



Projeto de
Mestrado em Engenharia Automóvel

*Gestão térmica em baterias de tração de veículos
elétricos*

Flávio Gonçalves da Silveira

Leiria, abril de 2020



Projeto de

Mestrado em Engenharia Automóvel

*Gestão térmica em baterias de tração de veículos
elétricos*

Flávio Gonçalves da Silveira

Projeto de Mestrado realizado sob a orientação do Doutor Hélder Manuel Ferreira Santos, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor Carlos Daniel Henriques Ferreira, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, abril de 2020

*“I have no special talent... I am only
passionately curious”*

-Albert Einstein

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

O presente projeto retrata o culminar de um percurso académico que decidi escolher. Contudo, tal não seria possível sem a ajuda de algumas pessoas a quem agradeço, particularmente:

Inicialmente quero agradecer à minha família pelo esforço, por todo o carinho, motivação e apoio emocional que me deram ao longo dos anos, pois sem a ajuda deles não poderia ter concluído mais esta etapa na minha vida.

À minha namorada, Camila, por toda a dedicação, todas as palavras, todos os conselhos, compreensão e perseverança demonstrada ao longo deste ano e meio em que me acompanhou neste percurso, sem a sua ajuda a conclusão não seria possível.

Quero agradecer aos orientadores deste projeto, especialmente ao Professor Doutor Hélder Santos por todo o apoio, partilha de conhecimento e por toda a paciência que teve durante a execução do trabalho.

Quero agradecer também ao Eng.º Nuno Pires, responsável pelo laboratório de Engenharia Automóvel, pela disponibilidade no acesso e utilização de equipamentos laboratoriais.

Um grande agradecimento ao Alexandre Borges, ao Alexandre Francisco e ao Luís Ventura com os quais tive o privilégio de partilhar este percurso em Leiria, estando sempre dispostos a dar-me sugestões, conselhos e apoio sempre que necessitei.

Quero deixar um agradecimento especial ao meu grupo de amigos “*Idosos*”, que apesar de não terem uma influência direta na elaboração deste projeto, estiveram sempre presentes desde o meu 3º ciclo “*e o destino não teve a coragem de separar durante a vida universitária*”. O seu apoio, carinho e preocupação foi crucial durante toda esta etapa.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O presente estudo é dedicado à investigação de sistemas de gestão térmica de baterias de tração para veículos elétricos, dando-se um enfoque especial ao estudo de sistemas que utilizam módulos termoelétricos (TEC).

Através da revisão bibliográfica efetuada foi possível identificar e estudar trabalhos já existentes, que tinham em comum o uso de módulos termoelétricos para gestão térmica de baterias, o que permitiu a identificação dos parâmetros necessários à caracterização do funcionamento destes módulos, assim como o estudo de possíveis aplicações.

O caso de estudo apresenta o módulo de baterias que se pretende utilizar, caracterizando-o e calculando a sua potência térmica gerada (\dot{Q}). Foram utilizadas as equações matemáticas de modulação do módulo TEC, e foi caracterizado o módulo selecionado (TEC1-12730). Através da caracterização do módulo TEC analisou-se a influência de algumas variáveis no seu desempenho, tendo-se identificando as variáveis mais importantes para o seu funcionamento e desempenho.

A partir da caracterização do módulo TEC selecionado, dimensionou-se uma montagem experimental de modo a simular a potência térmica gerada pelo módulo de baterias através de uma resistência térmica elétrica. Para a monitorização da montagem experimental desenvolveu-se um módulo de controlo e aquisição de dados que utiliza um microcontrolador programável.

Com a análise dos resultados dos parâmetros de desempenho do módulo TEC, verificou-se que é possível otimizar o seu funcionamento de modo a garantir um coeficiente de desempenho (COP_C) o mais elevado possível, ajustando o valor da tensão, o que possibilita uma diminuição no consumo, considerando as condições reais de utilização, nomeadamente a potência térmica a remover.

Palavras-chave: *Baterias de tração; Potência térmica gerada; Sistema de gestão térmica; Módulo termoelétrico; Coeficiente de desempenho.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The present study is dedicated to the investigation of battery thermal management system for electrical vehicles, giving a special focus to the study of systems that use thermoelectric modules (TEC).

Through the literature review, it was possible to identify and study the related works, which have in common the use of thermoelectric modules in battery thermal management, which allowed the identification of parameters required for characterization of TEC modules operation, as well as the study of possible applications.

The case study presents the battery module which will be used, characterizing it and evaluates the generated thermal power (\dot{Q}). The mathematical equations that allows the modulation of TEC module were used, and the selected module (TEC1-12730) was characterized. Through the TEC module characterization, the influence of some variables in TEC's performance were analyzed, and the most important variables for their performance and operation were identified.

From the selected TEC module characterization, an experimental test rig was dimensioned in order to simulate the generated thermal power form battery modules through an electric thermal resistance. For the continuous monitorization of experimental test rig, a data acquisition and control module were developed, which use a programable microcontroller.

The analysis of TEC module performance parameters results, revealed that it is possible to optimize its operation in order to improve the coefficient of performance as high as possible, adjusting the tension value, which allows a consumption decrease, considering the real operation conditions, namely thermal power to be removed.

Keywords: *Batteries; Thermal power generated; Thermal management system; Thermoelectric module; Coefficient of performance.*

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Figuras

Figura 2.1-Egger-Lohner C.2 Phaeton.....	6
Figura 2.2 – Ford modelo Model T.....	7
Figura 2.3 - Representação esquemática de um veículo elétrico.....	9
Figura 2.4 - Representação esquemática de um HEV.....	9
Figura 2.5 - Representação esquemática de um PHEV.	10
Figura 2.6 - Arquitetura de um veiculo equipado com supercondensador, Horn et al. (2019).	11
Figura 2.7 - Representação de uma célula do tipo <i>pouch</i>	12
Figura 2.8 -Representação de uma célula do tipo prismática.	13
Figura 2.9 - Representação de uma célula do tipo cilíndricas.	13
Figura 2.10 – Extremidade do cátodo de uma célula de Li-íon cilíndrica 18650.....	14
Figura 2.11 – Previsão de custo dos vários tipos de células de bateria.....	15
Figura 2.12 – Esquema representativo de um sistema baseado em bomba de calor.	17
Figura 2.13 – Esquema representativo de um sistema de arrefecimento que utiliza fluido refrigerante.	18
Figura 2.14 - Esquema representativo de um sistema de <i>Thermoelectric cooling</i>	19
Figura 2.15 - Módulo TEC com detalhe dos seus componentes.	20
Figura 2.16 - Esquema representativo de um módulo TEC.	20
Figura 2.17 - Variação do valor de $COP_{C,teórico}$ do módulo TEC em função do ΔT , para diferentes valores de ZT , $T_C = 300$ K.....	22
Figura 2.18 - Sistema de gestão térmica baseados em módulos TEC, Alaoui et al. (2005).25	
Figura 2.19 – Dissipadores de alhetas usados por Alaoui et al. (2005).	25
Figura 2.20 – Diagrama do sistema de gestão térmica implementado por Alaoui et al. (2005).	26
Figura 2.21 – Localização dos componentes instalados por Alaoui et al. (2005).	27

Figura 2.22 – Circuito de alimentação dos módulos TEC desenvolvido por Alaoui et al. (2005).	27
Figura 2.23 – Circuito de controlo dos módulos desenvolvido por Alaoui et al. (2005).	28
Figura 2.24 – Circuito elétrico equivalente da unidade de gestão térmica Alaoui et al. (2005).	28
Figura 2.25 - Esquema de montagem dos módulos TEC, Alaoui (2013).	31
Figura 2.26 – Circuito elétrico da montagem.	32
Figura 2.27 - Esquema do controlo do circuito elétrico.	32
Figura 2.28 - Resultados do teste em estrada para os veículos A e B.	33
Figura 2.29 - a) Dimensões do <i>heat spreader</i> em mm; b) Montagem das células de bateria no <i>heat spreader</i>	37
Figura 2.30 - Disposição dos módulos TEC no <i>heat spreader</i>	37
Figura 2.31 - Disposição das ventoinhas no dissipador.	38
Figura 2.32 - Montagem do BTMS.	38
Figura 2.33 - Variação da temperatura das baterias de acordo com o teste <i>US06 Driving Cycle</i>	41
Figura 2.34 - Disposição do BTMS com sistema de convecção forçada.	41
Figura 2.35 - Vista superior do sistema de arrefecimento por convecção forçada.	42
Figura 2.36 - Vista lateral do sistema de arrefecimento por convecção forçada.	42
Figura 2.37 - Aquecimento das baterias com o sistema de ar forçado durante o teste.	42
Figura 3.1 - Célula Samsung SDI 94Ah.	48
Figura 3.2 - Módulo de bateria constituído por 12 células.	49
Figura 3.3 – Potência térmica gerada pelas baterias tendo em conta a corrente consumida.	51
Figura 3.4 – <i>MAHLE Thermoelectric battery plate</i>	51
Figura 3.5 – Esquema da montagem do <i>Thermoelectric battery plate</i>	52
Figura 3.6 - Módulo TEC1-12730.	59

Figura 3.7 – Variação do coeficiente de Seebeck (S) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$ °C).....	60
Figura 3.8 – Variação da condutividade térmica (K) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	61
Figura 3.9 - Variação da resistência elétrica (R) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	61
Figura 3.10 - Variação da figura de mérito (ZT) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	62
Figura 3.11 – Variação da corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$, Q_c) e potência térmica removida máxima (Q_c , $m\acute{a}x$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	63
Figura 3.12 - Variação da corrente máxima ($I_{m\acute{a}x,COP}$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	64
Figura 3.13 - Variação da tensão ($V_{COP_C,m\acute{a}x}$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	65
Figura 3.14 – Variação da potência térmica removida (Q_c , COP_C , $m\acute{a}x$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$)...66	66
Figura 3.15 - Potência térmica removida da fonte fria (Q_c) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	67
Figura 3.16 - Potência térmica dissipada pela fonte quente (Q_h) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	67
Figura 3.17 - Tensão de operação (V) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).	68
Figura 3.18 - Potência consumida (P) pelo módulo TEC em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).....	69
Figura 3.19 – Coeficiente de desempenho (COP_C) do módulo TEC em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).	69
Figura 3.20 – Comparação entre $COP_{C,te\acute{o}rico}$, e o $COP_{C,m\acute{a}x}$	71
Figura 3.21 - Valores de Q_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 5$ °C.	74

Figura 3.22 - Valores de Q_c e de COP_c para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 15\text{ }^\circ\text{C}$	75
Figura 3.23 - Valores de Q_c e de COP_c em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$), para 8 módulos TEC.	76
Figura 4.1 - Esquema hidráulico sistema projetado.....	78
Figura 4.2- Placa dissipadora escolhida: a) dimensões; b) aplicação na base do módulo de baterias.	81
Figura 4.3 – Resistência térmica e perda de pressão em função do caudal da placa dissipadora.....	82
Figura 4.4 – Disposição dos módulos TEC1-12730 na placa dissipadora.....	83
Figura 4.5 - Radiador selecionado com dimensões.	85
Figura 4.6 - a) Bomba <i>Pierburg</i> CWA 100: b) curva característica da bomba.....	86
Figura 4.7-Caudalímetro UF25B.	87
Figura 4.8 -Tensão de saída do termopar em função da temperatura de leitura.....	87
Figura 4.9 – Diagrama de blocos do funcionamento sistema de controlo e aquisição de dados desenvolvido neste projeto.	88
Figura 4.10 - Esquematização da localização dos termopares	91
Figura 4.11- Visualização 3D do projeto da PCB: a) vista superior; b) vista inferior.....	93
Figura 4.12 – Visualização em CAD da caixa impressa em 3D.....	93
Figura 4.13 – PCB com os componentes soldados e a base da caixa.	94
Figura 4.14 – Resistência elétrica térmica projetada.	94
Figura 4.15 – Placa de policarbonato projetada.	95
Figura 4.16 - Placas dissipadoras com os respetivos coletores.	95
Figura 4.17 – Limitador de corrente de 220 V.	96
Figura 4.18 – Estrutura projetada para a montagem experimental com dimensões.	96
Figura 5.1 – Variação da potência térmica removida em função da corrente para diferentes valores de ΔT	98

Figura 5.2 – Corrente consumida (I) pelo módulo TEC1-12730 em função da potência térmica removida pela fonte fria (Q_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).....	99
Figura 5.3 – Tensão de alimentação total (V) em função da potência térmica total removida (Q_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).	101
Figura 5.4 – Coeficiente de desempenho (COP_c) do módulo TEC1-12730 em função da potência térmica removida pela fonte quente (Q_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).	102
Figura 5.5 – Procedimento de calculo para otimização de funcionamento do módulo TEC1-12730.....	103
Figura 5.6 – Potência térmica total dissipada (QH) em função da potência térmica removida pela fonte quente (Q_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).....	104
Figura 5.7 - Potência térmica total dissipada (QH) em função da potência térmica removida pela fonte quente (Q_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).....	105
Figura 8.1 – Esquemático da PCB.....	113
Figura 8.2 – Face superior em 2D da PCB.....	114
Figura 8.3 – Face inferior em 2D da PCB.....	114
Figura 8.4 - <i>Pinout</i> da PCB	115

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 -Vantagens e desvantagens de cada tipo de célula.	15
Tabela 2.2 - Resultados dos testes experimentais para a condição de aquecimento, Alaoui et al. (2005)	29
Tabela 2.3 – Resultados dos testes experimentais para a condição de arrefecimento, Alaoui et al. (2005).....	29
Tabela 2.4 -Testes para cálculo da potência térmica gerada e eficiência pelo autor Alaoui (2013).	31
Tabela 2.5 - Especificações da célula de bateria usada pelo autor Alaoui (2018).....	34
Tabela 2.6 - Calor gerado e energia perdida nos testes.....	35
Tabela 2.7 - Características do módulo TEC 9501/242/160B utilizado por Alaoui (2018).	36
Tabela 2.8 - Resultado dos testes laboratoriais.....	39
Tabela 2.9 - Especificações do BTMS para uma bateria com 24 células.	43
Tabela 2.10 - Resultados dos testes realizados sobre a norma <i>US06 Drive Cycles</i>	43
Tabela 2.11 – Trabalhos analisados para o atual caso de estudo.....	44
Tabela 3.1 - Características referentes a uma célula, Hesse et al. (2017).	48
Tabela 3.2 - Características referentes a cada um dos módulos de baterias.....	49
Tabela 3.3 - Potência térmica gerada dependendo do <i>C-rate</i>	50
Tabela 3.4 - Características do Módulo TEC1-12730.	60
Tabela 3.5 – Parâmetros correspondentes ao máximo de COP_C	70
Tabela 3.6 – Características de operação de um módulo TEC, considerando para diferentes números de módulos instalados em serie para uma tensão total $V = 44,4$ V.	72
Tabela 3.7 – Valores de Q_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 5$ °C.	74
Tabela 3.8 - Valores de Q_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 15$ °C.....	75
Tabela 4.1 - Propriedades do fluido refrigerante – água para uma temperatura de 20 °C. ..	79

Tabela 4.2 – Características da placa <i>AAVID Hi-Contact 6 pass cold plate</i>	82
Tabela 4.3 - Propriedades da placa dissipadora para o caudal máximo recomendado.	83
Tabela 4.4 - Parâmetros de operação da placa dissipadora.	84
Tabela 4.5 – Disposição dos termopares no sistema.....	91
Tabela 5.1 – Condições de operação ideais de um módulo TEC, e condições de operação de um módulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série.....	98

Nomenclatura

<i>A</i>	Altura (m)
BEV	Battery Electric Vehicle
BTMS	Battery thermal management system
<i>C-rate</i>	Taxa de carga/descarga (C)
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
<i>COP</i>	Coefficient of Performance (-)
<i>COP_C</i>	<i>Coefficient of Performance for cooling</i> (-)
<i>COP_H</i>	<i>Coefficient of Performance for heating</i> (-)
DC	<i>Direct Current</i>
<i>h</i>	Coefficiente de transferência de calor (W/m ² .°C)
<i>H</i>	Comprimento (m)
HEV	Hybrid Electric Vehicle
<i>I</i>	Corrente consumida pelo módulo (A)
	Corrente de carga/descarga do módulo (A)
<i>K</i>	Condutividade térmica (W/m·K);
<i>K_M</i>	Condutividade térmica do módulo TEC padrão (W/m·K·A);
<i>K_{MTC}</i>	Condutividade térmica da fonte fria (W/m·A)
<i>K_{MTH}</i>	Condutividade térmica da fonte quente (W/m·A)
<i>L</i>	Largura (m)
<i>Li-Ion</i>	Iões de lítio
MCI	Motores de Combustão Interna
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
<i>n</i>	Número de células por módulo
	Número de pares de semicondutores do módulo TEC
<i>N</i>	Número de módulos de bateria
<i>Nu</i>	Número de Nusselt (-)
NMC	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCM	<i>Phase Change Material</i>

PHEV	<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>
Pr	Número de Prandtl (-)
PWM	<i>Pulse with Modulation</i>
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
\dot{Q}	Potência térmica gerada pelas baterias (W)
\dot{Q}_C	Potência térmica removida pelo módulo TEC (W)
\dot{Q}_H	Potência térmica dissipada pelo módulo TEC (W)
R	Resistência elétrica (Ω);
Re	Reynolds (-)
R_M	Resistência elétrica do módulo TEC padrão ($\Omega \cdot A$);
R_{MTC}	Resistência elétrica da fonte fria ($\Omega \cdot A \cdot K$);
R_{MTH}	Resistência elétrica da fonte quente ($\Omega \cdot A \cdot K$);
R_t	Resistência térmica ($^{\circ}C/W$)
S	Coefficiente de Seebeck (V/K);
S_M	Coefficiente de Seebeck do módulo TEC padrão (V/K);
S_{MTC}	Coefficiente de Seebeck da fonte fria (V);
S_{MTH}	Coefficiente de Seebeck da fonte quente (V);
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOH	<i>State of Health</i>
T	Temperatura
T_C	Temperatura da fonte fria
T_H	Temperatura da fonte quente
TEC	<i>Thermoelectric cooler</i>
TEM	<i>Thermoelectric module</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
V	Volt (V)
v	Velocidade (m/s)
WLTP	World
ZT	Figura de mérito

Símbolos Gregos

Δ	Variações / Diferença
ρ	Densidade (kg/m ³)
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xv
Nomenclatura.....	xvii
Índice	xxi
1. Introdução.....	1
1.1. Contexto e motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização do trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Evolução dos veículos elétricos.....	5
2.3. Arquitetura do Veículo Elétrico	8
2.3.1. Battery Electric Vehicle - BEV	8
2.3.2. Hybrid Electric Vehicle – HEV.....	9
2.3.3. Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV.....	10
2.4. Sistemas de armazenamento de energia.....	10
2.4.1. Supercondensadores.....	10
2.4.2. Baterias.....	11
2.5. Gestão térmica em veículos elétricos.....	16

2.5.1.	Configurações para o sistema de gestão térmica das baterias	17
2.5.2.	Módulos de arrefecimento termoelétrico	19
2.6.	Estudos antecedentes	23
3.	Caso de Estudo.....	47
3.1.	Introdução.....	47
3.2.	Caracterização do sistema em estudo	47
3.2.1.	Módulo de Baterias.....	47
3.2.2.	Potência térmica gerada nas baterias	50
3.3.	Sistema de gestão térmica de baterias <i>MAHLE</i>	51
3.4.	Módulos termoelétricos.....	53
3.4.1.	Caracterização e desempenho de um módulo TEC.....	53
3.4.2.	Estudo analítico dos parâmetros de desempenho	59
4.	Montagem Experimental.....	77
4.1.	Introdução.....	77
4.2.	Circuito hidráulico	77
4.2.1.	Placa dissipadora	78
4.2.2.	Radiador	85
4.2.3.	Instrumentação do circuito hidráulico	86
4.3.	Aquisição de dados e controlo.....	88
4.3.1.	Seleção de componentes	89
4.3.2.	Projeto da PCB	92
4.4.	Estrutura e disposição dos componentes.....	94
5.	Análise e discussão de resultados	97

5.1. Introdução.....	97
5.2. Desempenho dos módulos TEC	97
6. Conclusões.....	107
6.1. Proposta de trabalhos futuros	108
7. Bibliografia.....	109
8. Anexo.....	113
ANEXO I: Esquemático da PCB	113
ANEXO II: Disposição de componentes e ligações da PCB.....	114
ANEXO III: <i>Pinout</i> da PCB	115

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

Devido às alterações climáticas que se tem vindo a acentuar ao longo das últimas décadas, que em grande parte são provocadas por fenómenos que resultam da elevada poluição atmosférica, e para a qual a contribuição dos veículos automóveis é significativa, e também devido à escassez de combustíveis fósseis, tal como o petróleo, os fundos de investigação e produção automóvel tem vindo a concentrar os seus investimentos no desenvolvimento de veículos elétricos. Atualmente os veículos elétricos são uma minoria no mercado, no entanto estamos numa época em que se assiste a um crescimento acelerado deste mercado.

Um dos maiores desafios dos fabricantes de veículos elétricos encontra-se na manutenção da temperatura de operação das baterias de tração, de modo:

- A maximizar o seu ciclo de vida;
- Obter a maior potência para propulsão possível;
- Garantir uma maior autonomia.

Assim, a generalidade dos veículos elétricos apresenta um sistema de gestão térmica que tem como objetivos a manutenção da temperatura das baterias e a garantia de conforto térmico no habitáculo. Contudo, em muitos casos, os sistemas de gestão térmica de baterias de tração consomem demasiada energia proveniente das próprias baterias, contribuindo assim para a redução da autonomia do veículo elétrico. Os sistemas de gestão térmica de baterias podem ser também constituídos por vários componentes móveis, o que poderá requerer uma elevada manutenção e ocupar demasiado espaço.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e caracterização de um sistema de gestão térmica de baterias de tração. Especificamente os objetivos são:

1. Análise e caracterização do desempenho dos sistemas atualmente implementados em veículos elétricos;
2. Análise de estudos antecedentes realizados na área de gestão térmica de baterias, com ênfase na utilização de módulos TEC;
3. Análise, seleção e caracterização dos parâmetros de desempenho de um módulo TEC;
4. Desenvolvimento de uma montagem experimental para o estudo e caracterização de um sistema de gestão térmica de baterias baseado em módulos TEC de modo a maximizar o seu desempenho;
5. Análise dos parâmetros de desempenho de um sistema de gestão térmica de baterias baseado em módulos TEC para condições reais de utilização.

1.3. Organização do trabalho

O presente trabalho é desenvolvido ao longo de seis capítulos.

O atual capítulo introduz o contexto e motivação e apresenta os principais objetivos do presente trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos sistemas de armazenamento de energia elétrica, e uma análise dos diferentes tipos de sistemas de gestão térmica em veículos elétricos.

No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo, o que inclui o módulo baterias a utilizar, e a análise, seleção e caracterização dos parâmetros de desempenho de um módulo TEC.

O capítulo 4 é dedicado à prototipagem e desenvolvimento da montagem experimental, apresentando o circuito hidráulico de arrefecimento e a aquisição de dados e controlo dos periféricos selecionados.

O capítulo 5 apresenta uma análise dos parâmetros de desempenho do sistema de gestão térmica de baterias baseado em módulos TEC para condições reais de utilização.

Por fim, o capítulo 6 resume as principais conclusões resultantes do presente estudo e as sugestões de trabalhos futuros.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão à evolução do veículo elétrico bem como à arquitetura dos atuais veículos elétricos. A secção 2.2 apresenta a evolução dos veículos elétricos desde a sua primeira aparição até aos dias de hoje. Na secção 2.3 apresenta-se o tipo de arquitetura de um veículo elétrico. A secção 2.4 é dedicada à apresentação dos sistemas de armazenamento de energia existentes atualmente no mercado. A secção 2.4.1 faz uma análise ao sistema de supercondensadores. A secção 2.4.2 faz uma análise aos tipos de baterias assim como às suas temperaturas de funcionamento. A secção 2.5 apresenta os sistemas de gestão térmica em veículos elétricos estando dividida em duas secções: a secção 2.5.1 apresenta uma análise aos sistemas de gestão térmica utilizados atualmente; e a secção 2.5.2 apresenta a aplicação de módulos termoeletrônicos na gestão térmica (arrefecimento e aquecimento) de baterias de tração para veículos elétricos. A secção 2.6 apresenta os estudos antecedentes destacando-se o trabalho desenvolvido pelo autor Alaoui et al. (2005) e Alaoui (2018) ao longo dos anos.

2.2. Evolução dos veículos elétricos

Os primeiros veículos elétricos surgiram no início do século XIX, com vários trabalhos desenvolvidos nesse âmbito. O primeiro veículo elétrico remonta a 1834 e foi desenvolvido por Thomas Davenport. Este veículo era alimentado por baterias não recarregáveis e foi usado num curto trajeto. Thomas Davenport, aproveitou assim trabalhos desenvolvidos anteriormente pelo húngaro Anyos Jedlik e pelo americano Joseph Henry, Chan et al. (2001).

No seguimento dos trabalhos de Thomas Davenport, no ano de 1838, o químico Robert Davidson começou a construção de locomotivas, sendo estas alimentadas por baterias galvânicas não recarregáveis, Chan et al. (2001).

Em 1874, após a invenção das baterias de chumbo recarregáveis, David Salomons construiu o primeiro veículo elétrico recarregável, Chan et al. (2001). Também devido à

invenção das baterias recarregáveis, em 1882 o professor William Ayrton e John Perry, desenvolveram e apresentaram um triciclo totalmente elétrico usando este tipo de baterias. As baterias de chumbo recarregáveis utilizadas neste protótipo tinham uma tensão de cerca de 20 V, uma capacidade de acumulação de energia de 0,5 kWh garantindo ao motor elétrico uma potência máxima de 0,37 kW. A autonomia seria entre 16 e 40 km dependendo do tipo de terreno e a velocidade máxima de 14 km/h, Westbrook (2001).

Na segunda metade do século XIX, foram vários os contributos para o desenvolvimento das baterias de tração recarregáveis, dos motores elétricos e do veículo elétrico. Em 1898 também Ferdinand Porsche deu uma importante contribuição para o desenvolvimento dos veículos elétricos. Porsche desenvolveu o Egger-Lohner C.2 Phaeton, ver Figura 2.1. Este veículo era alimentado por um motor elétrico octogonal, e permitia atingir uma velocidade máxima de cerca de 30 km/h.

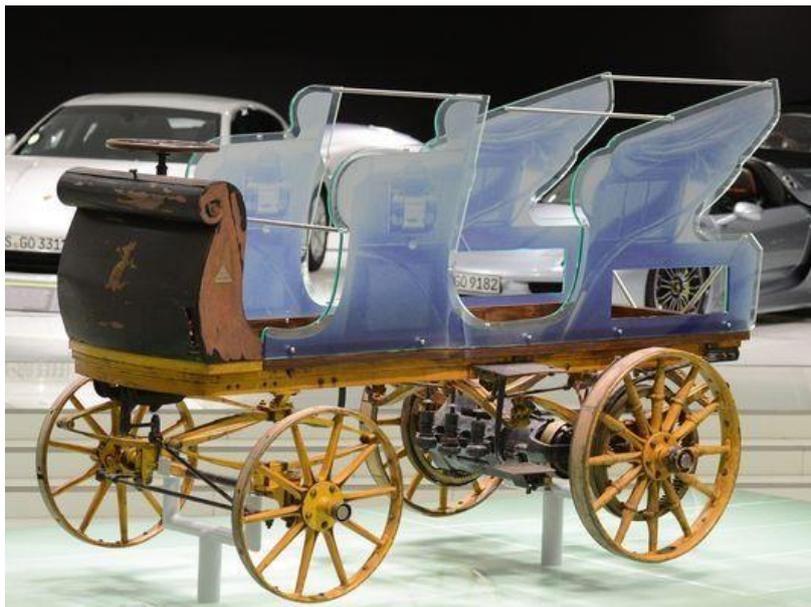


Figura 2.1-Egger-Lohner C.2 Phaeton.

Contudo, em 1885 Karl Benz, apresentou ao mundo o primeiro veículo com propulsão através de um motor de combustão interna (MCI). Mais tarde, com a invenção do motor de arranque em 1911 por Kettering, os motores de combustão interna tornaram-se ainda mais cativantes para os utilizadores, garantindo autonomias muito superiores aos veículos elétricos, o que desequilibrou o mercado em favor dos veículos equipados com motor de combustão interna, restringindo significativamente a quota de mercado dos veículos elétricos. Outra das causas para a extinção dos veículos elétricos foi o início da produção

em série de veículos com motores de combustão interna, sendo pioneiro o modelo Model T produzido pela Ford, no ano de 1908, ver Figura 2.2. Estes fatores, aliados às baixas autonomias dos veículos elétricos foram as principais causas do seu desaparecimento do mercado à data, Chan et al. (2001).



Figura 2.2 – Ford modelo Model T.

Neste contexto, todos os esforços de desenvolvimento foram concentrados nos veículos equipados com motor de combustão interna que dominaram o mercado durante todo o século XX.

Todavia, devido ao aumento do preço do barril de petróleo e às alterações climáticas, os veículos elétricos começaram a emergir através de sistemas de propulsão híbridos (HEV- Hybrid Electrical Vehicle, na literatura inglesa). Ao contrário dos veículos totalmente elétricos, os veículos híbridos não necessitavam de postos de carregamento pois são carregados pelo motor de combustão interna.

Contudo, em meados dos anos 90, surgiram no mercado alguns veículos totalmente elétricos com o lançamento do Impact EV1 (1996) da GM, e mais recentemente o Nissan Leaf e do Chevrolet Volt ambos em 2011. É importante referir que o Nissan Leaf 2011 foi o primeiro veículo elétrico considerado carro do ano. Estes veículos foram concebidos para a produção de um grande número de unidades oferecendo opções de compra ao consumidor, em termos de oferta no mercado e preço. Adicionalmente, estes veículos apresentavam autonomias aceitáveis (e.g, Nissan Leaf de 2011 era de 160 km) viabilizando assim a sua aceitação no mercado. O sucesso de vendas e a aceitação deste tipo de veículo pelo consumidor, conduziu ao desenvolvimento e à criação de um

conjunto de marcas dedicadas à produção de veículos elétricos, como por exemplo a Tesla, Rimac, Lucid, Fisker, etc. Este facto causou grande agitação no setor automóvel, levando as marcas instaladas no mercado (e.g Volkswagen, Mercedes-Benz, BMW) a reagir e a direcionarem o seu foco para o desenvolvimento de veículos elétricos.

2.3. Arquitetura do Veículo Elétrico

Os veículos elétricos atuais podem ter diferentes configurações e por isso várias designações, podendo a sua propulsão ser parcialmente ou totalmente elétrica. Assim os veículos elétricos dividem-se em três categorias:

- **BEV** (Battery Electric Vehicle) - Veículo totalmente elétrico;
- **HEV** (Hybrid Electric Vehicle) - Veículo híbrido, com carregamento de bateria pelo MCI;
- **PHEV** (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) - Veículo híbrido, com carregamento de bateria por tomada;

2.3.1. Battery Electric Vehicle - BEV

Os BEV são dotados de um sistema de propulsão totalmente elétrico. Possuem vários módulos de baterias (designadas de baterias de tração) que fornecem energia elétrica ao motor. O carregamento deste tipo de veículo elétrico pode ser feito a partir de postos de carregamento específicos ou da rede elétrica doméstica. A Figura 2.3 apresenta uma representação esquemática de um veículo elétrico. Os veículos BMW i3, Nissan LEAF, Tesla Model S são alguns dos exemplos desta categoria de veículos.

A autonomia dos veículos totalmente elétricos tem vindo a aumentar durante a última década. Considerando o Nissan Leaf de 2011, a sua autonomia era de 160 km e o Nissan Leaf de 2019 tem uma autonomia de 385 km. Os veículos elétricos mais recentes têm uma autonomia equiparável às dos veículos equipados com MCI. A Tesla anuncia para o Model S 100D uma autonomia máxima de 475-505 km de acordo com o ciclo WLTP (World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure, na literatura inglesa), mas para

que tal aconteça têm que se reunir um conjunto de condições, nomeadamente: temperatura exterior de 30 °C e não ultrapassar uma velocidade de 70 km/h, *Tesla Model S* (2019).

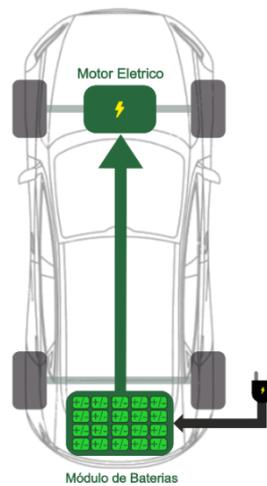


Figura 2.3 - Representação esquemática de um veículo elétrico.

2.3.2. Hybrid Electric Vehicle – HEV

Os HEV são dotados de um sistema de propulsão híbrido constituído por: i) sistema de propulsão elétrico (módulo de baterias de tração e motor elétrico); ii) sistema de propulsão através de MCI (utilizando combustíveis fósseis). Possuem vários módulos de baterias (designadas de baterias de tração) que fornecem energia elétrica ao motor. Quando estas deixam de ter energia, o sistema de propulsão passa a ser o MCI e o motor elétrico passa a funcionar como gerador carregando assim as baterias de tração. A Figura 2.4 mostra uma representação esquemática de um HEV. Este tipo de veículo pode ter várias arquiteturas de montagem dependendo do fabricante.

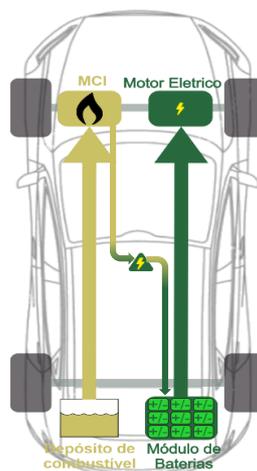


Figura 2.4 - Representação esquemática de um HEV.

2.3.3. Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV

À semelhança dos veículos HEV, os veículos PHEV podem operar com sistema de propulsão totalmente elétrico, contudo isto só pode ocorrer a velocidades baixas. A autonomia destes veículos em modo puramente elétrico é muito baixa. Assim, estes veículos são também dotados de um MCI que entra em funcionamento quando é ultrapassada a velocidade máxima definida para operação em modo totalmente elétrico. Nos PHEV, o carregamento das baterias tem de ser realizado, tal como nos BEV pela rede elétrica. A Figura 2.5 mostra uma representação esquemática de um PHEV.

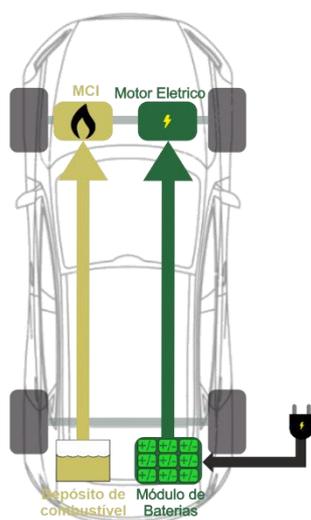


Figura 2.5 - Representação esquemática de um PHEV.

2.4. Sistemas de armazenamento de energia

Os sistemas de armazenamento de energia têm de satisfazer vários requisitos tais como a segurança, densidade de energia, densidade de potência, eficiência energética, entre outros.

Atualmente, os sistemas de armazenamento que melhor cumprem estes requisitos são os supercondensadores e as baterias.

2.4.1. Supercondensadores

Os supercondensadores são componentes eletrónicos capazes de fornecer grandes quantidades de energia num curto espaço de tempo, o que significa que têm grande

capacidade de fornecer potência (densidade de potência) e têm a vantagem de poderem ser rapidamente carregados. No entanto, quando comparados com as baterias de tração de íões de lítio, têm uma densidade de energia muito menor (cerca de 16 vezes), mas têm uma densidade de potência muito superior (cerca de 20 vezes). Os supercondensadores, dadas as suas características são indicados para uso em sistemas auxiliares para veículos elétricos, nomeadamente como tipo de armazenamento de energia em travagem regenerativa e fornecendo essa energia quando o motor necessita de energia suplementar para rápidas acelerações (*boosting*, na literatura inglesa) aumentando assim a eficiência e/ou melhorando o desempenho do veículo. A Figura 2.6 mostra a arquitetura de um veículo elétrico equipado com o sistema de supercondensadores.

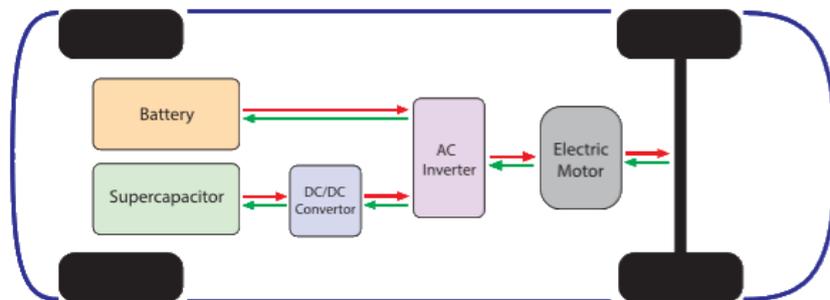


Figura 2.6 - Arquitetura de um veículo equipado com supercondensador, Horn et al. (2019).

Alguns dos veículos que usam este tipo de tecnologia são: o Toyota Supra HVR, que ganhou as 24h de Tokachi em 2007; o Mazda 6 e Mazda 3. Estes veículos têm a particularidade de serem todos HEV, Horn et al. (2019).

2.4.2. Baterias

Um dos principais componentes dos veículos elétricos são as baterias de tração. Com o avanço da tecnologia e com a necessidade de aumentar a autonomia dos veículos elétricos, tem-se assistido a uma diminuição do preço das baterias. As baterias funcionam com base numa reação eletroquímica, isto é, uma transformação química que dá origem a energia elétrica ou vice-versa, tendo por base reações de oxidação-redução, Hesse et al. (2017).

As baterias são constituídas por dois elétrodos: o Cátodo (elétrodo positivo) e o Ânodo (elétrodo negativo), os quais estão submersos no eletrólito. A corrente flui nos elétrodos

resultante das reações químicas, em estado de descarga a corrente flui do eletrodo negativo para o eletrodo positivo, e no sentido inverso em estado de carga.

A durabilidade das baterias é um dos fatores preponderantes para a aceitação dos veículos elétricos, no entanto, a vida útil da bateria de tração esta condicionada por vários fatores, como por exemplo a temperatura de funcionamento.

A temperatura de funcionamento das baterias é um dos fatores mais importantes para a sua longevidade. Para aumentar essa longevidade, as baterias de íões de lítio requerem uma temperatura de funcionamento entre 20 °C e 40 °C, sendo este um dos grandes desafios do veículo elétrico na atualidade Al-Zareer et al. (2018).

Os veículos elétricos utilizam maioritariamente baterias de íões de lítio (Li-íon), sendo que alguns HEV utilizam baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH).

Quanto à sua configuração, as células das baterias de tração podem ser: *pouch*, prismáticas ou cilíndricas.

Pouch

As células do tipo *pouch*, ver Figura 2.7, têm a particularidade de não apresentarem um involucro em metal, fazendo com que sejam leves e compactas. Estas células apresentam como vantagem a grande capacidade de remoção de calor. Devido ao seu *design* compacto, estas células não podem ser sujeitas a elevadas correntes de carregamento pois podem dilatar.

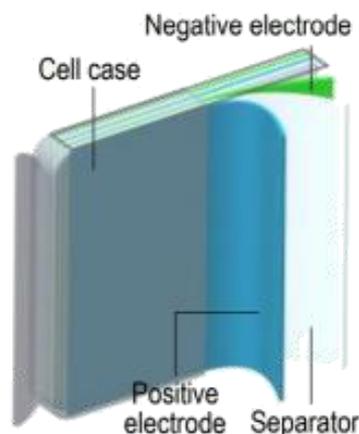


Figura 2.7 - Representação de uma célula do tipo *pouch*, Battery University (2018).

Prismáticas

Com um *design* semelhante às *pouch*, as células prismáticas, ver Figura 2.8, surgiram no início da década de 90. Aparecem principalmente em telemóveis, tablets e computadores, sendo também utilizadas em alguns veículos elétricos como por exemplo o BMW i3. Contudo para a aplicação em veículos elétricos, este tipo de célula tem um involucro em alumínio o que a protege contra choques, mas também ajuda na remoção do calor gerado da sua utilização. Têm uma capacidade nominal entre 20 Ah e 100 Ah, Battery University (2018).

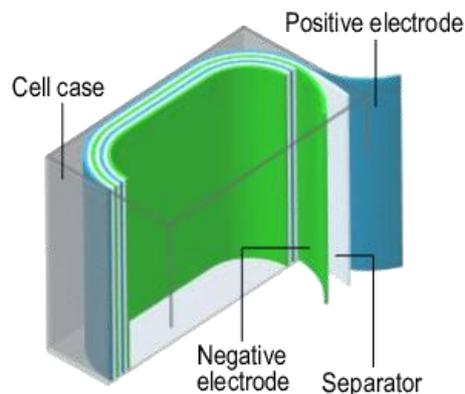


Figura 2.8 -Representação de uma célula do tipo prismática, Battery University (2018).

Cilíndricas

As baterias cilíndricas, ver Figura 2.9, são as mais utilizadas em veículos elétricos atualmente. Este tipo de baterias são de fácil construção e possuem elevada densidade energética e elevada estabilidade mecânica. Os tipos de células de bateria cilíndricas mais utilizados são os 18650 e 21700.

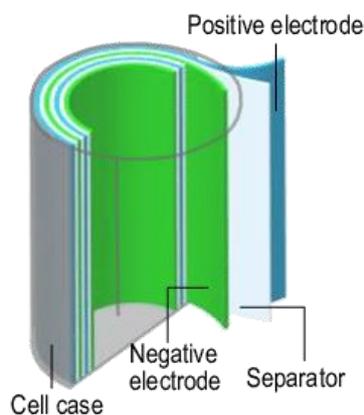


Figura 2.9 - Representação de uma célula do tipo cilíndricas, Battery University (2018)

Com o objetivo de aumentar a segurança, as células de baterias cilíndricas estão equipadas com um componente de Coeficiente Positivo de Temperatura - PTC (*Positive Temperature Coefficient*, na literatura inglesa), ver Figura 2.10. Uma elevada corrente de carga/descarga, irá gerar uma grande potência térmica. O PTC reage com a variação de temperatura, ou seja, quando a corrente está dentro dos valores normais, a temperatura é baixa, então o PTC apresenta baixa resistividade. No entanto, se a corrente aumentar, vai ocorrer um aumento de temperatura e conseqüentemente haverá também um aumento da resistividade do PTC, funcionando como um interruptor térmico limitando assim a sua condutividade, prevenindo deste modo curtos-circuitos. Quando a temperatura baixa para valores normais, a resistividade do PTC também baixa, Darcy et al. (2003).

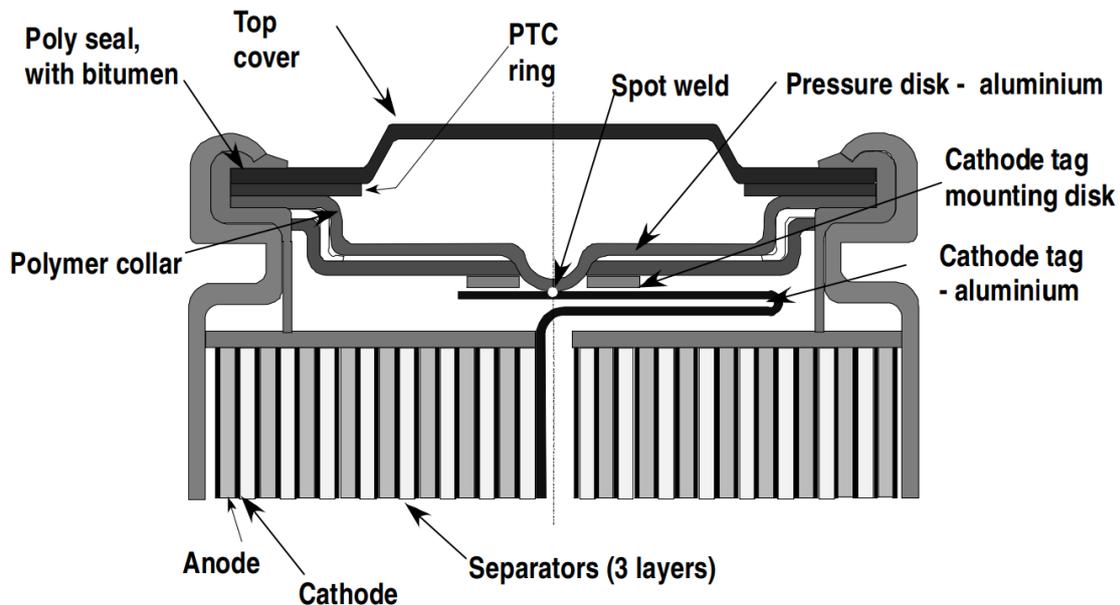


Figura 2.10 – Extremidade do cátodo de uma célula de Li-íon cilíndrica 18650.

Os construtores de baterias asiáticos antecipam o custo das 4 configurações de células de baterias mais utilizadas no mercado, ver Figura 2.11 , Battery University (2018).

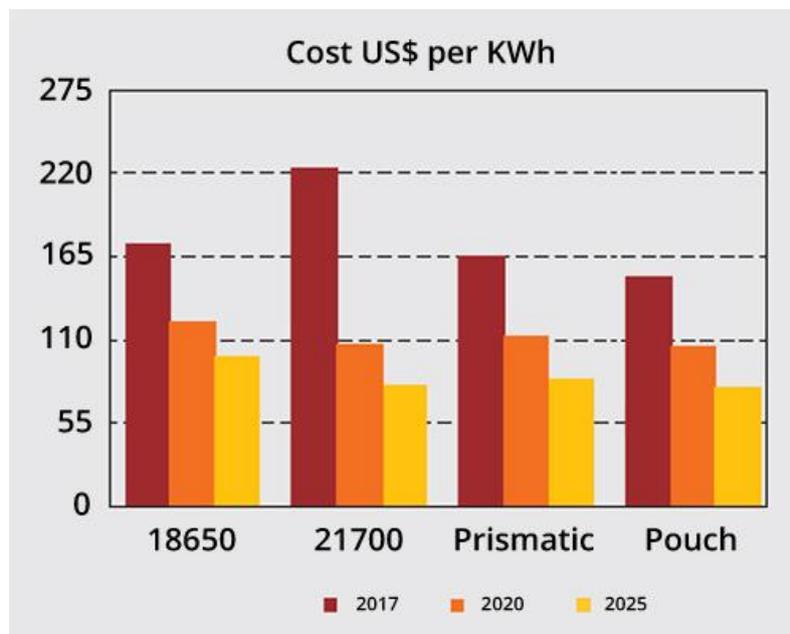


Figura 2.11 – Previsão de custo dos vários tipos de células de bateria.

Nesta estimativa não estão considerados os custos de encapsulamento, sendo que, a esse respeito as células prismáticas e *pouch* têm um custo adicional, fazendo com que fiquem mais caras do que as células cilíndricas (18650 e 21700).

A Tabela 2.1 resume as vantagens e desvantagens de cada um dos tipos de células.

Tabela 2.1 -Vantagens e desvantagens de cada tipo de célula.

	<i>Pouch</i>	Prismáticas	Cilíndricas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Grande facilidade de remoção de calor 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada proteção contra choques 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada densidade energética • Custo mais baixo
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Baixas correntes de carga e descarga 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Elevado volume ocupado 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixos ciclos de vida

2.5. Gestão térmica em veículos elétricos

As baterias de íões de lítio são consideradas à data o melhor meio de armazenamento de energia a ser usado na mobilidade elétrica. Contudo, a gestão térmica destas baterias continua a ser uma tarefa desafiante para os construtores, pois os sistemas de gestão térmica de baterias - BTMS (*Battery Thermal Management System*, na literatura inglesa) atuais consomem muita energia da bateria e conseqüentemente este consumo reflete-se na redução da autonomia do veículo.

Os tipos de gestão térmica podem ser divididos em duas categorias dependendo das suas características, sendo eles: passivos ou ativos, Siddique et al. (2018).

Os sistemas de gestão térmica passivos têm como base de funcionamento a utilização de materiais com elevada capacidade de absorção de energia de modo a dissipar a potência térmica das baterias. Nesta categoria estão inseridos os seguintes tipos:

- PCM - Material de mudança de fase (*Phase Change Material*, na literatura inglesa);
- Convecção natural (*Natural air cooling*, na literatura inglesa);
- Fluido refrigerante (*Liquid cooling*, na literatura inglesa);
- Tubo de calor (*Heat pipe*, na literatura inglesa).

Os sistemas de gestão térmica ativos têm por base a maximização da transferência de calor das baterias para um material e/ou meio. Nesta categoria estão inseridos os seguintes tipos:

- Convecção forçada (*Forced air cooling*, na literatura inglesa);
- Fluido refrigerante usando uma bomba circuladora;
- Módulo termoelétrico - TEC (*Thermoelectric Cooling*, na literatura inglesa);
- Bomba de calor (*Heat pump*, na literatura inglesa).

A maioria dos veículos elétricos atuais está equipado com um sistema de gestão térmica baseado em bombas de calor. Contudo existem algumas empresas (e.g. Mahle) que estão a investigar a utilização de módulos termoelétricos para a gestão térmica de baterias de tração. Estes módulos têm como vantagem, relativamente ao sistema baseado em bombas de calor, o facto de permitirem arrefecer e aquecer as baterias dependendo da sua temperatura.

2.5.1. Configurações para o sistema de gestão térmica das baterias

Dentro dos sistemas de gestão térmica das baterias de tração o mais usado pelos fabricantes de veículos elétricos é a bomba de calor, ver Figura 2.12. Este sistema é constituído por um compressor que comprime o fluido refrigerante fazendo com que este ao aumentar a pressão também aumente a sua temperatura. Posteriormente, o fluido refrigerante passa por um permutador de calor (condensador), onde a potência térmica é transferida para o ambiente com o auxílio de uma ventoinha. De seguida, o fluido refrigerante passa por uma válvula de expansão, onde baixa a sua pressão e conseqüentemente a sua temperatura, fazendo com que regresse ao evaporador com uma temperatura reduzida, permitindo assim remover a potência térmica gerada pelas baterias.

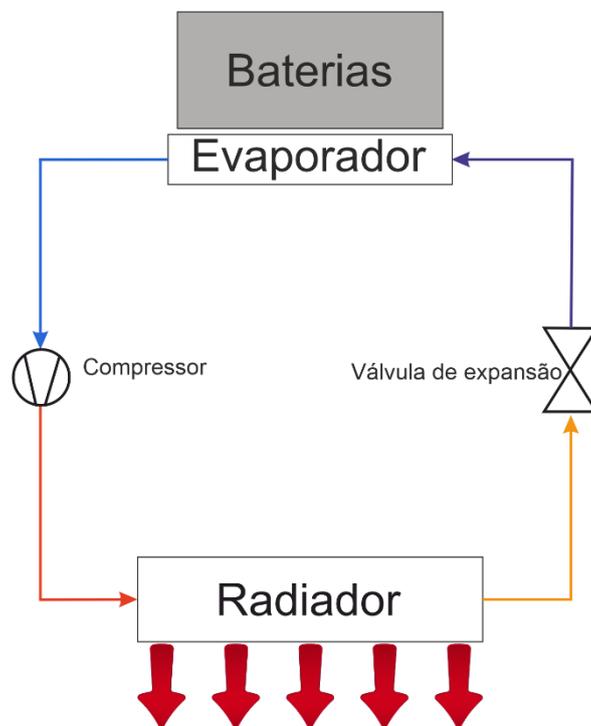


Figura 2.12 – Esquema representativo de um sistema baseado em bomba de calor.

Contudo, o sistema baseado em bomba de calor só funciona quando é necessário arrefecer as baterias, havendo assim a necessidade de implementar um sistema suplementar, normalmente à base de resistências elétricas, de modo a permitir o aquecimento das baterias quando a sua temperatura está abaixo do recomendado.

A remoção de calor das baterias através de um circuito de um fluido refrigerante (*refrigerant cooling*, na literatura inglesa) é outro dos sistemas utilizados para arrefecimento dos módulos de baterias em veículos elétricos, ver Figura 2.13. Este sistema baseia-se no arrefecimento dos módulos de baterias através de um circuito de

fluido refrigerante constituído por: uma bomba circuladora, um dissipador e um radiador. O radiador com o auxílio de uma ventoinha garante, através de convecção forçada, a transferência de calor do circuito para o ambiente. Após a passagem pelo radiador, por ação de uma bomba circuladora, o fluido refrigerante entra num dissipador que está em contacto com a base do módulo das baterias ou mesmo, em alguns casos, diretamente com as células de bateria, permitindo assim uma adequada remoção de calor. Usualmente, neste tipo de sistemas o fluido circulante é uma mistura de água com etilenoglicol.

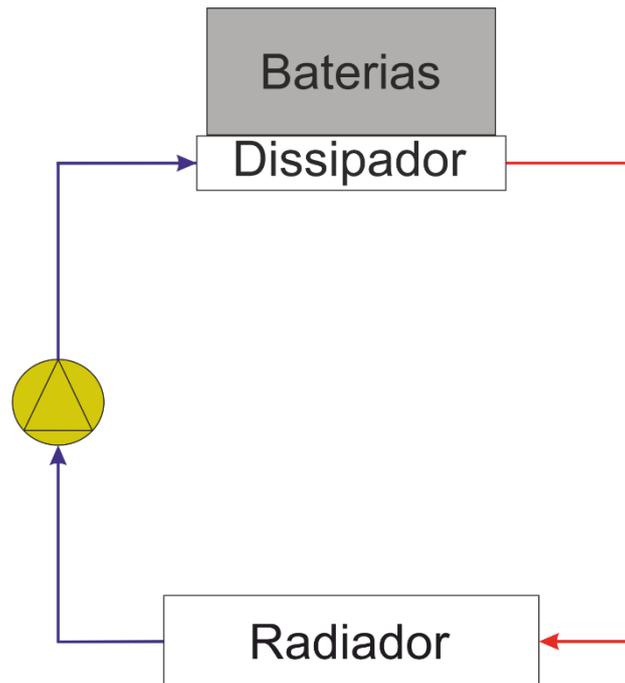


Figura 2.13 – Esquema representativo de um sistema de arrefecimento que utiliza fluido refrigerante.

Mas tal como a bomba de calor, este tipo de sistemas tem a desvantagem de ser necessário um sistema suplementar para o aquecimento das baterias em caso de necessidade. Este sistema apenas permite arrefecimento das baterias quando a temperatura do fluido refrigerante é superior à temperatura do ar ambiente, inviabilizando a sua utilização quando a temperatura ambiente é elevada.

Neste contexto, recentemente, os módulos termoelétricos - TEC (*Thermoelectric cooling*, na literatura inglesa,) baseado no efeito de *Peltier* têm vindo a ser considerados como uma alternativa promissora, ver Figura 2.14. Os módulos TEC são compostos por duas fontes de calor: a fonte fria e a fonte quente. A fonte fria permite remover o calor das baterias e por sua vez o dissipador absorve o calor da fonte quente. Neste dissipador circula um fluido refrigerante que recebe o calor fornecido pela fonte quente do TEC.

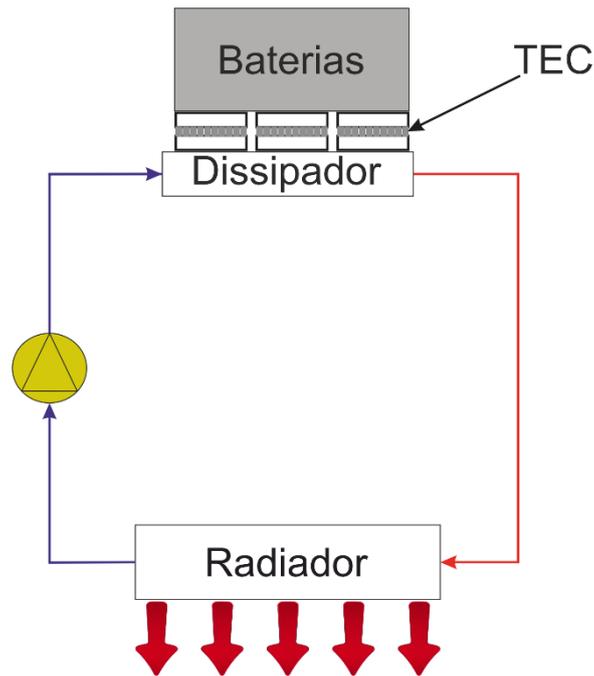


Figura 2.14 - Esquema representativo de um sistema de *Thermolectric cooling*.

O sistema de *Thermolectric cooling*, em comparação com os anteriores tem a vantagem de permitir o arrefecimento das baterias, mas também o seu aquecimento sem haver necessidade de implementação de um circuito auxiliar. Como é isento de partes moveis, exceto a bomba hidráulica, é um sistema que requer pouca manutenção. Este tipo de sistema poderá funcionar de vários modos, isto é, quando a temperatura do ar ambiente for inferior à temperatura do fluido refrigerante e a temperatura das baterias for reduzida, o calor gerado pelas baterias é removido pelo dissipador e transferido para o ar ambiente sem o auxílio dos módulos TEC. Quando a temperatura do ar ambiente for superior à temperatura do fluido refrigerante, ou a temperatura das baterias for elevada, o sistema funciona com o auxílio dos módulos TEC, permitindo assim a remoção de uma potência térmica mais elevada.

2.5.2. Módulos de arrefecimento termoeletrico

O módulo TEC é um componente eletrónico constituído por semicondutores tipo N e tipo P, trabalhando com corrente contínua DC (*Direct current*, na literatura inglesa), ver Figura 2.15. A aplicação desta corrente cria um diferencial de temperatura entre os dois lados do módulo: lado quente (fonte quente) e lado frio (fonte fria). Os módulos TEC têm a vantagem de permitir arrefecer e aquecer com o mesmo dispositivo. Isto acontece

devido à polaridade da tensão aplicada, isto é, caso se inverta a polaridade, os lados da fonte quente e da fonte fria invertem, Ferrotec (2019).

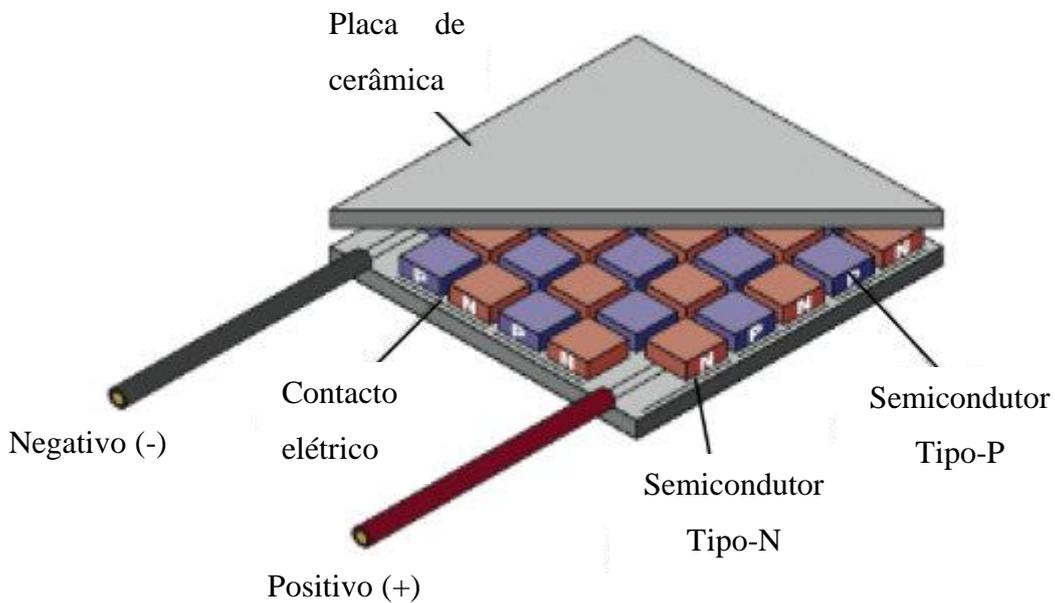


Figura 2.15 - Módulo TEC com detalhe dos seus componentes.

Entre as duas faces do módulo estão localizados semicondutores tipo N (termopar negativo) e tipo P (termopar positivo). Este módulo permite a remoção de calor da fonte fria, transferindo calor para a fonte quente. A Figura 2.16 apresenta um esquema representativo de um módulo TEC.

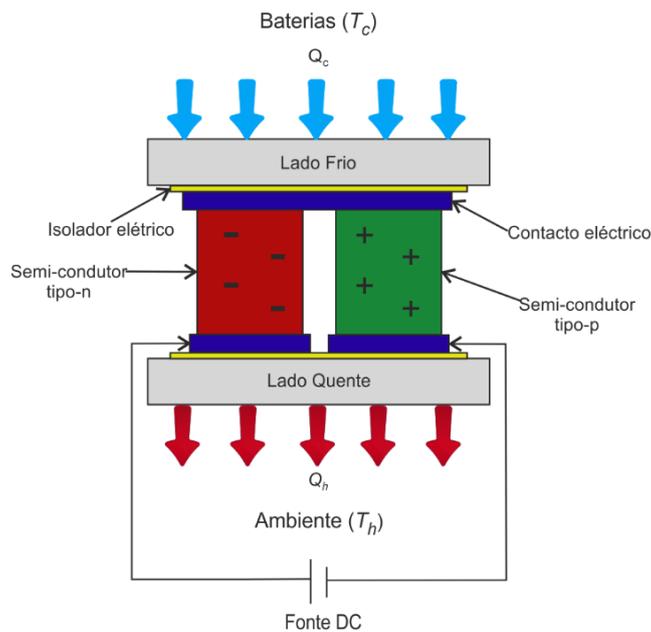


Figura 2.16 - Esquema representativo de um módulo TEC.

O parâmetro ZT corresponde à figura de mérito de um TEC. O valor de ZT depende do material utilizado na construção do TEC e da temperatura de operação. A figura de mérito é determinada por parâmetros físicos, tal como expressa a Eq. 2.1, Snyder et al. (2017).

$$ZT = \frac{S^2}{R \times K} T_C \quad 2.1$$

Onde,

ZT - Figura de mérito (-);

S - Coeficiente de Seebeck (V/K);

K - Condutividade térmica (W/mK);

R - Resistência elétrica ($\Omega.m$);

T_C - Temperatura da fonte fria (K).

O coeficiente de Seebeck expressa a magnitude da tensão resultante nos terminais do módulo termoeletrico quando se aplica um diferencial de temperatura nas suas faces.

A condutividade térmica é uma medida da capacidade de transferência de calor por condução do material que constitui o módulo TEC.

A resistência elétrica expressa a resistência que o módulo TEC oferece à passagem de corrente elétrica.

No presente estudo o módulo TEC tem como principal função a remoção de calor do módulo de baterias de tração, e como tal funciona em modo de arrefecimento (máquina frigorífica).

O coeficiente de desempenho teórico - $COP_{C,teórico}$ (*Coeficiente of Performance*, na literatura inglesa) de um módulo TEC a operar em modo de arrefecimento (máquina frigorífica) é obtido pela seguinte expressão, Snyder et al. (2017):

$$COP_{C,teórico} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \times \frac{\sqrt{1 + ZT} - \frac{T_C}{T_H}}{\sqrt{1 + ZT} + 1} \quad 2.2$$

O valor de $COP_{H,teórico}$ do módulo TEC para operação em modo de aquecimento (bomba de calor) é obtido do seguinte modo:

$$COP_{H,teórico} = COP_{C,teórico} + 1 \quad 2.3$$

O valor de $COP_{C,teórico}$, obtido através da Eq. 2.2, e o valor de $COP_{máx,H}$, obtido através da Eq. 2.3 dependem do valor de temperatura da fonte fria (T_C) e da fonte quente (T_H), respetivamente, mas também do valor da figura de mérito ZT do módulo TEC.

Para o cálculo do valor de $COP_{C,teórico}$ e $COP_{H,teórico}$, considerou-se uma temperatura da fonte fria constante, $T_C = 300$ K e uma temperatura da fonte quente variável no intervalo de $305 \leq T_H \leq 360$ °C, o que resulta numa variação de temperatura no intervalo: $5 \leq \Delta T \leq 60$ °C. Os valores da figura de mérito ZT dependem das características dos materiais utilizados no módulo TEC e das temperaturas de operação do TEC. Tendo como referência o trabalho realizado pelo autor Snyder et al. (2017), no presente estudo considerou-se uma variação de ZT no intervalo $0,5 \leq ZT \leq 2$. A Figura 2.17 mostra a variação do $COP_{C,teórico}$ em função da diferença de temperatura ($\Delta T = T_H - T_C$), para diferentes valores de ZT .

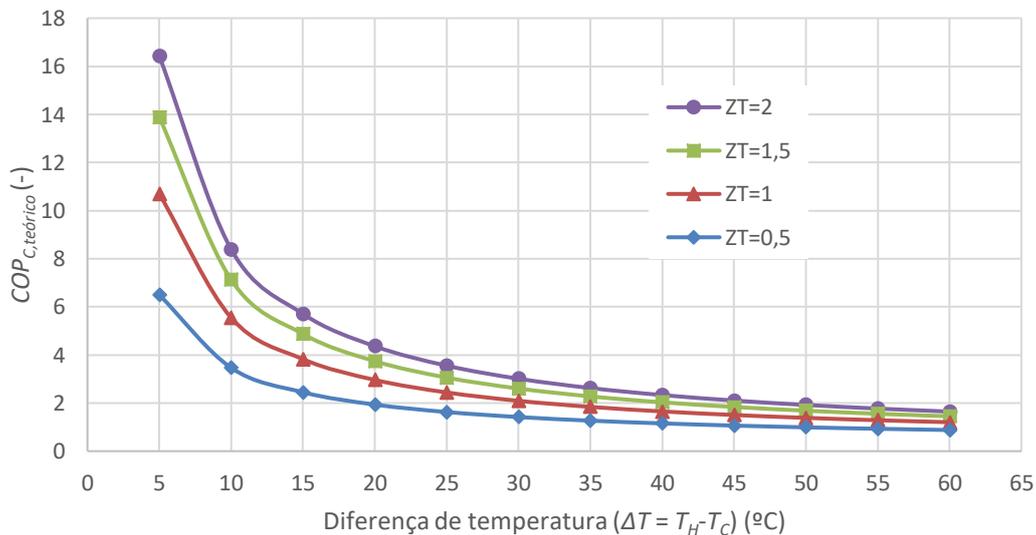


Figura 2.17 - Variação do valor de $COP_{C,teórico}$ do módulo TEC em função do ΔT , para diferentes valores de ZT , $T_C = 300$ K.

Como se pode observar na Figura 2.17, o valor do coeficiente de desempenho teórico máximo ($COP_{C,teórico}$) diminui com o aumento de ΔT e aumenta com o valor de ZT .

2.6. Estudos antecedentes

O presente trabalho considera a utilização de módulos termoelétricos (TEC) para a gestão térmica de baterias em veículos elétricos. Ainda são escassos os trabalhos desenvolvidos nesta área, destacando-se os trabalhos de Alaoui et al. (2005), Alaoui (2013) e Alaoui (2018).

O estudo desenvolvido por Alaoui et al. (2005), começa por fazer uma revisão acerca dos sistemas de gestão térmica dos veículos elétricos. Esta revisão refere que as temperaturas de funcionamento de uma bateria de chumbo ácido devem ser de cerca de 30 °C com o intuito de maximizar o seu desempenho. O autor refere também a importância de garantir o conforto dos passageiros no habitáculo. Neste contexto, os sistemas de gestão térmica têm de permitir o funcionamento em modo de arrefecimento e em modo de aquecimento. São vários os sistemas de gestão térmica que têm sido implementados, Alaoui et al. (2005) apresenta diferentes soluções.

Uma das soluções apresentadas por Alaoui et al. (2005) consiste no aquecimento das baterias e no aquecimento do habitáculo para garantir o conforto dos ocupantes em climas frios, utilizando um aquecedor a combustível (*Fuel Fire Heater*, da literatura inglesa). O autor refere que a aplicação destes sistemas em veículos elétricos comerciais traz uma preocupação adicional para o ambiente, pois um dos principais atributos destes veículos é serem não poluentes. Para além disso, este sistema tem a desvantagem de não permitir arrefecimento, sendo necessário a implementação de um sistema suplementar para a utilização do veículo em climas quentes.

Como solução para o aquecimento, Alaoui et al. (2005) apresenta também as resistências térmicas elétricas (PTC), as quais apresentam $COP_H \sim 1$. No entanto, como são alimentadas diretamente pelas baterias vão contribuir para a diminuição da autonomia do veículo elétrico, e tal como os aquecedores a combustível só são uteis para utilização em climas frios.

A terceira solução apresentada por Alaoui et al. (2005) para garantir a função de aquecimento são as bombas de calor. Esta tecnologia tem a vantagem de não requerer a queima de combustível, não produzindo gases nocivos para o ambiente. Apesar de haver um grande desenvolvimento e integração desta solução pelos fabricantes de veículos elétricos e híbridos, esta tecnologia não opera eficientemente a temperaturas inferiores a

0 °C. Alaoui et al. (2005) refere também que os sistemas de bomba de calor operam com um COP_C (modo de arrefecimento) entre 0,8 e 1,6 à temperatura de 10 °C, e que usam como fluido de trabalho Clorofluorcarbonetos que são prejudiciais para o meio ambiente. Adicionalmente, requer um sistema com um ciclo termodinâmico com os seguintes componentes: compressor, condensador, evaporador, etc., o que dificulta a acessibilidade e a manutenção no veículo.

A última solução apresentada por Alaoui et al. (2005) é a ventilação e isolamento do habitáculo e do compartimento das baterias. Todavia, tal como referido pelo autor, o isolamento garante a temperatura de funcionamento das baterias adequadas no inverno, mas poderá resultar num sobreaquecimento das mesmas no verão.

Alaoui et al. (2005) faz também uma apresentação e revisão sobre a utilização dos módulos TEC, referidos pelo autor como *Peltier modules*, apresentando as seguintes vantagens:

- Dimensões e peso reduzidos;
- Capacidade de arrefecimento e aquecimento com o mesmo sistema;
- Precisão no controlo da temperatura;
- Elevada fiabilidade;
- Sistema elétrico, sem ruído;
- Fonte de alimentação própria;
- Menor impacto ambiental.

O sistema de gestão térmica desenvolvido por Alaoui et al. (2005) foi desenhado para o veículo *Solectria Electric Vehicle* modelo *Force*. O autor apresenta as características do veículo que utilizava 12 células de bateria do tipo *Hawker* cada uma com uma tensão de 12 V, e uma capacidade nominal de 38 Ah. Alaoui et al. (2005) refere também que 5 das 12 baterias estão localizadas na frente do veículo, e as restantes estão localizadas na traseira, o que garante uma distribuição de peso adequada. O autor refere que originalmente o veículo está equipado com duas resistências térmicas elétricas (PTC) de modo a aquecer o habitáculo e um sistema convencional de bomba de calor de modo a arrefecer. Com o objetivo de instalar o sistema de módulos TEC, o autor retirou o sistema de bomba de calor do veículo.

O sistema dimensionado por Alaoui et al. (2005) tem como base a junção de um dissipador (*heat sink*, na literatura inglesa) à fonte quente e à fonte fria do módulo TEC, como demonstra a Figura 2.18. Para obter um melhor desempenho, o autor acoplou ventoinhas, forçando assim o ar a passar através dos dissipadores de alhetas.

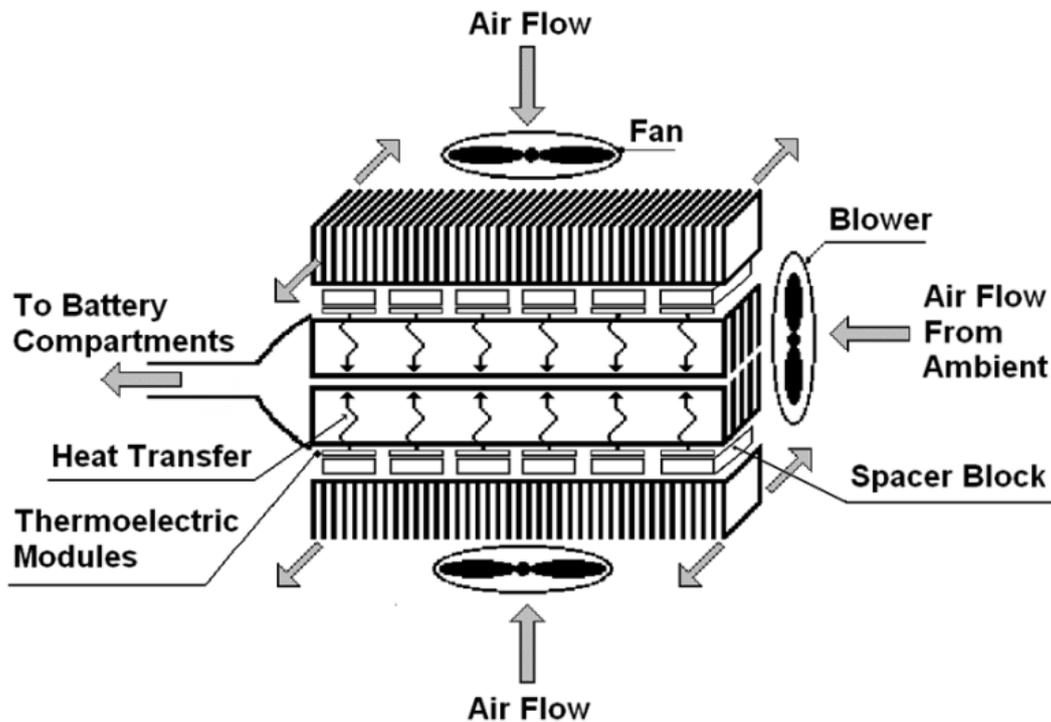


Figura 2.18 - Sistema de gestão térmica baseado em módulos TEC, Alaoui et al. (2005).

Alaoui et al. (2005), utilizou dois tipos de dissipadores: a) um com alhetas ao longo da sua largura, o que garante uma melhor transmissão de calor para o ambiente; b) outro com alhetas ao longo do seu comprimento, o que permite canalizar ar quente para o habitáculo do veículo. A Figura 2.19 apresenta os dois tipos de dissipadores utilizados por Alaoui et al. (2005): a) alheta transversal; b) alheta longitudinal.

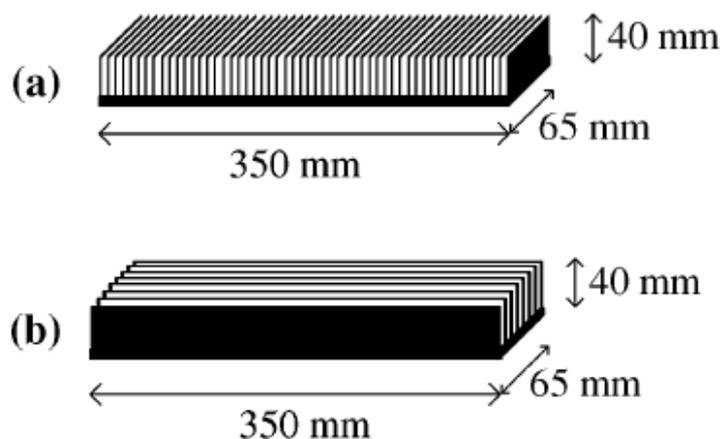


Figura 2.19 – Dissipadores de alhetas usados por Alaoui et al. (2005).

O sistema construído por Alaoui et al. (2005) consiste em 12 módulos TEC. No total, o autor construiu 3 unidades do sistema sendo que cada uma delas tem uma função diferente, nomeadamente:

- Uma para o compartimento das baterias colocado na zona frontal;
- Uma para o compartimento das baterias colocado na zona traseira;
- Uma para o habitáculo de passageiros.

A Figura 2.20 apresenta uma representação esquemática do sistema implementado por Alaoui et al. (2005), onde estão representadas as 3 unidades construídas com módulos TEC, o controlador dos módulos TEC e o sistema de canalização de ar.

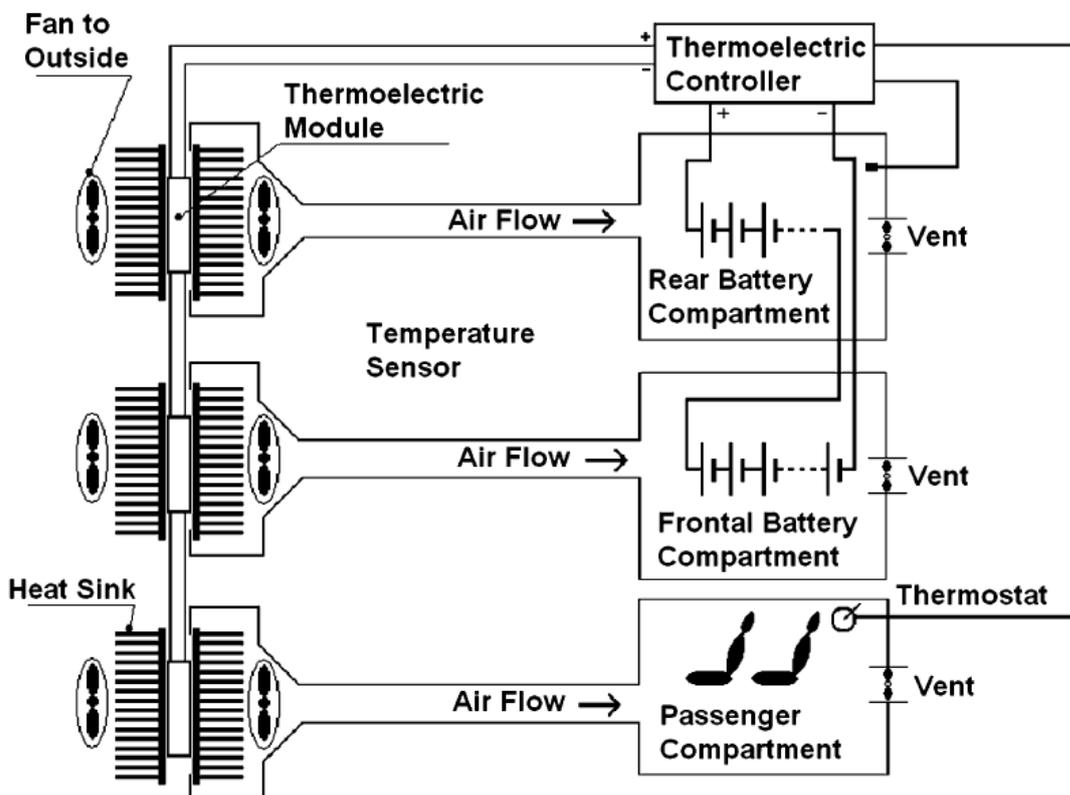


Figura 2.20 – Diagrama do sistema de gestão térmica implementado por Alaoui et al. (2005).

A Figura 2.21 apresenta uma representação esquemática da localização dos componentes no veículo.

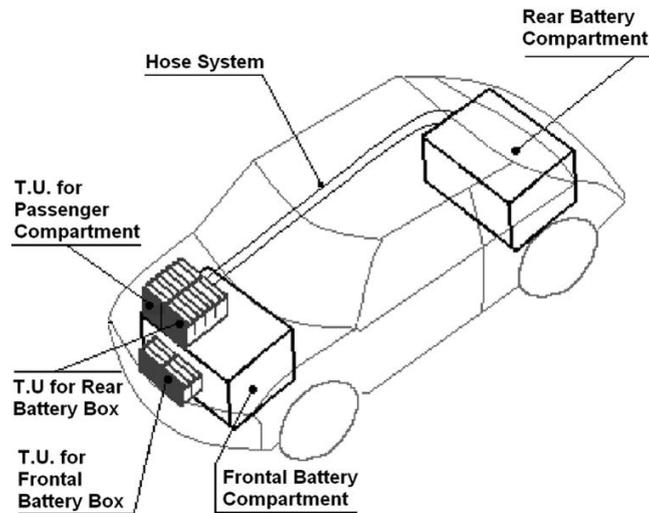


Figura 2.21 – Localização dos componentes instalados por Alaoui et al. (2005).

Posteriormente, Alaoui et al. (2005) especifica a construção do sistema de alimentação dos módulos TEC, referindo que o veículo está equipado com 144 V, e que o sistema de alimentação foi concebido de modo a permitir:

- Inverter a polaridade de alimentação dos módulos TEC, de modo a permitir que o sistema funcione em modo de aquecimento e arrefecimento;
- Ser controlado por um circuito analógico que mantém a temperatura dentro dos compartimentos controlando a corrente utilizada pelos módulos TEC.

A Figura 2.22 apresenta o circuito de alimentação dos módulos TEC desenvolvido por Alaoui et al. (2005), onde T1 e T2 são dois *Mosfets* tipo-N (ref. APT 5020BNFR) e T3 e T4 são dois *Mosfets* tipo-P (ref. IXYS 1XTH12P25).

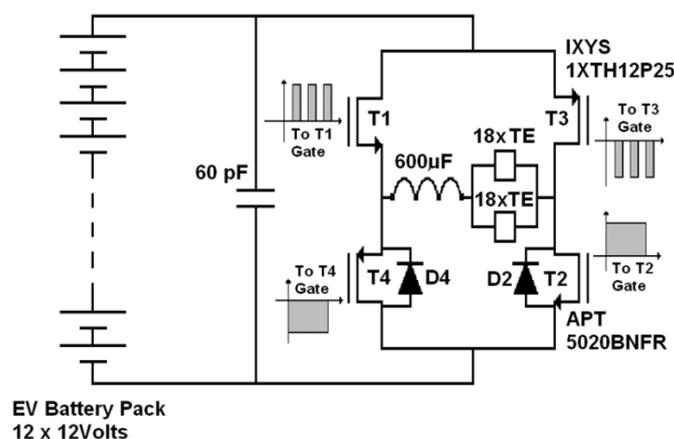


Figura 2.22 – Circuito de alimentação dos módulos TEC desenvolvido por Alaoui et al. (2005).

Alaoui et al. (2005) desenvolveu também o circuito de controlo, que permitiu controlar o sistema dos módulos TEC, tal como apresentado na Figura 2.23.

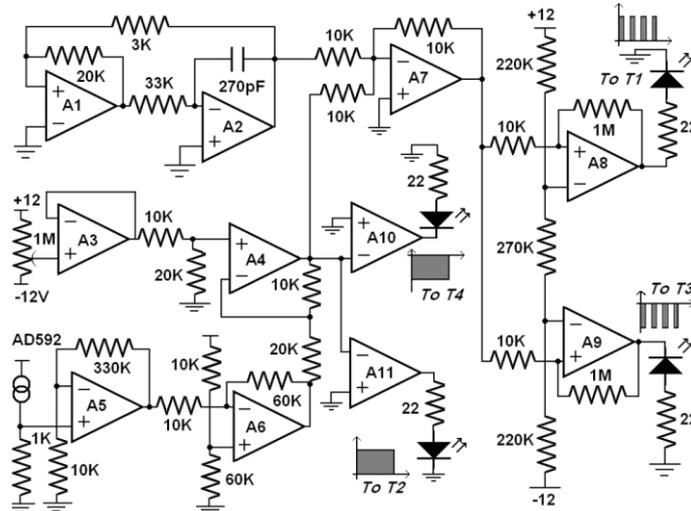


Figura 2.23 – Circuito de controlo dos módulos desenvolvido por Alaoui et al. (2005).

O circuito de controlo adquire o sinal de tensão de *offset* vindo de dois potenciômetros ajustados manualmente, e adquire o sinal de temperatura dado pelo transdutor de temperatura (ref. AD592), gerando uma onda tipo PWM (*Pulse With Modulation*, na literatura inglesa) que irá controlar a fonte de alimentação do módulo TEC.

Alaoui et al. (2005) instalou o sistema de controlo, de alimentação e as unidades no veículo, verificando que o sistema garantia um controlo estável.

Seguidamente o autor fez a modelação do sistema de gestão térmica, apresentando de início o circuito elétrico equivalente da unidade de gestão térmica, tal como apresentado na Figura 2.24.

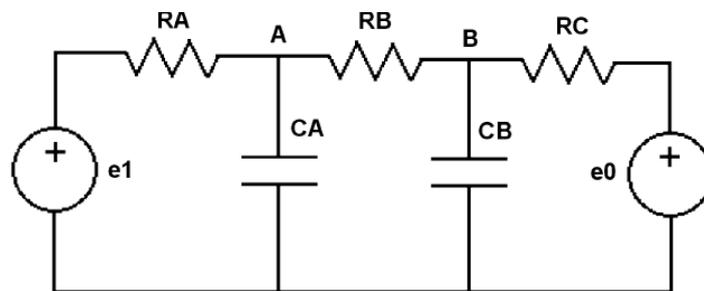


Figura 2.24 – Circuito elétrico equivalente da unidade de gestão térmica Alaoui et al. (2005).

Para a execução dos testes experimentais, Alaoui et al. (2005) impôs diferentes valores de corrente aos módulos TEC, ($I = 4 \text{ A}$, $I = 7 \text{ A}$ e $I = 10 \text{ A}$) registando a temperatura no compartimento das baterias. Foram executados testes para as condições de aquecimento e arrefecimento das baterias.

A Tabela 2.2 apresenta os resultados obtidos por Alaoui et al. (2005), incluindo a corrente (I), a temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), o coeficiente de desempenho obtido experimentalmente ($COP_{H,exp}$) e o coeficiente de desempenho máximo para a condiao de aquecimento ($COP_{H,te\acute{o}rico} = COP_{C,te\acute{o}rico} + 1$).

Tabela 2.2 - Resultados dos testes experimentais para a condiao de aquecimento, Alaoui et al. (2005)

Corrente, I (A)	Temperatura máxima, $T_{m\acute{a}x}$ (C)	$COP_{H,exp}$ (-)	$COP_{H,te\acute{o}rico}$ (-)
4	37	1,036	1,85
7	44	0,6	1,63
10	52	0,3	1,48

A Tabela 2.3 apresenta a corrente (I), a temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$), o coeficiente de desempenho obtido experimentalmente ($COP_{C,exp}$) e o coeficiente de desempenho máximo para a condiao de arrefecimento ($COP_{C,te\acute{o}rico}$).

Tabela 2.3 – Resultados dos testes experimentais para a condiao de arrefecimento, Alaoui et al. (2005)

Corrente, I (A)	Temperatura máxima, $T_{m\acute{a}x}$ (C)	$COP_{C,exp}$ (-)	$COP_{C,te\acute{o}rico}$ (-)
5	11	0,21	1,27
7	10	0,22	1,43
10	9,5	0,25	1,83

Alaoui et al. (2005) verificou que os resultados obtidos demonstram a viabilidade do sistema de gestão térmica das baterias baseado em módulos TEC, verificando que o sistema permite atingir a temperatura máxima de 52 C em modo de aquecimento e um mínimo de 9,5 C em modo de arrefecimento. O autor refere também que em modo de aquecimento foi obtido um valor médio de $COP_{H,exp} = 0,65$; enquanto em modo de arrefecimento o valor médio de $COP_{C,exp} = 0,23$. Para o autor os módulos TEC apresentam várias vantagens pois são componentes *solid-state*, isto é não apresentam componentes

móveis. Seguidamente são apresentadas várias vantagens da gestão térmica de baterias através de módulos TEC apresentadas por Alaoui et al. (2005):

- O sistema é seguro e com uma vida útil grande, pois não existem reações químicas ou uso de materiais de absorção;
- Baixo custo de manutenção;
- Amigo do ambiente, que vai ao encontro dos objetivos de um veículo elétrico;
- O sistema é relativamente leve;

O trabalho desenvolvido por Alaoui (2013) apresenta uma revisão sobre as baterias de íões de lítio ou *Li-ion* (na literatura inglesa *Lithium ion cells*) escolhidas para o caso de estudo, abordando o seu desempenho térmico, quando sujeitas a diferentes taxas de descarga. Faz também uma revisão teórica ao funcionamento dos módulos TEC selecionando para o caso de estudo o módulo Ferrotec's 9506/031/400. Este módulo TEC apresenta as seguintes características máximas: $I_{máx} = 40$ A, $V_{máx} = 4,3$ V, $\Delta T_{máx} = 72$ °C e $Q_{Cmáx} = 92$ W.

Para estimar a potência térmica gerada por uma célula de bateria, Alaoui (2013) carregou-a totalmente num ambiente com uma temperatura de -20 °C, tendo registado uma capacidade de armazenamento de energia de 174 Wh. De seguida sujeitou a célula a uma taxa de descarga de 1C no mesmo ambiente registando uma capacidade de descarga de energia de 137 Wh. Posteriormente, o autor calculou a energia perdida entre a carga e descarga (37 Wh), e sabendo o tempo de teste (48 minutos) estimou uma potência térmica gerada de 46,25 W por cada célula de bateria. Com estes resultados, o autor estimou também a eficiência da célula da bateria, obtendo um valor de aproximadamente cerca de 79%. O autor repetiu os testes para diferentes valores de temperatura ambiente e para diferentes taxas de carga e descarga. A Tabela 2.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos testes realizados.

Tabela 2.4 - Testes para cálculo da potência térmica gerada e eficiência pelo autor Alaoui (2013).

T célula (°C)	Eficiência (%)		Carga (Wh)	Energia de descarga		Energia perdida (Wh)		Potência perdida (W)	
	C	3C	CC/CV	C	3C	C	3C	C	3C
-20	78,73	75,86	174	137	132	37	42	46,25	168
0	82,54	81	189	156,01	153,12	32,99	35,88	37,36	126,78
25	95,8	89,92	196	187,78	176,25	8,22	19,75	8,35	62,5
40	98,6	97,4	198	195,23	196,87	2,77	5,13	2,77	15,54

Com estes testes, Alaoui (2013) conseguiu adquirir dados suficientes para dimensionar um BTMS. Para tal, colocou 6 módulos TEC na parte superior de cada célula, sendo esta a principal zona de aquecimento, e entres os módulos TEC e a célula colocou uma folha de alumínio. Usou um dissipador de alhetas onde estão conectadas ventoinhas com o intuito de maximizar a remoção de calor do módulo TEC. A Figura 2.25 apresenta o esquema de montagem utilizado pelo autor.

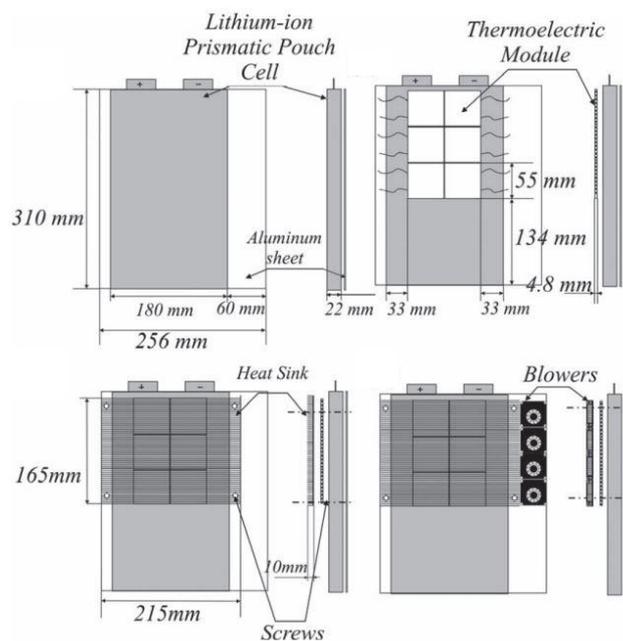


Figura 2.25 - Esquema de montagem dos módulos TEC, Alaoui (2013).

Sendo que os módulos TEC operam com corrente DC e visto que as baterias têm uma gama de tensão variável, o autor necessitou de criar um circuito de controlo de forma a regular a tensão. O módulo de baterias dispunha de 48 células cada uma com 3,3 V. As células estavam ligadas em série, assim a tensão no módulo foi de 158,4 V. Alaoui (2013) colocou 6 módulos TEC em cada célula, utilizando um total de 288 TEC. Para tal dimensionou um circuito que permite inverter a polaridade de alimentação dos módulos TEC, o que garante o aquecimento e o arrefecimento das células do módulo de baterias, e assim o controlo da sua temperatura no intervalo pretendido. O circuito era controlado por PWM com recurso a um circuito integrado - IC (*Integrated Circuit*, na literatura inglesa) UC3638.

A Figura 2.26 mostra o esquema do circuito elétrico da montagem e a Figura 2.27 o esquema de controlo do circuito elétrico.

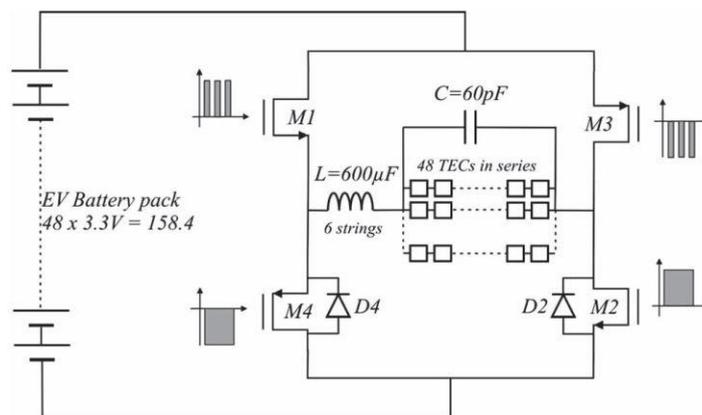


Figura 2.26 – Circuito elétrico da montagem.

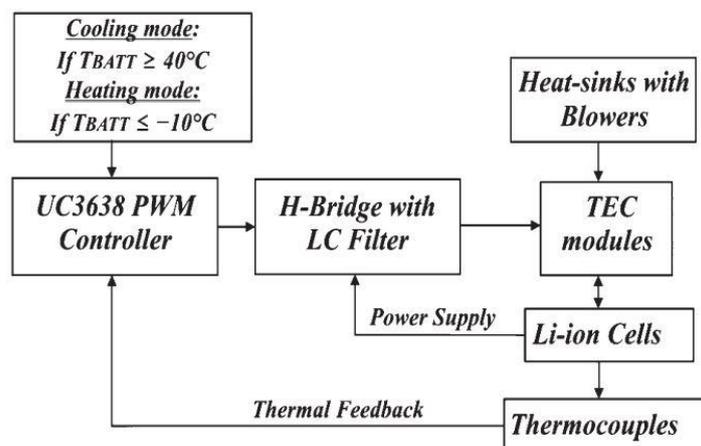


Figura 2.27 - Esquema do controlo do circuito elétrico.

Para finalizar, o autor fez testes em situações do dia a dia, onde equipou 2 veículos iguais denominados de veículo A e veículo B. No veículo A instalou um módulo de baterias sem BTMS e no veículo B instalou um módulo igual, mas com BTMS.

Ambos os veículos foram sujeitos aos mesmos testes e em simultâneo, o que garantiu as mesmas condições de temperatura e as mesmas condições de utilização. Os testes foram executados de acordo com o US 06, Liaw and Dubarry (2007). Os parâmetros de teste foram:

- Temperatura ambiente: 20 °C a 30 °C;
- Duração: 596 s;
- Distância: 12,8 km;
- Velocidade máxima: 129,2 km/h;
- Velocidade média: 77,4 km/h;
- Número de paragens: 5.

A Figura 2.28 apresenta os resultados do teste de estrada para os veículos A e B.

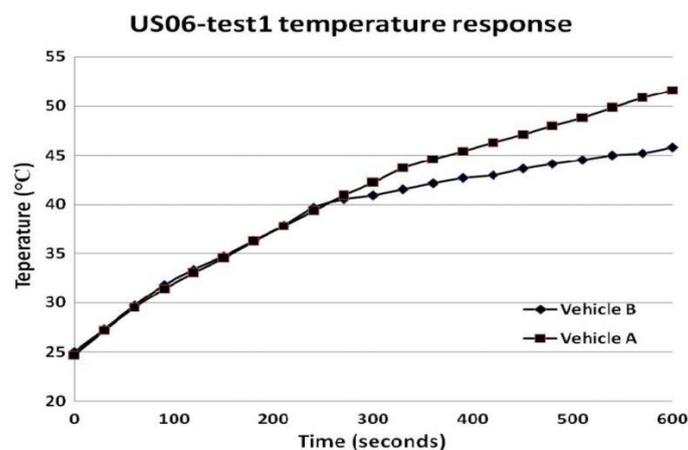


Figura 2.28 - Resultados do teste em estrada para os veículos A e B.

A Figura 2.28 mostra que o veículo B, equipado com BTMS registou uma temperatura máxima inferior em 8,82 °C em relação ao veículo A. No decorrer do teste, o BTMS consumiu cerca de 380 Wh. A massa do BTMS era de 51 kg.

O autor termina referindo que o teste mostrou que o efeito de *Peltier* aplicado em módulos de baterias usando módulos TEC garantem uma gestão térmica adequada para o tipo de baterias de estudo, classificando a resposta térmica e o consumo de energia como satisfatórios.

Mais recentemente, Alaoui (2018) apresentou um trabalho de continuação do seu trabalho desenvolvido em 2013. Neste artigo, o autor faz uma revisão teórica às baterias de *Li-ion*, abordando o seu desempenho térmico, quando sujeitas a diferentes taxas de descarga. Na Tabela 2.5 encontram-se resumidas as especificações das baterias usadas pelo autor.

Tabela 2.5 - Especificações da célula de bateria usada pelo autor Alaoui (2018).

Especificação	Valor
Capacidade nominal (Ah)	20
Potência de descarga nominal (W)	1200
Tensão nominal (V)	3,3
Gama de tensão (V)	2 – 3,6
Tensão máxima ($V_{m\acute{a}x}$)	4
Corrente de carregamento recomendada (A)	20
Corrente máxima de carregamento recomendada (A)	100
Temperatura de operação (°C)	-30 a 55
Temperatura recomendada (°C)	0 a 40

Para testar a potência térmica gerada pelas baterias e a energia perdida, foi necessário fazer o ciclo de carga/descarga a várias temperaturas ambiente (-20 °C, 0 °C, 24 °C e 40 °C). No carregamento foi aplicado o método recomendado de corrente constante/tensão constante. Foi aplicada uma corrente de 20 A, ou seja, uma taxa de carga (*C-rate*, na literatura inglesa) de valor igual a 1C, até atingir a tensão limite de 3,6 V. Ao atingir essa tensão o autor aplica uma corrente, que decresce de uma forma exponencial a uma tensão constante de 3,6 V. O carregamento é concluído quando a corrente de carregamento atinge 0,02C (0,4 A). Aplicando esta metodologia, o autor calculou a energia de carregamento.

Para calcular a energia de descarga, o autor submeteu as baterias a uma corrente de descarga de 1C (20 A) e de 5C (100 A), até à descarga total das baterias. A tabela apresenta os resultados obtidos pelo autor nos testes.

Tabela 2.6 - Calor gerado e energia perdida nos testes.

T_{celula} (°C)	η (%)	E_{Char} (Wh) CC/CV	E_{Disch} (Wh)	E_{Loss} (Wh)	Q_{BATT} (W)
C Teste de Descarga					
-20	76,56	59	45,1	13,9	17,75
0	82,27	62	51	11	12,7
24	95,1	65	61,82	3,18	3,23
40	98,3	66	64,88	1,12	1,12
5C Teste de Descarga					
-20	73,45	59	43,34	15,66	104,5
0	80,75	62	50,07	11,93	59,53
24	90,38	65	58,75	6,25	27,05
40	94,15	66	62,14	3,86	14,3

Alaoui (2018) faz uma revisão aos módulos TEC, referindo-os como módulos TEM, usando assim no seu projeto o TEM 9501/242/160B. As suas características encontram-se na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Características do módulo TEC 9501/242/160B utilizado por Alaoui (2018).

Símbolo	Descrição	Valor
	Dimensões do TEC (mm)	55×55×3,45
N	Número de pares de semicondutores	242
V	Tensão máxima (V)	33,3
I	Corrente máxima (A)	16
Q_c	Potência térmica removida máxima (W)	289
ΔT	Diferença de temperatura máxima (°C)	72
S	Coefficiente de Seebeck (V/K)	0,201
R	Resistência elétrica (Ω)	1,7352

Para remover a potência térmica gerada pelas células do módulo de baterias, o autor dimensionou um sistema de alhetas que são introduzidas entre as células do módulo de baterias e na sua base as alhetas estão conectadas a um dissipador. O autor denominou o conjunto de alhetas e dissipador de *heat spreader (wall and base)*. O *heat spreader* foi concebido de modo a suportar as 24 células da bateria, sendo resistente a vibrações, mas também de modo a maximizar a transferência de potência térmica gerada pelas células da bateria para os módulos TEC. O dimensionamento do *heat spreader* foi feito tendo em conta as dimensões das células da bateria. A Figura 2.29 apresenta as dimensões do *heat spreader*, bem como a sua montagem em conjunto com as células da bateria.

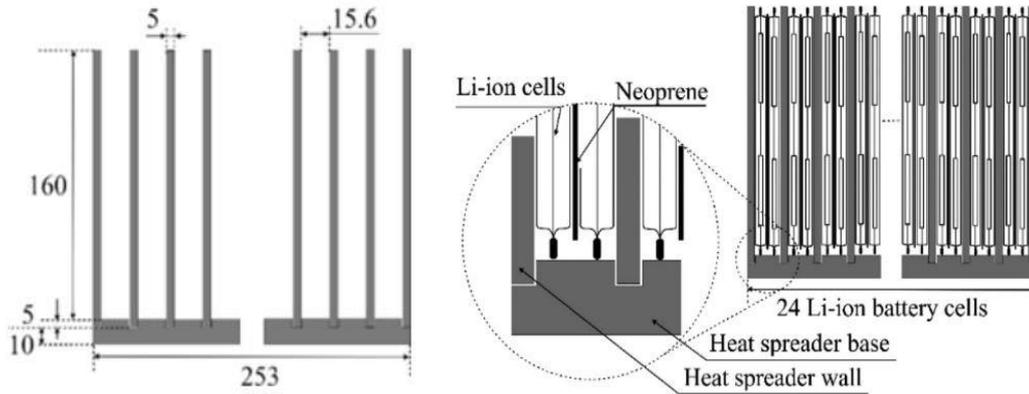


Figura 2.29 - a) Dimensões do *heat spreader* em mm; b) Montagem das células de bateria no *heat spreader*.

Entre cada duas células de bateria o autor optou por colocar uma membrana de Neopreno, o que segundo o autor, previne a danificação da estrutura interna da célula, afetando o SOC (*State of Charge*, na literatura inglesa), e o SOH (*State of Health*, na literatura inglesa).

Na base do *heat spreader*, do lado do módulo de baterias foram colocados 16 módulos TEC, e do lado oposto, o autor colocou um dissipador de calor de alhetas com ventoinhas, de modo a garantir convecção forçada, e assim maximizar a transferência de calor da fonte quente do módulo TEC para o ambiente.

A Figura 2.30 apresenta a disposição dos módulos TEC na base do *heat spreader*, e a Figura 2.31 mostra a disposição das ventoinhas no dissipador.

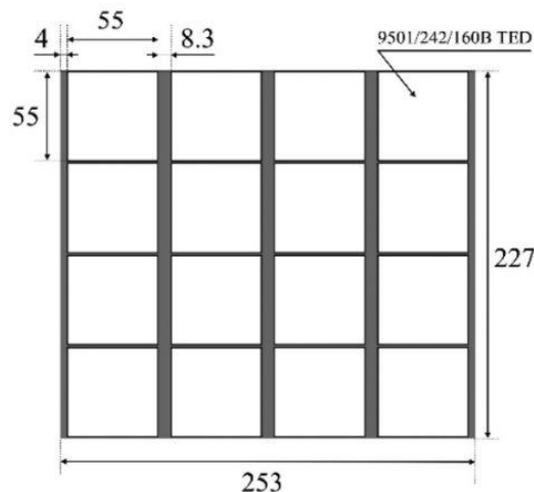


Figura 2.30 - Disposição dos módulos TEC no *heat spreader*.

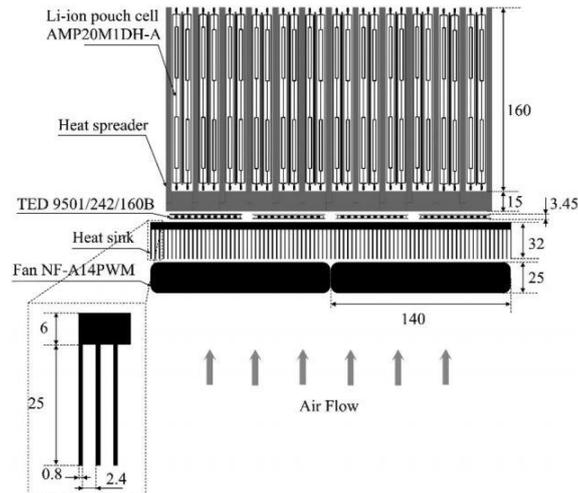


Figura 2.31 - Disposição das ventoinhas no dissipador.

A Figura 2.32 apresenta a montagem do BTMS desenvolvida por Alaoui (2018), bem como a direção do ar forçado pelas ventoinhas.

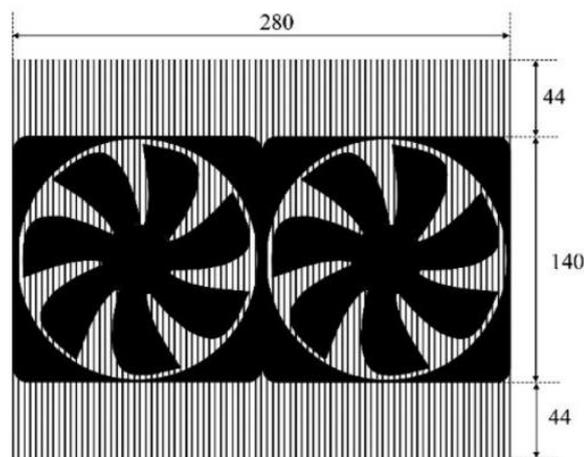


Figura 2.32 - Montagem do BTMS.

O autor dimensionou o BTMS para operar em vários regimes: i) quando as temperaturas das células da bateria se encontram abaixo de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, o BTMS vai operar em modo de aquecimento, ou seja, os módulos TEC vão aquecer as baterias com ambas as ventoinhas desligadas; ii) quando as células se encontram entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, o BTMS opera em modo passivo, ou seja, não é aplicada corrente nos módulos TEC e a potência térmica gerada pelas baterias é dissipada pelo *heat spreader*, com auxílio das ventoinhas; iii) acima de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, o BTMS opera em modo ativo, ou seja, de um lado os módulos TEC arrefeciam as baterias e do outro lado, o calor produzido por estes era removido pelo dissipador de calor com auxílio das ventoinhas.

Como testes de eficiência do BTMS, o autor sujeitou as baterias a diferentes taxas de descarga (C, 3C e 5C) e a diferentes temperaturas ambiente (-20 °C, 0 °C, 25 °C e 40 °C). Para realizar a medição de temperatura das baterias, Alaoui (2018) utilizou termopares tipo-T com uma precisão de $\pm 0,5$ °C. O autor registou também a corrente consumida pelo BTMS.

A Tabela 2.8 resume os resultados dos testes feitos em laboratório.

Tabela 2.8 - Resultado dos testes laboratoriais.

	C/1	3C	5C
-20 °C Teste			
Tempo de Teste	56 min 35 sec	17 min 64 sec	9 min
Temperatura máxima registada	14,5 °C	22,6 °C	28,1 °C
Tipo de BTMS	Aquecimento	Aquecimento	Aquecimento
BTMS ativo	18 min 29 sec	8 min 38 sec	4 min 12 sec
Energia consumida pelo BTMS	32,67 Wh	17,26 Wh	9,34 Wh
0 °C Teste			
Tempo de Teste	58 min 09sec	19 min	11 min
Temperatura máxima registada	26,9 °C	38,1 °C	43,2 °C
Tipo de BTMS	Passivo	Ventilação	Arrefecimento
BTMS ativo	0 min	0 min	2 min 32 sec
Energia consumida pelo BTMS	0Wh	0Wh	3,8 Wh
25 °C Teste			
Tempo de Teste	60 min	20 min	12 min
Temperatura máxima registada	40,35 °C	47,21 °C	53,17 °C

Tipo de BTMS	Arrefecimento	Arrefecimento	Arrefecimento
BTMS ativo	31 min 20 sec	10 min 15 sec	9 min
Energia consumida pelo BTMS	21,05 Wh	17,56 Wh	15,63 Wh
40 °C Teste			
Tempo de Teste	60 min	20 min	12
Temperatura máxima registada	54 °C	59,56 °C	63,78 °C
Tipo de BTMS	Arrefecimento	Arrefecimento	Arrefecimento
BTMS ativo	60 min	20 min	12 min
Energia consumida pelo BTMS	75 Wh	64,32 Wh	63,54 Wh

Adicionalmente, para demonstrar a eficiência do BTMS, o autor instalou-o num veículo elétrico e sujeitou-o ao teste *US06 Driving Cycle*, afirmando que este teste é o que melhor simula elevadas velocidades e acelerações agressivas. Este teste consiste numa duração de 596 s e numa distância total percorrida de 12,8 km. Durante o teste, o veículo atinge uma velocidade máxima de 129,2 km/h, sendo a velocidade média de 77,4 km/h. Foram realizados vários testes, diferindo entre eles apenas a temperatura inicial das baterias (9 °C, 24 °C e 33 °C). A Figura 2.33 traduz o comportamento das baterias bem como as variações a que estão sujeitas ao longo do teste.

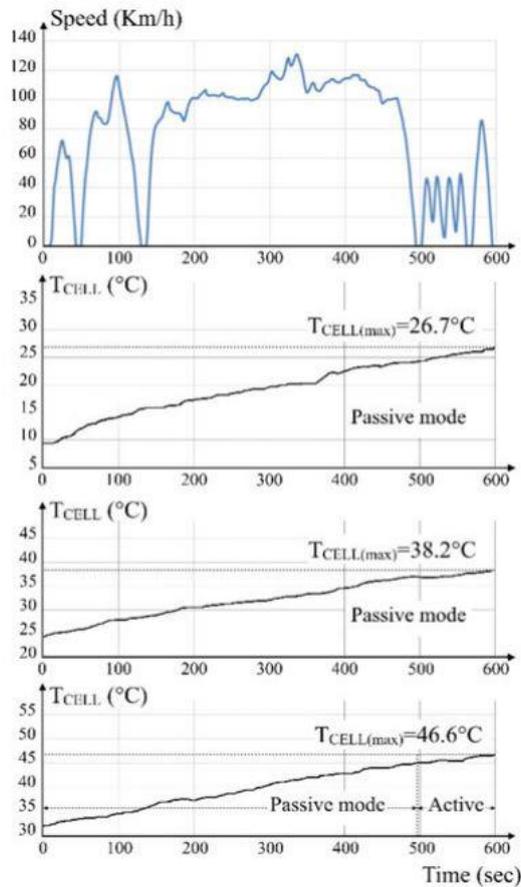


Figura 2.33 - Variação da temperatura das baterias de acordo com o teste *US06 Driving Cycle*.

Após isto, o autor construiu uma caixa onde pudesse albergar os *packs* de baterias, e de modo a garantir uma convecção forçada equipou essa caixa com ventoinhas. Este BTMS baseado em convecção forçada serviu para a comparação com o BTMS baseado em módulos TEC inicialmente construído. Os esquemas representativos do sistema de BTMS com de convecção forçada são apresentados nas Figura 2.34, Figura 2.35 e Figura 2.36.

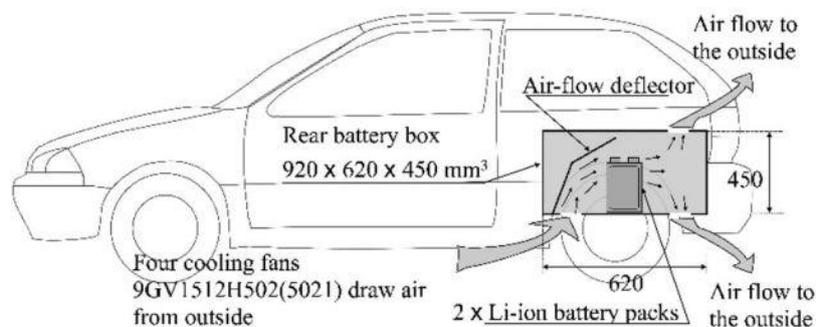


Figura 2.34 - Disposição do BTMS com sistema de convecção forçada.

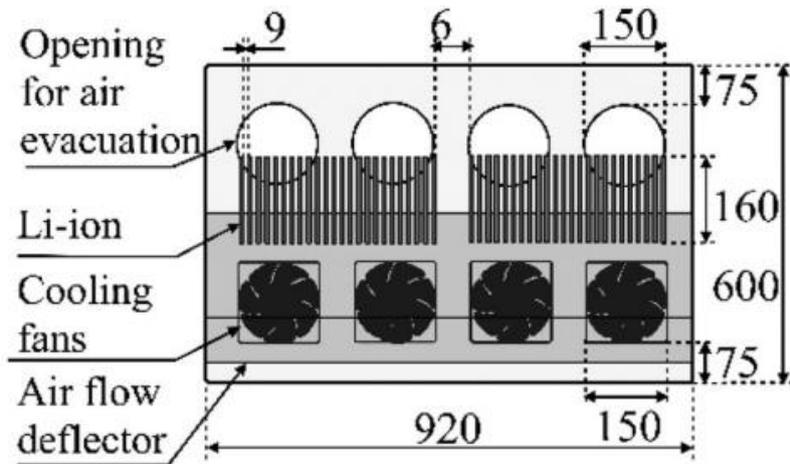


Figura 2.35 - Vista superior do sistema de arrefecimento por convecção forçada.

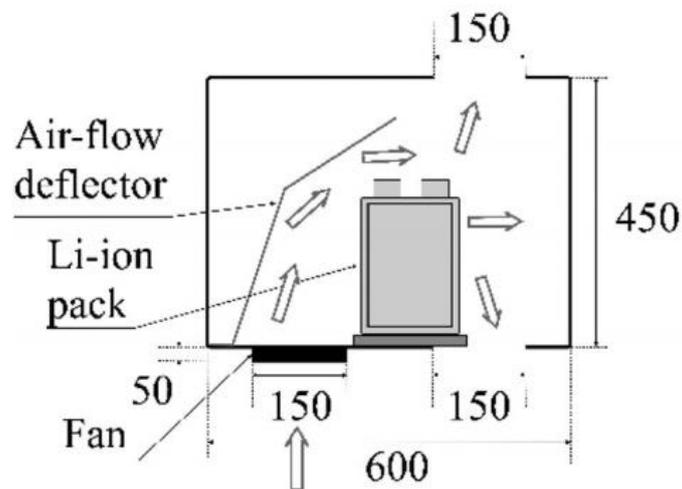


Figura 2.36 - Vista lateral do sistema de arrefecimento por convecção forçada.

Posteriormente, o autor realizou o teste *US06 Driving Cycle* para testar a capacidade de arrefecimento do sistema de BTMS com ar forçado, tendo obtido os seguintes resultados, ver Figura 2.37.

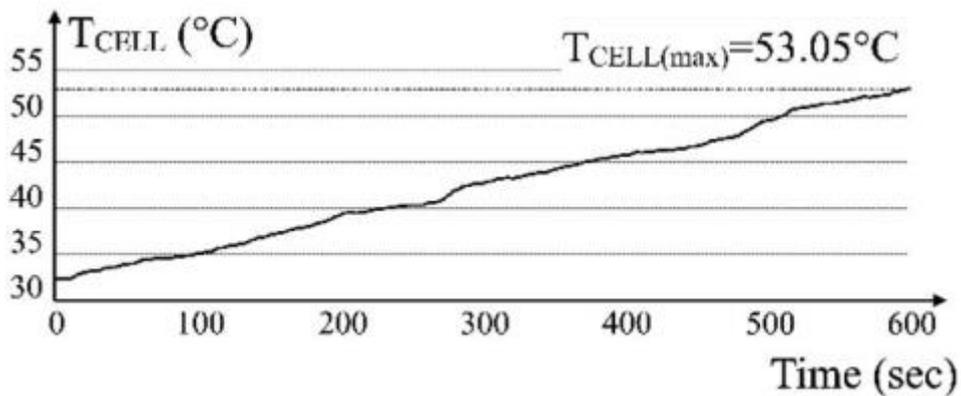


Figura 2.37 - Aquecimento das baterias com o sistema de ar forçado durante o teste.

Fez também uma análise ao peso, volume ocupado e energia armazenado pelo pack de baterias com e sem BTMS, ver Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Especificações do BTMS para uma bateria com 24 células.

	Baterias	Baterias + BTMS	Diferença
Peso Total (kg)	12	21,8	+81,6 %
Volume Total (cm ³)	6843	15028	+120 %
Energia armazenada (Wh)	1560	1485	-4,8 % (-75 Wh)

Numa análise final, o autor faz um comparativo dos vários testes realizados em regime de quotidiano segundo o *US06 Driving Cycle*. Este registou que num dia relativamente quente, um veículo equipado com BTMS com módulos TEC, a temperatura máxima atingida é cerca de 46 °C, enquanto num veículo equipado apenas com arrefecimento por ar forçado, a temperatura máxima registada é cerca de 53°C. Os resultados comparativos encontram-se apresentados na seguinte tabela.

Tabela 2.10 - Resultados dos testes realizados sobre a norma *US06 Drive Cycles*.

Temperatura ambiente	Temperatura máxima registada	Modo de Operação	Energia consumida
BTMS			
9 °C	26,7 °C	Passivo	-
24 °C	38,2 °C	Passivo	-
33 °C	46,6 °C	Passivo / Ativo	38 Wh
Ar Forçado			
33 °C	56,06 °C		23,2 Wh

O autor refere que o BTMS com sistema de convecção forçada, em dias de calor, representa um risco pois é possível que as baterias atinjam uma temperatura de 60°C, o que acarreta perigos para o veículo e ocupantes.

Como trabalhos futuros o autor propõe uma simulação do dissipador em elementos finitos com o intuito de otimizar as dimensões para um melhor arrefecimento.

A Tabela 2.11 apresenta um resumo dos trabalhos analisados com BTMS equipado com módulos TEC.

Tabela 2.11 – Trabalhos analisados para o atual caso de estudo.

Tipo de estudo	Especificações do TEC	Especificações das baterias	Potência térmica a remover	$COP_{C,exp}$	Autor
Experimental	3 unidades; 12 TEC/unidade	12 células 12V 38AH	-	0,25	Alaoui et al. (2005)
Experimental	6 TEC/ célula	48 células LiFePO ₄	168W / célula	0,93	Alaoui (2013)
Experimental	-	3,2 V 110 Ah	-	-	Liu et al. (2014)
Experimental	-	-	-	0,63 < $COP_{C,exp}$ <0,94	Kim et al. (2014)
Experimental	2 TEC	1 célula (NMC) 5 Ah	-	-	Hunt et al. (2016)
Experimental	1 TEC	-	-	1,2	Maral et al. (2017)

Experimental	16 TEC	24 células LiFePO ₄	104,5W / Célula	-	Alaoui (2018)
Experimental	1 TEC	9 células Tipo 18650 3,7V 3,2Ah	-	-	Li et al. (2019)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

3. Caso de Estudo

3.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado à caracterização do sistema de gestão térmica do módulo de baterias em estudo. A secção 3.2 apresenta as características do módulo de baterias e uma estimativa da potência térmica gerada pelas mesmas. A secção 3.3 apresenta o sistema de gestão térmica baseado em TEC da empresa *Mahle*. A secção 3.4 é dedicada ao estudo e seleção dos módulos termoelétricos utilizados no presente caso de estudo. A secção 3.4.1 apresenta as equações utilizadas para quantificar o parâmetro de desempenho de um módulo TEC. A secção 3.4.2 apresenta um estudo analítico dos parâmetros de desempenho para o módulo TEC selecionado, TEC1-12730.

3.2. Caracterização do sistema em estudo

Um dos maiores desafios nos veículos elétricos é o controlo adequado da temperatura de funcionamento das baterias. A potência térmica gerada pelas baterias depende da taxa de carga (*C-rate*, na literatura inglesa) ou descarga das mesmas.

Para tal, no presente estudo, foi concebida uma montagem experimental para o estudo de um sistema de gestão térmica em baterias através da utilização de módulos TEC. Neste contexto, a secção 3.2.1 apresenta as principais características do módulo de baterias selecionado. A secção 3.2.2 apresenta uma estimativa da potência térmica gerada pelo módulo de baterias.

3.2.1. Módulo de Baterias

As baterias de tração selecionadas para o presente caso de estudo são as utilizadas no veículo elétrico BMW i3. Estas baterias são de iões de lítio do tipo NMC (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*, na literatura inglesa), a Tabela 3.1 apresenta as suas principais características. Tal como se pode observar na Tabela 3.1 cada célula tem: uma tensão nominal de 3,68 V, podendo atingir no máximo, em estado de carga 4,15 V; uma

capacidade nominal de cerca de 94 Ah, sendo o valor máximo de 95,6 Ah; e uma capacidade de armazenamento de energia de 355 Wh.

Tabela 3.1 - Características referentes a uma célula, Hesse et al. (2017).

Descrição	Valor médio
Tensão nominal (V)	3,68
Gama de tensão (V)	2,7-4,15
Capacidade nominal (Ah)	94
Energia (Wh)	350
Massa (kg)	2,01
Ciclo de vida (80% SOH) (ciclos)	5000
Densidade energética (Wh/kg)	174,13

A Figura 3.1 mostra as células prismáticas Samsung SDI 94 Ah utilizadas no presente estudo.

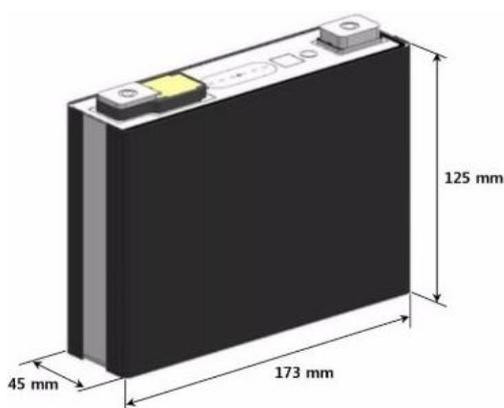


Figura 3.1 - Célula Samsung SDI 94Ah.

O módulo de baterias que se pretende estudar é constituído por 12 células, conferindo-lhe assim uma configuração de 1P12S, pois essas 12 células encontram-se acopladas em série, ver Figura 3.2. O módulo possui uma tensão nominal de cerca de 44,16 V e uma tensão máxima de 49,8 V em estado de carga, tendo uma capacidade de armazenamento de energia de cerca de 4,4 kWh.



Figura 3.2 - Módulo de bateria constituído por 12 células.

Tabela 3.2 - Características referentes a cada um dos módulos de baterias.

Descrição	Valor médio
Tensão nominal (V)	44,4
Gama de tensão (V)	32,4-49,8
Capacidade nominal (Ah)	94
Energia (kWh)	4,4
Massa (kg)	±25
Resistência interna (mΩ)	1,25

Visto que no caso em estudo se pretende o acoplamento de 2 módulos em paralelo a configuração passa a ser 2P12S (2 paralelo, 12 série) apresentando assim os mesmos valores de tensão, aumentando a capacidade de armazenamento de energia para 8,8 kWh.

3.2.2. Potência térmica gerada nas baterias

Para o cálculo da potência térmica gerada no módulo de baterias, recorreu-se à equação 3.1, sendo esta uma expressão empírica fornecida por um fabricante, Xalt XMP17P Integration Manual.

$$\dot{Q} = I^2 \times \left(\frac{R}{N}\right) \times n \times 1,75 \quad 3.1$$

Onde,

\dot{Q} - Potência térmica gerada por módulo (W);

I - Corrente de carga/descarga do módulo (A);

R - Resistência interna de uma célula (Ω);

N - Número de módulos;

n - Número de células por módulo.

Para o caso de estudo, considerou-se o acoplamento de 2 módulos em paralelo ($N=2$), cada um com 12 células de bateria ($n=12$) e um C -rate máximo de 3C.

Aplicando a Eq. 3.1, obtiveram-se os valores de potência térmica gerada (\dot{Q}) em função da corrente de carga/descarga (I), tal como apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Potência térmica gerada dependendo do C -rate.

C -rate	-	0,25	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Corrente (I)	A	23,5	47,0	70,5	94,0	141,0	188,0	235,0	282,0
Potência de térmica gerada (\dot{Q})	W	7,2	29,0	65,2	116,0	260,9	463,9	724,8	1043,8

A Figura 3.3 apresenta a variação da potência térmica gerada em função da corrente consumida.

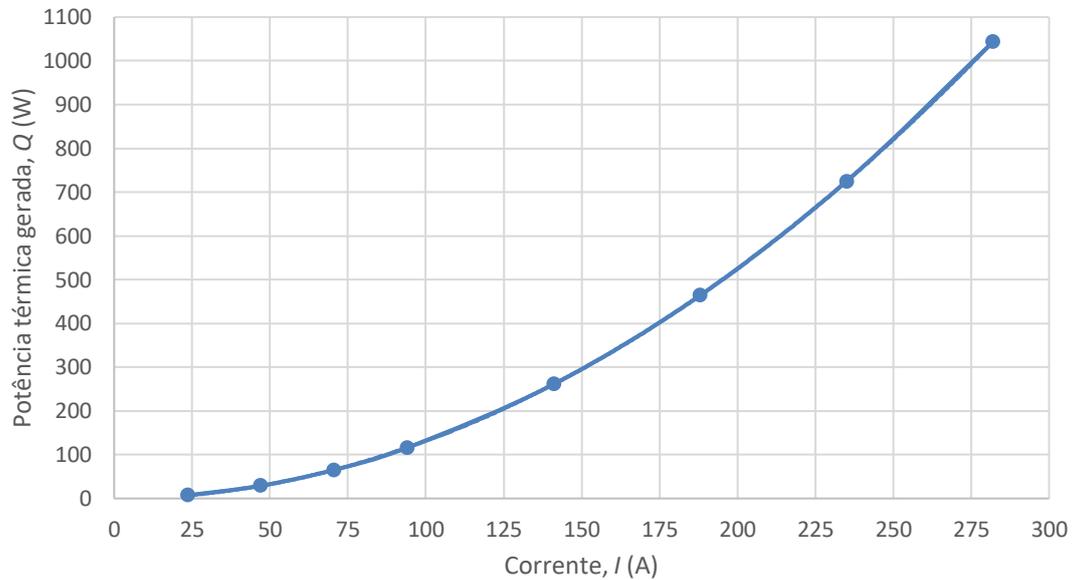


Figura 3.3 – Potência térmica gerada pelas baterias tendo em conta a corrente consumida.

É possível observar que a potência térmica gerada aumenta de forma quadrática com a corrente consumida, obtendo-se um valor máximo de 1043,8 W para um *C-rate* igual a 3C.

3.3. Sistema de gestão térmica de baterias *MAHLE*

O sistema de gestão térmica das baterias baseado no efeito termoelétrico apresenta-se como uma alternativa interessante relativamente aos sistemas convencionais, Mahle (2015).

O sistema da *MAHLE*, representado na Figura 3.4, consiste numa placa para permuta de calor (*thermoelectric battery plate*) onde se encontram vários módulos TEC conectados entre si.



Figura 3.4 – *MAHLE Thermoelectric battery plate*.

Na fonte fria, os TEC encontram-se em contacto com a base do módulo de baterias por via de um permutador de calor (*heat exchanger*), e a fonte quente encontra-se em contacto com um dissipador (*fluid plate*) de fluido circulante de baixa temperatura. A Figura 3.5 apresenta o esquema da montagem.

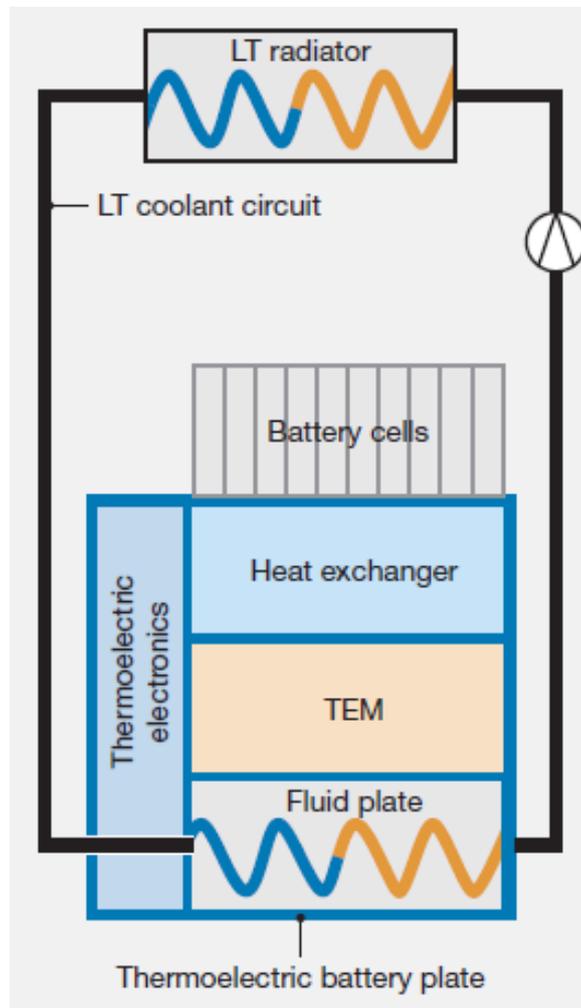


Figura 3.5 – Esquema da montagem do *Thermoelectric battery plate*, Mahle (2015).

3.4. Módulos termoelétricos

3.4.1. Caracterização e desempenho de um módulo TEC

Para a seleção do módulo TEC é necessário garantir um bom compromisso entre:

- Área de contacto do TEC com as baterias;
- A potência térmica absorvida/fornecida;
- Custo do módulo TEC.

Para tal, é necessário recorrer às equações matemáticas para caracterização do módulo TEC, Ferrotec (2019). Assim, o coeficiente de Seebeck é dado por:

$$S = S_M \times \frac{N}{71} \quad 3.2$$

Onde,

S - Coeficiente de Seebeck (V/K);

S_M - Coeficiente Seebeck do módulo TEC padrão (V/K);

N - Número de pares de semicondutores.

Para o cálculo do coeficiente de Seebeck do módulo TEC padrão (S_M) são utilizadas as equações 3.3 e 3.4, onde são aplicados os coeficientes do módulo padrão para a fonte fria (S_{MTc}) e para a fonte quente (S_{MTh}).

$$S_{MTc} = s_1 T_c + \frac{s_2 T_c^2}{2} + \frac{s_3 T_c^3}{3} + \frac{s_4 T_c^4}{4} \quad 3.3$$

$$S_{MTh} = s_1 T_h + \frac{s_2 T_h^2}{2} + \frac{s_3 T_h^3}{3} + \frac{s_4 T_h^4}{4} \quad 3.4$$

Onde,

S_{MTc} - Coeficiente de Seebeck da fonte fria (V) (Eq. 3.3);

S_{MTh} - Coeficiente de Seebeck da fonte quente (V) (Eq. 3.4);

T_c - Temperatura da fonte fria (K);

T_h - Temperatura da fonte quente (K);

Coeficientes para um módulo TEC: $N = 71$; $I=6$ A. Obtidos de Ferrotec (2019);

- $s_1 = 1,33450 \times 10^{-2}$
- $s_2 = -5,37574 \times 10^{-5}$
- $s_3 = 7,42731 \times 10^{-7}$
- $s_4 = -1,27141 \times 10^{-9}$

Posteriormente, calculou-se o coeficiente de Seebeck do módulo TEC padrão (S_M):

$$S_M = \frac{(S_{MTh} - S_{MTc})}{\Delta T} \quad 3.5$$

Onde,

S_M - Coeficiente Seebeck do módulo TEC padrão (V/K);

S_{MTc} - Coeficiente de Seebeck da fonte fria (V) (Eq. 3.3);

S_{MTh} - Coeficiente de Seebeck da fonte quente (V) (Eq. 3.4);

ΔT - Diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria (K).

A resistência elétrica é dada por:

$$R = R_M \times \frac{6}{I} \times \frac{N}{71} \quad 3.6$$

Onde,

R - Resistência elétrica (Ω);

R_M - Resistência elétrica do módulo TEC padrão (Ω);

I - Corrente consumida pelo módulo (A);

N - Número de pares de semicondutores.

Para o cálculo do coeficiente da resistência elétrica do módulo TEC padrão (R_M) são utilizadas as equações 3.7 e 3.8, onde são aplicados os coeficientes do módulo padrão para a fonte fria (R_{MTc}), e para a fonte quente (R_{MTh}).

$$R_{MTc} = r_1 T_c + \frac{r_2 T_c^2}{2} + \frac{r_3 T_c^3}{3} + \frac{r_4 T_c^4}{4} \quad 3.7$$

$$R_{MTh} = r T_h + \frac{r_2 T_h^2}{2} + \frac{r_3 T_h^3}{3} + \frac{r_4 T_h^4}{4} \quad 3.8$$

Onde,

R_{MTc} - Resistência elétrica da fonte fria ($\Omega \cdot K$) (Eq. 3.7);

R_{MTh} - Resistência elétrica da fonte quente ($\Omega \cdot K$) (Eq. 3.8);

T_c - Temperatura da fonte fria (K);

T_h - Temperatura da fonte quente (K);

Coeficientes para um módulo TEC: N=71; I=6. Obtidos de Ferrotec (2019);

- $r_1 = 2,08317$
- $r_2 = -1,98763 \times 10^{-2}$
- $r_3 = 8,53832 \times 10^{-5}$
- $r_4 = -9,03143 \times 10^{-8}$

Posteriormente, calculou-se o coeficiente de resistência elétrica do módulo TEC padrão (R_M):

$$R_M = \frac{(R_{MTh} - R_{MTc})}{\Delta T} \quad 3.9$$

Onde,

R_M - Resistência elétrica do módulo TEC padrão (Ω);

R_{MTc} - resistência elétrica da fonte fria ($\Omega \cdot K$) (Eq. 3.7);

R_{MTh} - resistência elétrica da fonte quente ($\Omega \cdot K$) (Eq. 3.8);

ΔT - Diferença de temperatura entre a fonte quente e fria.

A condutividade térmica é dada por:

$$K = K_M \times \frac{I}{6} \times \frac{N}{71} \quad 3.10$$

Onde,

K - Condutividade térmica (W/m·K);

K_M - Condutividade térmica do módulo TEC padrão (W/m·K);

I - Corrente consumida pelo módulo (A);

N - Número de pares de semicondutores.

Para o cálculo do coeficiente da condutividade térmica do módulo TEC padrão (K_M) são utilizadas as equações 3.11 e 3.12, onde são aplicados os coeficientes do módulo padrão para a fonte fria (K_{MTc}) e para a fonte quente (K_{MTh}).

$$K_{MTc} = k_1 T_c + \frac{k_2 T_c^2}{2} + \frac{k_3 T_c^3}{3} + \frac{k_4 T_c^4}{4} \quad 3.11$$

$$K_{MTh} = k T_h + \frac{k_2 T_h^2}{2} + \frac{k_3 T_h^3}{3} + \frac{k_4 T_h^4}{4} \quad 3.12$$

Onde,

K_{MTc} - Condutividade térmica da fonte fria (W/m) (Eq. 3.11);

K_{MTh} - Condutividade térmica da fonte quente (W/m) (Eq. 3.12);

T_c - Temperatura da fonte fria (K);

T_h - Temperatura da fonte quente (K);

Coeficientes para um módulo TEC: $N = 71$; $I = 6$. Obtidos de Ferrotec (2019);

- $r_1 = 4,76218 \times 10^{-1}$
- $r_2 = -3,89821 \times 10^{-6}$
- $r_3 = -8,64864 \times 10^{-6}$
- $r_4 = 2,20869 \times 10^{-8}$

Posteriormente, calculou-se a condutividade térmica do módulo TEC padrão (K_M):

$$K_M = \frac{(K_{MTh} - K_{MTc})}{\Delta T} \quad 3.13$$

Onde,

K_M - Condutividade térmica do módulo TEC padrão (W/m·K);

K_{MTc} - Condutividade térmica da fonte fria (W/m) (Eq. 3.11);

K_{MTh} - Condutividade térmica da fonte quente (W/m) (Eq. 3.12);

ΔT - Diferença de temperatura entre a fonte quente e fria.

Após o cálculo dos coeficientes (S , R , K), a potência térmica removida da fonte fria do módulo TEC, foi calculada do seguinte modo, Ferrotec (2019):

$$\dot{Q}_c = (S \times T_c \times I) - (0,5 \times I^2 \times R) - (K \times \Delta T) \quad 3.14$$

Onde,

\dot{Q}_c - Potência térmica removida da fonte fria (W);

T_c - Temperatura da fonte fria (K);

I - Corrente consumida pelo módulo (A);

S - Coeficiente Seebeck (Eq. 3.2);

R - Resistência elétrica (Eq. 3.6);

K - Condutividade térmica (Eq. 3.10);

ΔT - Diferença de temperaturas entre a fonte quente e fria.

A potência térmica dissipada pela fonte quente do módulo TEC, é calculada do seguinte modo, Ferrotec (2019):

$$\dot{Q}_h = (S \times T_H \times I) + (0,5 \times I^2 \times R) - (K \times \Delta T) \quad 3.15$$

Onde,

\dot{Q}_h - Potência térmica dissipada pela fonte quente (W);

T_H - Temperatura da fonte quente (K);

I - Corrente consumida pelo módulo (A);

S - Coeficiente Seebeck (Eq. 3.2);

R - Resistência elétrica (Eq. 3.6);

K - Condutividade térmica (Eq. 3.10);

ΔT - Diferença de temperatura entre a fonte quente e fria.

A tensão de operação do módulo TEC, é calculada do seguinte modo, Ferrotec (2019):

$$V = (S \times \Delta T) + (I \times R) \quad 3.16$$

Onde,

V - Tensão de operação do módulo TEC (V);

S - Coeficiente Seebeck (Eq. 3.2);

R - Resistência elétrica (Eq. 3.6);

ΔT - Diferença de temperatura entre a fonte quente e fria.

A potência consumida pelo módulo TEC, é calculada do seguinte modo, Ferrotec (2019):

$$P = V \times I \quad 3.17$$

Onde,

P - Potência consumida pelo módulo TEC (W)

V - Tensão de operação do módulo TEC (V) (Eq. 3.16);

I - Corrente consumida pelo módulo TEC (A).

O coeficiente de desempenho do módulo TEC, é calculado do seguinte modo, Ferrotec (2019):

$$COP_c = \dot{Q}_c / (V \times I) \quad 3.18$$

Onde,

COP_c - Coeficiente de desempenho;

\dot{Q}_c - Potência térmica removida pela fonte fria (W);

V - Tensão de operação do módulo TEC (V) (Eq. 3.16);

I - Corrente consumida pelo módulo TEC (A).

3.4.2. Estudo analítico dos parâmetros de desempenho

Posto isto, o módulo TEC selecionado foi o TEC1-12730. A Figura 3.6, apresenta o módulo TEC1-12730 e respectivas dimensões (62 × 62 × 3,9 mm). O módulo selecionado permite uma distribuição uniforme de temperatura ocupando assim a maior parte de área da base das baterias não comprometendo o número de TEC's, garantindo também a capacidade necessária para a remoção da potência térmica gerada pelas baterias.

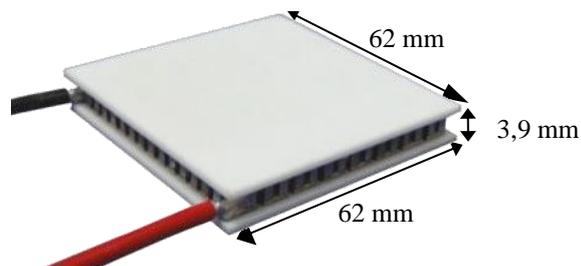


Figura 3.6 - Módulo TEC1-12730.

A Tabela 3.4 apresenta as características do módulo TEC1-12730 selecionado para o presente estudo:

Tabela 3.4 - Características do Módulo TEC1-12730.

Variável	Valor
Dimensões ($L \times H \times A$) (mm)	$62 \times 62 \times 3,9$
Corrente máxima, $I_{m\acute{a}x}$ (A)	30
Tensão máxima, $V_{m\acute{a}x}$ (V)	16,2
Potência máxima, $P_{m\acute{a}x}$ (W)	486
Potência térmica absorvida máxima, $\dot{Q}_{c,m\acute{a}x}$ (W)	267
Número de pares de semicondutores, N (-)	127
$\Delta T_{m\acute{a}x}$ (°C)	68

A Figura 3.7 apresenta a variação do coeficiente de Seebeck (S) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

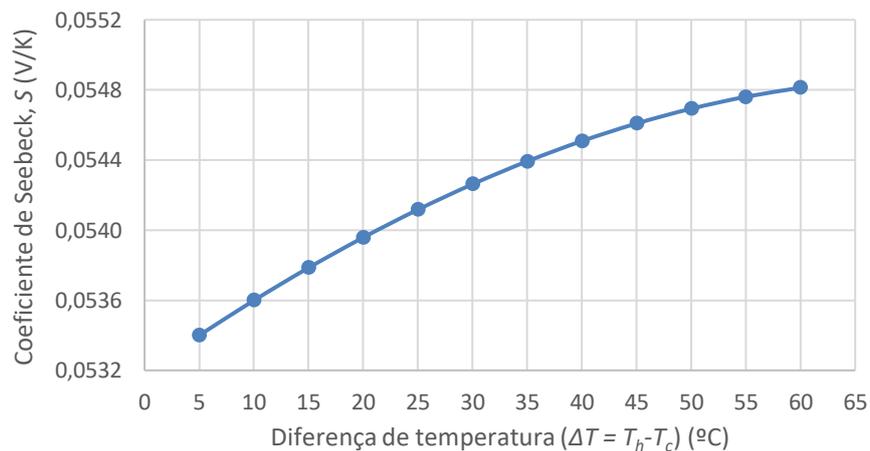


Figura 3.7 – Variação do coeficiente de Seebeck (S) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$ °C).

Para a diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), o coeficiente de Seebeck (S) encontra-se no intervalo $0,0534 \leq S \leq 0,0548$ V/K, e aumenta com o aumento do ΔT .

A Figura 3.8 mostra a variação da condutividade térmica (K) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

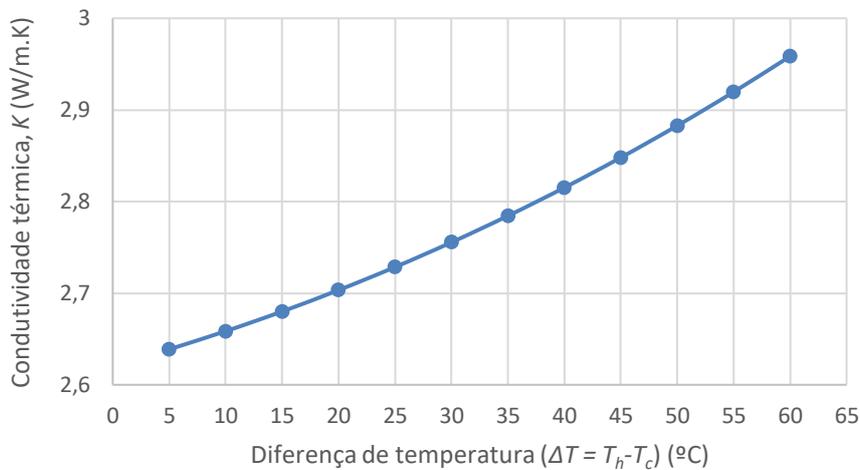


Figura 3.8 – Variação da condutividade térmica (K) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

Para a diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), a condutividade térmica (K) encontra-se no intervalo $2,6 < K < 3$ W/m.K, e aumenta com o aumento do ΔT .

A Figura 3.9 expressa a variação da resistência elétrica (R) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

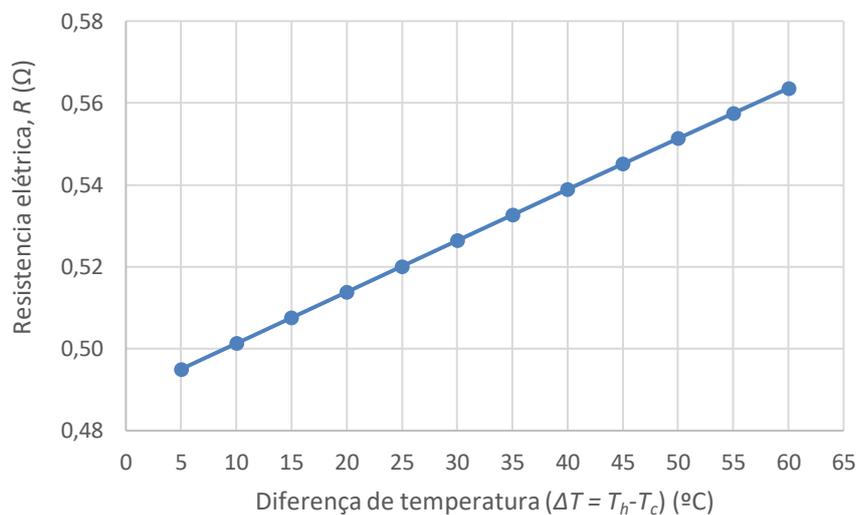


Figura 3.9 - Variação da resistência elétrica (R) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

Para a diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), a resistência elétrica (R) encontra-se no intervalo $0,48 < R < 0,57$ Ω, e aumenta com o aumento do ΔT .

Conhecidos os parâmetros (S , K e R) do módulo TEC1-12730, é possível traçar as curvas de funcionamento do módulo, e através delas procurar encontrar o ponto de funcionamento mais adequado para o caso de estudo. Tal como foi referido na secção 2.5.2, a figura de mérito (ZT) de um módulo TEC é determinada através da Eq. 2.1 ($ZT = \frac{S^2}{R \times K} T$). A Figura 3.10 expressa o valor da figura de mérito do módulo TEC1-12730 em função da diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria.

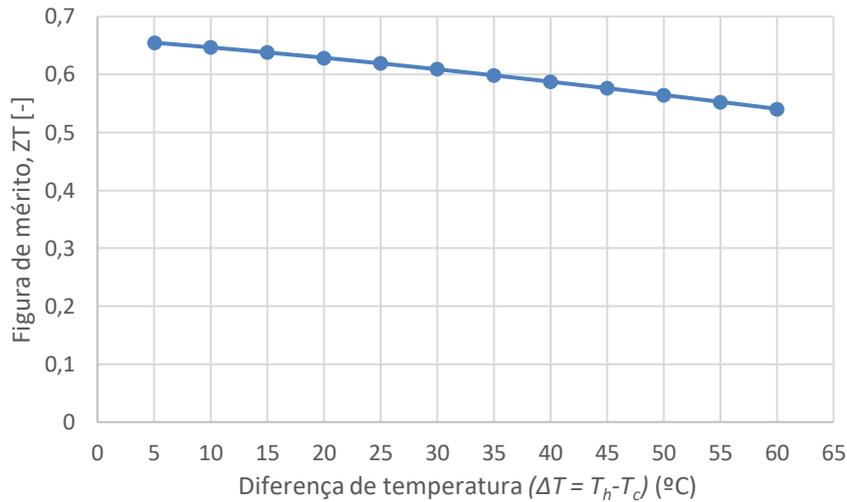


Figura 3.10 - Variação da figura de mérito (ZT) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.10 mostra que o valor de ZT decresce ligeiramente com o aumento da diferença de temperatura, sendo que o seu valor se situa no intervalo de 0,54 a 0,65.

Elarusi et al. (2017) apresentam uma equação para determinar a corrente máxima ($I_{m\acute{a}x}$) para a potência térmica absorvida máxima ($\dot{Q}_{C,m\acute{a}x}$):

$$I_{m\acute{a}x,\dot{Q}_C} = \frac{S \times T_C}{R} \quad 3.19$$

Onde,

$I_{m\acute{a}x,\dot{Q}_C}$ - Corrente máxima para a potência térmica absorvida máxima ($\dot{Q}_{C,m\acute{a}x}$);

S - Coeficiente Seebeck (Eq. 3.2);

T_C - Temperatura da fonte fria;

R - Resistência elétrica (Eq. 3.6).

Para o cálculo da potência térmica removida máxima ($\dot{Q}_{c,máx}$), utilizou-se a Eq. 3.14, sendo que a corrente consumida corresponde à corrente máxima ($I_{máx,Qc}$):

$$\dot{Q}_{c,máx} = (S \times T_c \times I_{máx,Qc}) - (0,5 \times I_{máx,Qc}^2 \times R) - (K \times \Delta T) \quad 3.20$$

A Figura 3.11 apresenta a variação da corrente máxima ($I_{máx,Qc}$) e a variação da potência térmica removida máxima ($\dot{Q}_{c,máx}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

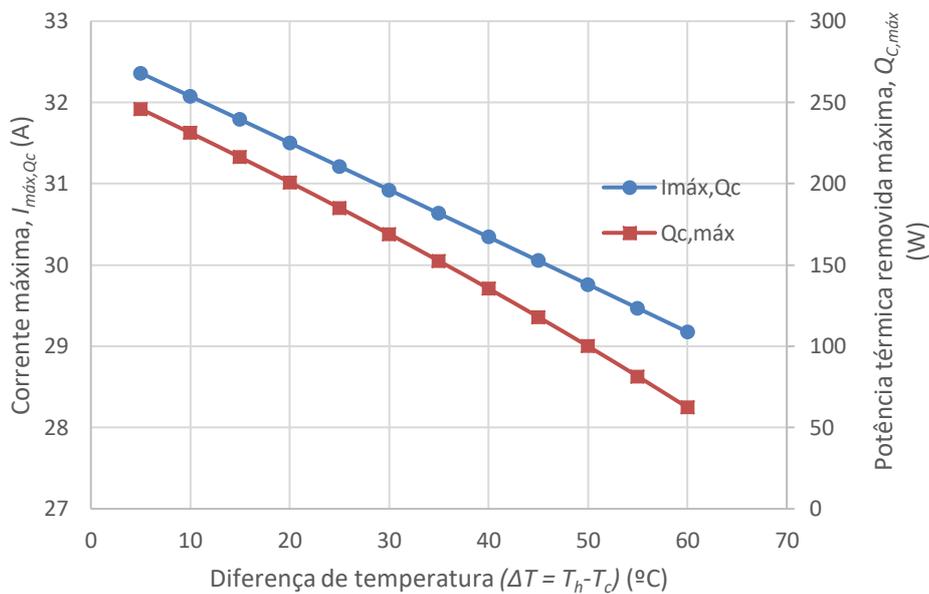


Figura 3.11 – Variação da corrente máxima ($I_{máx,Qc}$) e potência térmica removida máxima ($\dot{Q}_{c,máx}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.11 mostra que $\dot{Q}_{c,máx}$ diminui com o aumento da diferença de temperatura. A Figura 3.11 permite verificar que a corrente máxima ($I_{máx,Qc}$) que corresponde à potência térmica absorvida máxima ($\dot{Q}_{c,máx}$) diminui de forma aproximadamente linear com o aumento da diferença de temperatura. É ainda possível observar que para obter a potência térmica absorvida máxima ($\dot{Q}_{c,máx}$) no intervalo de diferenças de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), a corrente consumida pelo módulo estará no intervalo: $29,2 \leq I \leq 32,4$ A.

O autor Elarusi et al. (2017) apresenta também uma equação para calcular a corrente máxima ($I_{máx}$) para o $COP_{C,máx}$:

$$I_{m\acute{a}x,COP} = \frac{S \times \Delta T}{R[(1 + ZT)^{1/2} - 1]} \quad 3.21$$

Onde,

$I_{m\acute{a}x,COP}$ - Corrente máxima para o $COP_{C,m\acute{a}x}$;

S - Coeficiente Seebeck (Eq. 3.2);

ΔT - Diferença de temperaturas entre a fonte quente e fria;

R - Resistência elétrica (Eq. 3.6);

ZT - Figura de mérito (Eq. 2.1).

Para o cculo do coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) utilizou-se a Eq. 3.18, sendo que a corrente consumida corresponde  corrente máxima ($I_{m\acute{a}x,COP}$):

$$COP_{C,m\acute{a}x} = \frac{(S \times T \times I_{m\acute{a}x,COP}) - (0,5 \times I_{m\acute{a}x,COP}^2 \times R) - (K \times \Delta T)}{(S \times I_{m\acute{a}x,COP} \times \Delta T) + (I_{m\acute{a}x,COP}^2 \times R)} \quad 3.22$$

A Figura 3.12 apresenta a variao da corrente máxima ($I_{m\acute{a}x,COP}$) e a variao do coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em funo da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

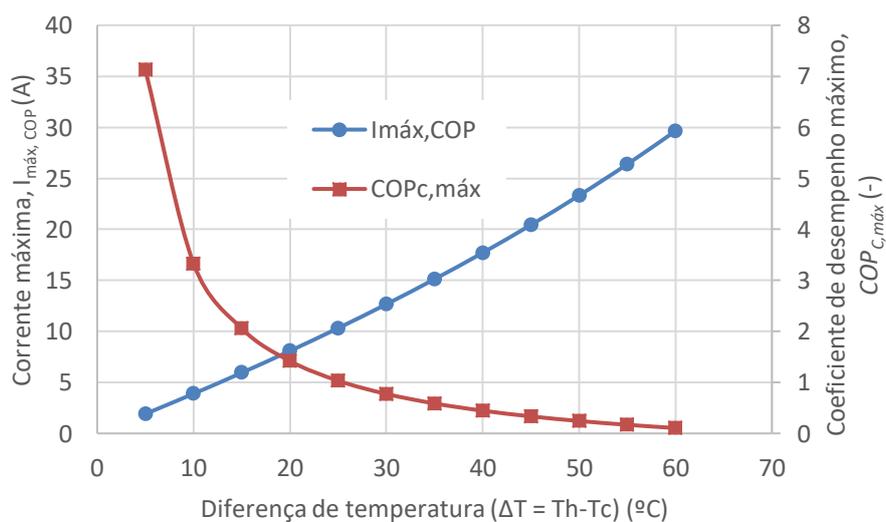


Figura 3.12 - Variao da corrente máxima ($I_{m\acute{a}x,COP}$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em funo da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.12 permite verificar que a corrente máxima ($I_{m\acute{a}x,COP}$) para atingir o coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento da diferença de temperatura, o que permite concluir que é vantajoso manter a diferença de temperatura baixa de modo a garantir valores de $COP_{C,m\acute{a}x}$ mais elevados. É ainda possível observar que para obter valores de $COP_{C,m\acute{a}x}$ no intervalo de diferenças de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), a corrente consumida pelo módulo estará no intervalo: $1,9 \leq I \leq 29,6$ A.

A Figura 3.13 apresenta no eixo principal a variação da tensão para o $COP_{C,m\acute{a}x}$ ($V_{COP_{C,m\acute{a}x}}$) e no eixo secundário o coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

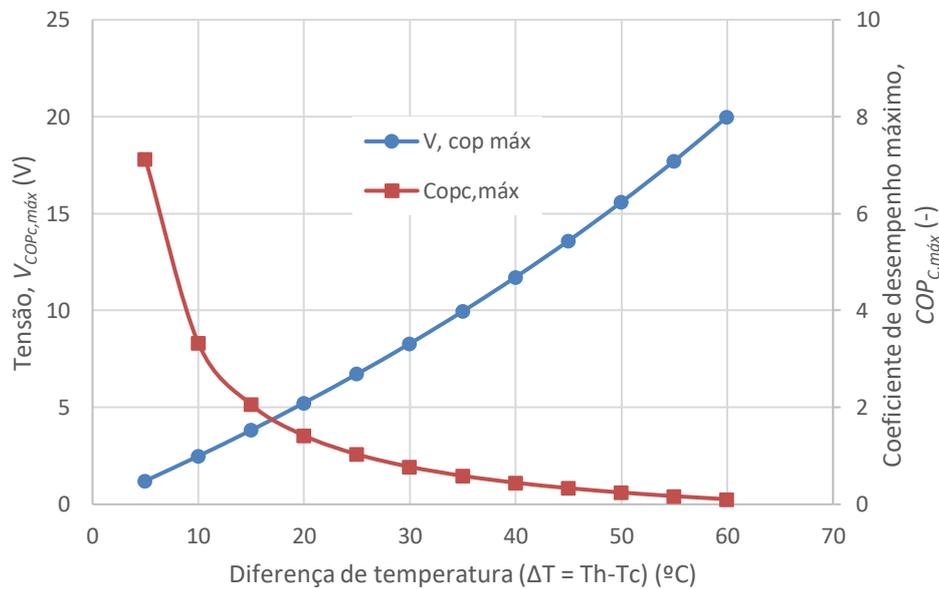


Figura 3.13 - Variação da tensão ($V_{COP_{C,m\acute{a}x}}$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,m\acute{a}x}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.13 mostra que no intervalo de diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), o coeficiente de desempenho máximo varia entre ($0,1 \leq COP_{C,m\acute{a}x} \leq 7,1$). É ainda possível observar que que a tensão para o $COP_{C,m\acute{a}x}$ varia entre ($1,2 \leq V_{COP_{C,m\acute{a}x}} \leq 20$). O valor de $COP_{C,m\acute{a}x}$ atinge o máximo quando o valor de $V_{COP_{C,m\acute{a}x}} = 1,2$, para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 5^{\circ}C$.

A Figura 3.14 apresenta no eixo primário a variação da potência térmica removida para o $COP_{C,máx}$ ($\dot{Q}_{c,COP_{C,máx}}$), e no eixo secundário o coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,máx}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

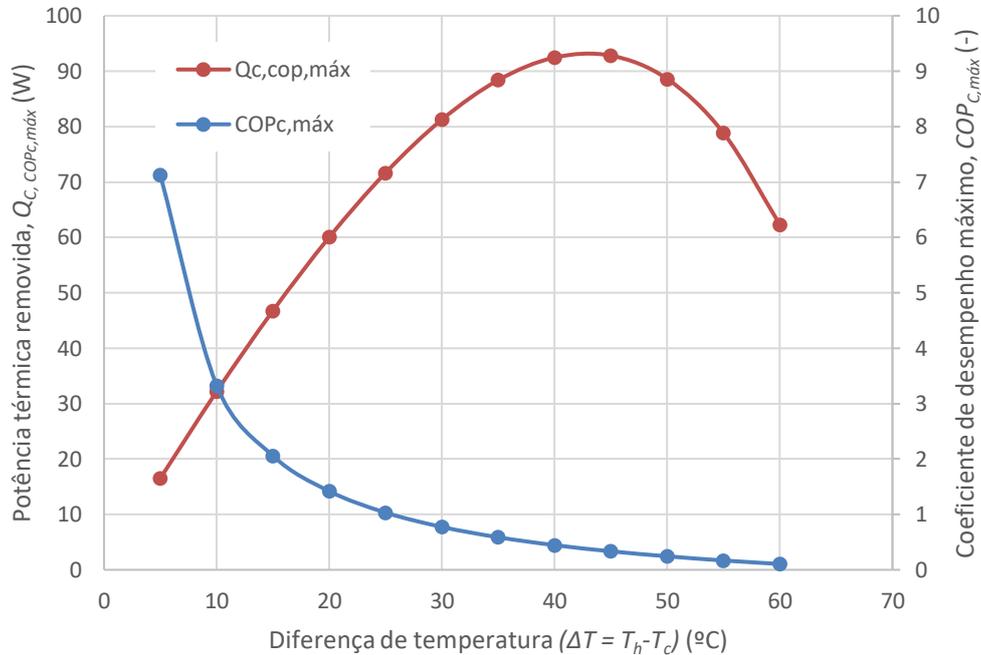


Figura 3.14 – Variação da potência térmica removida ($\dot{Q}_{c,COP_{C,máx}}$) e coeficiente de desempenho máximo ($COP_{C,máx}$) em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.14 mostra que no intervalo de diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$), o coeficiente de desempenho máximo varia entre $0,1 \leq COP_{C,máx} \leq 7,1$. É ainda possível observar que a $\dot{Q}_{c,COP_{C,máx}}$ para o intervalo de diferença de temperatura em estudo varia entre $16,5 \leq \dot{Q}_{c,COP_{C,máx}} \leq 92,8$ W. O valor de $\dot{Q}_{c,COP_{C,máx}}$ atinge o máximo quando o valor de $COP_{C,máx} = 0,33$, para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 45$ °C.

As curvas de funcionamento do módulo TEC1-12730 permitiram caracterizar a potência térmica removida da fonte fria (\dot{Q}_c), a potência térmica dissipada pela fonte quente (\dot{Q}_h), a tensão (V), a potência (P) e o coeficiente de desempenho (COP_C) em função da corrente consumida para diferentes diferenças de temperatura (ΔT).

A Figura 3.15 expressa a potência térmica removida (\dot{Q}_c) pelo módulo TEC1-12730, em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$). O valor potência térmica removida (\dot{Q}_c) foi calculado utilizando a Eq. 3.14.

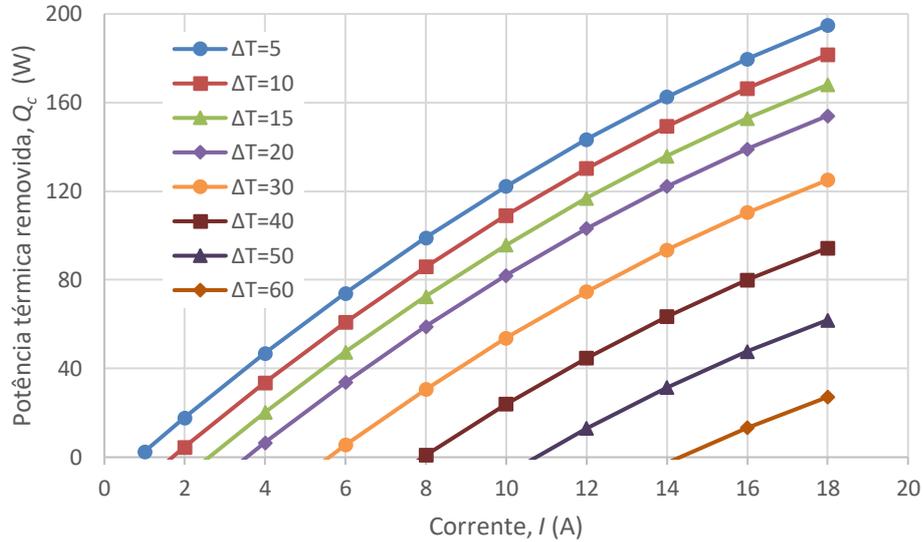


Figura 3.15 - Potência térmica removida da fonte fria (\dot{Q}_c) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.15 permite observar que para a mesma corrente consumida (I), a potência térmica removida pelo módulo TEC1-12730 aumenta com a diminuição do valor de ΔT .

A Figura 3.16 mostra a potência térmica dissipada (\dot{Q}_h) pelo módulo TEC1-12730, em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$). O valor de \dot{Q}_h foi calculado utilizando a Eq. 3.15.

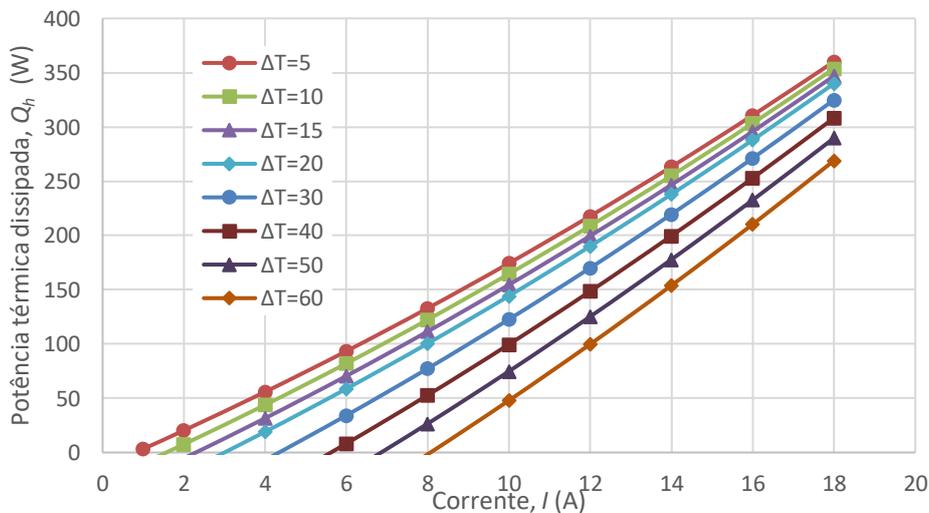


Figura 3.16 - Potência térmica dissipada pela fonte quente (\dot{Q}_h) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.16 permite observar que para a mesma corrente (I) consumida, a potência térmica dissipada (\dot{Q}_h) pelo módulo TEC1-12730 aumenta com a diminuição do valor de ΔT .

A Figura 3.17 expressa a Tensão de operação (V) do módulo TEC para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$), em função da corrente consumida (I). O valor de tensão (V) foi calculado com recurso à Eq. 3.16.

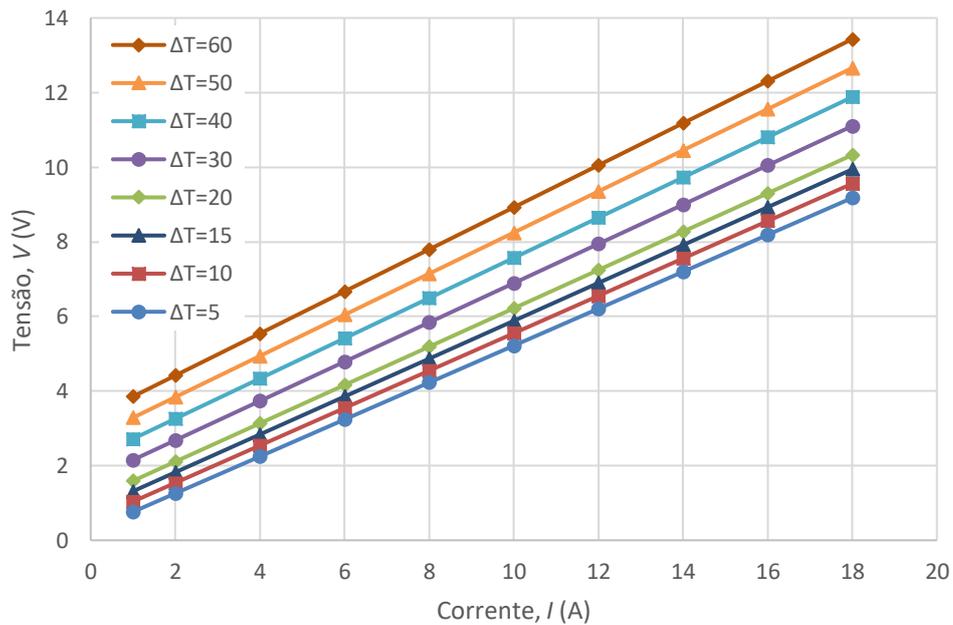


Figura 3.17 - Tensão de operação (V) do módulo TEC1-12730 em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.17 permite observar que para a mesma corrente consumida (I), a tensão (V) do módulo TEC1-12730 aumenta com o aumento do valor de ΔT .

A Figura 3.18 expressa a potência consumida (P) do módulo TEC para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$), em função da corrente consumida (I). O valor potência consumida (P) foi calculado utilizando a Eq. 3.17.

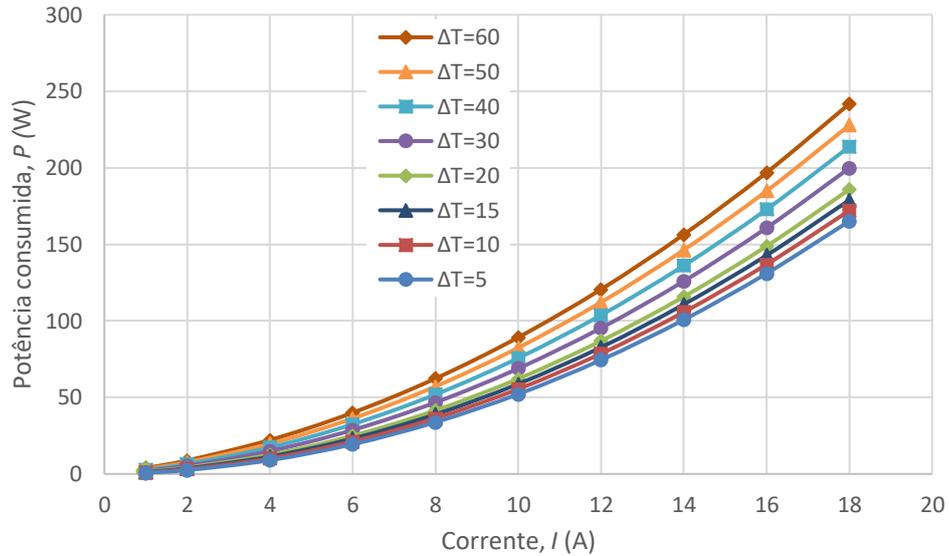


Figura 3.18 - Potência consumida (P) pelo módulo TEC em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.18 permite observar que para a mesma corrente (I) consumida, a potência consumida (P) pelo módulo TEC1-12730 aumenta com o aumento do valor de ΔT .

A Figura 3.19 expressa o coeficiente de desempenho (COP_C) do módulo TEC para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$), em função da corrente consumida (I). O valor de coeficiente de desempenho (COP_C) foi calculado utilizando a Eq. 3.18.

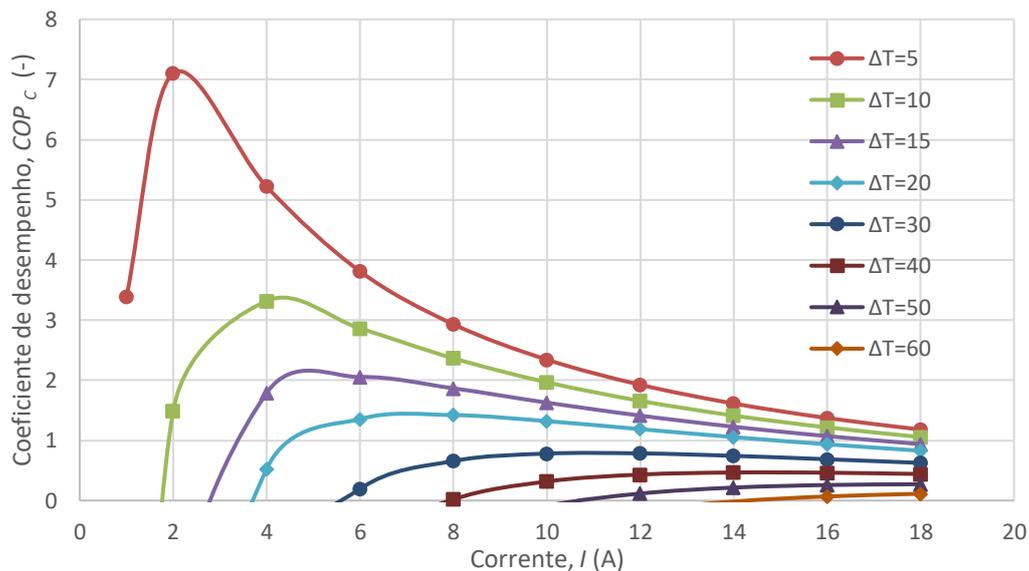


Figura 3.19 – Coeficiente de desempenho (COP_C) do módulo TEC em função da corrente consumida (I) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 60$).

A Figura 3.19 permite observar que para a mesma corrente consumida (I), o coeficiente de desempenho (COP_C) do módulo TEC1-12730 aumenta com a diminuição do valor de ΔT .

A Tabela 3.5 apresenta os valores de corrente (I), tensão (V), potência consumida (P) e potência térmica removida (\dot{Q}_c) correspondentes ao valor de coeficiente de desempenho máximo de $COP_{C,máx}$ para cada valor de ΔT observado na Figura 3.19.

Tabela 3.5 – Parâmetros correspondentes ao máximo de COP_C .

ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	1,9	3,9	5,9	8,1	12,7	17,7	23,3	29,6
V (V)	1,2	2,49	3,8	5,2	8,3	11,7	15,58	19,9
P (W)	2,29	9,72	22,4	42,5	105,6	207,4	363	591,14
\dot{Q}_c (W)	16,35	33,3	46,17	60,2	81,6	92,4	88,5	62,3
$COP_{C,máx}$	7,13	3,33	2,06	1,42	0,77	0,45	0,24	0,11

De modo a calcular o coeficiente de desempenho máximo teórico ($COP_{C,teórico}$), determinado através da Eq. 2.2 foi necessário determinar a figura de mérito (ZT) para o módulo TEC em estudo.

Posteriormente, foi possível calcular $COP_{C,teórico}$ (Eq. 2.2) da montagem e compará-lo ao $COP_{C,máx}$ obtido para cada um dos valores de ΔT . A Figura 3.20 apresenta a comparação entre $COP_{C,teórico}$ e o $COP_{C,máx}$.

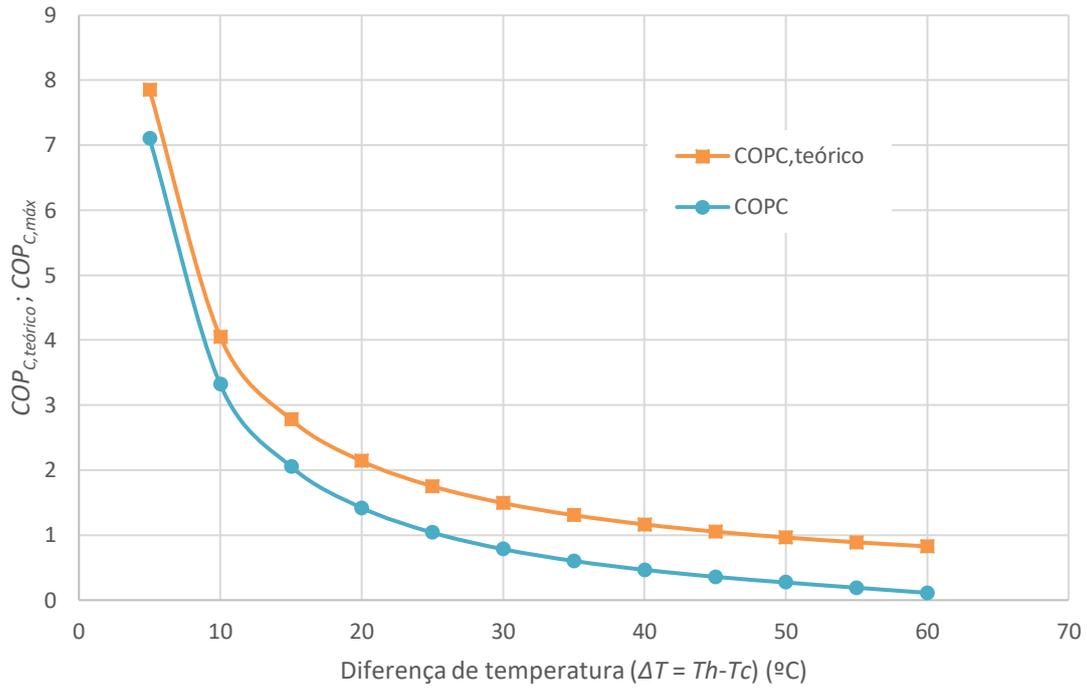


Figura 3.20 – Comparação entre $COP_{C,teórico}$, e o $COP_{C,máx}$.

Os módulos de baterias utilizados no presente trabalho operam com uma tensão de cerca de 45 V. Considerando este valor de tensão, testou-se a possibilidade de os TEC's serem todos ligados em série. Assim, e tendo em conta que o número de módulos TEC tem de ser par, optou-se por testar a possibilidade de usar 6, 8, 10, 12, 14 ou 16 módulos. A Tabela 3.6 expressa as características de operação de um módulo TEC, considerando que módulos TEC estão instalados em série, com uma tensão total $V = 44,4$ V.

Tabela 3.6 – Características de operação de um módulo TEC, considerando para diferentes números de módulos instalados em serie para uma tensão total $V = 44,4 V$.

6 módulos								
ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	14,4	13,7	13,0	12,3	11,0	9,7	8,5	7,3
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/6 = 7,4 V$							
P (W)	106,6	101,3	96,1	91,0	81,1	71,7	62,6	54,0
\dot{Q}_c (W)	166,3	146,6	126,6	106,2	64,2	20,5	-25,0	-72,6
COP_c (-)	1,56	1,45	1,32	1,17	0,79	0,29	-0,40	-1,34
8 módulos								
ΔT (°C)	5,0	10,0	15,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0
I (A)	10,7	10,0	9,3	8,7	7,5	6,3	5,1	4,0
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/8 = 5,6 V$							
P (W)	59,2	55,5	51,9	48,3	41,4	34,7	28,3	22,3
\dot{Q}_c (W)	129,6	109,2	88,4	67,3	24,0	-20,9	-67,5	-116,1
COP_c (-)	2,19	1,97	1,70	1,39	0,58	-0,60	-2,38	-5,21
10 módulos								
ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	8,4	7,8	7,2	6,5	5,3	4,2	3,1	2,0
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/10 = 4,4 V$							
P (W)	37,4	34,6	31,8	29,0	23,7	18,6	13,7	9,1
\dot{Q}_c (W)	104,3	83,4	62,3	40,8	-3,2	-48,8	-96,0	-145,1

COP_c (°C)	2,79	2,41	1,96	1,41	-0,14	-2,62	-6,99	-16,00
12 módulos								
ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	6,9	6,3	5,7	5,1	3,9	2,8	1,8	0,7
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/12 = 3,7 V$							
P (W)	25,7	23,4	21,1	18,9	14,6	10,4	6,5	2,7
\dot{Q}_c (W)	86,0	64,9	43,5	21,8	-22,7	-68,6	-116,3	-165,7
COP_c (-)	3,35	2,78	2,06	1,16	-1,56	-6,58	-17,94	-61,36
14 módulos								
ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	5,9	5,3	4,7	4,1	3,0	1,9	0,8	-0,2
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/14 = 3,2 V$							
P (W)	18,6	16,7	14,8	12,9	9,4	6,0	2,7	-0,6
\dot{Q}_c (W)	72,3	51,0	29,5	7,6	-35,8	-80,2	-125,6	-171,9
COP_c (-)	3,88	3,06	1,99	0,59	-3,80	-13,30	-46,68	294,93
16 módulos								
ΔT (°C)	5	10	15	20	30	40	50	60
I (A)	5,1	4,5	3,9	3,3	2,3	1,2	0,2	-0,9
V (V)	$V_{total} = 44,4V; V_{TEC} = 44,4/16 = 2,8 V$							
P (W)	14,3	12,6	11,0	9,4	6,3	3,3	0,4	-2,4
\dot{Q}_c (W)	62,3	40,9	19,3	-2,7	-46,5	-91,1	-136,8	-183,4
COP_c (-)	4,35	3,24	1,75	-0,29	-7,34	-27,21	-323,70	75,02

Tal como se pode observar na Tabela 3.6, ao incrementar o número de módulos TEC, a gama de valores de ΔT em que a utilização do módulo TEC se torna viável diminui. Contudo, com o aumento do número de módulos TEC o valor de COP_C aumenta, já o valor de \dot{Q}_c diminui com o aumento do número de módulos. De notar que o valor de \dot{Q}_c e de COP_C é mais elevado quando $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, não obstante do número de módulos TEC.

A Tabela 3.7 apresenta os valores de \dot{Q}_c e de COP_C , quando $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, para a totalidade dos módulos instalados.

Tabela 3.7 – Valores de \dot{Q}_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 5^\circ\text{C}$.

Número de módulos instalados	6	8	10	12	14	16
\dot{Q}_c (W)	997,52	1036,67	1042,64	1032,01	1011,91	996,78
COP_C (-)	1,56	2,19	2,79	3,35	3,88	4,35

A Figura 3.21 apresenta esquematicamente as variações de \dot{Q}_c e de COP_C apresentadas na Tabela 3.7.

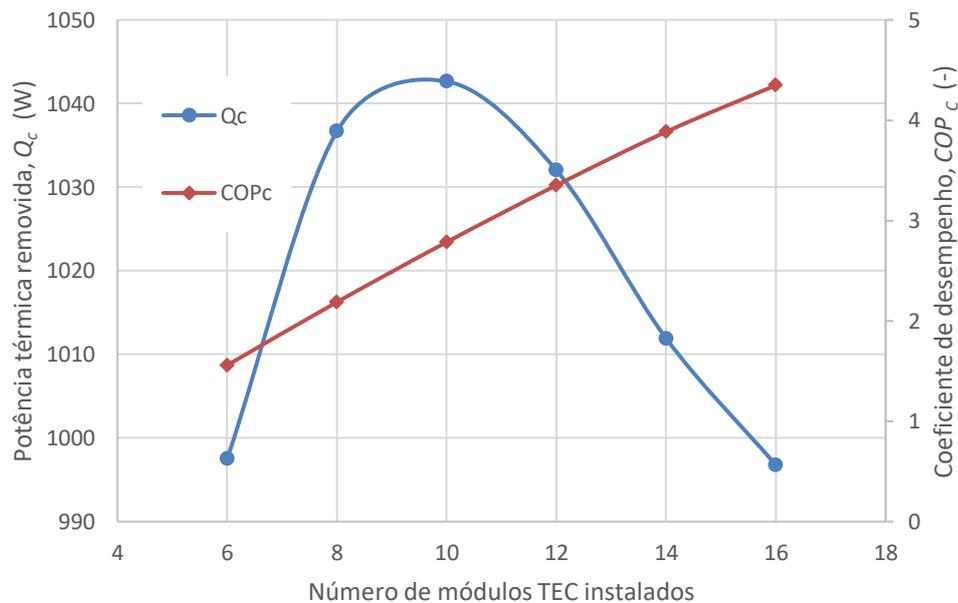


Figura 3.21 - Valores de \dot{Q}_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 5^\circ\text{C}$.

Como mostra a Figura 3.21, o valor de \dot{Q}_c é mais elevado quando o número de módulos TEC instalados são 10. Por outro lado, o valor de COP_C revela-se mais elevado com a incrementação de módulos TEC atingindo o máximo quando o número de módulos são 16.

A Tabela 3.8 apresenta os valores de \dot{Q}_c e de COP_C , quando $\Delta T = 15^\circ\text{C}$, para a totalidade dos módulos instalados.

Tabela 3.8 - Valores de \dot{Q}_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

Número de módulos instalados	6	8	10	12	14	16
\dot{Q}_c (W)	759,46	707,40	622,97	522,36	412,5	308
COP_C (-)	1,32	1,70	1,96	2,06	1,99	1,75

A Figura 3.22 apresenta esquematicamente as variações de \dot{Q}_c e de COP_C apresentadas na Tabela 3.8.

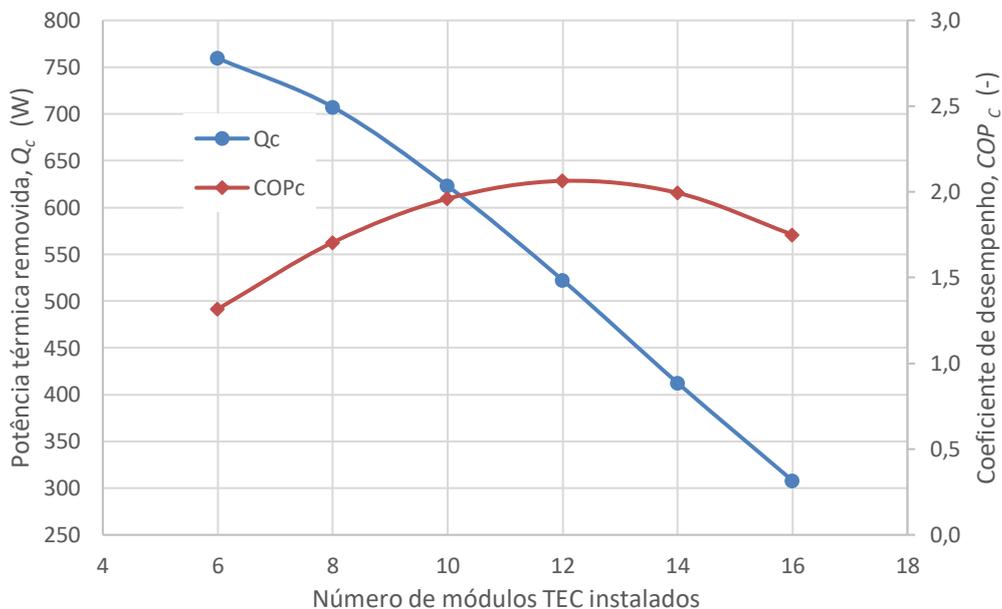


Figura 3.22 - Valores de \dot{Q}_c e de COP_C para a totalidade de módulos instalados para uma diferença de temperatura de $\Delta T = 15^\circ\text{C}$.

Como mostra a Figura 3.22 , quando $\Delta T = 15\text{ }^\circ\text{C}$, o valor de \dot{Q}_c é mais elevado quando o número de módulos TEC instalados são 6. Por outro lado, o valor de COP_C revela-se mais elevado numa fase inicial, com a incrementação de módulos TEC atingindo o máximo quando o número de módulos são 12 diminuindo posteriormente.

Posto isto, tendo em conta o valor de potência térmica gerada pelas baterias, tal como calculado na secção 3.2.2 ($\dot{Q} = 1043,7\text{ W}$), e de modo a garantir uma maior gama de valores de diferença temperatura, recomenda-se a utilização de 8 módulos TEC para cada módulo de baterias. A Figura 3.23 apresenta os valores de \dot{Q}_c e de COP_C , considerando a utilização de 8 módulos TEC instalados em série, para o intervalo de temperaturas possível ($5 < \Delta T < 30$).

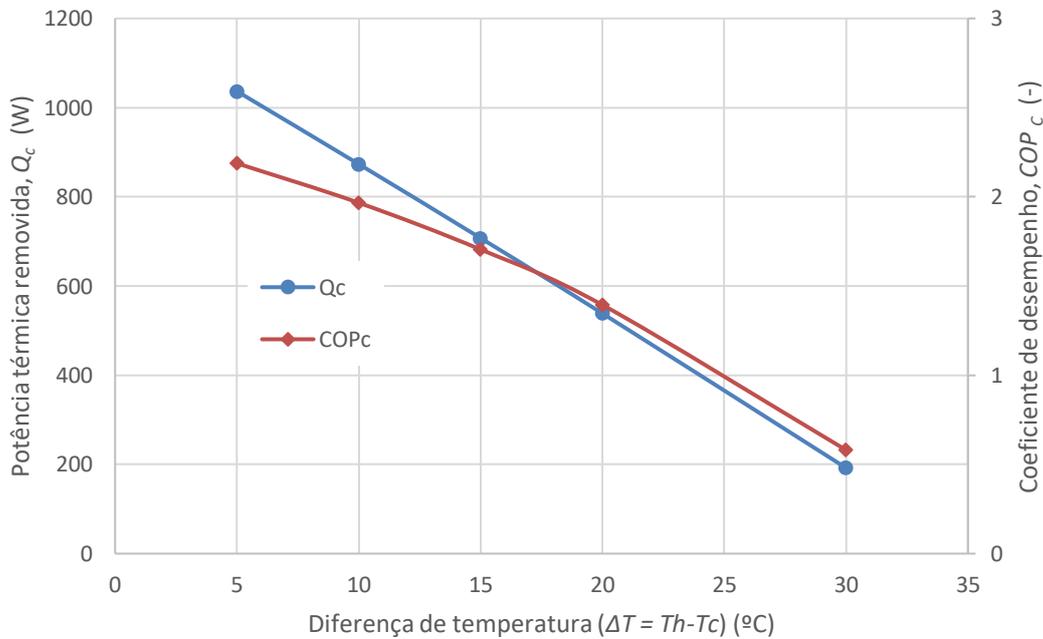


Figura 3.23 - Valores de \dot{Q}_c e de COP_C em função da diferença de temperatura ($5 \leq \Delta T \leq 60$), para 8 módulos TEC.

É possível observar na Figura 3.23, quando $\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$, tanto o valor de \dot{Q}_c como o valor de COP_C são máximos decrescendo com o aumento da diferença de temperatura. É importante observar que o valor de COP_C decresce para valores inferiores a 1 quando a diferença de temperatura ultrapassa os $25\text{ }^\circ\text{C}$.

4. Montagem Experimental

4.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado à prototipagem e desenvolvimento da montagem experimental para o sistema de gestão térmica de baterias em estudo. A secção 4.2 apresenta o circuito hidráulico concebido para remover a potência térmica da fonte quente dos módulos TEC. A secção 4.2.1 apresenta as propriedades do fluido refrigerante utilizado, as equações utilizadas para a caracterização do escoamento e seleção de uma placa dissipadora (*AAVID modelo Hi-Contact 6 pass cold plate*). A secção 4.2.2 apresenta o radiador utilizado na montagem experimental e a secção 4.2.3 a instrumentação do circuito hidráulico que é constituído por: bomba circuladora, caudalímetro e termopares tipo K. A secção 4.3 apresenta o módulo concebido para aquisição de dados e controlo da montagem experimental. A secção 4.4 é dedicada à apresentação da estrutura construída e a disposição dos componentes na montagem experimental.

4.2. Circuito hidráulico

Com o intuito de maximizar o desempenho dos módulos TEC, e assim remover eficientemente a potência térmica proveniente das baterias, projetou-se um sistema hidráulico devidamente instrumentado e controlado. O circuito hidráulico é constituído por: quatro permutadores de calor (placas dissipadoras), um radiador e uma bomba circuladora. As placas dissipadoras têm como objetivo a remoção do calor proveniente da fonte quente do módulo TEC e assim minimizar a diferença de temperatura entre a fonte fria e a fonte quente do módulo TEC, as placas dissipadoras foram instaladas em paralelo. A bomba circuladora tem o intuito de fazer circular o fluido refrigerante e permite regular o caudal mássico no circuito, controlando a velocidade de rotação da bomba através de PWM (*Pulse With Modulation*, da literatura inglesa). O radiador tem a função de transmitir o calor do circuito para o ambiente. De modo a garantir convecção forçada é utilizado em conjunto com o radiador uma ventoinha com velocidade de rotação controlada por PWM. A Figura 4.1 esquematiza o circuito hidráulico projetado.

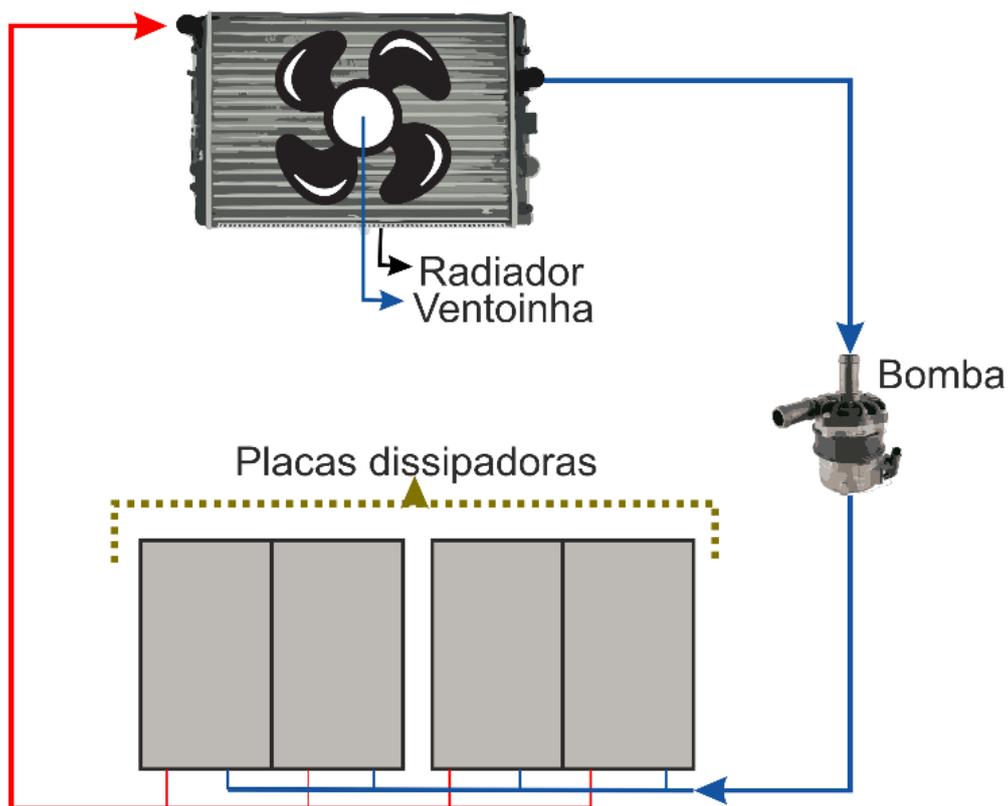


Figura 4.1 - Esquema hidráulico sistema projetado.

4.2.1. Placa dissipadora

De modo a garantir um desempenho otimizado, isto é, maximizar o valor de COP_C , é necessário manter a diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria do módulo TEC tão baixa quanto possível. Nesta secção é apresentada a caracterização das condições de funcionamento e a respetiva seleção da placa dissipadora para o sistema em estudo, que tem como função a remoção do calor da fonte quente do módulo TEC.

As temperaturas mínimas do circuito hidráulico estão sempre acima dos $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, e como tal o fluido refrigerante a utilizar no caso de estudo é água. A Tabela 4.1 apresenta as propriedades da água a uma temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 4.1 - Propriedades do fluido refrigerante – água para uma temperatura de 20 °C.

Propriedades do fluido refrigerante - Água		
Variável	Valor	Unidade
Densidade, ρ	1000	kg/m ³
Viscosidade cinemática, ν	1,003E-06	m ² /s
Número de Prandtl, Pr	6	(-)
Condutividade térmica, K	0,613	W/m.K

Para caracterizar o regime de escoamento no interior dos canais da placa dissipadora calculou-se o Número de *Reynold* (Re), definido através da expressão:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad 4.1$$

Onde,

Re - Número de *Reynolds* (-);

V - Velocidade (m/s);

d - Diâmetro interior do canal (m);

ν - Viscosidade cinemática (m²/s) (Tabela 4.1).

Dependendo do valor do Número de *Reynolds* (Re), o regime de escoamento poderá ser classificado de laminar, transição ou turbulento, Oliveira et al. (2015):

$0 < Re < 2,4 \times 10^3$ - Regime laminar;

$2,4 \times 10^3 < Re < 10^4$ - Regime de transição;

$Re > 10^4$ - Regime turbulento.

Para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção, é necessário calcular o Número de *Nusselt* (*Nu*). Para regime laminar ($Re < 2,4 \times 10^3$) e canais circulares, o Número de *Nusselt* para escoamento completamente desenvolvido e fluxo de calor constante na parede assume o valor de 4,36. Para regime turbulento, $Re > 10^4$ e para número de *Prandtl* no intervalo de $0,6 \leq Pr \leq 160$, onde se inclui a água ($Pr = 6$, ver Tabela 4.1), é utilizada a correlação de Dittus-Boelter, definido através da expressão:

$$Nu = 0,023 \times Re^{\frac{4}{5}} \times Pr^n \quad 4.2$$

Onde,

Nu - Número de *Nusselt* (-);

Re - Número de *Reynolds* (-) (Eq. 4.1);

Pr - Número de *Prandtl* (-) (Tabela 4.1);

$n = 0,3$.

Finalmente, calculou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção através da seguinte expressão:

$$h = \frac{Nu \times K}{d} \quad 4.3$$

Onde,

h - Coeficiente de transferência de calor ($W/m^2.K$);

Nu - Número de *Nusselt* (-) (Eq. 4.2);

K - Condutividade térmica ($W/m.K$) (Tabela 4.1);

d - Diâmetro interior do canal (m).

De modo a calcular a diferença de temperatura (ΔT) entre a saída e a entrada de fluido refrigerante na placa dissipadora, utilizou-se a seguinte expressão:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_{h,m\acute{a}x}}{h \times A} \quad 4.4$$

Onde,

ΔT - Diferença de temperatura entre a saída e a entrada de fluido refrigerante;

$\dot{Q}_{h,m\acute{a}x}$ - Potência térmica máxima (W);

h - Coeficiente de transferência de calor (Eq. 4.3);

A - Área de contacto com o fluido refrigerante (m²);

Posto isto, a placa dissipadora selecionada foi da marca *AAVID* modelo *Hi-Contact 6 pass cold plate*. A Figura 4.2 representa a placa dissipadora escolhida e respetivas dimensões (305 × 177,5 × 15,24 mm), bem como a sua montagem na base do módulo de baterias. A placa dissipadora consiste num permutador de calor arrefecido a água, que garante a robustez necessária para suportar as baterias.

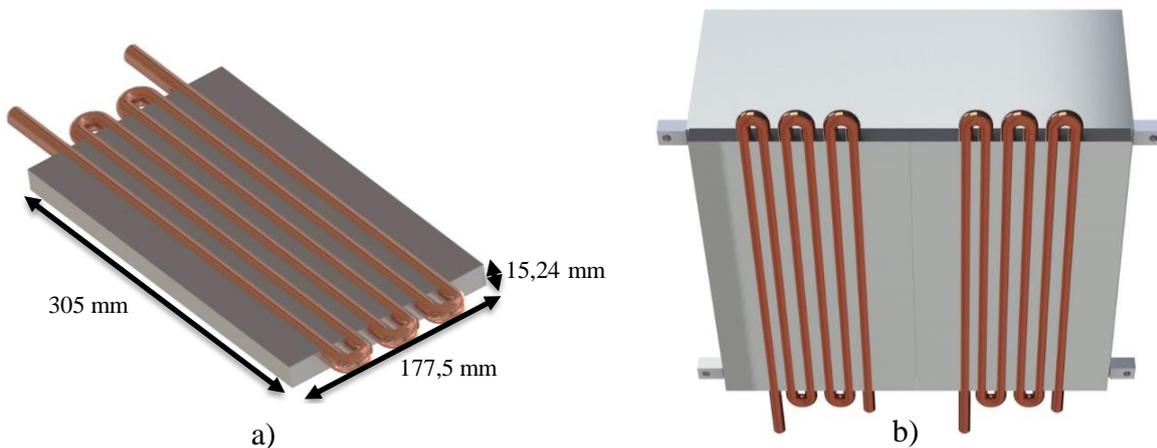


Figura 4.2- Placa dissipadora escolhida: a) dimensões; b) aplicação na base do módulo de baterias.

A Tabela 4.2 apresenta as características da placa *AAVID Hi-Contact 6 pass cold plate*, selecionada para o presente caso de estudo. A designação de *6 pass* indica que o tubo da placa, tal como se pode observar na Figura 4.2 atravessa a placa na direção longitudinal 6 vezes.

Tabela 4.2 – Características da placa AAVID *Hi-Contact 6 pass cold plate*.

Designação	Característica
Material da placa	Alumínio extrudido
Material do tubo	Cobre
Diâmetro exterior do tubo	9,5 mm
Espessura da parede do tubo	1,24 mm

A Figura 4.3 apresenta a resistência térmica total e a perda de pressão em função do caudal para placa dissipadora *AAVID Hi-Contact 6 pass cold plate*, apresentando resultados experimentais para diferentes comprimentos: i) 6” = 152,4 mm; ii) 12” = 304,8 mm; iii) 24” = 609,6 mm.

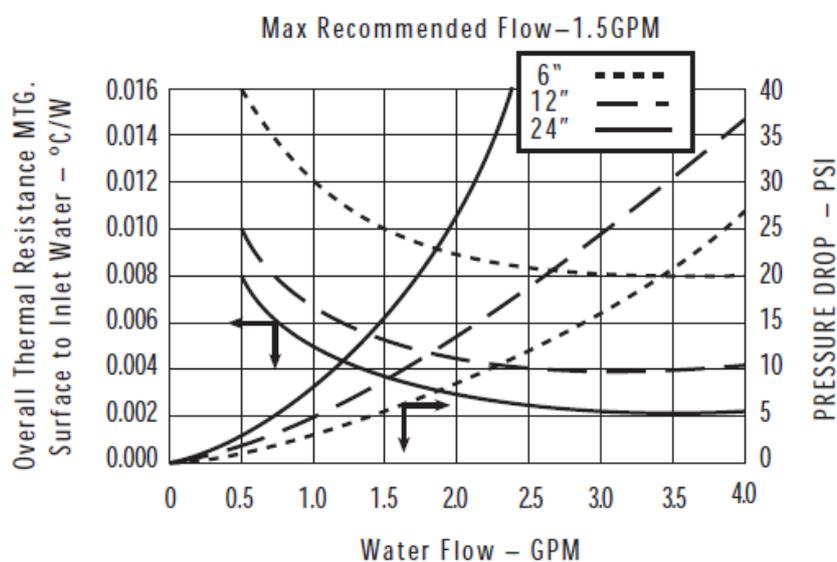


Figura 4.3 – Resistência térmica e perda de pressão em função do caudal da placa dissipadora.

A Tabela 4.3 apresenta as propriedades da placa dissipadora *AAVID Hi-Contact 6 pass cold plate* de 12”, isto é 304,8 mm selecionada para o presente estudo para um caudal máximo recomendado de 1,5 GPM (*Gallon per minute*, na literatura inglesa).

Tabela 4.3 - Propriedades da placa dissipadora para o caudal máximo recomendado.

Variável	Valor	Unidade
Caudal	1,5	GPM
Caudal	5,7	l/min
Caudal mássico	0,095	kg/s
Diâmetro Interno	0,007	m
Área da secção do tubo	3,87E-05	m ²
Comprimento do tubo do dissipador	2,2	m
Área de contacto com o fluido	0,049	m ²

Em cada uma das placas dissipadoras serão instalados quatro módulos TEC1-12730, como mostra a Figura 4.4.

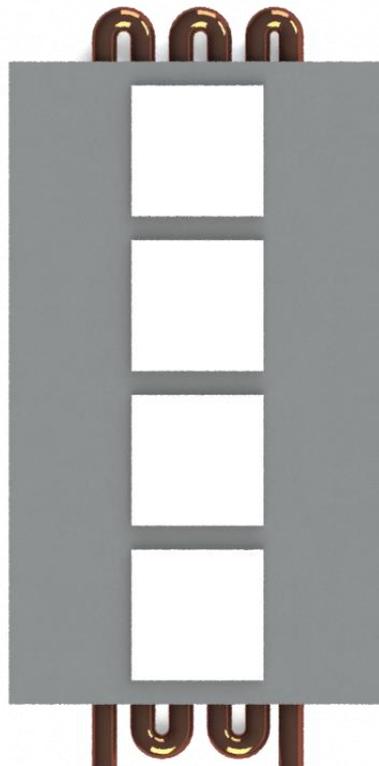


Figura 4.4 – Disposição dos módulos TEC1-12730 na placa dissipadora.

A potência térmica máxima ($\dot{Q}_{h,máx}$) que a placa dissipadora pode remover é igual à soma da potência térmica máxima ($\dot{Q}_{h,máx}$) dissipada pelos quatro módulos TEC1-12730. A potência térmica máxima dissipada pelo módulo TEC1-12730 ocorre quando a diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria é mínima ($\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$) e tem o valor de 360 W, ver figura Figura 3.16. Assim, cada placa dissipadora terá de dissipar no máximo 1440 W. A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros de operação da placa dissipadora AAVID *Hi-Contact 6 pass cold*.

Tabela 4.4 - Parâmetros de operação da placa dissipadora.

Variável	Valor	Unidade
Potência térmica máxima, $\dot{Q}_{h,máx}$	1440	W
Velocidade, V	2,45	m/s
Reynolds, Re	17113	(-)
Número de Nusselt, Nu	95,9	(-)
Coefficiente de transferência de calor, h	8374,4	W/m ² .°C
Diferença de temperatura entre a saída e a entrada do fluido refrigerante, ΔT	3,53	°C
Resistência térmica, R_t	0,0025	°C/W

A Tabela 4.4 mostra que o regime de escoamento no interior dos canais da placa dissipadora é turbulento, $Re = 17113$, e como tal para o cálculo do número de Nusselt utilizou-se a correlação de Dittus-Boelter (Eq. 4.2), tendo-se obtido um coeficiente de transferência de calor, $h = 8374,4 \text{ W/m}^2\text{.}^\circ\text{C}$.

Para as condições de operação apresentadas, que correspondem à potência térmica máxima a remover ($\dot{Q}_{h,máx} = 1440 \text{ W}$), a diferença de temperatura entre a saída e a entrada do fluido refrigerante é $\Delta T = 3,53 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2.2. Radiador

De modo a garantir a transmissão de calor do fluido refrigerante para o ambiente, maximizando assim o desempenho dos módulos TEC, selecionou-se um radiador já existente no mercado do fabricante JDeus. A Figura 4.5 apresenta o radiador escolhido e respetivas dimensões ($495 \times 417 \times 29$ mm), o diâmetro do tubo de entrada e do tubo de saída do fluido refrigerante é de 35 mm. A potência térmica máxima de cada placa dissipadora é de 1440 W, uma vez que são utilizadas 4, a potência térmica máxima a dissipar no radiador será de 5760 W. O radiador selecionado permite dissipar uma potência térmica superior, e como tal encontra-se sobredimensionado para o caso de estudo. Ao radiador foi acoplada uma ventoinha de forma a garantir uma convecção forçada e assim aumentar o coeficiente de transferência de calor para o ambiente.

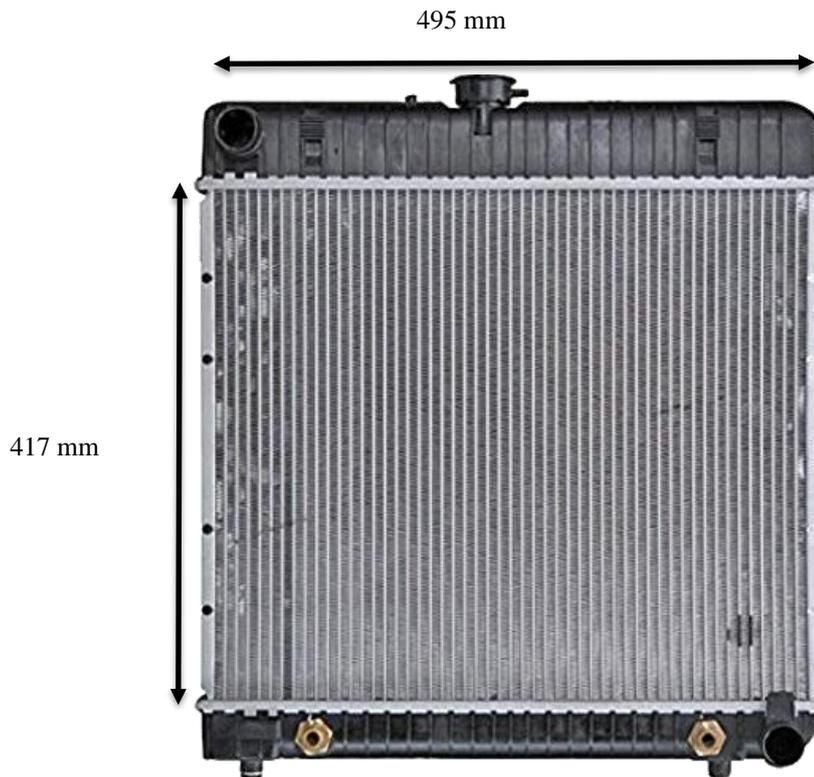


Figura 4.5 - Radiador selecionado com dimensões.

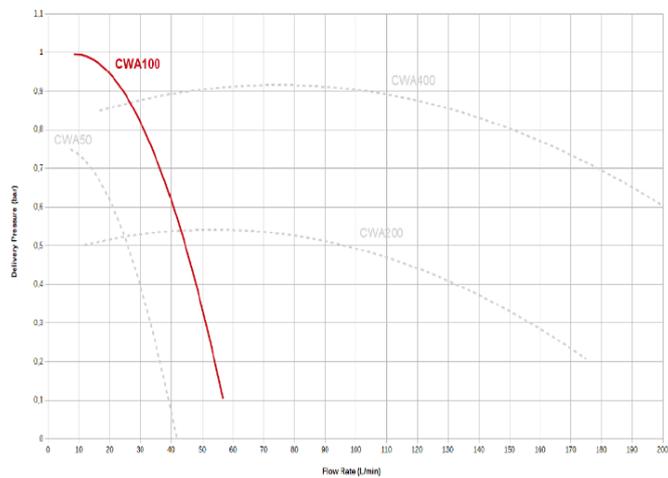
4.2.3. Instrumentação do circuito hidráulico

Bomba circuladora de fluido

A bomba selecionada é da marca *Pierburg* modelo CWA 100, ver Figura 4.6. Esta bomba permite caudais volúmicos no intervalo entre 0 e 35 l/min sendo alimentada com uma tensão de 12 V e controlada por PWM. O caudal máximo de cada uma das placas dissipadoras é de 5,7 l/min. Como as placas estão dispostas em paralelo, o caudal total máximo requerido à bomba circuladora é de 22,8 l/min.



a)



b)

Figura 4.6 - a) Bomba *Pierburg* CWA 100; b) curva característica da bomba.

Medição de caudal - Caudalímetro

De modo a adquirir o caudal do circuito hidráulico, selecionou-se o caudalímetro de ultrassons modelo UF25B da Cynergy3, apresentado na Figura 4.7. O caudalímetro têm como principais características a leitura do caudal volúmicos até ao máximo de 25 l/min (notar que o caudal máximo no circuito é de 22,8 l/min), tendo uma precisão de 0,001 l/min, gerando uma tensão de saída no intervalo de 0 a 5 V.

Um caudalimetro de ultrassons, mede a diferença de tempo que demora a propagação dos pulsos ultrassónicos emitidos no fluido refrigerante. Este tempo depende da velocidade do fluido refrigerante ao longo do comprimento do caudalimetro.



Figura 4.7-Caudalimetro UF25B.

Medição de temperatura - Termopares

De modo a adquirir as temperaturas do circuito hidráulico, selecionaram-se termopares do tipo K. Este tipo de termopar é constituído por dois termoelementos, um positivo e outro negativo, sendo estes constituídos por dois metais diferentes: no termoelemento positivo, o metal utilizado é o *Chromel* e no termoelemento negativo é o *Alumel*. Estes termopares têm como principais características a leitura numa vasta gama de temperaturas (-270 °C até 1200 °C), possuírem uma elevada robustez e um baixo custo. A Figura 4.8 apresenta a tensão de saída do termopar em função da temperatura de leitura.

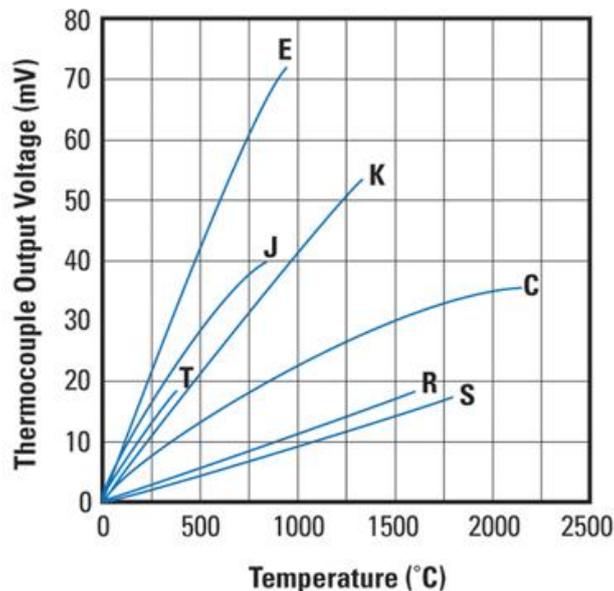


Figura 4.8 -Tensão de saída do termopar em função da temperatura de leitura.

O funcionamento dos termopares baseia-se no efeito de Seebeck, isto é, o termopar produz uma tensão de saída que depende da diferença de temperatura entre o ponto de medição (temperatura de leitura) e a junta fria que é utilizada como referência.

4.3. Aquisição de dados e controlo

O diagrama de blocos apresentado na Figura 4.9 mostra o sistema de controlo e aquisição de dados desenvolvido neste projeto. Este sistema foi implementado através do desenvolvimento de uma PCB (*Printed Board Circuit*, da literatura inglesa), ver secção 4.3.2. No seu conjunto, o *hardware* desenvolvido permite o funcionamento da unidade de controlo e aquisição de dados, no entanto, pode-se separar o *hardware* em duas secções principais: instrumentação e controlo.

A secção de instrumentação é composta pelo microcontrolador (responsável pelo cálculo, execução de tarefas e processamento de dados), pela aquisição de sinais, comunicação série USB e alimentação. Nesta secção são utilizados os valores de tensão de 5 V (para microcontrolador, FTDI) e 3,3 V (para o multiplexer e compensador de junta fria).

A secção de potência utiliza uma tensão de 12 V e é composta pelo *hardware* que permite o controlo da bomba circuladora e da ventoinha de arrefecimento.

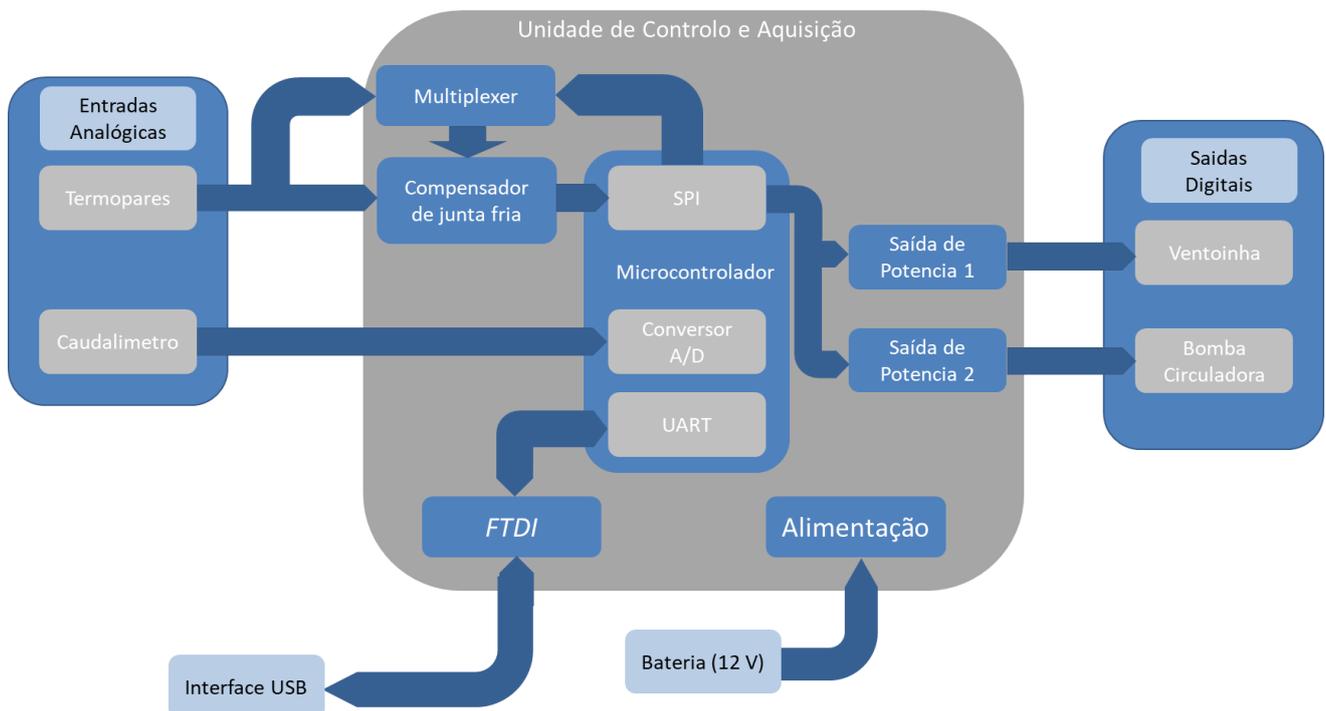


Figura 4.9 – Diagrama de blocos do funcionamento sistema de controlo e aquisição de dados desenvolvido neste projeto.

4.3.1. Seleção de componentes

Microcontrolador

Na unidade de controlo e aquisição de dados é utilizado o microcontrolador Atmega328p-AU de elevado desempenho e desenvolvido pela Microchip Technology. Este microcontrolador caracteriza-se por um processador de 8 bits com uma frequência máxima de 16 MHz, 32 Kbytes de memória de programa flash e 2 Kbytes de memória estática de acesso aleatório SRAM (do inglês *Static Random Access Memory*). O microcontrolador integra um conjunto de módulos, tais como: módulo UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, na literatura inglesa) com suporte para comunicação série RS-232, comunicação série SPI (*Serial Peripheral Interface*, na literatura inglesa), 2 temporizadores de 8 bits e 1 temporizador de 16 bits, conversor de sinal analógico-digital de 10 bits com 6 entradas, entre outros. Este microcontrolador é programado com recurso ao *software ARDUINO*, que utiliza uma linguagem de programação do tipo C/C++.

UART Interface USB

A unidade de controlo possui uma interface USB (*Universal Serial Bus*) para configuração dos parâmetros: caudal de fluido refrigerante e velocidade de rotação da ventoinha do radiador e visualização dos parâmetros: temperaturas e caudal. A porta série é implementada na unidade usando um conversor USB série FTDI FT232RL que converte o sinal UART RS232 do microcontrolador para USB. Antes de realizar a comunicação, os controladores (*drivers do software*) do conversor FTDI devem ser instalados no computador a utilizar.

Alimentação

A unidade de controlo e aquisição desenvolvida utiliza dois reguladores de tensão lineares de baixas perdas modelo AMS1117S da Advanced Monolithic Systems. O primeiro regula a tensão proveniente da bateria, ou seja, 12 V para 5 V, necessários para alimentar o microcontrolador. O segundo regula a tensão proveniente do regulador de 5 V para 3,3 V, que alimenta o multiplexer e o compensador de junta fria.

Saídas de potência

As saídas de potência permitem o controle da bomba circuladora e da ventoinha do radiador.

De modo a separar o circuito de instrumentação do circuito de potência, aplicaram-se transístores MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, na literatura inglesa) do modelo BSS138-7-F da Diodes Incorporated. Estes MOSFET têm a função de atuar o MOSFET de potência.

A bomba circuladora e a ventoinha são controladas em “*high side*” por meio de MOSFET, modelo AUIR3314S da International Rectifier. Estes MOSFET têm a capacidade de programação da corrente de corte, *feedback* de corrente, e proteção contra sobreaquecimento e curto-circuito.

Entradas analógicas

Nas entradas analógicas dos termopares é utilizado um multiplexer, modelo CD4051B da Texas Instruments. Este componente tem a função de adquirir informação dos seus 8 canais e direcioná-la apenas para um, sendo controlado digitalmente. A tensão de alimentação deste componente é de 3,3 V.

Para a conversão do sinal de tensão proveniente dos termopares em sinal digital é utilizado um compensador de junta fria (Cold-Junction Compensated, na literatura inglesa), modelo MAX6675ISA da Maxim Integrated. O sinal de saída é em formato de 14 bits compatível com SPI. Este componente tem uma resolução de 0,25 °C e permite leituras de temperatura de -270 °C até 1800 °C, tendo uma precisão de ± 2 °C para leituras de temperatura de -200 °C até 700 °C. A Tabela 4.5 apresenta a disposição dos termopares e a Figura 4.10 esquematiza a sua localização.

Tabela 4.5 – Disposição dos termopares no sistema.

Termopar	Localização
Termopar 1	Entrada de água na placa dissipadora
Termopar 2	Saída de água da placa dissipadora
Termopar 3	Face inferior da resistência
Termopar 4	Face superior da resistência
Termopar 5	Face da placa dissipadora 1
Termopar 6	Face da placa dissipadora 2
Termopar 7	Face da placa dissipadora 3
Termopar 8	Face da placa dissipadora 4

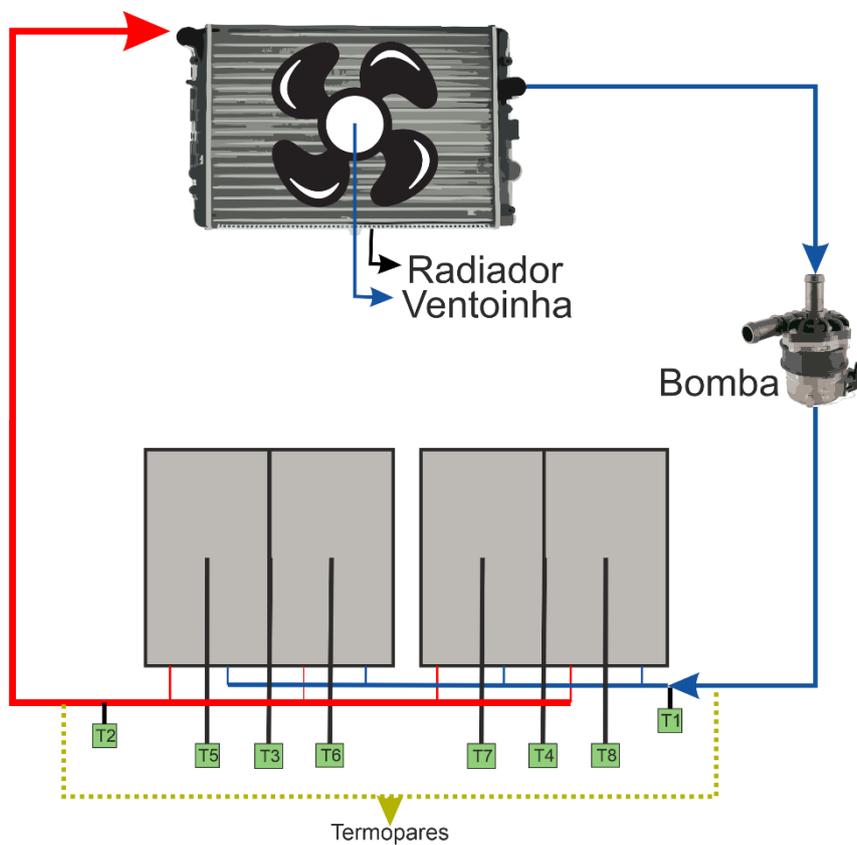


Figura 4.10 - Esquematização da localização dos termopares

Conectores

De modo a separar a secção de controlo da secção de aquisição de dados da PCB, seleccionaram-se dois conectores.

Para a secção de aquisição de dados, seleccionou-se o conector modelo Amp Seal 1-770669-1 da TE Connectivity de 23 pinos banhados a ouro e encapsulamento *through-hole*. Este conector utiliza pinos do modelo 770520-1 da TE Connectivity indicados para fios com uma secção de 0,5 mm² tendo capacidade para uma corrente até 24 A.

Para a secção de controlo, seleccionou-se o conector Deutch DT13-4P da TE Connectivity de 4 pinos e encapsulamento *through-hole*. Este conector utiliza pinos do modelo 1062-16-0122 da TE Connectivity indicados para fios com uma secção de 1,5 mm² tendo capacidade para uma corrente até 42 A.

4.3.2. Projeto da PCB

O projeto da PCB (*Printed Board Circuit*, da literatura inglesa) foi desenvolvido com recurso ao *software* Altium Designer. Este projeto pode ser dividido em duas fases.

Numa primeira fase desenhou-se o circuito elétrico de acordo com os componentes seleccionados na secção anterior, recorrendo às bibliotecas do *software* Altium Designer, que para além de possuir o desenho do componente, possui também as suas características físicas (*footprint*, dimensões e desenho CAD), ver Anexo I – Esquemático da PCB.

Numa segunda fase, seleccionou-se o tamanho da PCB e houve separação dos componentes por categorias: circuito de aquisição de dados e circuito de controlo, ver Anexo II – Disposição de componentes e ligações da PCB.

Na secção de aquisição de dados, os condensadores foram colocados próximos dos respetivos componentes para eliminar o ruído que pode eventualmente causar erros de funcionamento. Também o cristal, por ser um componente que precisa de estabilidade foi colocado nas proximidades do microcontrolador.

Na realização do projeto desta PCB decidiu-se colocar plano de massa, diminuído assim as interferências eletromagnéticas e aumentando a condutividade elétrica à massa facilitando assim a execução das ligações aos restantes componentes. Para garantir a

separação do circuito de controlo do circuito de aquisição de dados, foram realizados planos de massa independentes.

A Figura 4.11 apresenta a visualização em 3D do projeto da PCB no *software* Altium e permite visualizar a separação entre os planos de massa das zonas de aquisição de dados (área maior) e controlo (área menor).

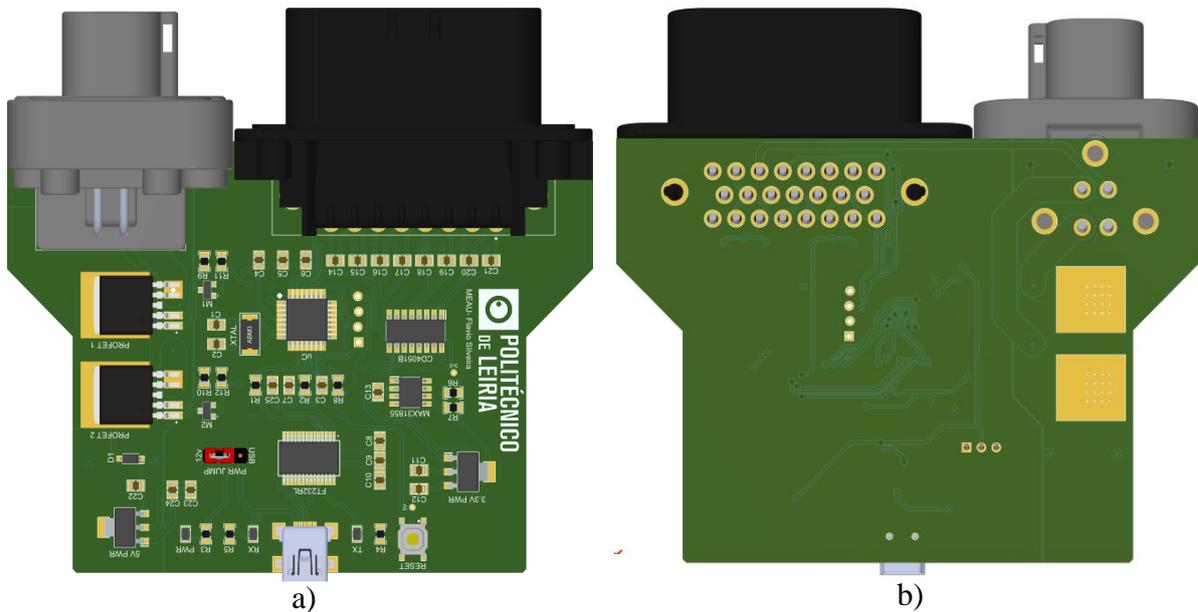


Figura 4.11- Visualização 3D do projeto da PCB: a) vista superior; b) vista inferior.

O Anexo III apresenta o *pinout* de ligação aos conetores da PCB.

De modo a proteger a PCB e a conferir-lhe uma estrutura mais robusta, foi desenhada em CAD uma caixa e posteriormente impressa em 3D. A caixa foi impressa em ABS que possui uma moderada resistência quando exposta a médias temperaturas, ver Figura 4.12.



Figura 4.12 – Visualização em CAD da caixa impressa em 3D.

Para que a caixa fosse totalmente funcional, foram deixadas 2 ranhuras frontais para os 2 conectores de ligações da PCB, e uma ranhura traseira para a conexão de um cabo USB de modo a ser possível a monitorização da montagem experimental em tempo real.

A Figura 4.13 mostra uma imagem da PCB que foi construída com os respetivos componentes já soldados.



Figura 4.13 – PCB com os componentes soldados e a base da caixa.

4.4. Estrutura e disposição dos componentes

A potência térmica gerada por uma bateria de tração depende das suas condições de funcionamento (*C-rate*). De modo a estudar o desempenho do sistema de gestão térmica das baterias baseado em módulos TEC, de uma forma controlada considerou-se a utilização de uma resistência térmica elétrica, ver Figura 4.14, que gera uma potência térmica equivalente à que seria gerada pela bateria. A resistência elétrica térmica dimensionada tem uma potência de 1000 W sendo esta controlada por um limitador de corrente alternada.

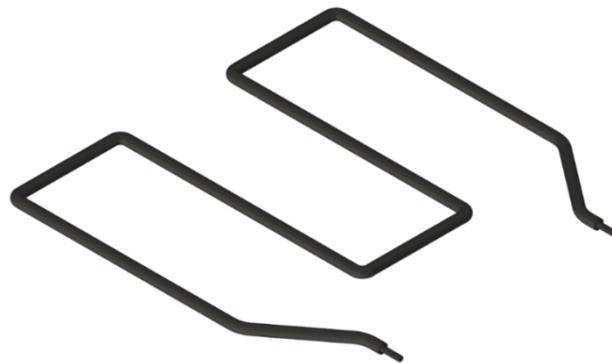


Figura 4.14 – Resistência elétrica térmica projetada.

De modo a criar condições de simetria, a resistência elétrica térmica foi acoplada a 2 chapas, uma inferior e outra superior permitindo uniformizar a distribuição de potência.

Entre a chapa e as placas dissipadoras projetou-se a colocação de uma placa de policarbonato de modo a que a massa subjacente não ficasse concentrada nos módulos TEC. Adicionalmente a placa de policarbonato tem o intuito de manter os módulos TEC corretamente posicionados. Foi prevista também a abertura de fendas que permitem a ligação dos módulos TEC entre si, e a colocação de um termopar para que este esteja em contacto com a superfície da chapa, o termopar é colocado ao centro. A Figura 4.15 mostra a placa de policarbonato projetada para o sistema.

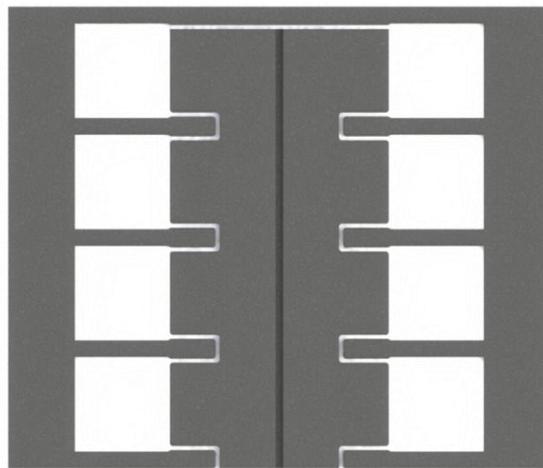


Figura 4.15 – Placa de policarbonato projetada.

Para a ligação hidráulica das placas dissipadoras considerou-se a utilização de coletores de tubos de cobre, um de baixa temperatura (entrada de fluido nas placas dissipadoras) e um de alta temperatura (saída de fluido das placas dissipadoras), que permitem a ligação das placas dissipadoras em paralelo, tal como se pode observar na Figura 4.16.

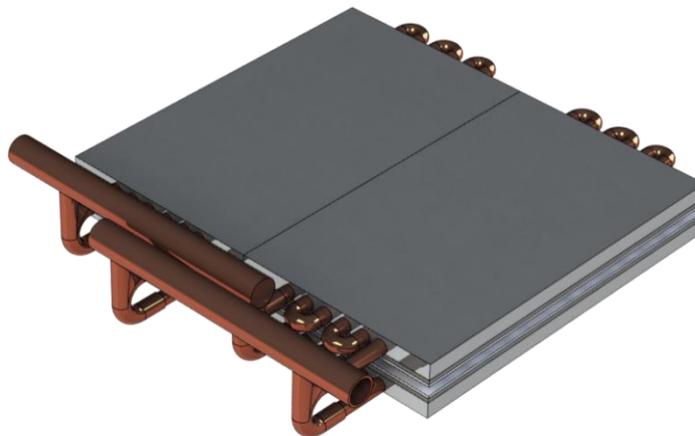


Figura 4.16 - Placas dissipadoras com os respectivos coletores.

De modo a controlar a temperatura máxima atingida pela resistência elétrica térmica, utilizou-se um limitador de corrente de 220 V com uma potência máxima de 4000 W.



Figura 4.17 – Limitador de corrente de 220 V.

Para colocar os vários componentes da montagem experimental foi construída uma estrutura com recurso a perfil Bosch. Esta estrutura está seccionada em 3 divisões, tal como demonstrado na Figura 4.18, que apresenta também as suas dimensões (900 × 695 × 955 mm).

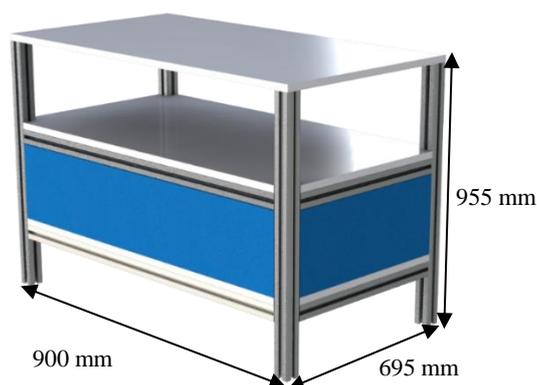


Figura 4.18 – Estrutura projetada para a montagem experimental com dimensões.

Na divisão inferior serão instaladas as placas dissipadoras com os respetivos termopares, a resistência elétrica térmica, e os módulos TEC. Tal como representado na Figura 4.18, esta divisão será revestida com um material isolante térmico de maneira a minimizar as perdas de calor para o ambiente.

A divisão intermédia será utilizada para instalar a bomba hidráulica, o caudalímetro e o radiador com a respetiva ventoinha.

A divisão superior será utilizada para instalar o módulo de controlo e aquisição de dados e o limitador de corrente da resistência térmica elétrica. Esta divisão apenas terá estes periféricos pois o resto do espaço estará reservado para a ligação de um computador com o *software* de aquisição de dados por parte do utilizador.

5. Análise e discussão de resultados

5.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado à análise e discussão de resultados do caso de estudo. A secção 5.2 apresenta uma análise aos resultados obtidos no estudo analítico dos módulos TEC (secção 3.4).

5.2. Desempenho dos módulos TEC

No capítulo 3 dedicado a apresentação do caso de estudo foi efetuada a seleção e caracterização dos módulos TEC. Na presente secção é feita uma análise de desempenho dos módulos TEC para as condições reais de utilização. Assim, nesta secção é apresentada uma análise dos parâmetros de funcionamento (tensão e corrente) dos módulos TEC com vista a maximizar o seu desempenho (COP_C) para o presente caso de estudo.

Na secção 3.4.2 concluiu-se que o módulo TEC1-12730 tem um COP_C mais elevado quanto menor for o ΔT e menor for a corrente consumida pelo módulo (I). No entanto, é importante notar que a maximização dos valores de COP_C ocorre para valores de potência térmica removida (\dot{Q}_c) relativamente reduzidos. Neste contexto, de modo a aumentar a gama de valores em que os módulos TEC podem operar, e tendo em vista a sua otimização ao nível da eficiência (COP_C) optou-se pela utilização de 8 módulos TEC ligados em série para cada um dos módulos de baterias. A Tabela 5.1 apresenta os valores de potência térmica removida (\dot{Q}_c) e de corrente (I) para diferentes valores de diferença de temperatura (ΔT) de modo a garantir valores de $COP_{C,máx}$, isto é valor otimizado a que correspondem as condições de operação ideais de um módulo TEC, e condições de operação de um módulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série.

Tabela 5.1 – Condições de operação ideais de um módulo TEC, e condições de operação de um módulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série.

Condições de operação ideais de um módulo TEC				
ΔT (°C)	5	10	15	20
I (A)	1,9	3,9	5,9	8,1
V (V)	1,2	2,49	3,8	5,2
\dot{Q}_c (W)	16,35	33,3	46,17	60,2
$COP_{C,máx}$ (-)	7,13	3,3	2,06	1,42
Condições de operação de um modulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série				
ΔT (°C)	5	10	15	20
I (A)	10,7	10	9,3	8,7
V (V)	44,4/8 = 5,6			
\dot{Q}_c (W)	129,6	109,2	88,4	67,3
COP_C (-)	2,18	1,97	1,71	1,39

A Figura 5.1 mostra a variação da potência térmica removida em função da corrente para diferentes valores de ΔT . Tendo em consideração as condições de operação ideais de um módulo TEC, foi definida uma zona limite inferior (ideal) tal como assinalado na figura. Do mesmo modo tendo em conta as condições de operação reais de um módulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série, foi definida uma zona limite superior (real – 8 módulos TEC instalados em série).

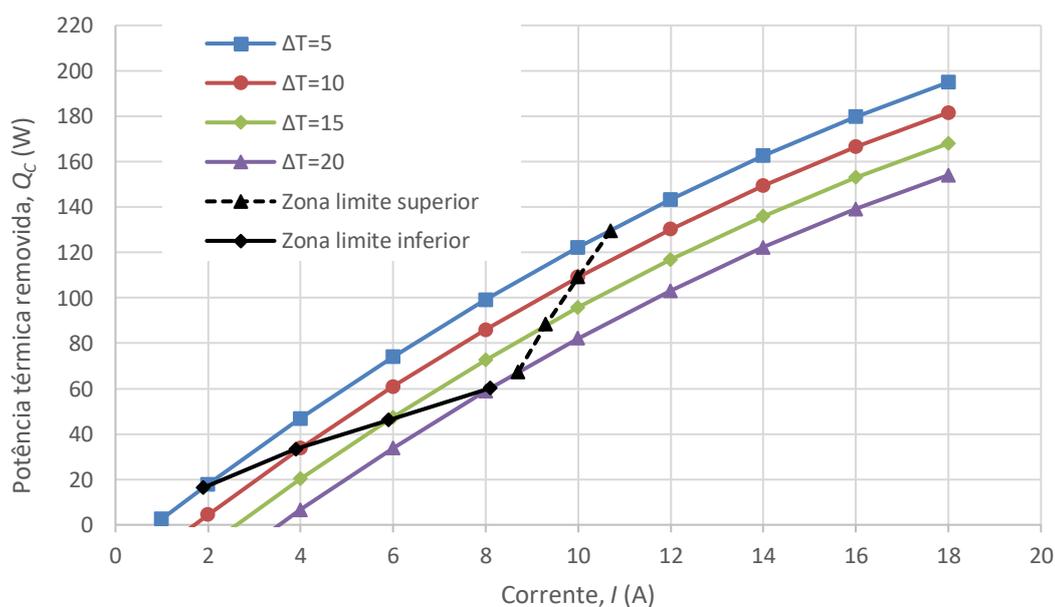


Figura 5.1 – Variação da potência térmica removida em função da corrente para diferentes valores de ΔT .

Idealmente os módulos TEC devem operar entre a zona limite inferior e a zona limite superior. A zona limite inferior referente às condições de operação ideais de um módulo TEC é aquela que maximiza o valor de COP_C , no entanto esta zona corresponde à potência térmica removida mínima.

Considerando a zona limite inferior e a zona limite superior definida na Figura 5.1, a Figura 5.2 exprime a corrente consumida (I) pelo módulo TEC em função da potência térmica removida (\dot{Q}_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$). Considera-se que a potência térmica removida (\dot{Q}_c) corresponde à potência térmica gerada pelas baterias (\dot{Q}).

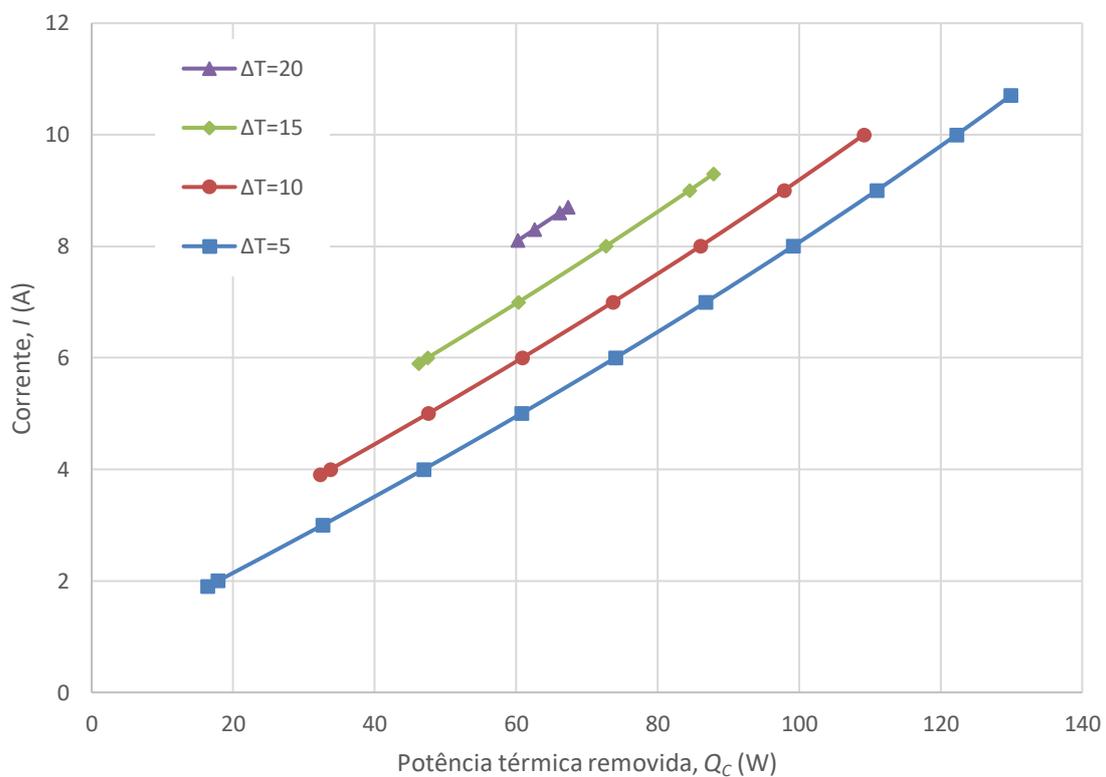


Figura 5.2 – Corrente consumida (I) pelo módulo TEC1-12730 em função da potência térmica removida pela fonte fria (\dot{Q}_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

Considerando os valores de corrente e potência térmica removida apresentados na Figura 5.2, obtiveram-se equações polinomiais que expressão a variação da corrente (I) em função da potência térmica removida (\dot{Q}_c) para diferentes valores de diferença de temperatura (ΔT). As equações obtidas são apresentadas de seguida:

$$\Delta T = 5^\circ\text{C} \quad I = 0,000114 \dot{Q}_c^2 + 0,061\dot{Q}_c + 0,89 \quad 5.1$$

$$\Delta T = 10^\circ\text{C} \quad I = 0,000125 \dot{Q}_c^2 + 0,062\dot{Q}_c + 1,78 \quad 5.2$$

$$\Delta T = 15^\circ\text{C} \quad I = 0,000137 \dot{Q}_c^2 + 0,063\dot{Q}_c + 2,7 \quad 5.3$$

$$\Delta T = 20^\circ\text{C} \quad I = 0,000153 \dot{Q}_c^2 + 0,065\dot{Q}_c + 3,65 \quad 5.4$$

As equações anteriores indicam que conhecendo a potência térmica a remover e a diferença de temperatura no módulo TEC, é possível obter o valor da corrente que permite maximizar o valor de COP_C . No entanto, para se obter o valor de corrente pretendido é necessário controlar a tensão de alimentação do módulo TEC. É importante notar que para as condições de operação de um módulo TEC, considerando 8 módulos TEC instalados em série, a tensão de alimentação de cada módulo TEC é constante ($44,4/8 = 5,6$ V). Assim, é necessário conceber um sistema que permita o controlo da tensão de alimentação dos módulos TEC de modo a garantir o seu funcionamento otimizado.

Através da análise das equações 5.1 a 5.4, foi possível obter uma equação geral para o cálculo da corrente necessária em função da potência térmica gerada pelo módulo de baterias de tração e da temperatura:

$$I = 0,000114 \times 1,1^{\left(\frac{\Delta T}{5}-1\right)} \times \dot{Q}^2 + 0,061 \times 1,016^{\left(\frac{\Delta T}{5}-1\right)} \times \dot{Q} + 0,18 \times \Delta T \quad 5.5$$

A Figura 5.3 mostra a tensão de alimentação total (V) em função da potência térmica total removida (\dot{Q}_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$). O valor total corresponde ao valor dos 8 módulos TEC.

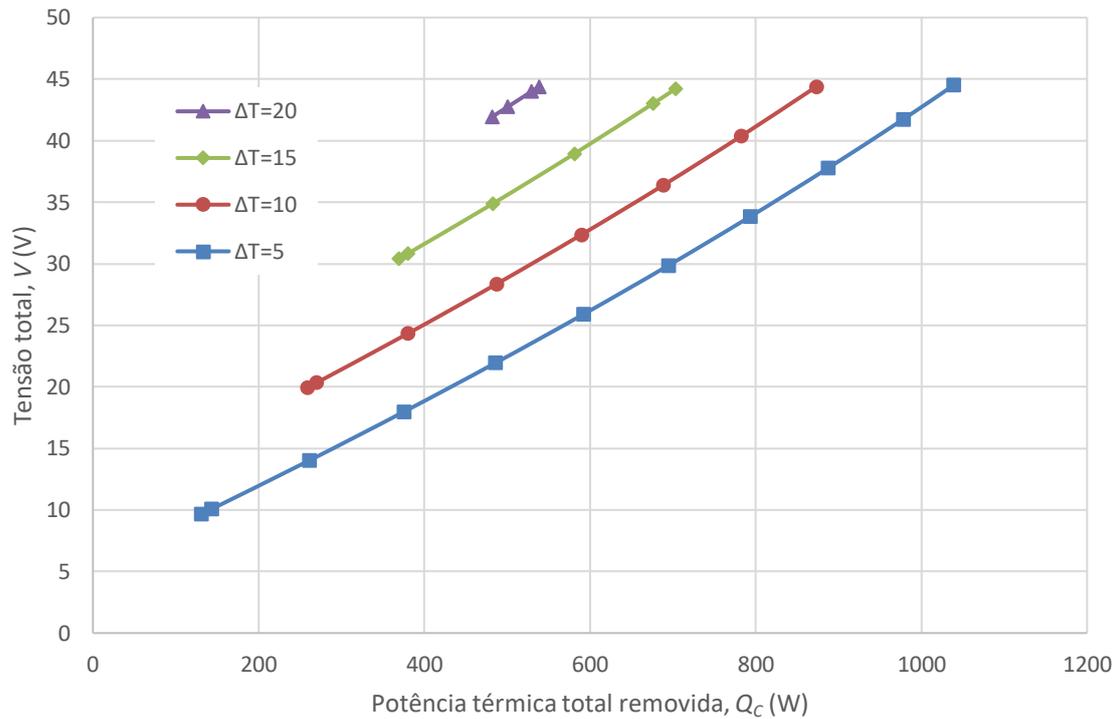


Figura 5.3 – Tensão de alimentação total (V) em função da potência térmica total removida (\dot{Q}_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

A Figura 5.3 mostra que a tensão de alimentação total máxima para as diferentes temperaturas é de 44,4 V, correspondendo à tensão nominal das baterias que alimentam os módulos TEC, e a tensão de alimentação total (V) mínima corresponde ao valor que maximiza o desempenho do sistema, isto é COP_C . A Figura 5.3 mostra também que a tensão de alimentação total (V) aumenta de forma aproximadamente linear com a potência térmica total removida, independentemente da diferença de temperatura no módulo TEC. Posto isto, e conhecendo a potência térmica gerada pelas baterias, e a diferença de temperatura no módulo TEC (ΔT) existe um valor de tensão de alimentação total que maximiza o desempenho do sistema, tal como indicado na Figura 5.3.

A Figura 5.4 mostra a variação do coeficiente de desempenho (COP_C) em função da potência térmica removida (\dot{Q}_c) por cada um dos módulos TEC1-12730 para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

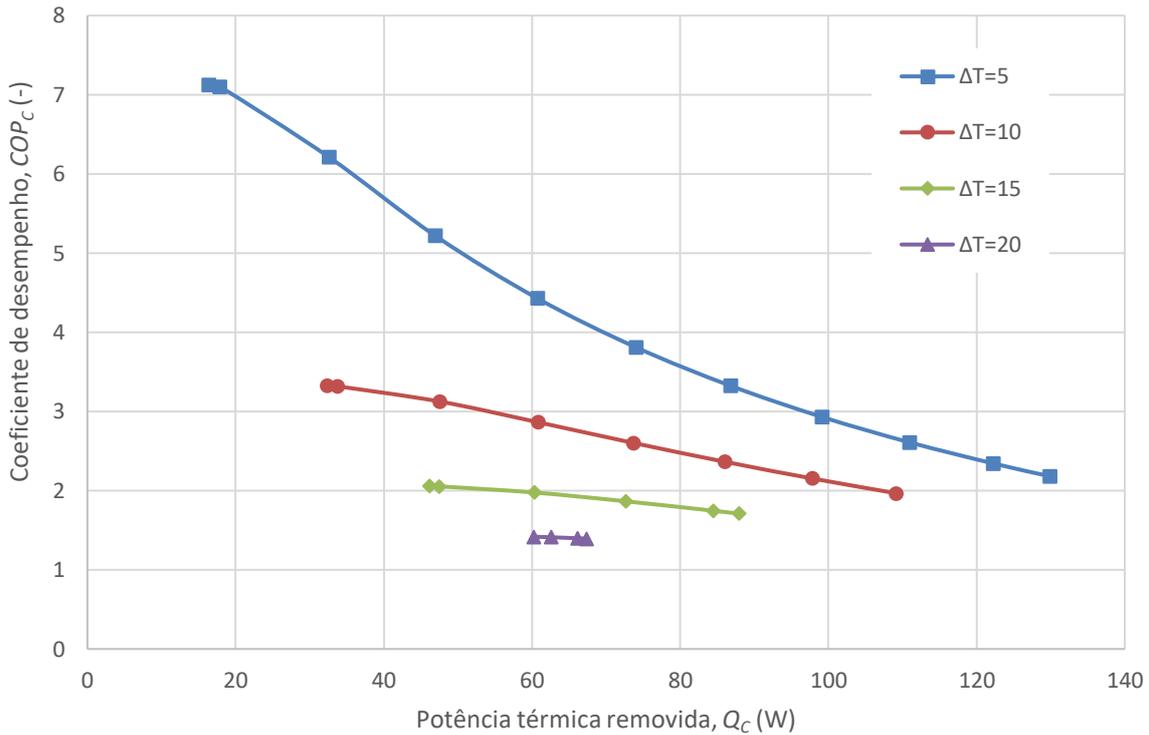


Figura 5.4 – Coeficiente de desempenho (COP_c) do módulo TEC1-12730 em função da potência térmica removida pela fonte quente (\dot{Q}_c) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

Tal como se pode observar na Figura 5.4 independentemente das condições de operação, o valor de COP_c é sempre superior a 1,39, atingindo um máximo de 7,13. Estes resultados demonstram a viabilidade do sistema de gestão térmica de baterias de tração através da utilização de módulos TEC. Independentemente da diferença de temperatura do módulo TEC, o seu desempenho (COP_c) decresce ligeiramente com o aumento da potência térmica removida, aumentando de forma significativa com a diminuição de ΔT . Adicionalmente, a Figura 5.4 revela que minimizando a diferença de temperatura do módulo TEC permite um intervalo de potência térmica removida mais alargado, por exemplo: para $\Delta T = 5$ °C, o valor de \dot{Q}_c varia no intervalo de $16,35 < \dot{Q}_c < 129,88$ W; para $\Delta T = 20$ °C, o valor de \dot{Q}_c varia no intervalo de $60,19 < \dot{Q}_c < 66,32$ W. É importante ainda referir que aumentando o valor de ΔT , o módulo TEC opera com COP_c negativo inviabilizando a sua utilização. Assim, conclui-se que $\Delta T = 20$ °C corresponde ao valor máximo de diferença de temperatura a que o módulo TEC deve ser sujeito.

Neste contexto, é possível o desenvolvimento de um algoritmo que ajuste a tensão de alimentação considerando o valor de corrente calculado na Eq. 5.5. A Figura 5.5 apresenta o procedimento para a otimização do módulo TEC.

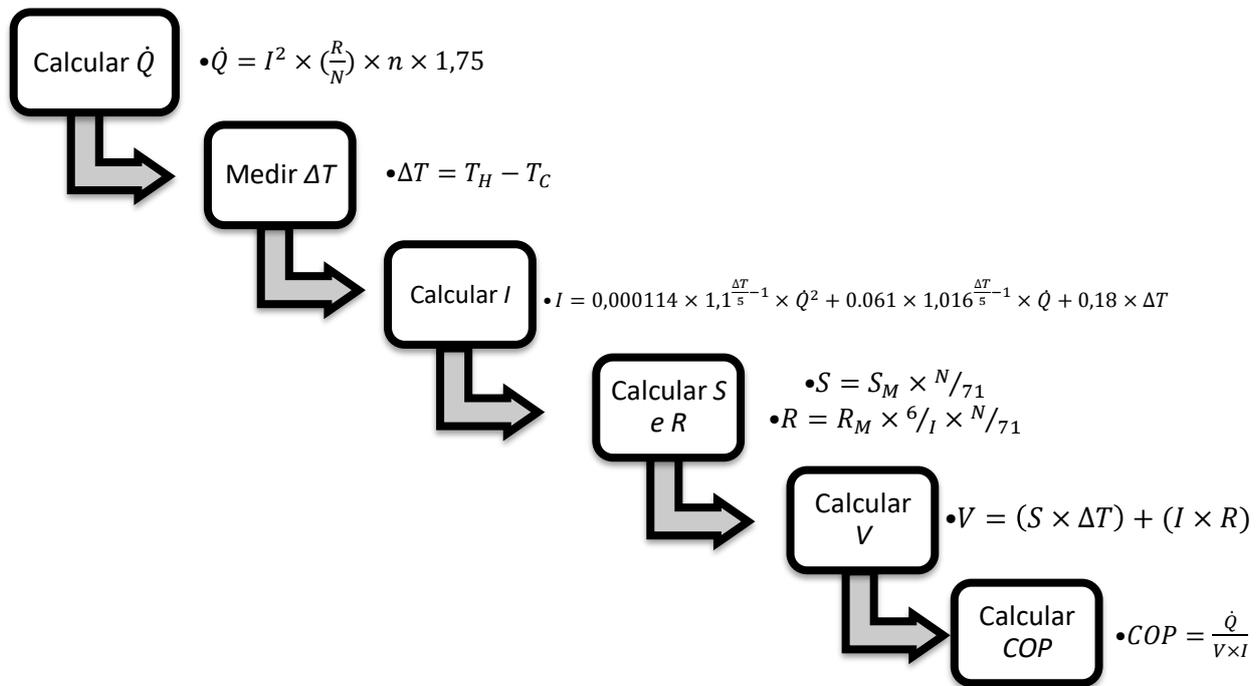


Figura 5.5 – Procedimento de cálculo para otimização de funcionamento do módulo TEC1-12730.

O algoritmo proposto requer o desenvolvimento de uma unidade de controlo da tensão de alimentação total a impor aos módulos TEC. Com esta otimização é possível minimizar o consumo dos módulos TEC, aumentando assim o seu coeficiente de desempenho.

A Figura 5.6 mostra a potência térmica total dissipada (\dot{Q}_H) em função da potência térmica total removida (\dot{Q}_C) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$). O valor total corresponde ao valor dos 8 módulos TEC.

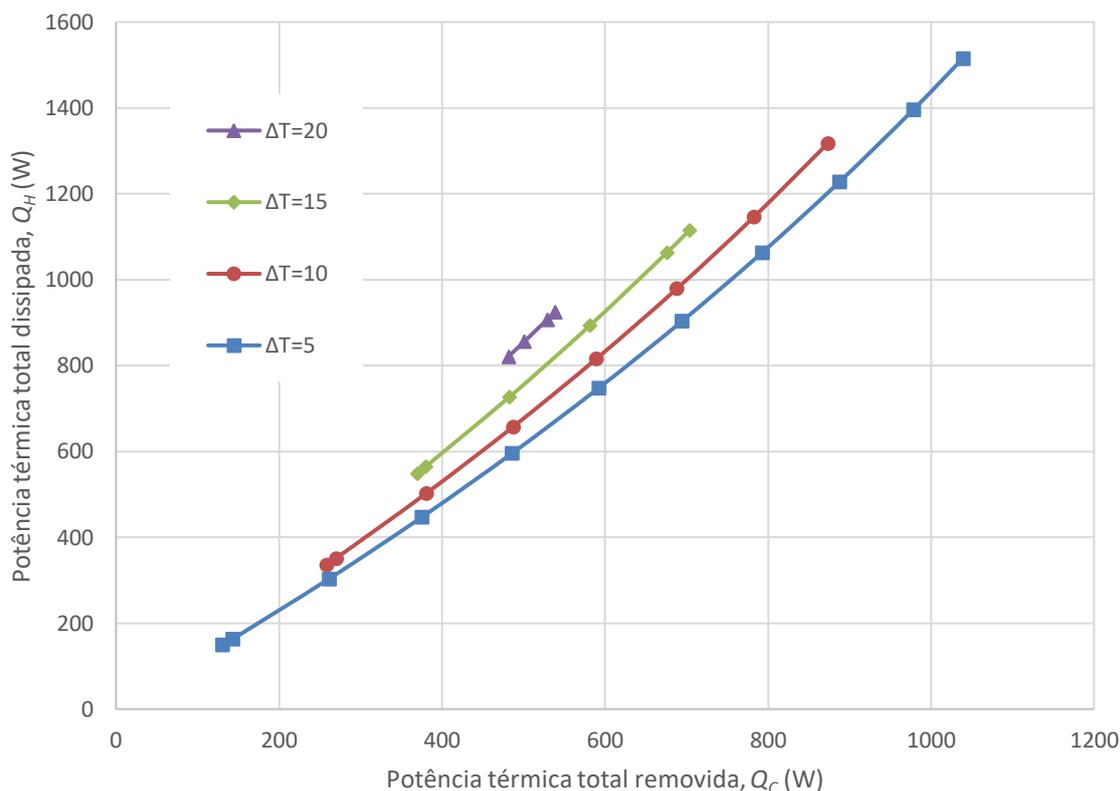


Figura 5.6 – Potência térmica total dissipada (\dot{Q}_H) em função da potência térmica removida pela fonte quente (\dot{Q}_C) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

A Figura 5.6 mostra que: para $\Delta T = 5$ °C, o valor da potência térmica total removida varia no intervalo de $130,8 < \dot{Q}_C < 1039$ W; para $\Delta T = 20$ °C, o valor da potência térmica total removida varia no intervalo de $481,6 < \dot{Q}_C < 538,5$ W. Do mesmo modo, a Figura 5.6 mostra que: para $\Delta T = 5$ °C, o valor da potência térmica total dissipada varia no intervalo de $149,2 < \dot{Q}_H < 1515,3$ W; para $\Delta T = 20$ °C, o valor da potência térmica total removida varia no intervalo de $821,2 < \dot{Q}_H < 924,8$ W.

A potência térmica máxima gerada por um módulo de baterias para um $C\text{-rate} = 3C$ é de 1043,8 W. Assim será necessário garantir uma diferença de temperatura no módulo TEC tão baixa quanto possível, visto que para $\Delta T = 5$ °C o valor da potência térmica total removida pelos 8 módulos TEC varia no intervalo de $130,8 < \dot{Q}_C < 1039$ W.

No presente estudo foi projetada uma montagem experimental que permite simular a geração de calor da bateria de tração através de uma resistência térmica elétrica de 1000 W de potência máxima. Adicionalmente, para garantir condições de simetria, a instalação considera a utilização de 4 placas dissipadoras, ver Figura 4.16. Uma vez que

são utilizados 4 módulos TEC por cada placa dissipadora, a instalação com resistência térmica elétrica utiliza 16 módulos TEC.

A Figura 5.7 mostra a potência térmica total dissipada (\dot{Q}_H) em função da potência térmica total removida (\dot{Q}_C) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$). O valor total corresponde ao valor dos 16 módulos TEC, funcionando com dois grupos de 8 módulos cada em paralelo.

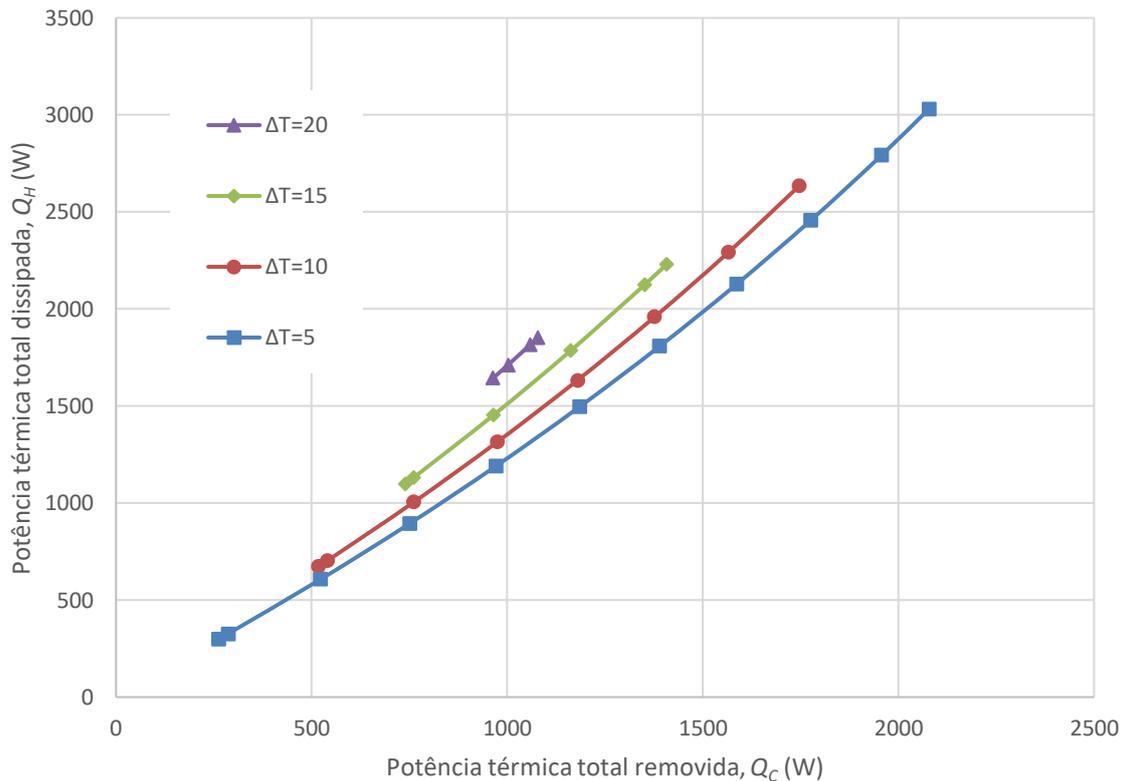


Figura 5.7 - Potência térmica total dissipada (\dot{Q}_H) em função da potência térmica removida pela fonte quente (\dot{Q}_C) para diferentes valores de ΔT ($5 \leq \Delta T \leq 20$).

A resistência térmica elétrica disponível para a instalação tem uma potência de 1000 W. A Figura 5.7 mostra que para $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, o valor da potência térmica total removida pelos 16 módulos TEC varia no intervalo de $261,6 < \dot{Q}_C < 2078$ W, assim recomenda-se a aquisição de uma resistência térmica elétrica que permita uma potência máxima até 2100 W.

Relativamente à potência térmica total dissipada pelos 16 módulos TEC, e que é removida através das 4 placas dissipadoras, o seu valor máximo é de $\dot{Q}_H = 3030$ W e ocorre para $\Delta T = 5^\circ\text{C}$, tal como se pode observar na Figura 5.7. Cada uma das placas dissipadoras

permite remover 1440 W, assim as 4 placas dissipadoras permitem remover um máximo de 5760 W, o que revela que o circuito de refrigeração se encontra adequado para o sistema em estudo.

6. Conclusões

No presente trabalho foi feita uma análise de um sistema de gestão térmica de baterias de tração de veículos elétricos através da utilização de módulos TEC.

A revisão bibliográfica efetuada expôs os parâmetros fundamentais de funcionamento para o estudo de um módulo TEC, revelando que a sua utilização na gestão térmica de baterias de tração apresenta um conjunto de vantagens, quando comparado com outros sistemas.

Foi selecionado o módulo TEC1-12730 e foram caracterizados os seus parâmetros de desempenho tendo em conta a sua aplicação para as condições de funcionamento requeridas. Na análise efetuada conclui-se que:

- No intervalo de diferença de temperatura em estudo ($5 \leq \Delta T \leq 60$ °C), o coeficiente de desempenho máximo varia entre $0,1 \leq COP_{C,máx} \leq 7,1$, e a potência térmica removida para o valor de $COP_{C,máx}$ varia no intervalo: $16,5 \leq \dot{Q}_{c,COP_{C,máx}} \leq 92,8$ W;
- A utilização de 8 módulos TEC garante o melhor compromisso, tendo em conta os objetivos de maximização de COP_C , sem comprometer os requisitos ao nível da potência térmica removida;
- Verificou-se que a minimização de ΔT no módulo TEC contribui em simultâneo para a maximização de COP_C e da potência térmica removida;
- Para as condições de operação em estudo, o valor de COP_C é sempre superior a 1,39, podendo atingir um máximo de 7,1.

Verificou-se que a instalação experimental projetada é adequada para o estudo dos módulos TEC nas condições de funcionamento pretendidas, e apresentou-se um algoritmo que, com base na estimativa de potência térmica gerada pelas baterias de tração e da medição do valor de ΔT no módulo TEC, permite calcular o valor de tensão de alimentação que maximiza o desempenho (COP_c) dos módulos TEC.

6.1. Proposta de trabalhos futuros

Considerando o estudo efetuado no presente projeto, como proposta de trabalhos futuros sugere-se:

- Conclusão da montagem experimental, com montagem de todos os periféricos;
- Realização de testes experimentais simulando o aquecimento das baterias e arrefecimento sem auxílio dos módulos TEC, apenas com a placa dissipadora;
- Realização de testes experimentais simulando a potência térmica gerada pelas baterias através da utilização da resistência térmica elétrica, e utilização do sistema de arrefecimento com o auxílio dos módulos TEC ligados em série e alimentados por uma tensão de 44,4 V;
- Desenvolvimento de uma unidade de controlo para os módulos TEC, a qual tem de ser capaz de:
 - Adquirir o valor da potência térmica gerada pelo módulo de baterias;
 - Adquirir o valor de diferença de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria do módulo TEC;
 - Implementar o algoritmo proposto neste trabalho de modo a calcular a tensão de alimentação dos módulos TEC ajustada à condição de funcionamento em cada momento;
 - Controlar a tensão de alimentação dos módulos TEC.

7. Bibliografia

- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2018). A review of novel thermal management systems for batteries. *International Journal of Energy Research*, 42(10), 3182–3205. <https://doi.org/10.1002/er.4095>
- Alaoui, C. (2013). Solid-state thermal management for lithium-ion EV batteries. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(1), 98–107. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2214246>
- Alaoui, C. (2018). *Passive / Active BTMS For EV Lithium-Ion Batteries*. 67(5), 3709–3719.
- Alaoui, C., & Salameh, Z. M. (2005). A novel thermal management for electric and hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54(2), 468–476. <https://doi.org/10.1109/TVT.2004.842444>
- Battery University. (2018). *Types_of_Battery_Cells @ Batteryuniversity.Com*. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- Chan, C. C., & Chau, K. T. (2001). *Modern Electric Vehicle Technology*.
- Darcy, E., Davies, F., Jeevarajan, J., & Cowles, P. (2003). Lithium-Ion Cell PTC Limitations and Solutions for High Voltage Battery Applications. *The Electrochemical Society 203rd Meeting*, 1. <https://www.electrochem.org/dl/ma/203/pdfs/0189.pdf>
- Elarusi, A., Attar, A., & Lee, H. (2017). Optimal Design of a Thermoelectric Cooling/Heating System for Car Seat Climate Control (CSCC). *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 1984–1995. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-5043-y>
- Ferrotec. (2019). *Introduction to Thermoelectric Cooling*. <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref01/>
- Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D., & Jossen, A. (2017). Lithium-ion battery storage

- for the grid - A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. In *Energies* (Vol. 10, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/en10122107>
- Horn, M., Macleod, J., Liu, M., Webb, J., & Motta, N. (2019). Supercapacitors : A new source of power for electric cars. *Economic Analysis and Policy*, *61*, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2018.08.003>
- Hunt, I. A., Zhao, Y., Patel, Y., & Offerz, G. J. (2016). Surface cooling causes accelerated degradation compared to tab cooling for lithium-ion pouch cells. *Journal of the Electrochemical Society*, *163*(9), A1846–A4852. <https://doi.org/10.1149/2.0361609jes>
- Kim, S. Y., Lee, K., Park, S., & Kim, J. (2014). Thermal design analysis and performance test of a 1kW thermoelectric battery cooler. *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems -Proceedings of the Intersociety Conference*, 1417–1421. <https://doi.org/10.1109/ITHERM.2014.6892446>
- Li, X., Zhong, Z., Luo, J., Wang, Z., Yuan, W., Zhang, G., Yang, C., & Yang, C. (2019). Experimental Investigation on a Thermoelectric Cooler for Thermal Management of a Lithium-Ion Battery Module. *International Journal of Photoenergy*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3725364>
- Liaw, B. Y., & Dubarry, M. (2007). From driving cycle analysis to understanding battery performance in real-life electric hybrid vehicle operation. *Journal of Power Sources*, *174*(1), 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.06.010>
- Liu, Y., Yang, S., Guo, B., & Deng, C. (2014). Numerical Analysis and Design of Thermal Management System for Lithium Ion Battery Pack Using Thermoelectric Coolers. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/852712>
- Mahle. (2015). THERMOELECTRICS — A NEW TYPE OF BATTERY COOLING AND HEATING. *MAHLE Performance 2015*.
- Maral, Y., Aktas, M., Erol, O., Ongun, R., & Polat, F. (2017). An examinaion about thermal capacities of thermoelectric coolers in battery cooling systems. *6*(December), 703–710.

Oliveira, L. A., & Lopes, A. G. (2015). *Mecânica dos Fluidos* (4ª).

Siddique, A. R. M., Mahmud, S., & Heyst, B. Van. (2018). A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. In *Journal of Power Sources*.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.094>

Snyder, G. J., & Snyder, A. H. (2017). Figure of merit ZT of a thermoelectric device defined from materials properties. *Energy and Environmental Science*, 10(11).
<https://doi.org/10.1039/c7ee02007d>

Tesla Model S. (2019).

Westbrook, M. H. (2001). *The electric car : development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*.

8. Anexo

ANEXO I: Esquemático da PCB

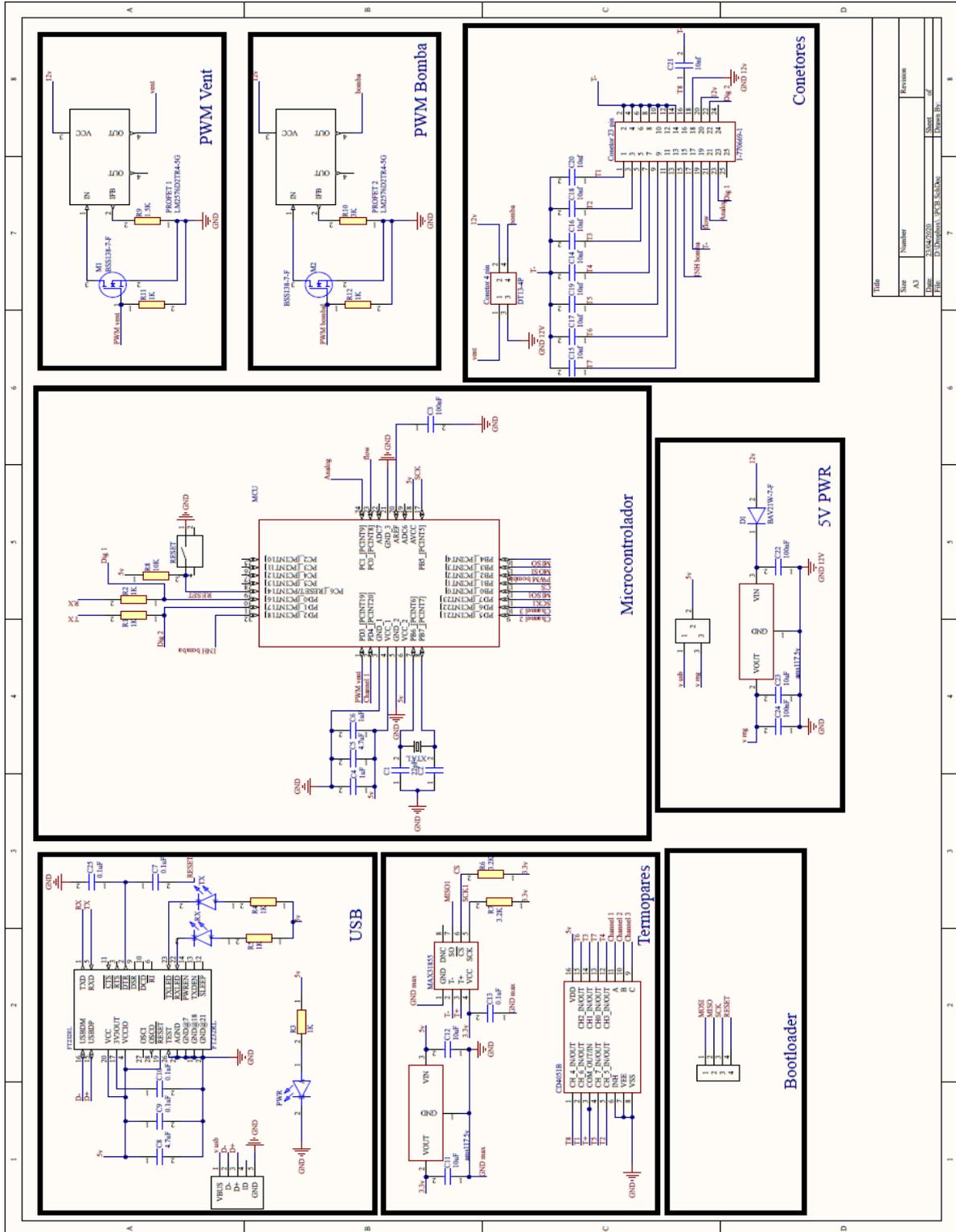


Figura 8.1 – Esquemático da PCB

ANEXO II: Disposição de componentes e ligações da PCB

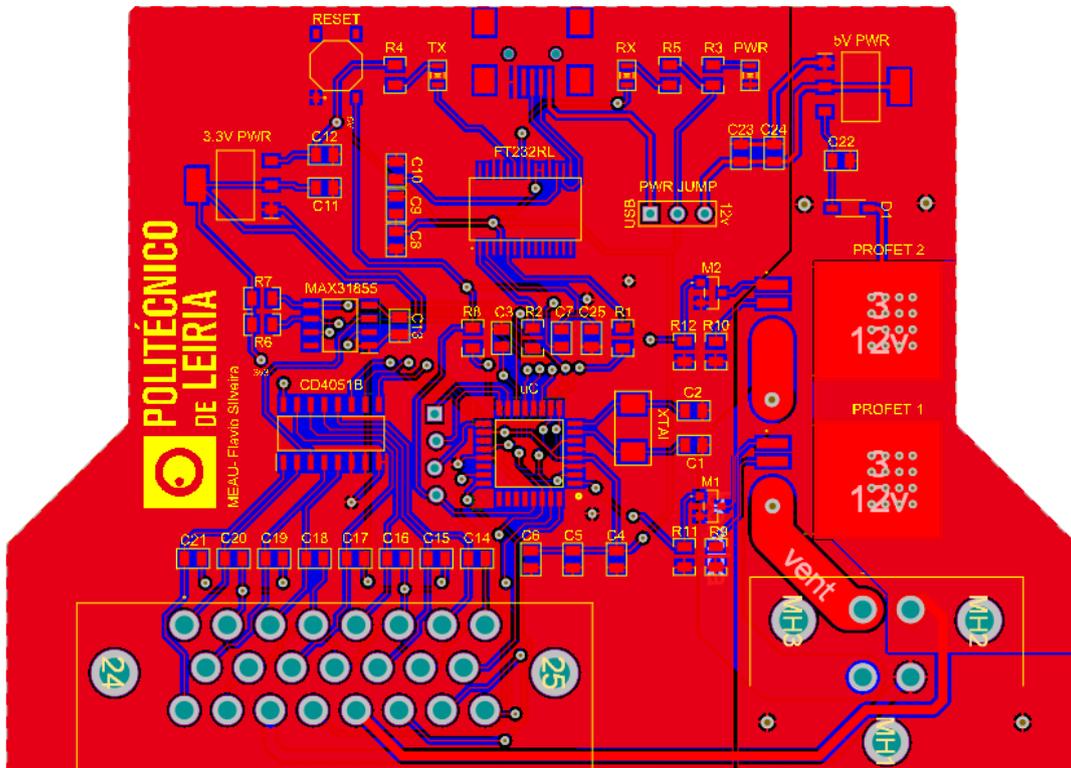


Figura 8.2 – Face superior em 2D da PCB.

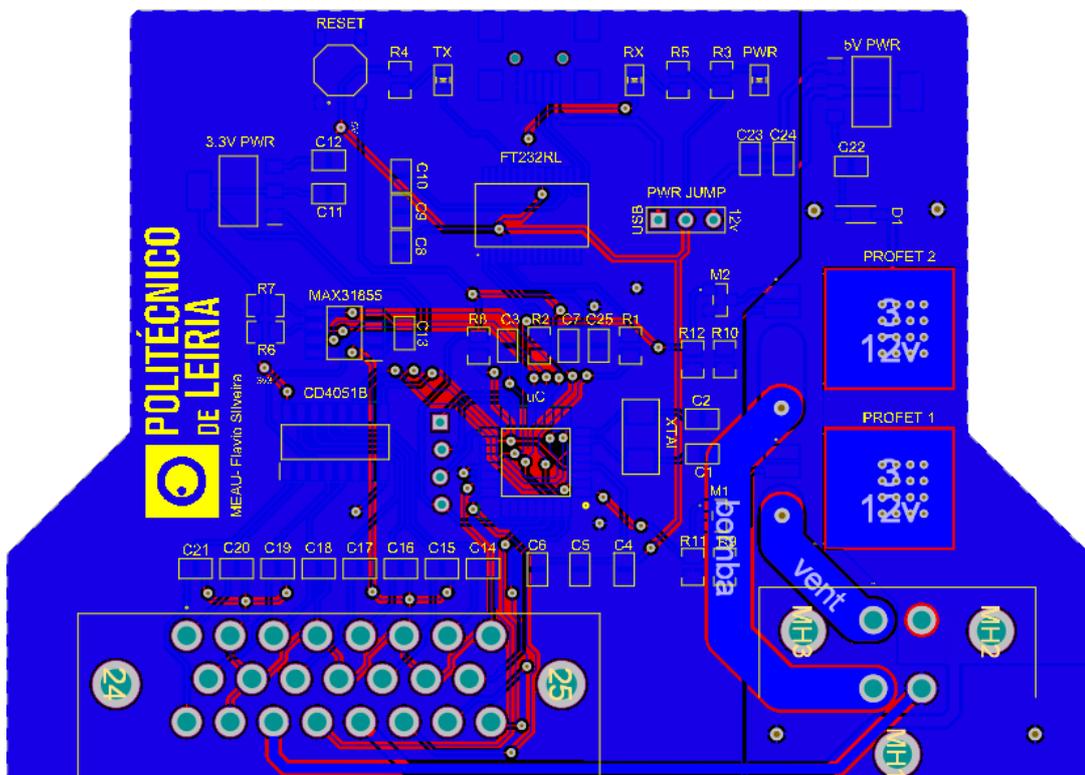
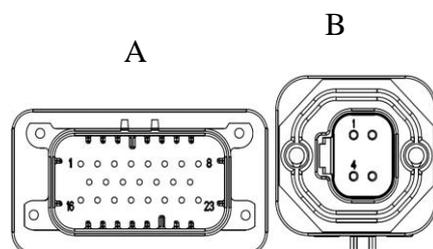


Figura 8.3 – Face inferior em 2D da PCB

ANEXO III: *Pinout* da PCB



Conetor A				Conetor B	
Pino	Ligação	Pino	Ligação	Pino	Ligação
1	Termopar 1 (+)	13	Termopar 7 (+)	1	Ventoinha
2	Termopar 1 (-)	14	Termopar 7 (-)	2	12 V
3	Termopar 2 (+)	15	Enable Bomba	3	GND
4	Termopar 2 (-)	16	Termopar 8 (+)	4	Bomba
5	Termopar 3 (+)	17	Termopar 8 (-)		
6	Termopar 3 (-)	18	Massa 12V		
7	Termopar 4 (+)	19	Caudalimetro		
8	Termopar 4 (-)	20	12V		
9	Termopar 5 (+)	21	Pino Analógico		
10	Termopar 5 (-)	22	Pino Digital 1		
11	Termopar 6 (+)	23	Pino Digital 2		
12	Termopar 6 (-)				

Figura 8.4 -*Pinout* da PCB