5,36%
6,5	1326	199	0,263874	4,830	5,46%
7,0	1450	190	0,274775	4,410	6,23%
7,5	1477	180	0,265860	5,880	4,52%
8,0	1507	173	0,259958	4,830	5,38%
8,3	1528	169	0,258232	4,725	5,47%
C. Aberto	2480	0	0	0	0,00%
médias			0,221191	5,460	3,99%

Tabela 3.4 Ensaio com o dispositivo vertical

Ensaio da Célula de Peltier

1. Características do Ensaio

Posição do dispositivo	Vertical
Tensão de alimentação das resistências de aquecimento	31,5 V
Corrente de alimentação das resistências de aquecimento	1,92 A

2. Medições Efectuadas

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Temp Tubo (base alum.) [°C]	Temp. Dissipador [°C]	
				Base	Topo
0,0	0	405,00	40,3	39,3	34,1
0,5	145	382,40	40,0	40,0	34,4
1,0	175	375,70	40,1	41,1	36,8
1,5	263	346,80	41,1	40,1	35,0
2,0	535	309,50	41,8	41,6	35,3
2,5	691	299,50	41,8	41,3	35,6
3,0	821	279,90	41,9	41,7	35,2
3,5	955	262,20	42,3	40,7	35,5
4,0	1037	253,40	42,9	40,9	34,7
4,5	1095	243,30	41,9	40,4	34,6
5,0	1098	214,20	41,8	40,2	34,5
5,5	1166	203,70	42,1	39,1	34,2
6,0	1268	202,20	40,7	39,7	34,4
6,5	1336	200,40	41,5	41,0	34,3
7,0	1460	190,90	41,5	39,5	35,4
7,5	1493	181,70	41,8	40,3	34,2
8,0	1537	174,50	40,4	39,5	33,7
8,3	1563	170,90	40,9	39,9	33,2
C. Aberto	2320	0	41,3	39,3	34,1

3. Cálculos de Potência e rendimento

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência da Carga [W]	Potência Térmica [W]	Rendimento [%]
0,0	0	405,00	0,00000	5,437	0,00%
0,5	145	382,40	0,05545	5,857	0,95%
1,0	175	375,70	0,06575	4,492	1,46%
1,5	263	346,80	0,09121	5,332	1,71%
2,0	535	309,50	0,16558	6,592	2,51%
2,5	691	299,50	0,20695	5,962	3,47%
3,0	821	279,90	0,22980	6,802	3,38%
3,5	955	262,20	0,25040	5,437	4,61%
4,0	1037	253,40	0,26278	6,487	4,05%
4,5	1095	243,30	0,26641	6,067	4,39%
5,0	1098	214,20	0,23519	5,962	3,95%
5,5	1166	203,70	0,23751	5,122	4,64%
6,0	1268	202,20	0,25639	5,542	4,63%
6,5	1336	200,40	0,26773	7,012	3,82%
7,0	1460	190,90	0,27871	4,282	6,51%
7,5	1493	181,70	0,27128	6,382	4,25%
8,0	1537	174,50	0,26821	6,067	4,42%
8,3	1563	170,90	0,26712	7,012	3,81%
C. Aberto	2320	0	0,00000	5,437	0,00%
		médias	0,21626319	5,880	3,47%

Tabela 3.5 Ensaio com o dispositivo a 45° com a vertical

Ensaio da Célula de Peltier

1. Características do Ensaio

Posição do dispositivo	45° c/ vertical
Tensão de alimentação das resistências de aquecimento	31,5 V
Corrente de alimentação das resistências de aquecimento	1,92 A

2. Medições Efectuadas

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Temp Tubo (base alum.) [°C]	Temp. Dissipador [°C]	
				Base	Topo
0,0	0	420,00	42,0	41,8	38,0
0,5	114	368,50	42,0	42,0	36,3
1,0	131	362,60	41,9	42,2	36,3
1,5	229	331,70	42,5	42,3	36,7
2,0	498	294,20	42,4	41,8	37,8
2,5	638	286,60	42,7	42,3	36,5
3,0	758	267,60	42,5	40,4	36,4
3,5	880	251,10	42,2	40,0	34,3
4,0	960	243,80	43,0	43,0	37,2
4,5	1010	233,50	42,1	41,1	36,4
5,0	1011	204,30	41,6	39,6	33,4
5,5	1084	192,80	41,5	40,5	35,3
6,0	1175	193,00	42,1	41,7	35,4
6,5	1245	191,60	42,0	41,7	36,1
7,0	1369	182,40	42,0	42,1	36,2
7,5	1399	173,80	42,2	41,8	36,7
8,0	1438	166,90	42,4	43,0	35,9
8,3	1463	163,30	42,5	42,7	35,5
C. Aberto	2050	0	42,3	41,8	38,0

3. Cálculos de Potência e rendimento

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência da Carga [W]	Potência Térmica [W]	Rendimento [%]
0,0	0	420,00	0,00000	3,938	0,00%
0,5	114	368,50	0,04201	5,985	0,70%
1,0	131	362,60	0,04750	6,195	0,77%
1,5	229	331,70	0,07596	5,880	1,29%
2,0	498	294,20	0,14651	4,148	3,53%
2,5	638	286,60	0,18285	6,038	3,03%
3,0	758	267,60	0,20284	4,200	4,83%
3,5	880	251,10	0,22097	5,933	3,72%
4,0	960	243,80	0,23405	6,038	3,88%
4,5	1010	233,50	0,23584	4,883	4,83%
5,0	1011	204,30	0,20655	6,458	3,20%
5,5	1084	192,80	0,20900	5,460	3,83%
6,0	1175	193,00	0,22678	6,563	3,46%
6,5	1245	191,60	0,23854	5,828	4,09%
7,0	1369	182,40	0,24971	6,143	4,07%
7,5	1399	173,80	0,24315	5,303	4,59%
8,0	1438	166,90	0,24000	7,403	3,24%
8,3	1463	163,30	0,23891	7,508	3,18%
C. Aberto	2050	0	0,00000	3,938	0,00%
		médias	0,19067	5,772	3,12%

Tabela 3.6 Ensaio com o dispositivo na horizontal (invertido - dissipador para baixo)

Ensaio da Célula de Peltier

1. Características do Ensaio

Posição do dispositivo	Horizontal Invertido
Tensão de alimentação das resistências de aquecimento	31,5 V
Corrente de alimentação das resistências de aquecimento	1,92 A

2. Medições Efectuadas

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Temp Tubo (base alum.) [°C]	Temp. Dissipador [°C]	
				Base	Topo
0,0	0	467,00	38,1	38,1	28,5
0,5	370	454,46	42,2	41,2	27,9
1,0	427	449,16	41,9	41,8	27,8
1,5	591	413,16	41,8	41,3	27,8
2,0	915	371,46	41,8	41,0	28,1
2,5	1098	360,46	42,0	40,9	27,8
3,0	1258	338,76	42,0	41,7	27,7
3,5	1425	318,36	41,6	38,6	27,6
4,0	1533	309,26	41,6	40,6	27,7
4,5	1613	296,36	41,4	40,4	27,7
5,0	1634	266,06	42,5	41,5	27,5
5,5	1739	251,86	42,8	39,8	27,3
6,0	1864	249,36	41,6	40,6	27,7
6,5	1959	245,86	41,8	39,8	26,4
7,0	2109	234,46	41,6	40,6	26,7
7,5	2159	223,76	41,4	40,4	27,6
8,0	2218	214,96	41,9	40,9	27,6
8,3	2255	210,36	41,6	40,6	27,2
C. Aberto	1890	0	42,1	42,1	28,5

3. Cálculos de Potência e rendimento

Resistência de Carga [Ω]	Tensão [mV]	Corrente [mA]	Potência da Carga [W]	Potência Térmica [W]	Rendimento [%]
0,0	0	467,00	0,00000	18,573	0,00%
0,5	370	454,46	0,16833	12,624	1,33%
1,0	427	449,16	0,19197	13,289	1,44%
1,5	591	413,16	0,24401	12,814	1,90%
2,0	915	371,46	0,33992	12,244	2,78%
2,5	1098	360,46	0,39586	12,434	3,18%
3,0	1258	338,76	0,42609	13,289	3,21%
3,5	1425	318,36	0,45379	10,403	4,36%
4,0	1533	309,26	0,47419	12,244	3,87%
4,5	1613	296,36	0,47788	12,054	3,96%
5,0	1634	266,06	0,43463	13,289	3,27%
5,5	1739	251,86	0,43804	11,864	3,69%
6,0	1864	249,36	0,46473	12,244	3,80%
6,5	1959	245,86	0,48174	12,683	3,80%
7,0	2109	234,46	0,49436	13,158	3,76%
7,5	2159	223,76	0,48315	12,149	3,98%
8,0	2218	214,96	0,47677	12,624	3,78%
8,3	2255	210,36	0,47441	12,719	3,73%
C. Aberto	1890	0	0,00000	18,573	0,00%
		médias	0,407051	12,817	3,10%

A tabela abaixo indica os cálculos já efectuados para o conjunto das faces, considerando um gerador termoelétrico com 8 células de Peltier (uma em cada face do octógono).

Tabela 3.7 Calculo da Potência máxima no tubo octogonal.

Potência máxima (watts)						
	a)	b)	c)	d)	e)	
Posição	H	2 x 45°	2 x 90°	2 x 135°	H-1	Total
Resistência	0	0	0	0	0	0,000000
0,5	0,056	0,17628	0,110896	0,084018	0,168333	0,595527
1	0,08664	0,176784	0,131495	0,095001	0,191972	0,681892
1,5	0,10885	0,220114	0,182417	0,151919	0,244013	0,907312
2	0,17949	0,362544	0,331165	0,293023	0,339923	1,506145
2,5	0,2172	0,437052	0,413909	0,365702	0,395856	1,829719
3	0,23716	0,476289	0,459596	0,405682	0,426091	2,004818
3,5	0,2535	0,512996	0,500802	0,441936	0,453789	2,163023
4	0,2635	0,534842	0,525552	0,468096	0,474187	2,266177
4,5	0,264	0,533368	0,532827	0,47167	0,477879	2,279744
5	0,23163	0,46852	0,470383	0,413095	0,434635	2,018262
5,5	0,232	0,470256	0,475028	0,41799	0,438035	2,033310
6	0,252	0,506062	0,512779	0,45355	0,464733	2,189124
6,5	0,260631	0,527748	0,535469	0,477084	0,48174	2,282672
7	0,273672	0,54955	0,557428	0,499411	0,494362	2,374423
7,5	0,26255	0,53172	0,542556	0,486292	0,483147	2,306265
8	0,258516	0,519915	0,536413	0,480004	0,476766	2,271614
8,3	0,254675	0,516464	0,534233	0,477816	0,474411	2,257599

Máximo

2,374423

Os cálculos efectuados e apresentados na tabela anterior, dizem respeito a uma posição do tubo octogonal horizontal. Analisou-se posteriormente, a alteração para o tubo octogonal passar a ser vertical em vez de horizontal, favorecendo, potencialmente, a circulação natural de ar nos dissipadores de calor. Assim, as potências calculadas passam a ser todas iguais em cada uma das faces do tubo octogonal, e igual à alínea c) na tabela 3.7.

Tabela 3.8 Potência máxima no tubo octogonal numa posição vertical.

Potência Máxima (Watts)

Posição	Vertical
Resistência	Potência
0	0
0,5	0,4435840
1	0,5259800
1,5	0,7296672
2	1,3246600
2,5	1,6556360
3	1,8383832
3,5	2,0032080
4	2,1022064
4,5	2,1313080
5	1,8815328
5,5	1,9001136
6	2,0511168
6,5	2,1418752
7	2,2297120
7,5	2,1702248
8	2,1456520
8,3	2,1369336

Máximo

2,229712

Verifica-se que não há melhoria da potência, pela alteração da posição da instalação do tubo octogonal.

Verifica-se também que o rendimento do dispositivo é idêntico numa posição ou em outra, uma vez que a dissipação do calor na posição vertical é menor que na posição horizontal (calor tem tendência a subir, sendo na posição vertical impedido de o efectuar na totalidade – efeito de chaminé).

Os custos associados a implementação do tubo octogonal são os constantes na tabela abaixo:

Tabela 3.9 Custos associados ao projecto

Item	Quantidade [un]	Preço Unitário [€]	Custo Total [€]
Tubo octogonal em alumínio com 1,2 metros de comprimento	1	150,00 €	150,00 €
Células de Peltier com 1x 1"	80	40,00 €	3.200,00 €
Dissipador em alumínio com 1,2 metros de comprimento e 10 cm de largura	8	150,00 €	1.200,00 €
Termal compound	4	10,00 €	40,00 €
Instalação	1	200,00 €	200,00 €
Total			4.790,00 €

Uma vez que o dispositivo terá uma capacidade de produção 80 células dispostas em 10 anéis de 8 pastilhas cada:

$$E = 2,374423 \times 1 \times 10$$

$$E = 23,74 \text{ W.h}$$

a energia produzida num ano é de

$$E = 23,74 \times 24 \times 365$$

$$E = 208 \text{ kWh}$$

considerando que o custo do kWh é de 0,16 €, considerando já todas as taxas de potência incluídas, no período de um ano, a energia eléctrica produzida pela implementação das células de Peltier será de

$$208 \times 0,16 = 33,28 \text{ €}$$

o investimento não é rentável face a estes números, considerando o total financeiro que é necessário recuperar e o número de anos de recuperação do investimento, que se apresenta de seguida:.

A rentabilidade do investimento (ROI) será de

$$\text{ROI} = 33,28 / 4790 = 0,0069$$

$$\text{ROI} = 0,69\%$$

O período de recuperação do investimento será

$$\text{PRI} = 4790 / 33,28$$

$$\text{PRI} = 143 \text{ anos}$$

3.8. Verificação dos Objectivos Estabelecidos

- Aumento do rendimento do processo (global) pela redução dos desperdícios energéticos:

Verifica-se a recuperação de 208 kWh de energia que é desperdiçada pela diluição na atmosfera (transferência de calor para o ar).

- Redução do consumo de energia eléctrica no processo

Embora não muito significativo face ao consumo de energia eléctrica da empresa – segundo dados não oficializados de 150 MWh por ano (17.123 kWh por cada hora de consumo) – representa uma redução mínima, no consumo de energia eléctrica, no entanto ainda aproveitável.

- Redução de custos de manutenção preventiva do equipamento

Dada a fiabilidade dos dispositivos termo geradores, garantindo mais de um milhão de horas de funcionamento contínuas, sem falhas, a robustez do sistema sugerido é bastante elevada. O impacto da recuperação de energia desperdiçada não tem qualquer relacionamento com a manutenção preventiva, pelo que este objectivo não tem razão para ter sido estabelecido.

Para que o sistema tivesse impacto na manutenção preventiva teria de haver um aumento do indicador MTBF (mean time between failures – tempo médio entre falhas), e este apenas seria conseguido caso a temperatura do fluido R404 baixasse após a passagem no dispositivo de recuperação de energia, tendo como consequência a redução da exigência (embora diminuta) solicitada à torre de arrefecimento e indirectamente na manutenção preventiva da mesma. Considera-se que esta poderá, no futuro ser uma situação que seja objecto de estudo.

- Redução da emissão de CO₂

A emissão de CO₂ considerada é devida às centrais geradoras de energia eléctrica. Segundo o Anexo técnico às instruções do modelo de PAES (Pacto de Autarcas para as Energias Sustentáveis) - Factores de emissão, o valor do Factor de emissão nacional para o consumo de electricidade, considerando a análise de ciclo de vida é de 0,750 t CO₂-eq/MWh_e. Assim, para a produção da energia recuperada obtemos 155,6 kg de CO₂ que não é emitido.

Mas estamos a falar apenas na relação entre o CO₂ e a produção de electricidade, porque se caminhararmos para montante do sistema, considerando que apenas 13% do valor energético do combustível é transformado em electricidade, obtemos já uma diminuição significativa (ou não emissão) de 889,2 kg CO₂ na queima de combustível. Terá de ser considerada nesta equação de que falamos da importação de combustível – terá impacto na balança de transacções – e também no processo de obtenção desse mesmo combustível (gás natural, petróleo ou carvão) nos países de origem.

Sendo uma matéria de sensível discussão, consideramos apenas que a redução da emissão de CO₂ pela implementação do sistema de recuperação de energia é um objectivo totalmente alcançado.

4. Conclusões e perspectivas de Desenvolvimento Futuro

4.1. Introdução

Nesta dissertação pretendeu-se estudar a viabilidade de utilização de células de Peltier como gerador termoeléctrico, numa perspectiva de aproveitamento de um desperdício energético. Pretendeu-se também contribuir para uma alternativa à geração de energia eléctrica, recorrendo a fontes energéticas já existentes mas não utilizadas.

Neste capítulo estabelecer-se-á as principais conclusões do estudo bem como a indicação de perspectivas de trabalho futuro, deixando uma porta aberta para se voltar a realizar este mesmo estudo já com outras condições de desenvolvimento tecnológico.

4.2. Conclusões

O objectivo principal desta dissertação residiu na proposta de recuperação alternativa de energia térmica desperdiçada num processo industrial, para geração de energia eléctrica através da utilização de células de Peltier funcionando segundo o efeito de Seebeck.

A solução proposta apresenta vários benefícios, desde logo a recuperação de energia desperdiçada e melhoria, embora indirectamente, do rendimento dos processos e redução da emissão de CO₂.

A simplicidade de aplicação é sem sombra de dúvidas uma vantagem, bem como a rápida colocação em serviço dos sistemas estudados. Com o desenvolvimento deste estudo pode-se concluir que a implementação de sistemas de recuperação de energia térmica através da utilização de células de Peltier é possível mas tem um investimento muito elevado face à energia recuperada. No entanto, se pensarmos em sistemas críticos, este investimento não é elevado. O custo de implementação pode vir a descer, num futuro próximo com o desenvolvimento de novos materiais e novas técnicas de aproveitamento do calor, segundo a aplicação de geradores termoeléctricos seguindo o mesmo processo.

O estudar a possibilidade de implementação de um dispositivo de recuperação de energia, foi desafiante desde o início, com a formulação de várias alternativas, e a construção do dispositivo de simulação do tubo de recuperação de energia foi das actividades que mais empenho mostrou ser necessário. Por um lado permitiu comparar o estudo teórico com a simulação e por outro deixou

visíveis as necessidades de otimização necessárias e que foram efectuadas aos parâmetros identificados, para a melhoria do rendimento do sistema.

O armazenamento da energia eléctrica, utilizando baterias para o efeito, afigura-se como uma forte possibilidade para utilização futura da energia não consumida.

4.3. Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

A complexidade das medições efectuadas levanta algumas dúvidas quanto ao rendimento atingido, sendo este um dos desafios para futuro – a utilização de sensores de temperatura, termopares, na aquisição de dados mais fiáveis e confiáveis.

No desenvolvimento, quer da pesquisa de informação, quer na construção do dispositivo utilizado para a obtenção de dados, algumas questões ficaram em aberto, como potenciais possibilidades de melhoria e de otimização do processo. São, então de considerar:

- Aumento do rendimento na dissipação do calor, pela otimização da utilização dos dissipadores de calor
- A utilização de dissipadores de calor lineares e a sua colocação ao redor do tubo, impede que os dispositivos que se encontram na parte inferior do tubo tenham um bom desempenho devido ao efeito de chaminé criado pelos dissipadores que se encontram por cima, impedindo a libertação do calor. O estudo de utilização de dissipadores em anel com circulação natural de ar entre os vários anéis que o compõem poderá ser uma forma de otimizar a transferência de calor para o ar circundante, aumentando assim o rendimento do dispositivo de recuperação de energia. Tal dissipador pode ser idêntico às figuras abaixo:

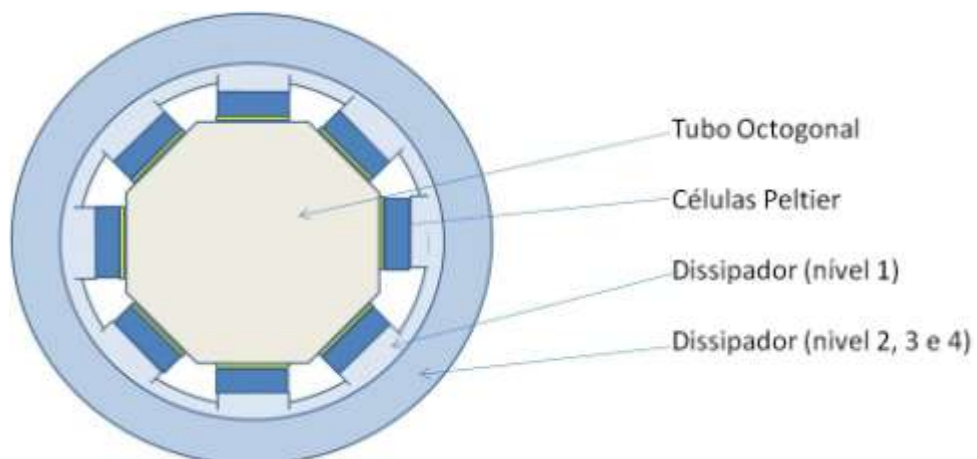


Figura 4.1 Tubo octogonal com dissipador de calor em forma de anel.

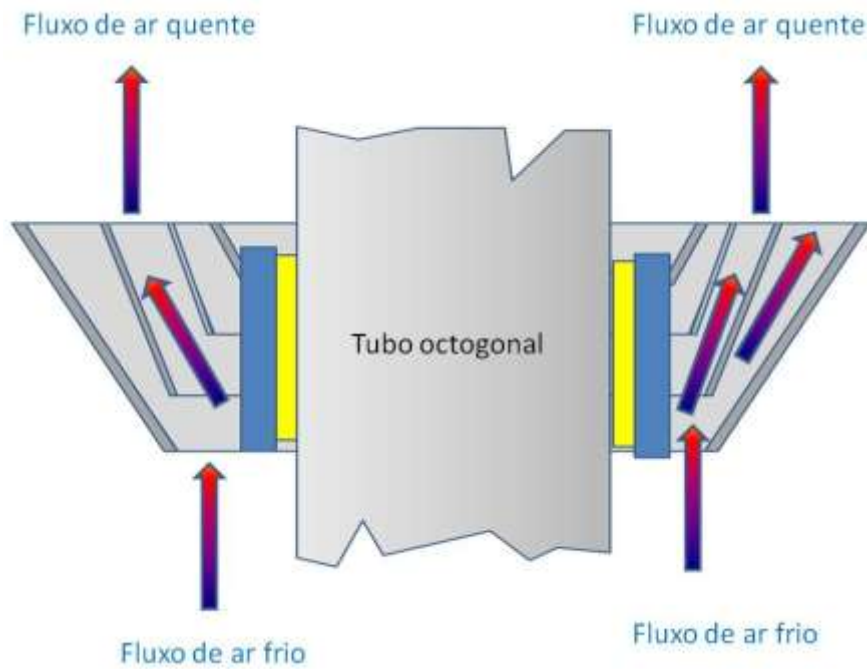


Figura 4.2 Tubo octogonal com dissipador de calor em forma de anel - circulação de ar frio e quente.

Um dos inconvenientes é que este tipo de dissipador apenas admite com a circulação natural um posicionamento do tubo vertical.

- O desenvolvimento de geradores termoelétricos em filme fino (*thin film*), podem ser conseguidas dimensões até 100 vezes mais finos do que um dispositivo de Peltier normal, ou seja coloca na casa dos 0,03 mm de espessura, o que dará um outro sentido à sua aplicação na recuperação de energia, como o caso agora estudado, através da perfeita adaptação do gerador ao tubo redondo, aumentando a superfície de contacto para a totalidade da superfície disponível.

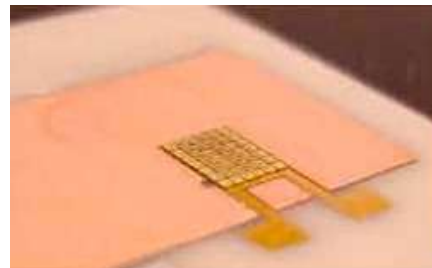
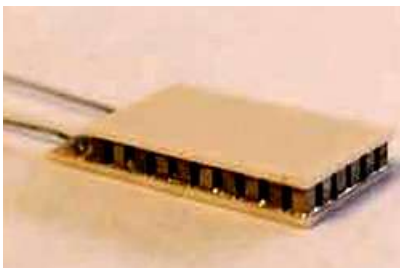


Figura 4.3 Comparação entre um gerador termoelétrico normal e em tecnologia thin film (fonte: (Design, 2011))

- Uma área que está em franco desenvolvimento é designada de nanogeradores, associando as características dos geradores em filme fino e também a dimensão.

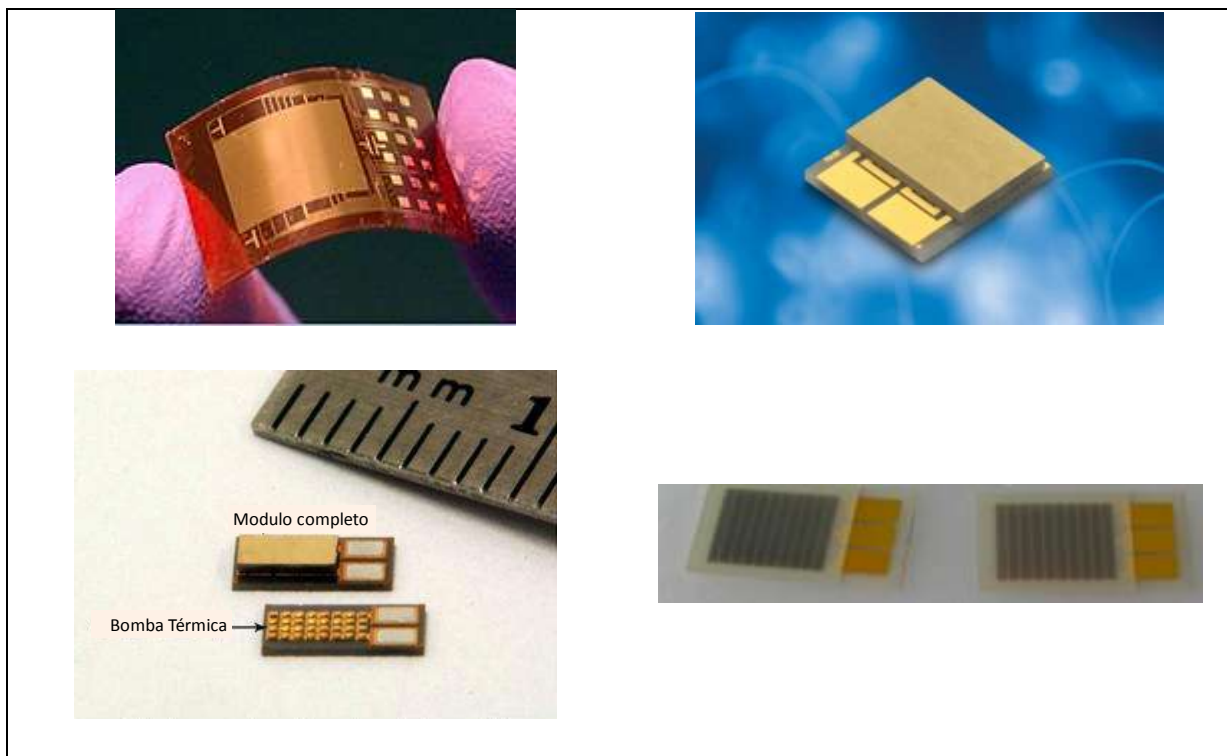


Figura 4.4 - Gerador Termoeléctrico construído em filme fino (fase de produção) (fonte: (Design, 2011))

- Outro caminho poderá ser seguido através do desenvolvimento de materiais termoeléctricos - as skutteruditas – que permitirão a utilização de figuras de mérito muito mais elevadas, com o necessário aumento do rendimento na transformação da energia térmica em energia eléctrica. É este parâmetro que efectivamente inibe que este projecto seja viável do ponto de vista económico. Mas também há alguns anos os painéis fotovoltaicos para a produção de energia eléctrica tinham um preço proibitivo e agora são substancialmente mais baratos graças ao desenvolvimento tecnológico.
- Os materiais utilizados em geradores termoeléctricos apresentam uma figura de mérito ainda muito baixa. Se o desenvolvimento tecnológico melhorar os valores de ZT para valores substancialmente mais elevados, o futuro será a implementação de recuperadores de energia ou geradores termoeléctricos com células de Peltier.

Reconhece-se que ainda existem caminhos a percorrer que sendo complementares ao estudo agora apresentado, poderão melhorar os resultados atingidos agora, dando origem a potenciais contribuições inovadoras.

Terminado este trabalho, espera-se que ele tenha contribuído de alguma forma para um melhor conhecimento de alternativas à geração de energia eléctrica. Interligando os vários componentes abordados neste trabalho, pretende-se promover a utilização dos recursos energéticos desperdiçados ou não aproveitados, contribuindo para um mundo melhor.

Referencias Bibliográficas e Informáticas

- A.P. GONÇALVES, E. L. (Outubro / Dezembro de 2008). NOVOS COMPOSTOS TERMOELÉCTRICOS: UMA POTENCIAL FONTE DE ENERGIA “VERDE”. *Química*, p. 31 a 36.
- Amec Thermasol Heat Management and Thermal Control Solutions - Paste*. (2010). Obtido em 21 de Julho de 2011, de Amec Thermasol:
<http://www.amecthermasol.co.uk/AmecThermasolPaste.html>
- Anacleto, A. M. (2007). *Temperatura e sua medição*. Obtido em 7 de Maio de 2011, de
http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_000355002.pdf:
http://www.fc.up.pt/fcup/contactos/teses/t_000355002.pdf
- Answers Corporation*. (2011). Obtido em 21 de Julho de 2011, de Answers.com (Answers Corporation) - Heat Sink - McGraw-Hill Dictionary of Aviation & Wiki:
<http://www.answers.com/topic/heat-sink>
- Antunes, J. A. (2011). *Reaproveitamento de Calor para Geração de Energia Eléctrica no Automóvel*. Guimarães: Universidade do Minho.
- Bangert, K. (26 de Abril de 2006). Thermopowers. *E-futures*, pp. 1-5.
- Bastos, S. A. (Outubro de 2010). Desenvolvimento de uma pulseira para a geração de energia. *Teste de Mestrado*. Braga: Universidade do Minho.
- Coimbra, F. d. (2007). *Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos*. Obtido em 20 de Julho de 2011, de Início > Processos Químicos > Separações e Operações Unitárias > Transferência de Calor e de Massa > Transferência de Calor :
http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=248&Itemid=422
- Communications, S. (2010). *Soylent Communications*. Obtido em 18 de 8 de 2010, de
<http://www.nndb.com/people/685/000097394/>.
- Design, E. T. (23 de Junho de 2011). *Using new thin-film techniques to manage thermal and energy problems in embedded designs*. Obtido em Junho de 2011, de
<http://www.eetimes.com/design/embedded/4007088/Using-new-thin-film-techniques-to-manage-thermal-and-energy-problems-in-embedded-designs>:
<http://www.eetimes.com/design/embedded/4007088/Using-new-thin-film-techniques-to-manage-thermal-and-energy-problems-in-embedded-designs>
- Ecofan, C. (2007). Obtido em 26 de Julho de 2011, de [ecofan.co.uk](http://www.ecofan.co.uk):
<http://www.ecofan.co.uk/index.html>
- Edu, I. S. (18 de 7 de 2011). *Thermal Energy Conversion*. Obtido em 18 de 7 de 2011, de Program os Excellence EnergyScience: <http://www.energyscience.ilstu.edu/areas/thermal.shtml>

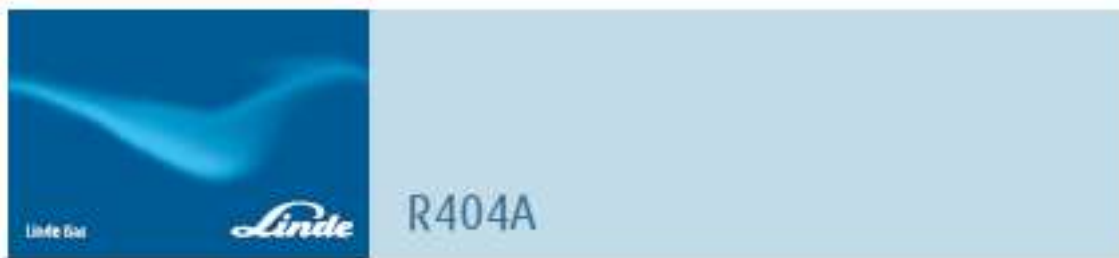
- EFUNDA. (2011). *Thermal Conductivity: ALuminium*. Obtido em 21 de Julho de 2011, de Home Materials: http://www.efunda.com/materials/elements/TC_Table.cfm?Element_ID=al
- Electrolux. (2010). *Sistema distribuição Alimentos Elecrolux*. Obtido em 26 de Julho de 2011, de Comeca.pt: http://www.comeca.pt/Catalogos_electrolux_PDF/MDS_folheto.pdf
- Engelke, K. W. (Janeiro de 2010). NOVEL THERMOELECTRIC GENERATOR FOR STATIONARY POWER WASTE HEAT RECOVERY. Bozeman, Montana, USA: MONTANA STATE UNIVERSITY.
- Gizmodo. (12 de Julho de 2007). *Peltier USB Can Cooler/Heater is a Cup Holder Too*. Obtido em 26 de Julho de 2011, de gizmodo.com: <http://gizmodo.com/277642/peltier-usb-can-coolerheater-is-a-cup-holder-too>
- Goldsmid, H. J. (2009). *Introduction to Thermoelectricity*. New South Wales -Australia: Springer.
- Gonçalves, L. (2008). Tese de Doutoramento. *Microsistema termoeléctrico baseado em teluretos debismuto e antimónio* . Universidade do Minho.
- Group, T. M. (18 de 7 de 2011). *New Thermoelectric Materials*. Obtido em 18 de 7 de 2011, de Everithing is made of everithing: <http://chemgroups.northwestern.edu/kanatzidis/research.html#thermoelectrics>
- HyperPhysics. (s.d.). *HyperPhysics - Referencias Mecânicas*. Obtido em 20 de Julho de 2011, de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mecref.html#c1>
- Jyrki Tervo, A. M. (2009). *State-of-the-art of thermoelectric materials processing - Properties and applications*. Filândia: VTT Technical Research Centre of Finland.
- Learning, N. P. (2011). BASICS OF HEAT TRANSFER- Student_Slides_M1. *Heat and Mass Transfer* . Índia: nptel.
- Lee, S. *THERMOELECTRIC DEVICES*. College of Engineering: University of Hawai`i at Mānoa.
- Materiais, F. -U.-E. (s.d.). *Técnicas de Instrumentação - Tansdutores*. Obtido em 8 de 5 de 2011, de FCT - UNL: <http://disciplinas.dcm.fct.unl.pt/ti/Files/Exercicios/Cap8-Transdutores.pdf>
- Mieg, S. T. (Abril de 2006). Termoelectricidad, la energia del desequilibrio - Los generadores termoelectricos podrian representar en el futuro una importante fuente de energia complementaria. *Técnica Industrial 262* .
- Nolas, G. S., Morelli, D. T., & Tritt, T. M. (1999). *SKUTTERUDITAS:A Phonon-Glass-Electron Crystal - Approach to Advanced Thermoelectric Energy Conversion Applications*. USA: Annual Reviews.
- Piedade, P. M. (1997). Efeitos Termoeléctricos e suas aplicações. *Aquisição e Processamento de Sinais* . IST - Lisboa.
- Pinto, R. (27 de Maio de 2010). *Wikienergia*. Obtido em 18 de Agosto de 2010, de <http://wikienergia.com/~edp/index.php?title=Electricidade>.

- Rowe, D. (2006). *Thermoelectric Handbook - Macro to nano*. Florida - USA: Taylor & Francis Group.
- Semião, V. S. (2009). Transferência de Calor. *Origens Físicas e Equações de Transferência*. Lisboa: IST - Dep. Mecânica.
- Snyder, G. J. (2008). Small Thermoelectric Generators. *The Electrochemical Society Interface • Fall 2008*, pp. 54 - 56.
- Unitemp. (2007). *Temperature Sensors - Standard Thermocouples*. Obtido em 22 de Julho de 2011, de Unitemp: <http://www.unitemp.com/catalogue/sensors-and-transducers/temperature-sensors/standard-thermocouples>
- White, S. B. (2010). *Energy Harvesting for Autonomous Systems*. Norwood - USA: Artech House.

Anexos

Anexo A

Características do Gás R404A



Designação R-404A; HFC-404A

Composição	HFC-125	HFC-134a	HFC-143a
CF ₂ CHF ₂	CF ₂ CHF ₂	CF ₂ CHF ₂	CF ₂ CHF ₂
Pentfluoroetano	1,1,1,2-Tetrafluoroetano	1,1,1-Trifluoroetano	
44 % Peso	4 % Peso	52 % Peso	

Formas de Fornecimento	Garrafas de aço					
	Volumen garrafa litros	Diâmetro mm	Altura total mm	Peso total aprox. cheio kg	Peso da garrafa aprox. vazio (20°C) kg	Conteúdo kg
	12,3	729	494	18	10	10
	41	100	1140	25	10	45

Identificação Garrafa 12,3 litros: corpo e ergia de cor verde claro (RAL 6018) equipada com gata plástica de cor azul (RAL 5012), com etiqueta indicativa.
Garrafa 41 litros: corpo e ergia de cor verde claro (RAL 6018), com etiqueta indicativa.

Classificação de Transporte / ADR Classe 2, 2ª A Nº (ADR) 1117

Conexão Válvula da garrafa de 12,3 litros: rosca macho W 21,8 x 1/14" equipada com adaptador de redução para 1/4" SAE, e dispositivo anti-retorno.
Válvula da garrafa 41 litros: duplo com selo, rosca macho W 21,8 x 1/14" direita (DIN 477 r90)

Características O R-404A é uma mistura de 3 gases refrigerantes liquefeitos do tipo HFC (Hidrofluorcarbono) que não causa destruição da camada de ozônio, tem baixa toxicidade, não é inflamável na presença de ar atmosférico em temperatura inferior a 100 °C e à pressão atmosférica.

Massa molar:	97,6 g/mol	
Ponto de ebulição a 1013 mbars:	Temperatura:	72,75K (-46,4 °C)
	Calor latente de ebulição:	200 kJ/kg
Ponto crítico:	Temperatura:	145,15 K (-72,0 °C)
	Pressão:	37,2 bar
	Densidade:	0,484 kg/dm ³
Líquido líquido a 25 °C:	Densidade:	1,54 kg/dm ³
Vapor saturado:	Densidade:	5,41 kg/m ³
Calor específico a 25 °C:	Estado Líquido:	1,64 kJ/(kg.K)
	Estado Gasoso a 1013 mbars:	0,88 kJ/(kg.K)
Limite de inflamabilidade:	No ar, temperatura ambiente - Nenhum	
ODP (Potencial destruição do ozônio):	0	

Aplicações	<p>O R 404A é recomendado para uso em aplicações de baixa temperatura e de simples estágio (temperatura de evaporação = -45 °C) para refrigeração comercial, industrial e transporte. Pode também ser usada em sistema de cascata, múltiplo estágio ou de injeção de líquido com bons resultados.</p> <p>É também eficiente em alta temperatura (até + 15 °C de evaporação) e permite o uso de compressores do mesmo deslocamento. Ou seja, o R 404A pode ser utilizado em qualquer tipo de sistema com temperatura de evaporação de -45°C até + 15°C.</p>
Substituição de R-502 por R-404A	<p>É possível utilizar o R-404A em sistemas R-502 existentes, efectuando algumas pequenas modificações, especialmente a troca do óleo para POE. No entanto, para a substituição do R-502 desenhava-se especialmente o R-408A como refrigerante específico.</p> <p>De uma forma geral, o R-404A tem um comportamento similar ou mesmo superior ao dos R-502 e R-22 num sistema optimizado.</p>
Sujeito a alterações	0542/04.07

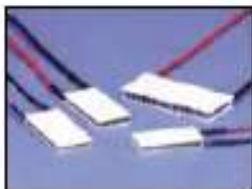
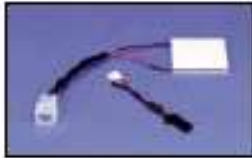


Linde Sogás, Lda.
 Av. Infante D. Henrique, 11, 21/24, 1800-217 Lisboa
 Tel: +351 218 310 424, Fax: +351 218 599 844
 www.linde.pt, comercial@pl.linde-gas.com

Anexo B

Características da Célula de Peltier

CP Series TECs



CP Series Specifications

Catalog Number	Imax (Amps)	Th = 25°C			N	Dimensions (mm)			
		Qmax ¹ (Watts)	Vmax (Volts)	ΔTmax (°C)		A	B	C	D ²
CP0.8-7-06L	2.1	1.0	0.85	67	7	6	6	6	3.4
CP0.8-17-06L	2.1	2.4	2.06	67	17	9	9	9	3.4
CP0.8-31-06L	2.1	4.4	3.75	67	31	12	12	12	3.4
CP0.8-63-06L	2.1	8.0	7.62	67	63	12	25	12	3.4
CP0.8-71-06L	2.1	10.1	8.60	67	71	18	18	18	3.4
CP0.8-127-06L	2.1	18.1	15.40	67	127	25	25	25	3.4
†CP0.8-254-06L	2.1/4.2	36.2	30.8/15.4	67	254	50	25	50	3.4
CP0.8-127-05L	2.6	22.4	15.40	67	127	25	25	25	3.1
†CP0.8-254-05L	2.6/5.2	44.8	30.8/15.4	67	254	50	25	50	3.1
CP1.0-7-08L	2.5	1.2	0.85	67	7	8	8	8	4.0
CP1.0-17-08L	2.5	2.9	2.06	67	17	12	12	12	4.0
CP1.0-31-08L	2.5	5.3	3.75	67	31	15	15	15	4.0
CP1.0-63-08L	2.5	10.6	7.62	67	63	15	30	15	4.0
CP1.0-71-08L	2.5	12.0	8.60	67	71	23	23	23	4.0
CP1.0-127-08L	2.5	21.4	15.40	67	127	30	30	30	4.0
†CP1.0-254-08L	2.5/5.0	42.8	30.8/15.4	67	254	60	30	60	4.0
CP1.0-7-06L	3.0	1.4	0.85	67	7	8	8	8	3.6
CP1.0-17-06L	3.0	3.4	2.06	67	17	12	12	12	3.6
CP1.0-31-06L	3.0	6.3	3.75	67	31	15	15	15	3.6
CP1.0-63-06L	3.0	12.7	7.62	67	63	15	30	15	3.6
CP1.0-71-06L	3.0	14.4	8.60	67	71	23	23	23	3.6
CP1.0-127-06L	3.0	25.7	15.40	67	127	30	30	30	3.6
†CP1.0-254-06L	3.0/6.0	51.4	30.8/15.4	67	254	60	30	60	3.6
CP1.0-7-05L	3.0	1.8	0.85	67	7	8	8	8	3.2
CP1.0-17-05L	3.0	4.5	2.06	67	17	12	12	12	3.2
CP1.0-31-05L	3.0	8.2	3.75	67	31	15	15	15	3.2
CP1.0-63-05L	3.0	16.6	7.62	67	63	15	30	15	3.2
CP1.0-71-05L	3.0	18.7	8.60	67	71	23	23	23	3.2
CP1.0-127-05L	3.0	33.4	15.40	67	127	30	30	30	3.2
†CP1.0-254-05L	3.0/7.0	66.8	30.8/15.4	67	254	60	30	60	3.2
CP1.4-11-10L	3.0	2.9	1.33	68	11	10	15	10	4.7
CP1.4-17-10L	3.0	4.5	2.06	68	17	15	15	15	4.7
CP1.4-31-10L	3.0	8.2	3.75	68	31	20	20	20	4.7
CP1.4-35-10L	3.0	0.2	4.24	68	35	15	30	15	4.7
CP1.4-51-10L	3.0	13.4	6.18	68	51	0.5	62	0.5	4.7
CP1.4-71-10L	3.0	18.7	8.60	68	71	30	30	30	4.7
CP1.4-127-10L	3.0	33.4	15.40	68	127	40	40	40	4.7
CP1.4-11-06L	6.0	4.4	1.33	67	11	10	15	10	3.8
CP1.4-17-06L	6.0	6.0	2.06	67	17	15	15	15	3.8
CP1.4-31-06L	6.0	12.5	3.75	67	31	20	20	20	3.8
CP1.4-35-06L	6.0	14.2	4.24	67	35	15	30	15	3.8
CP1.4-51-06L	6.0	20.6	6.18	67	51	0.5	62	0.5	3.8
CP1.4-71-06L	6.0	28.7	8.60	67	71	30	30	30	3.8
CP1.4-127-06L	6.0	51.4	15.40	67	127	40	40	40	3.8

More specifications on following page.

CP Series

- For higher current, larger heat pumping applications
- Low-Cost, High-Performance
- The standard for consumer product and industrial cooling
- Ideal for instrumentation, laboratory apparatus, consumer appliances
- Excellent for applications from commercial to military

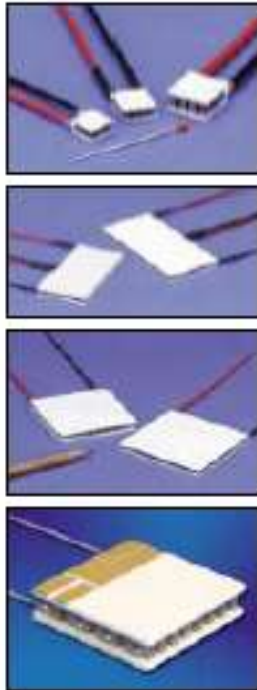
Download our
FREE Aztec Design
Software



TEL: 609-393-4178 • FAX: 609-393-9461 • WEB: www.melcor.com • EMail: tecooler@melcor.com

For a list of Global Sales Offices visit: www.melcor.com

CP Series Specifications



Catalog Number	I _{max} (Amps)	Th = 25°C			N	Dimensions (mm)			
		Q _{max} ¹⁾ (Watts)	V _{max} (Volts)	ΔT _{max} (°C)		A	B	C	D ²⁾
CP1.4-11-04SL	8.5	6.0	1.33	65	11	10	15	10	3.3
CP1.4-17-04SL	8.5	9.2	2.06	65	17	15	15	15	3.3
CP1.4-31-04SL	8.5	16.8	3.75	65	31	20	20	20	3.3
CP1.4-36-04SL	8.5	10.0	4.24	65	35	15	30	15	3.3
CP1.4-51-04SL	8.5	28.9	6.18	65	51	9.5	62	9.5	3.3
CP1.4-71-04SL	8.5	38.5	8.60	65	71	30	30	30	3.3
CP1.4-127-04SL	8.5	72.0	15.40	65	127	40	40	40	3.3
CP2-17-10L	9.0	10.3	2.06	68	17	22	22	22	5.8
CP2-31-10L	9.0	18.8	3.75	68	31	30	30	30	5.8
CP2-49-10L	9.0	29.7	5.93	68	49	36	36	36	5.8
CP2-71-10L	9.0	43.1	8.60	68	71	44	44	44	5.8
CP2-127-10L	9.0	77.1	15.40	68	127	62	62	62	5.8
CP2-17-06L	14.0	16.0	2.06	67	17	22	22	22	4.8
CP2-31-06L	14.0	20.3	3.75	67	31	30	30	30	4.8
CP2-49-06L	14.0	46.2	5.93	67	49	36	36	36	4.8
CP2-71-06L	14.0	67.0	8.60	67	71	44	44	44	4.8
CP2-127-06L	14.0	120.0	15.40	67	127	62	62	62	4.8
CP2-8-31-06L	24.0	50.2	3.75	67	31	40	40	40	5.0
CP5-31-10L	30.0	81.5	3.75	68	31	55	55	55	5.8
CP5-31-06L	60.0	125.0	3.75	67	31	55	55	55	4.8

Interfacing and Options:

Both hot and cold faces non-metallized flat, Type L. Both faces metallized and tinned, Type TT. Hybrid, hot face tinned, cold face non-metallized, Type TL. Hot face non-metallized, cold face tinned, Type LT. Two face soldering (Type TT) in sizes larger than 12 x 12 mm is not recommended. Consult MELCOR for details. See chart on page 24.

Example: CP1.0-127-05TL
Hot face tinned with 118 C solder
Cold face non-metallized

Notes:

- 1) Q_{max} rated value at ΔT = 0°, I_{max} and V_{max}, Th = 25°C.
- 2) Thickness for Type L only.

Definitions:

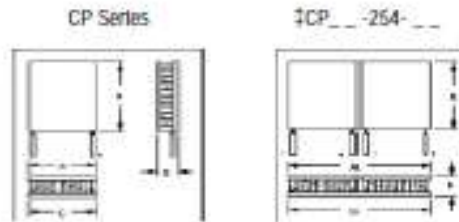
- I_{max} Input current resulting in greatest ΔT (ΔT_{max})[amps]
 N Number of thermocouples (p- and n-type pairs)
 Q_{max} Maximum amount of heat that can be absorbed at cold face (occurs at I = I_{max}, ΔT = 0°)[watts]
 Th Temperature of the TEC hot face during operation [°C]
 ΔT_{max} Maximum temperature difference a TEC can achieve (occurs at I = I_{max}, Q_c = 0)[°C]
 V_{max} Voltage at ΔT_{max}

Wire Standards:

Module Type	Wire Gauge (AWG)
CP0.B-ALL	26
CP1.0-ALL	24
CP1.4-ALL	18
CP2-ALL	18
CP2.B-ALL	16
CP5-...-30	14 (Teflon™)
CP5-...-06	12 (Teflon™)
‡ CP...-254-...	Contact Melcor

For all CP Series modules, wire is stranded, 114 mm (4.5 in.) long and PVC insulated, except CP5.

‡ These modules have four leads and can be wired in series or parallel. The Specifications table indicates maximum values for V and I when "Wired in Series/Wired in Parallel".























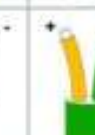











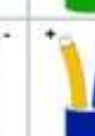

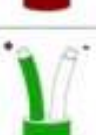



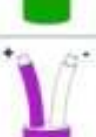




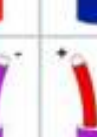





Download our
**FREE Aztec Design
Software**



Anexo C

Código de cores dos termopares

type	Conductor Combinations:		Approximate temperature ranges		European DIN	British	American	German	French	Japanese
	+ leg	- leg	Continuous	Short Term	IEC 584-3 	BS 1843 	ANSI/MC96.1 	DIN 43714 	NF 42-323 	JIS C 1610-1961 
K	Nickel - Chromium	Nickel - Aluminium (magnetic)	0 to +1100	-180 to +1350						
J	Iron (magnetic)	Copper - Nickel	-185 to +300	-250 to +300						
R	Platinum - 13% Rhodium	Platinum	0 to +1550	-50 to +1700						
S	Platinum - 10% Rhodium	Platinum	0 to +1550	-50 to +1700						
T	Copper	Copper - Nickel	-185 to +300	-250 to +300						
V	Copper	Copper - Nickel	Used for interconnecting Type 'K' thermocouples as an alternative to Type 'K' material. Only used where the interconnection temperature is in the range 0°C to 50°C							
E	Nickel - Chromium	Copper - Nickel	0 to +800	-180 to +900						
N	Nickel - Chromium - Silicon	Nickel - Silicon - Magnesium	0 to +1550	-50 to +1700						
B	Platinum - 30% Rhodium	Platinum	0 to +1550	-50 to +1700			