Universidade de Aveiro
2021

Pedro Filipe Custódio dos Santos

Sistema Eletrónico para Pesquisa de Marcadores Fisiológicos da Dor

Universidade de Aveiro
2021

Pedro Filipe Custódio dos Santos

Sistema Eletrónico para Pesquisa de Marcadores Fisiológicos da Dor

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e da Doutora Ana Raquel Sebastião, investigadora do Instituto de Engenharia Eletrónica e Informática de Aveiro.

Dedico este trabalho às minhas duas avós, avó ‘Lina’ e avó ‘Palhaça’, que já não se encontram junto de mim, mas que sempre me apoiaram e sempre estiveram bem presentes na minha vida. Dedico-lhes este trabalho, porque foram, e são, duas pessoas essenciais na minha vida e às quais devo parte do que sou como ser humano. Hoje não estão junto de mim fisicamente como sempre estiveram, mas estão e estarão sempre no meu coração.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Pedro Miguel Ribeiro Lavrador
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Sérgio Ivan Fernandes Lopes
Professor Adjunto da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Viana do Castelo.

Prof. Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão, por tudo o que fizeram por mim e pelo incondicional apoio que sempre me deram ao longo deste trabalho e de todo o curso. Agradeço a paciência e a compreensão que sempre tiveram para comigo.

À minha avó Judit e à minha melhor amiga 'Belita', que nunca desistiram de mim e que acreditaram em mim, mesmo quando eu não acreditava. Agradeço todo o apoio e toda a oração que me dedicaram. Agradeço, ainda, aos meus familiares, amigos e colegas, em especial a todos aqueles que sempre acreditaram em mim e que me ajudaram nesta etapa da minha vida.

Agradeço ao Sr. Mário Jorge Gonçalves, ao Sr. Paulo Martins, à Eng. Isabel Castro e à Eng. Sara Pereira pela ajuda e pela disponibilidade que demonstraram ao longo desta dissertação.

Aos meus orientadores, Doutor Rui Manuel Escadas Ramos Martins e Doutora Ana Raquel Sebastião, por todo o conhecimento que me foi transmitido ao longo desta dissertação e por toda a ajuda que me deram.

Por fim, ao Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática e à Universidade de Aveiro pelo suporte dado na realização desta dissertação e no curso em geral.

palavras-chave

dor, *cold pressor test*, *peltier*. marcadores fisiológicos, controlo de temperatura, sistema elétrico, bombas, aquecimento, arrefecimento, termoelétrico.

Resumo

Estudar alterações fisiológicas que possam ser identificadas como marcadores fisiológicos da dor, requer a utilização de um equipamento que permita a indução da mesma. Face ao elevado valor comercial destes equipamentos, surgiu a necessidade de desenvolver um equipamento para esta finalidade, cujo custo seja inferior aos existentes no mercado. O presente trabalho mostra a elaboração de um sistema eletrónico que será fundamental para a realização de testes de indução de dor por exposição da mão e do antebraço a estímulos frios, permitindo assim a investigação de marcadores fisiológicos da dor. O sistema elétrico aqui apresentado pretende estabilizar a temperatura da água em 2 tanques, a, aproximadamente, 7ºC e 37ºC, usando materiais como: sensores de temperatura, módulos *peltier*, bombas, um microcontrolador, entre outros.

O sistema garante o controlo da temperatura a 37ºC e a permanência da temperatura da água em torno dos 7ºC durante um tempo superior ao necessário para a realização do estudo de indução de dor. Este garante, também, a segurança dos participantes e a homogeneidade da temperatura da água através da circulação permanente da mesma.

Keywords

pain, cold pressor test, peltier, research, physiological markers, temperature management, electrical systems, pumps, heating, cooling, thermoelectric.

Abstract

To study physiological changes that can be considered as physiological pain indicators, it is necessary to induce pain. Often, it is used the cold pressor task using an equipment that induce pain through cold stimuli. The high commercial value of such equipment opens the possibility to develop one with reduced costs, for research purposes.

This work presents the development of an electronic system, which will be fundamental for the execution of pain induction tests consisting in the exposition of the hand and forearm to cold stimuli, thus allowing the study of physiological pain indicators.

The electric system presented stabilizes water temperature in two different compartments, one with water at 7°C and another at 37°C, by using materials such as: temperature sensors, peltier modules, pumps, microcontroller, among others. This system guarantees the temperature control of the water at, approximately, 37°C and the stability of the water temperature in the other compartment at, approximately, 7°C for a period greater than the necessary for the pain induction task. It also assures the safety of the participants and the homogeneity of water temperature through permanent water circulation.

Índice

1. Introdução 1
   1.1. Enquadramento 1
   1.2. Estudos semelhantes 3
   1.3. Estrutura do Documento 7
2. Estudo do Sistema 9
   2.1. Idealização do Sistema 9
   2.2. Escolha dos Tanques 10
   2.3. Caracterização das Bombas e do Sistema de Captura e Reposição de Água 11
   2.4. Módulos *Peltier* 13
   2.5. Suporte para o Braço 15
3. Desenvolvimento do Hardware do Sistema 18
   3.1. Módulo de Aquecimento 18
      3.1.1. Cálculo das Perdas Teóricas 18
      3.1.2. Número de Módulos *Peltier* Necessários 22
      3.1.3. Circuitos Elétricos do Módulo de Aquecimento 23
      3.1.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Aquecimento 23
      3.1.3.2. Circuito de Alimentação dos Módulos *Peltier* 24
      3.1.3.3. Sensores de Temperatura 29
      3.1.4. Arquitetura do Módulo de Aquecimento 31
   3.2. Módulo de Arrefecimento 32
      3.2.1. Cálculo das Perdas Teóricas 32
      3.2.2. Número de Módulos *Peltier* Necessários 34
      3.2.3. Circuitos Elétricos do Módulo de Arrefecimento 34
      3.2.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Arrefecimento 35
      3.2.3.2. Circuito de Alimentação dos Módulos *Peltier* 36
      3.2.3.3. Sensores de Temperatura 41
      3.2.4. Arquitetura do Módulo de Arrefecimento 41
   3.3. Módulo de Controlo 42
      3.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Controlo 42
      3.3.2. Arquitetura do Módulo de Controlo 43
   3.4. Fonte de Alimentação 49
4. Desenvolvimento do *Firmware* da Unidade de Controlo 51
   4.1. Leitura da Temperatura da Água dos Tanques 52

4.2. Algoritmo de Controlo 54
4.3. Protocolo *Ad Hoc* de Comunicação com o PC 57
5. Protótipo Final 59
6. Validação Experimental 63
6.1. Módulo de Aquecimento 64
6.2. Módulo de Arrefecimento 68
6.3. Estudo de Indução de Dor 74
7. Conclusão e Trabalho Futuro 79
7.1. Conclusão 79
7.2. Trabalho Futuro 81
Anexos 83
a. Montagem do *Kit* de Aquecimento 85
b. Montagem do *Kit* de Arrefecimento 86
c. Montagem das Caixas de Proteção dos Módulos de Aquecimento e Arrefecimento 88
i. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Aquecimento 88
ii. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Arrefecimento 91
d. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Controlo 92
e. PCB's de Entrada/Saída dos Módulos 94
f. Módulo de Aquecimento 96
g. Módulo de Arrefecimento 100
h. Módulo de Controlo 101
i. Montagem dos Circuitos de Alimentação dos Módulos *Peltier* 102
ii. Montagem do Circuito Controlador 104
iii. Finalização da Montagem do Módulo de Controlo 105
Referências 107

Lista de Figuras

Figura 1 – Um dos equipamentos existentes no mercado que possibilita a realização de estudos de dor usando CPT. Imagem adaptada de [3]. 2
Figura 2 – Um dos equipamentos existentes no mercado que possibilita a realização de estudos de dor usando CPT. Imagem retirada de [4]. 2
Figura 3 - Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem retirada de [5]. 2
Figura 4 - Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem adaptada de [6]. 2
Figura 5 -Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem retirada de [7]. 3
Figura 6 - Arquitetura geral do sistema. 10
Figura 7 - Arcas térmicas utilizadas como tanques. 10
Figura 8 - Perfuração que permite visualizar o isolamento utilizado nos tanques escolhidos. 11
Figura 9 - Tanque com tubos de captura e restituição de água. 12
Figura 10 - Uma das bombas utilizadas. 12
Figura 11 - Esquema de um módulo peltier. Imagem retirada de [16]. 13
Figura 12 - Módulos *peltier*. Imagem retirada de [19]. 14
Figura 13 - Suporte para o braço. 15
Figura 14 - Modelo de Fiala. Imagem retirada de [20]. 20
Figura 15 - Esquema das dimensões da mão e do antebraço segundo o modelo de Fiala. Imagem adaptada de [20] [22] [24]. 20
Figura 16 - Circuito de alimentação dos módulos peltier para o módulo de aquecimento. 24
Figura 17 - Cálculo *online* da largura das pistas dos pinos 2 e 3 do *mosfet*. 27
Figura 18 - *Layout* do PCB (EAGLE). 27
Figura 19 - Circuito com os componentes. 28
Figura 20 - Pinos *Ground* e *Out* do LM335 soldados aos fios riscado e colorido, respetivamente. 30
Figura 21 - Uso da cola quente para isolar os pinos do LM335. 30
Figura 22 - Massa térmica dentro do tubo. 30
Figura 23 - Colocação do LM335 dentro do tubo com massa térmica. 30
Figura 24 - Sensor vedado. 30
Figura 25 - Sensor com mangas termorretráteis. 31
Figura 26 - Conector *molex* colocado no sensor. 31
Figura 27 - Arquitetura do Módulo de Aquecimento. 32
Figura 28 - Cálculo da largura das pistas para os pinos 2 e 3 do mosfet para 3 módulos *peltier*. 37
Figura 29 - Cálculo da largura das pistas para os pinos 2 e 3 do mosfet para 4 módulos *peltier*. 37
Figura 30 - Corrente de *dreno* máxima em função da temperatura da caixa do *mosfet*. Imagem retirada de [27]. 38
Figura 31 - Circuito de alimentação dos módulos *peltier* para o módulo de arrefecimento. 39
Figura 32 - Circuito com os componentes. 40
Figura 33 - Arquitetura do Módulo de Arrefecimento. 41
Figura 34 - Circuito total de cada sensor. 43
Figura 35 - Esquema do circuito controlador. 45

Figura 36 - Funcionalidades disponíveis dos portos/pinos da esquerda (CN7). Imagem retirada de [33]..... 46
Figura 37 - Funcionalidades disponíveis dos portos/pinos da direita (CN10). Imagem retirada de [33]..... 46
Figura 38 - *Layout* do PCB (EAGLE). 47
Figura 39 - Circuito final mostrando em primeiro plano a placa de desenvolvimento NUCLEO-F446RE. 48
Figura 40 - Fonte de alimentação. 49
Figura 41 - Diagrama de blocos do programa. 51
Figura 42 - Disposição dos sensores nos tanques. 52
Figura 43 – Construção da palavra enviada com a informação para seleção da DAC e para a tensão. Imagem retirada de [31]. 56
Figura 44 - Seleção da DAC. Imagem retirada de [31]. 57
Figura 45 - Registo do cabeçalho e das primeiras leituras apresentadas ao utilizador. 58
Figura 46 - Cabos do sistema. 59
Figura 47 - Ligações no Módulo de Controlo. 59
Figura 48 - Ligações nos Módulos de Aquecimento e Arrefecimento. 60
Figura 49 - Sistema finalizado. 60
Figura 50 - Inicialização do emulador Tera Term. 61
Figura 51 - Utilização do sistema para indução de dor num voluntário. 63
Figura 52 - Módulo de aquecimento incompleto. 64
Figura 53 - Fontes utilizadas para alimentação do módulo de aquecimento. 64
Figura 54 - Testes com garrafão de 5 litros. 70
Figura 55 - Esquema de uma possível solução. 72
Figura 56 - Sistema montado na sala utilizada para a realização do CPT. 75
Figura 57 - Participante com a mão e antebraço não dominante dentro do tanque de água quente. 75
Figura 58 - Participante voluntário com a mão e antebraço colocado no tanque de água fria. 76
Figura 59 - Recolha dos sinais fisiológicos. 76
Figura 60 - Elementos do *kit* de aquecimento. 85
Figura 61 - *Kit* de aquecimento. 86
Figura 62 - *Kit* de arrefecimento. 87
Figura 63 - Base inferior da caixa de proteção. 89
Figura 64 - Base superior e laterais da caixa de proteção. 89
Figura 65 - Furação que permitirá a ventilação no interior da caixa de proteção. 89
Figura 66 - Canto de apoio. 90
Figura 67 - Redes de proteção. 90
Figura 68 - Caixa finalizada. 90
Figura 69 - Parte inferior da caixa de proteção. 93
Figura 70 - Alguns dos orifícios abertos na caixa de proteção. 93
Figura 71 - Redes colocadas nos orifícios destinados para a circulação de ar. 94
Figura 72 - Parte inferior da caixa pintada. 94
Figura 73 - Caixa finalizada. 94
Figura 74 - *Layout* do PCB (EAGLE) 95
Figura 75 - Esquema do sistema. 95
Figura 76 - PCB do circuito: face superior (esquerda) e inferior (direita). 96
Figura 77 - PCB E/S usado no módulo de aquecimento. 96

Figura 78 - Tanque com furação adequada para a colocação da canalização e dos sensores. 98
Figura 79 - Tanque com engates rápidos colocados. 98
Figura 80 - Tanque com os sensores já colocados. 98
Figura 81 - Tanque com a base da caixa de proteção já colocada. 99
Figura 82 - Tanque com as bombas, mangueiras e o *kit* de aquecimento aplicados. 99
Figura 83 - Circuito E/S inserido na caixa de proteção. 99
Figura 84 - Módulo de Aquecimento finalizado. 99
Figura 85 - Módulo de Arrefecimento. 101
Figura 86 - Módulo de Arrefecimento completo. 101
Figura 87 - Barras de cobre com rolhas de cortiça. 103
Figura 88 - Circuito com espaçador de cortiça colocado. 103
Figura 89 - Circuitos montados nas barras de ferro. 103
Figura 90 - Circuitos com os dissipadores de calor dos *mosfet*'s. 104
Figura 91 - Circuito controlador com as rolhas de suporte. 105
Figura 92 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo. 106
Figura 93 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo. 106
Figura 94 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo. 106
Figura 95 - Montagem completa do Módulo de Controlo. 106

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Variação da temperatura em função da tensão..... 66
Gráfico 2 - Controlo da temperatura durante um longo período de tempo. 67
Gráfico 3 - Estudo com voluntário. 68
Gráfico 4 - Evolução da temperatura do tanque frio. 69
Gráfico 5 - Variação da temperatura no garrafão de 5 litros. 70
Gráfico 6 - Variação da temperatura de 1 litro de água na garrafa. 71
Gráfico 7 - Variação da temperatura de 0.5 litro de água na garrafa. 71
Gráfico 8 - Variação da temperatura no tanque frio, com a colocação do antebraço e mão. 73
Gráfico 9 - Variação da temperatura no tanque frio, sem a colocação do antebraço. 73
Gráfico 10 - Variação da temperatura no tanque frio durante o estudo com um voluntário. 74

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Características dos recipientes utilizados. 11
Tabela 2 - Características das bombas utilizadas. 12
Tabela 3 - Características dos diferentes módulos peltier. Tabela adaptada de [18]. 14
Tabela 4 - Material utilizado na construção do suporte para o braço. 16
Tabela 5 - Cálculo da corrente (I_q) e o número de módulos *peltier* (n_q). 22
Tabela 6 – Correntes e tensões máximas utilizadas no módulo de aquecimento. 23
Tabela 7 - Componentes utilizados para o PCB. 28
Tabela 8 - Material utilizado para a construção dos sensores de temperatura. 29
Tabela 9 - Cálculo da corrente (I_f) e o número de módulos *peltier* (n_f). 34
Tabela 10 - Correntes e tensões máximas utilizadas no módulo de arrefecimento. 35
Tabela 11 - Componentes utilizados no PCB. 40
Tabela 12 - Correntes e tensões utilizadas no módulo de controlo. 42
Tabela 13 - Características do NUCLEO. 45
Tabela 14 - Portos do NUCLEO utilizados. 47
Tabela 15 - Componentes utilizados no PCB do controlador. 48
Tabela 16 - Potências utilizadas em todo o sistema. 49
Tabela 17 - Relação Sensor-Porta Analógica. 52
Tabela 18 - Constante de calibração para cada sensor. 54
Tabela 19 - Variáveis ‘dacA’ e ‘dacB’, código enviado, valor da tensão nos terminais dos *peltier*’s. 55
Tabela 20 - Características do cabeçalho e da informação apresentada ao utilizador. 58
Tabela 21 - Fontes e suas características. 63
Tabela 22 - Variação da tensão nos terminais dos *peltier*’s, com intervalos de 5 minutos. 65
Tabela 23 - Variação da tensão de 0.1ºC em 0.1ºC. 65
Tabela 24 - Material necessário para a montagem de um *kit* de aquecimento. 85
Tabela 25 - Material necessário para a montagem de um *kit* de arrefecimento. 87
Tabela 26 - Material utilizado para a construção da caixa de proteção do módulo de aquecimento. 88
Tabela 27 - Material utilizado para a construção da caixa de proteção do módulo de arrefecimento. 91
Tabela 28 - Material utilizado na elaboração da caixa de proteção do módulo de controlo. 92
Tabela 29 - Materiais usados na montagem do módulo de aquecimento. 97
Tabela 30 - Materiais usados na montagem do módulo de arrefecimento. 100
Tabela 31 - Material necessário para a montagem dos circuitos de alimentação dos módulos *peltier*. 102
Tabela 32 - Componentes necessários para a montagem do circuito controlador no módulo de controlo. 104
Tabela 33 - Material utilizado na finalização da montagem do módulo de controlo. 105

Símbolos e Abreviaturas

A	Altura [m]
A	Área da secção atravessada pelo calor [m^2]
$A_{antebraço}$	Área média de pele no antebraço [m^2]
A_B	Área da superfície total da pele do braço e da mão [m^2]
A_G	Ganho do *opamp*
$A_{mão}$	Área média de pele na mão [m^2]
A_{pele}	Área média de pele na mão e no antebraço [m^2]
A_T	Área da superfície total do tanque [m^2]
B	Base maior do trapézio [m]
B	Base menor do trapézio [m]
B	Base [m]
C	Comprimento [m]
C	Condensador [F]
$C_{antebraço}$	Comprimento do antebraço [m]
c_e	Comprimento no exterior do tanque [m]
CHIP_SELECT	Pino SPI com informação para a seleção do *slave*
c_i	Comprimento no interior do tanque [m]
$C_{mão}$	Comprimento da mão [m]
CPT	Teste de pressão a frio (*Cold Pressor Test*)
c_s	Comprimento no superior do tanque [m]
Cs	Variável com o valor correspondente ao pino CHIP_SELECT
CT	Condutividade Térmica [$Wm^{-1}K^{-1}$]
D	Diâmetro [m]
D	Díodo
DAC	Conversor digital-analógico (*Digital-to-Analog Converter*)
dacA_init	Variável com o valor inicial relativo à DAC A enviado para o LTC1665
dacB_init	Variável com o valor inicial relativo à DAC B enviado para o LTC1665
DC	Corrente contínua (*Direct Current*)
d_{ext}	Diâmetro externo [m]
d_{int}	Diâmetro interno [m]
E	Espessura [m]
E	Espessura da secção atravessada pelo calor [m]
E/S	Entrada/Saída
ECG	Eletrocardiograma
EDA	Atividade eletrodérmica
E_{EPS}	Espessura das placas de esferovite [m]
EMG	Eletromiografia
E_P	Espessura da pele do braço e da mão [m]
EPS	Poliestireno expandido (esferovite)
E_T	Espessura das paredes do tanque [m]
EUA	Estados Unidos da América
GND	Tensão de massa [V]
HIT	Teste de imersão em água quente (*Hot water Immersion Test*)

$H_{máx}$	Elevação máxima da bomba [m]
I	Corrente [A]
IASP	Associação Internacional para o Estudo da Dor (*International Association for the Study of Pain*)
I_D	Corrente de *dreno* [A]
I_{Dmax}	Corrente máxima do díodo [A]
I_{Dmin}	Corrente mínima do díodo [A]
IEETA	Instituto de Engenharia Eletrónica e Telemática de Aveiro
I_f	Corrente em cada módulo *peltier* do módulo de arrefecimento [A]
I_f	Corrente do díodo [A]
I_{max}	Corrente máxima [A]
IMC	Índice de Massa Corporal [Kg/m^2]
I_q	Corrente em cada módulo *peltier* do módulo de aquecimento [A]
I_r	Corrente do díodo no sentido oposto [A]
I_R	Corrente na resistência R [A]
K	Coeficiente de condutividade térmica do material [$Wm^{-1}K^{-1}$]
k_{EPS}	Coeficiente de condutividade térmica das placas de esferovite [$Wm^{-1}K^{-1}$]
K_M	Coeficiente de condutância térmica do módulo *peltier* [$W\ K^{-1}$]
k_P	Coeficiente de condutividade térmica da pele [$Wm^{-1}K^{-1}$]
k_T	Coeficiente de condutividade térmica do tanque [$Wm^{-1}K^{-1}$]
L	Largura [m]
MC	Microcontrolador
Med	Média do sinal recebido
NA	Pino da entrada analógica
n_f	Número de módulos *peltier* do módulo de arrefecimento
n_q	Número de módulos *peltier* do módulo de aquecimento
P	Potência [W]
PA	Pressão arterial
PC	Computador (*Personal Computer*)
PCB	Circuito impresso (*Printed Circuit Board*)
PVC	Policloreto de vinila (*PolyVinyl Chloride*)
PWM	Modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation*)
Q	Calor transmitido [J]
Q	Fluxo de calor transferido [W]
Q	*Mosfet*
Q_{Bf}	Fluxo de calor transferido através da pele no módulo de arrefecimento [W]
Q_{Bq}	Fluxo de calor transferido através da pele no módulo de aquecimento [W]
Q_f	Fluxo de calor total transferido no módulo de arrefecimento [W]
Q_{max}	Fluxo máximo de calor transferido [W]
Q_q	Fluxo de calor total transferido no módulo de aquecimento [W]
Q_{Tf}	Fluxo de calor transferido através do tanque no módulo de arrefecimento [W]
Q_{Tq}	Fluxo de calor transferido através do tanque no módulo de aquecimento [W]
R	Raio [m]

R	Rosca [m]
R	Raio [m]
R	Resistência [Ω]
$R_{DS(on)}$	Resistência estática do *dreno-source* do *mosfet* [Ω]
R_m	Resistência do módulo *peltier* [Ω]
R_T	Resistência térmica [KmW^{-1}]
SEMG	Eletromiografia de superfície
Sensor_Temp	Sensor de temperatura
S_M	Tensão no módulo *peltier* [V]
SMD	Dispositivos de montagem superficial (*Surface-Mount Device*)
SPI	Comunicação serie síncrona (*Serial Peripheral Interface*)
SPI_CLK	Pino SPI com informação do relógio
SPI_MISO	Pino SPI com informação do *slave* para o *master*
SPI_MOSI	Pino SPI com informação do *master* para o *slave*
SR	*Slew Rate*
T	Temperatura
T	Tempo (s)
$T_{água}$	Temperatura da água dentro do tanque [K]
T_{amb}	Temperatura ambiente [K]
T_{ar}	Temperatura ambiente [K]
T_C	Temperatura da face fria do módulo *peltier* [K]
Tc	Temperatura do *mosfet* (*case temperature*)
T_{corpo}	Temperatura do corpo humano [K]
t_d	Tempo de atraso [s]
T_{frio}	Temperatura mais baixa [K]
T_h	Temperatura da face quente do módulo *peltier* [K]
T_{max}	Temperatura máxima [K]
Tol	Tolerância
T_{quente}	Temperatura mais elevada [K]
UART	*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*
UART_Rx	Pino UART que recebe os dados da porta USB
UART_Tx	Pino UART que envia os dados para a porta USB
USB	Porta serie universal (*Universal Serial Bus*)
USB_5V	Pino USB com tensão de 5V
USB_GND	Pino USB com tensão de massa
USB_Rx	Pino USB com informação para o microcontrolador
USB_Tx	Pino USB com informação do microcontrolador
V	Tensão [V]
V_-	Tensão na entrada negativa do *opamp* [V]
V_+	Tensão na entrada positiva do *opamp* [V]
V_{AN}	Tensão na entrada analógica [V]
V_{Anmax}	Tensão máxima na entrada analógica [V]
V_{CC}	Tensão de alimentação [V]
V_{CON}	Tensão recebida no conector [V]
V_{CONmax}	Tensão máxima recebida no conector [V]
V_{DC}	Tensão DC [V]
V_{DS}	Tensão entre os terminais *dreno* e *source* do *mosfet* [V]
V_{DSS}	Tensão entre os terminais *dreno* e *source* do *mosfet* [V]

$\mathbf{V_f}$	Tensão no díodo [V]
$\mathbf{V_{IN}}$	Tensão de alimentação do microcontrolador [V]
$\mathbf{V_{max}}$	Tensão máxima [V]
$\mathbf{V_{peltier}}$	Tensão entre os terminais do módulo *peltier* [V]
$\mathbf{V_r}$	Tensão do díodo no sentido oposto [V]
$\mathbf{\Delta T}$	Variação da temperatura
$\mathbf{\Delta T_{max}}$	Variação máxima da temperatura
$\mathbf{\Phi_{máx}}$	Taxa de fluxo máxima [l/h]

Capítulo 1

1. Introdução

Nesta dissertação apresenta-se o desenvolvimento de um sistema capaz de induzir, de maneira controlada, dor por estímulo ao frio. Neste primeiro capítulo, inicialmente, será feito o enquadramento do problema e a importância desta dissertação. Numa segunda parte, serão referidos alguns estudos já efetuados, que servirão de ponto de partida para a criação do sistema pretendido. Por fim, serão dispostos os objetivos pretendidos para esta dissertação.

1.1. Enquadramento

A dor está presente nas nossas vidas. Todos nós já, em alguma circunstância, sentimos dor, que é um fenómeno muito complexo e de difícil avaliação e descrição. A perceção da dor é influenciada por alguns fatores, de diferentes naturezas, que podem variar de doente para doente. Deste modo, torna-se difícil para os profissionais de saúde perceber realmente a dor a que o utente está sujeito. E para o utente torna-se difícil explicar a dor que sente.

Estudos recentes, mostram que os sintomas mais comuns na dor parecem induzir alterações no sistema nervoso autónomo, incluindo alterações da contração muscular, aumento da atividade eletrodérmica e respiratória, aceleração da frequência cardíaca [1] [2]. Para estudar e analisar estas alterações, é necessário sujeitar proceder a tarefas de indução de dor, recolhendo sinais fisiológicos, como, por exemplo, eletrocardiograma (ECG), respiração (RESP), atividade eletrodérmica (EDA) e eletromiograma de superfície (sEMG), de modo a encontrar alterações nos mesmos que possam ser identificados como marcadores fisiológicos de dor.

Deste modo, estudar e descrever a dor, de modo menos subjetivo, requer a utilização de um equipamento que permita a indução da mesma, permitindo assim avaliar a dor com base em parâmetros fisiológicos.

Após a análise dos equipamentos existentes no mercado (Figuras 1 e 2), que possibilitam a realização de estudos de dor usando a *cold pressor test* (CPT), foi possível perceber que estes possuem custos elevados, rondando os 6000€.

Figura 1 – Um dos equipamentos existentes no mercado que possibilita a realização de estudos de dor usando CPT. Imagem adaptada de [3].

Figura 2 – Um dos equipamentos existentes no mercado que possibilita a realização de estudos de dor usando CPT. Imagem retirada de [4].

Por este motivo procedeu-se à elaboração de um sistema que permita a indução de dor, por estímulo a frio, aquando da imersão do braço e da mão em água. Para uma melhor idealização do sistema foram, ainda, analisados alguns sistemas construídos para outros estudos CPT, cujos trabalhos são descritos na secção seguinte.

Alguns dos sistemas utilizados (Figuras 3, 4 e 5) possuem aspetos que podem ser melhorados e outros aspetos que devem ser mantidos. Deste modo, é necessário idealizar, construir e testar um sistema elétrico que permita controlar a temperatura da água em dois tanques, pretendendo-se que a água atinja temperaturas quentes (37ºC) e frias (7ºC).

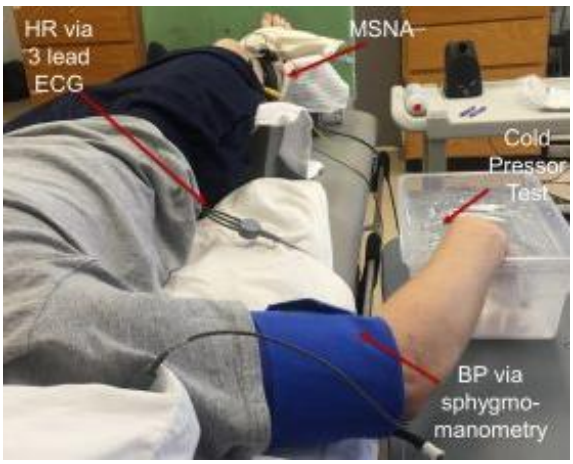


Figura 3 - Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem retirada de [5].

Figura 4 - Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem adaptada de [6].

Figura 5 -Exemplo de um sistema utilizado noutros estudos. Imagem retirada de [7].

Para a realização do projeto, depois de estimar as perdas e ganhos térmicos associados à água no tanque é, de seguida, necessário desenvolver um sistema, baseado num microcontrolador, que permita reverter as perdas de modo a manter a água no tanque estabilizada à temperatura desejada com uma variação máxima de ± 1.0ºC. Ao longo deste processo é necessário, ainda, garantir a segurança dos participantes, bem como a homogeneidade da temperatura da água dentro dos tanques.

1.2. Estudos semelhantes

A análise da reação do corpo humano à dor tem sido objeto de estudo em diferentes países ao longo dos anos. Em muitos trabalhos é utilizado o teste de pressão a frio, mais comummente designado *cold pressor test* (CPT).

O CPT foi concebido, inicialmente, como um teste cardiovascular [8], para estudar a estabilização da pressão arterial, permitindo avaliar a capacidade de contração e dilatação dos vasos sanguíneos. No entanto, o teste também é um modelo utilizado no que diz respeito à avaliação da dor [9], como o limiar da dor e a tolerância à dor.

O CPT consiste, geralmente, na colocação de uma mão ou antebraço em água fria, um estímulo que produz uma dor que cresce lentamente de intensidade e que termina com a remoção da mão ou antebraço da água. Por ser um teste empiricamente validado [10], é utilizado, por diversas vezes, em investigações relacionadas com a dor, o stress ou a atividade cardiovascular.

Em 1975, foi publicado pela revista *Psychophysiology* um artigo de revisão [10], que pretendia avaliar a fiabilidade do uso do CPT. Este artigo concluiu, pela análise de vários estudos já realizados, que o uso do teste CPT em ensaios psicofisiológicos contribuiu para um avanço nessa área.

Um dos estudos mais longos com o uso do CPT foi publicado, em 1984, pela revista *Hypertension* [11]. Este estudo durou 45 anos, com a finalidade de demonstrar a validade do CPT em testes de hipertensão. Em 1934, foram sujeitas a este teste 300 crianças de uma escola de Rochester, Minnesota (EUA), com idades entre os 7 e 17 anos. Mais tarde, em 1961, voltaram a ser submetidas a um novo teste, nesta altura apenas 151 dos sujeitos iniciais participaram. Por fim, em 1979, finalizaram este estudo com um novo teste CPT. Com este estudo e com a avaliação da pressão cardíaca de cada participante foi possível concluir que o teste CPT também é válido para o estudo de hipertensão. O teste CPT foi efetuado através da imersão da mão, até ao pulso, durante 1 minuto em água a uma temperatura de 4°C a 5°C.

Outro estudo publicado pela revista *Psychophysiology* [12], conclui que o uso do CPT para gerar dor, neste caso na testa (com recurso a um saco de gelo) e no pé, alterou as medições cardíacas, como frequência e débito cardíaco, e a resistência periférica total. Este estudo detalhou extensivamente os efeitos fisiológicos do uso do CPT.

No estudo publicado pela revista *The Journal of Pain* [9], é concluído que a temperatura da água tipicamente usada no teste CPT para adultos varia entre o 1°C e os 5°C. Neste estudo está descrito a importância da circulação da água, podendo uma má circulação, ou a não existência desta, alterar por completo os resultados. Para o estudo foram realizados 4 testes CPT, cada um deles com temperaturas de água diferentes (1°C, 3°C, 5°C e 7°C), a 26 participantes.

Baseado em diversos estudos realizados anteriormente, em abril de 2005, na revista *The Journal of Pain* é publicado um artigo, [13], que conclui a necessidade de circulação da água, para manter a temperatura uniforme e assim evitar regiões com diferentes temperaturas junto da mão. Conclui, ainda, que é uma boa abordagem começar por mergulhar o membro utilizado para o estudo em água a uma temperatura de 37°C, cerca de 2 minutos, para, assim, diminuir as diferenças de temperatura preexistentes na mão, estabelecendo assim a temperatura inicial ao teste entre os participantes. Outra conclusão apresentada neste estudo é a temperatura que se deve utilizar no CPT quando o estudo é feito com crianças ou adolescentes, sendo recomendado o uso de água a uma temperatura de 10°C ± 1°C.

Um outro estudo realizado na Alemanha, em 2008 [14], recorre ao teste CPT. Este estudo foi publicado na revista *Psychoneuroendocrinology*. Este estudo usa dois recipientes com água para o teste CPT, inicialmente, os 70 estudantes da Universidade de Trier, do sexo masculino, saudáveis, com IMC entre os 19 e 20 Kg/m^2 e com idade entre os 19 e os 35 anos, mergulham a mão num recipiente com água a uma temperatura entre os 35°C - 37°C por duas vezes, a primeira sem câmara e sem supervisão e a segunda vez com câmara e com supervisão. Por fim, os participantes voltaram a imergir a mão, por mais duas vezes, em um recipiente com água a uma temperatura entre os 0°C - 4°C, nas mesmas condições que o teste anterior.

Já em 2009, um estudo publicado pela revista *The Journal of Pain* [15], contou com 30 participantes voluntárias, do sexo feminino, saudáveis, com uma idade compreendida entre os 19 e 34 anos, todas afirmaram ter alguma aversão a aranhas. Neste estudo, pretendia-se analisar a influência do medo na dor e vice-versa. Para este efeito, para além do uso do CPT utilizou-se, ainda, duas aranhas. O CPT consistiu na imersão da mão direita num balde de 10 litros, com água fria e gelo, mantendo uma temperatura de 4°C ± 1°C. O CPT foi efetuado com e sem a presença das aranhas.

Publicado em 2010, pela revista *European Journal of Pain* [1], um estudo contou com a colaboração de 35 voluntários (18 do sexo feminino e 17 do sexo masculino) com idade entre os 19 e 57 anos. Os participantes declararam que eram saudáveis e que não tinham ingerido nenhuma medicação nas últimas 24 horas. No estudo, foram analisados parâmetros fisiológicos, intensidade subjetiva da dor, limiar de dor e tolerância à dor. Neste caso, utilizou-se o teste CPT, com água à temperatura de 4°C ± 0,2°C, e um teste de indução de dor por estímulo a quente, o *Hot water Immersion Test* (HIT), com água à temperatura de 47°C ± 0,5°C. Os dois testes foram realizados no mesmo dia com um período de descanso entre os dois testes de 10 minutos. Cada participante mergulhou a mão direita e teve de indicar o momento, verbalmente, da primeira sensação de dor (limiar de dor) e avaliar a dor a cada 15 segundos. No intervalo entre os dois testes a mão foi imersa em água morna, 32°C, durante os 3 minutos iniciais da interrupção.

No que diz respeito a questões éticas do uso do teste CPT, um artigo [16], publicado em 2010, tinha como objetivo descrever as questões éticas e a aceitabilidade do CPT por parte de investigadores, crianças e pais. Com este estudo foi possível chegar à conclusão que o CPT é um método de investigação aceite pelas crianças, pais e investigadores. Podendo,

por isso, ser usado em investigações pediátricas, pois os efeitos adversos foram raros e transitórios, e as crianças, pais e investigadores, na sua maioria, tiveram experiências positivas com este teste.

Já em 2013, um artigo publicado pela revista *PLoS ONE* [2] retrata o uso do CPT. Neste estudo pretendia-se analisar a intensidade da dor, o limiar da dor, tempo de imersão, tolerância à dor, avaliando a frequência e amplitude da respiração, tonalidade da pele, frequência cardíaca, pressão arterial e fluxo sanguíneo da pele. Neste caso, o CPT foi realizado pela imersão da mão esquerda, até ao punho, em água a uma temperatura de 0°C a 1°C. Participaram neste estudo 44 voluntários saudáveis, com uma idade média de 21 anos. Cada voluntário terminou o teste assim que sentiu dor insuportável ou após 4 minutos, nos casos em que o voluntário não sentisse dor insuportável.

Um outro estudo [17], em 2015, contou com a colaboração de 96 alunos, com idade média de 20,2 anos, dos quais 31% eram do sexo masculino. Os participantes foram divididos em três grupos, aleatoriamente, e a cada um foi pedido que mantivesse o antebraço imerso em água fria por 90 segundos, narrando a intensidade da dor em intervalos de 10 segundos. Neste estudo, a CPT foi realizada com equipamento de laboratório, mantendo a temperatura da água ajustada a 13,5°C.

Outro estudo feito com recurso ao teste CPT [18], foi publicado em 2015. Este estudo, contou com a colaboração de 30 voluntários, todos eles estudantes com idades entre os 22,7 e os 24,3 anos, saudáveis, sem consumo de qualquer estimulante nas 48 horas prévias ao estudo. Cada voluntário foi sujeito à medição da pressão arterial e à recolha de imagens térmicas da mão antes da execução do teste. Após 10 minutos de repouso total, cada individuo mergulhou a mão direita na água, com uma temperatura de 4°C, durante 1 minuto.

Face ao exposto, o CPT é um método bastante utilizado para a indução de dor e para o estudo das alterações fisiológicas provocadas pela mesma. É seguro para os participantes, e, por isso, eticamente aceite por investigadores, participantes e conselhos de ética.

Deste modo, para desenvolver um sistema eletrónico que permita a realização da CPT é necessário ter em consideração alguns aspetos importantes como a circulação da água, com o objetivo da uniformização da temperatura, a diminuição de diferenças de temperatura do antebraço e da mão (com recurso à utilização de um recipiente com água a 37°C, aproximadamente), começando assim todos os participantes do mesmo ponto de partida, e ainda, o uso do CPT com uma temperatura média entre o usado normalmente para adultos e

o aconselhado para crianças (água a uma temperatura de 7°C, aproximadamente). O equipamento desenhado é constituído por 2 tanques de água com sistema de circulação, sendo a temperatura da água dos mesmos controlada eletronicamente, evitando assim o contacto do antebraço e da mão com gelo, sendo por isso mais seguro.

1.3. Estrutura do Documento

Após um enquadramento dos motivos que levaram à necessidade da elaboração de um sistema que permita a realização de estudos CPT, esta dissertação é composta, primeiramente, pela idealização do sistema e por uma apresentação dos materiais utilizados, e suas características, e a explicação de toda a elaboração do projeto até ao protótipo final. Passando pela apresentação dos cálculos teóricos necessários, dos esquemas elétricos dos circuitos concebidos para a criação do sistema e a sua explicação.

O capítulo 6 apresenta a validação experimental do sistema desenvolvido, descrevendo alguns testes efetuados durante a criação do sistema e após a finalização do mesmo, bem como a descrição do estudo CPT realizado com recurso a este sistema.

Por fim, esta dissertação termina com as conclusões retiradas após a validação do sistema e com algumas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

2. Estudo do Sistema

Este capítulo é relativo à planificação do sistema que se pretende construir e da escolha de alguns dos seus componentes que permitem que o sistema eletrónico controle, independentemente, a temperatura da água contida em dois tanques diferentes.

2.1. Idealização do Sistema

O projeto consiste em monitorizar a temperatura da água em dois tanques, de forma a estabilizar a temperatura da água a 7ºC e a 37ºC. Para tal idealizou-se um sistema simples de dois tanques (um tanque para a água fria e outra para a água quente) que são monitorizados por um microcontrolador comum a ambos. Tanto no tanque frio, como no tanque quente, as perdas/ganhos são compensadas com o recurso a módulos *peltier* que permitem o aquecimento ou o arrefecimento da água através de *kit*'s de aquecimento e de arrefecimento. Para além dos módulos de aquecimento ou arrefecimento, cada tanque possui pequenas bombas que permitem a homogeneidade da temperatura da água dentro dos tanques e a circulação desta pelos respetivos módulos de aquecimento ou arrefecimento. Cada tanque possui um suporte para a mão e para o braço tornando os testes mais confortáveis. Para finalizar, todo o sistema é alimentado por uma fonte de alimentação comutada (Figura 6).

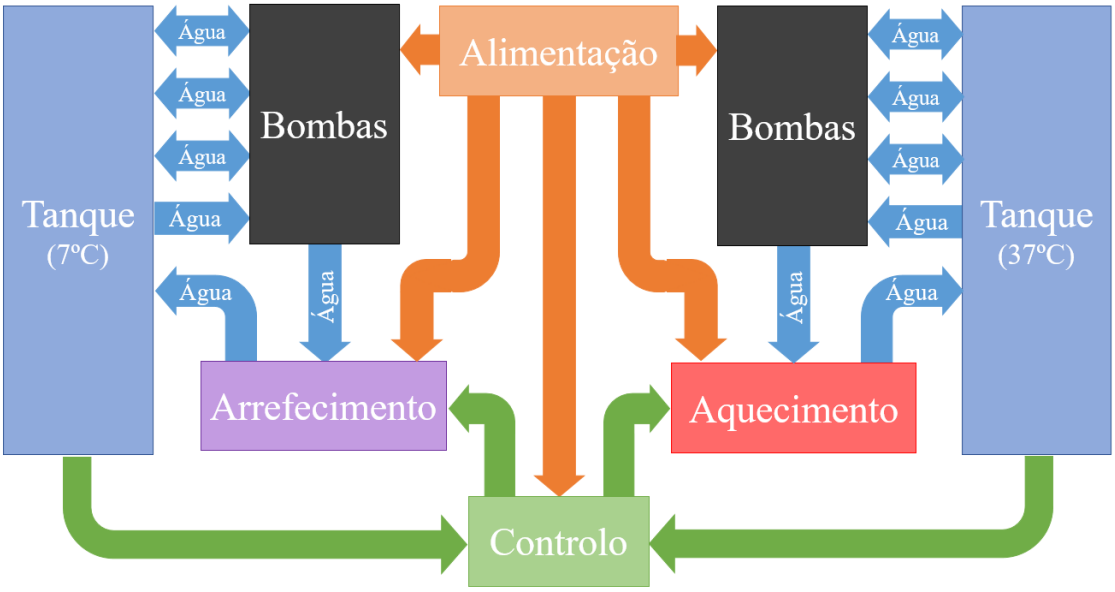


Figura 6 - Arquitetura geral do sistema.

2.2. Escolha dos Tanques

A escolha dos recipientes foi um aspeto importante. É necessário que estes tenham algum isolamento, diminuindo assim a transferência de calor entre a água e o meio ambiente.

Na sua escolha foram considerados três aspetos: o isolamento, o tamanho e o preço. Após análise de vários tipos de recipientes, a escolha recaiu sobre duas arcas térmicas, iguais à da Figura 7.

Figura 7 - Arcas térmicas utilizadas como tanques.

Os recipientes escolhidos têm as seguintes caracteristicas (Tabela 1).

Dimensões Internas (sem tampa) C×L×A [m]	**E_T [m]**	**E_{EPS} [m]**	**k_{EPS} [19] [W/m/K]**
0.383×0.258×0.345	0.021	0.018	0.042

Tabela 1 - Características dos recipientes utilizados.

Estes recipientes têm como isolante algumas camadas de esferovite (EPS), como se vê na Figura 8. Estas camadas de EPS estão colocadas dentro de cada face dos recipientes, de forma a isolar melhor cada tanque. Sendo este, em geral, o método de isolamento destas arcas térmicas, pode-se considerar que os coeficientes de condutividade térmica do tanque (k_T) e da esferovite (k_{EPS}) são iguais, desprezando os coeficientes de condutividade térmica do plástico (*poliuretano*) das faces dos recipientes.

Figura 8 - Perfuração que permite visualizar o isolamento utilizado nos tanques escolhidos.

2.3. Caracterização das Bombas e do Sistema de Captura e Reposição de Água

Como referido anteriormente, o uso de bombas neste sistema é extremamente importante. As bombas serão usadas para manter a circulação da água dentro dos tanques e, também, como meio de circulação da água pelos módulos de aquecimento e arrefecimento.

A colocação dos tubos de captura e restituição da água nos tanques em lugares estrategicamente escolhidos permite a homogeneidade da temperatura na água (Figura 9).

Figura 9 - Tanque com tubos de captura e restituição de água.

As bombas escolhidas (Figura 10) são bombas de pequenas dimensões e normalmente usadas em aquários. As características destas bombas (Tabela 2), e o seu preço, foram tidos em consideração na escolha das mesmas.

Figura 10 - Uma das bombas utilizadas.

V **[V]**	**P** **[W]**	**$\Phi_{máx}$** **[l/h]**	**$H_{máx}$** **[m]**	**Dimensões** **C×L×A [cm]**	**d** **[cm]**	**Ruído** **[dB]**	**ΔT** **[ºC]**
12	4.2	240	3	5.4×3.7×4.2	0.8	≤ 40	0-100

Tabela 2 - Características das bombas utilizadas.

2.4. Módulos *Peltier*

Os módulos *peltier* são dispositivos termoelétricos, isto é, são dispositivos que convertem diretamente tensão/corrente em diferenças de temperatura. Uma célula *peltier* é composta por duas placas cerâmicas separadas por cubos de material semicondutor tipo N e tipo P (Figura 11). Quando se aplica uma tensão a um módulo termoelétrico, este é percorrido por uma corrente e o calor é transmitido pelo dispositivo de uma face para a outra, face fria e face quente. [20]

Figura 11 - Esquema de um módulo peltier. Imagem retirada de [21].

Os cálculos do calor transferido (Q) de e para o módulo *peltier* utilizam as equações (1) a (5) [22], resultantes das relações entre as propriedades físicas fundamentais do material termoelétrico presente no módulo *peltier* (tensão de Seebeck (S_M), condutância térmica (K_M) e resistência elétrica (R_M) dos módulos *peltier*), as propriedades fornecidas pelos fabricantes (tensão e corrente máximas do módulo *peltier* (V_{max} e I_{max}, respetivamente) e variação de temperatura máxima entre as duas faces do módulo *peltier* (ΔT_{max})) e as características utilizadas pelo utilizador (tensão (V), corrente (I), variação da temperatura pretendida entre

as duas faces do módulo *peltier* (ΔT) e as temperaturas da face quente (T_h) e fria (T_c)) (Tabela 3 e Figura 12).

$$S_M = \frac{V_{\max}}{T_h} \quad (1)$$

$$K_M = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) V_{\max} I_{max}}{2 T_h \Delta T_{max}} \quad (2)$$

$$R_M = \frac{(T_h - \Delta T_{max}) V_{\max}}{T_h I_{max}} \quad (3)$$

$$Q = S_M T_c I - \frac{1}{2} I^2 R_M - K_M \Delta T \quad (4)$$

$$V = S_M \Delta T + I R_M \quad (5)$$

Modelo	**Q_{max} [W]**	**I_{max} [A]**	**V_{max} [V]**	**ΔT_{max} [K]**	**C [mm]**	**L [mm]**	**A [mm]**
TEC1-12703	38.0	3.3	15.4	68.0	40.0	40.0	4.7
TEC1-12704	33.4	4.0	15.4	66.0	40.0	40.0	4.7
TEC1-12705	57.0	5.3	15.4	68.0	40.0	40.0	4.0
TEC1-12706	63.0	6.4	15.4	68.0	40.0	40.0	3.9
TEC1-12710	100.0	10.5	15.4	68.0	40.0	40.0	3.3
TEC1-12715	150.0	15.6	15.4	68.0	40.0	40.0	3.9

Tabela 3 - Características dos diferentes módulos peltier. Tabela adaptada de [23].

Figura 12 - Módulos peltier. Imagem retirada de [24].

Admitindo, n módulos obtêm-se as equações (6) e (7), que permitem o cálculo do número de módulos *peltier* necessários para compensação das perdas (módulo de aquecimento - Q_q) e dos ganhos (módulo de arrefecimento – Q_f), respetivamente.

$$Q_q = n(Q + VI) = n\left(\frac{V_{\max}}{T_h}T_c I - \frac{1}{2}\frac{(T_h - \Delta T_{max})V_{\max}}{T_h I_{max}}I^2 - \frac{(T_h - \Delta T_{max})V_{\max} I_{max}}{2T_h \Delta T_{max}}\Delta T + \frac{V_{\max}}{T_h}I\Delta T + \frac{(T_h - \Delta T_{max})V_{\max}}{T_h I_{max}}I^2\right) \quad (6)$$

$$Q_f = nQ = n\left(\frac{V_{\max}}{T_h}T_c I - \frac{1}{2}\frac{(T_h - \Delta T_{max})V_{\max}}{T_h I_{max}}I^2 - \frac{(T_h - \Delta T_{max})V_{\max} I_{max}}{2T_h \Delta T_{max}}\Delta T\right) \quad (7)$$

2.5. Suporte para o Braço

O sistema desenvolvido será utilizado para a realização de testes de indução de dor. Por este motivo, não se pretende que durante a experiência os participantes sejam afetados de outras dores para além da que será induzida, para isso a criação do suporte para o braço permite que os participantes realizem o teste de modo mais confortável.

O suporte para o braço é uma grelha de ferro que possui três apoios de espuma (Figura 13 e Tabela 4), que permitem um apoio mais confortável da mão e do antebraço dos participantes durante os testes a realizar. O interior dos apoios de espuma contem placas de ferro que impedem o suporte de boiar, tornando-o imóvel.

Figura 13 - Suporte para o braço.

O material utilizado tem as características apresentadas na Tabela 4.

Material	Quantidades	Características
Espuma	3	Dimensões: 0.230m×0.062m (c×d)
Grelha Ferro	1	Dimensões: 0.440m×0.236m×0.012m (c×l×a)
Placa de Ferro	6	Dimensões: 0.097m×0.050m×0.005m (c×l×a)
Spray Branco	1	
Spray Primário	1	

Tabela 4 - Material utilizado na construção do suporte para o braço.

Capítulo 3

3. Desenvolvimento do Hardware do Sistema

Este capítulo mostra a composição dos módulos de aquecimento, de arrefecimento e de controlo, explicando os circuitos elétricos, circuitos de alimentação, sensores de temperatura e a arquitetura destes.

3.1. Módulo de Aquecimento

Para desenvolver o módulo de aquecimento é necessário calcular as perdas que o sistema deve compensar aquando a colocação do braço e antebraço na água a 37ºC.

3.1.1. Cálculo das Perdas Teóricas

No módulo de aquecimento, como referido anteriormente, a água existente dentro do tanque encontra-se a 37ºC (310.15 K), tendo em conta que a temperatura exterior ao tanque é a temperatura ambiente, aproximadamente 25ºC (298.15 K), e que a temperatura do corpo humano é de cerca de 33.44ºC (306.59 K) [25], a potência dissipada em forma de calor total (Q_q) é a soma da potência dissipada através do tanque (Q_{Tq}) com a potência dissipada em contacto com o braço (Q_{Bq}).

A quantidade de calor transmitido (Q), segundo a lei de Fourier [26], pode ser obtida a partir da relação entre a condutividade térmica do material atravessado pelo calor (k), com a área de contacto (A), o comprimento desse mesmo material (E) e a diferença de temperatura nas duas extremidades do material (T_{quente} - T_{frio}). Desta forma obtém-se a equação (8):

$$Q = kA\frac{(T_{quente} - T_{frio})}{E}\ [W] \qquad (8)$$

Tem-se, portanto, que:

$$Q_q = Q_{Tq} + Q_{Bq}\ [W] \tag{9}$$

Considerando, agora, as dimensões do tanque é possível obter a área da superfície de contacto (A_T):

$$A_T = 2 \times 0.383 \times 0.258 + 2 \times 0.383 \times 0.345 + 0.345 \times 0.258$$

$$A_T = 0.554\ m^2 \tag{10}$$

Partindo de (8) e considerando a temperatura da água ($T_{água}$), a temperatura do ar (T_{ar}), o coeficiente de condutividade térmica da arca (k_T), a espessura do tanque (E_T) e a área da superfície de contacto (A_T), pode-se calcular Q_{Tq} através da equação (11).

$$Q_{Tq} = k_T A_T \frac{(T_{água} - T_{ar})}{E_T} \tag{11}$$

$$Q_{Tq} = 0.042 \times 0.554 \frac{(310.150 - 298.150)}{0.021}$$

$$Q_{Tq} = 13.30\ W \tag{12}$$

Embora próximas, a temperatura do corpo humano é inferior à temperatura da água, por isso as perdas não são desprezáveis.

Tendo por base as dimensões médias do corpo humano mundial, segundo o modelo de Fiala [25] [27] (Figura 14), podemos considerar o antebraço e a mão como dois cilindros. Considerando, também, o braço e o antebraço com dimensões idênticas [28], obtêm-se as dimensões apresentadas na Figura 15.

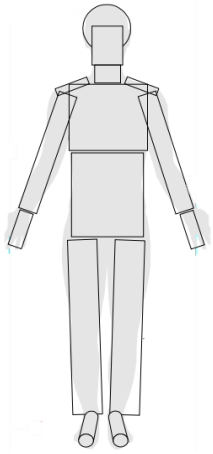


Figura 14 - Modelo de Fiala. Imagem retirada de [25].

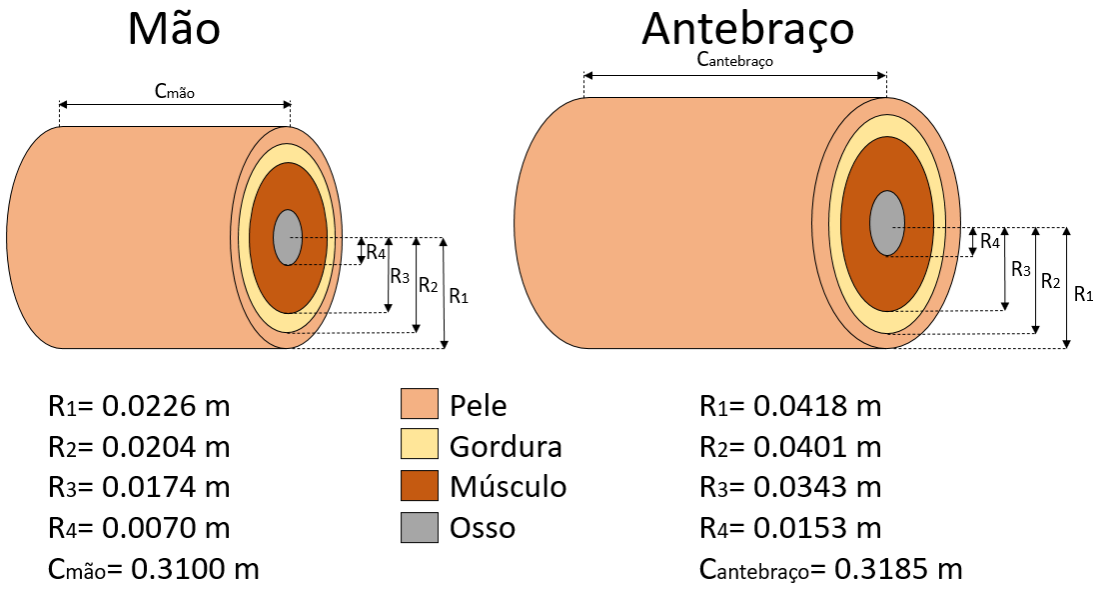


Figura 15 - Esquema das dimensões da mão e do antebraço segundo o modelo de Fiala. Imagem adaptada de [25] [27] [29].

Como a transferência de calor é dada através da pele, primeiramente é necessário calcular a área média de pele (A_{pele}) existente no antebraço ($A_{antebraço}$) e na mão ($A_{mão}$). Área essa calculada de seguida:

$$A_{pele} = A_{mão} + A_{antebraço} \quad (13)$$

$$A_{mão} = 2\pi R_1 \times C_{mão} \quad (14)$$

$$A_{antebraço} = 2\pi R_1 \times C_{antebraço} \quad (15)$$

$$A_{pele} = 2\pi R_1 \times C_{mão} + 2\pi R_1 \times C_{antebraço} \quad (16)$$

$$A_{pele} = 2\pi \times 0.0226 \times 0.3100 + 2\pi \times 0.0418 \times 0.3185$$

$$A_{pele} = 0.0440 + 0.0836$$

$$A_{pele} = 0.1276 \text{ m}^2 \quad (17)$$

Pela análise da Figura 15, é possível determinar que a espessura da pele é diferente na mão e no antebraço. Com a relação entre as áreas da pele na mão ($A_{mão}$) e no antebraço ($A_{antebraço}$) é possível calcular-se a espessura da pele para a mão e o antebraço em conjunto, Ep.

$$E_p = \frac{0.0440}{0.1276} \times (0.0226 - 0.0204) + \frac{0.0836}{0.1276} \times (0.0418 - 0.0401)$$

$$E_p = 0.0019 \text{ m} \quad (18)$$

Tendo, portanto, em conta as equações (8), (17) e (18), e sabendo que o coeficiente de condutividade térmica da pele, k_p, é 0.47 W/(m K) [27] , pode-se calcular:

$$Q_{Bq} = k_p A_{pele} \frac{(T_{quente} - T_{frio})}{E_p} \quad (19)$$

$$Q_{Bq} = 0.470 \times 0.1276 \frac{(310.150 - 306.590)}{0.0019}$$

$$Q_{Bq} = 112.37\ W \quad (20)$$

Por fim, pela equação (9):

$$Q_q = 112.37 + 13.30$$

$$Q_q = 125.67\ W \quad (21)$$

Importa, no entanto, referir que este valor é meramente teórico e permite, apenas, ter um ponto de partida no que diz respeito às perdas a serem compensadas pelos módulos *peltier*.

3.1.2. Número de Módulos *Peltier* Necessários

Com base nos cálculos anteriores, é preciso determinar o número de módulos *peltier* necessários para compensar as perdas, mantendo assim a temperatura da água a 37ºC (310.15 K).

Tendo em conta as equações de (1) a (5) com alguma facilidade chegamos às equações (22) e (23).

$$I_q = \frac{V - S_M \Delta T}{R_M} \tag{22}$$

$$I_q = \frac{(V T_{quente} - V_{max} T_{quente} + V_{max} T_{frio}) I_{max}}{(T_{quente} - \Delta T_{max}) V_{max}} \tag{23}$$

Olhando, agora, para as características dos diferentes modelos de módulos *peltier* (Tabela 4) e para as perdas calculadas anteriormente, usando as equações (6) e (23) pode-se calcular a corrente (I_q) que deverá percorre cada módulo *peltier* e depois o número de módulos (n_q), para cada modelo *peltier*, que permite compensar as perdas.

Módulo *Peltier*	**V [V]**	**T_{ar} [K]**	**$T_{água}$ [K]**	**I_q [A]**	**n_q**
TEC1-12703	12.00	298.15	310.15	3.13	2.01
TEC1-12704	12.00	298.15	310.15	3.79	1.66
TEC1-12705	12.00	298.15	310.15	5.03	1.25
TEC1-12706	12.00	298.15	310.15	6.07	1.04
TEC1-12710	12.00	298.15	310.15	9.96	0.63
TEC1-12715	12.00	298.15	310.15	14.80	0.42

Tabela 5 - Cálculo da corrente (I_q) e o número de módulos peltier (n_q).

Pela análise da Tabela 5, conclui-se que para compensar as perdas do módulo de aquecimento são necessários dois dispositivos *peltier*, para a maioria dos diferentes módulos *peltier* analisados. A utilização de dois módulos *peltier*, para o aquecimento, permite, também, diminuir algumas perdas do *kit* de aquecimento. Importa salientar que a escolha recaiu sobre o módulo *peltier* TEC1-12705, simplesmente por motivos financeiros.

3.1.3. Circuitos Elétricos do Módulo de Aquecimento

O módulo de aquecimento é constituído por uma fonte de alimentação, por diversos circuitos de alimentação dos módulos *peltier*, controlados pelo módulo de controlo, e por sensores de temperatura, conectados ao módulo de controlo.

3.1.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Aquecimento

Optando pela utilização de dois *peltier*'s, a alimentação necessária para os diferentes elementos elétricos do módulo de aquecimento é a apresentada na Tabela 6.

Elementos	Quantidade	Tensão	Corrente
Módulo *Peltier*	2	12 V	5 A
Ventoinha	2	12 V	0.09 A
Bomba	4	12 V	0.30 A

Tabela 6 – Correntes e tensões máximas utilizadas no módulo de aquecimento.

Logo, para o cálculo da potência deste módulo do sistema é necessário o cálculo inicial da corrente máxima utilizada (I_{max}):

$$I_{max} = 2 \times 5 + 2 \times 0.09 + 4 \times 0.30$$
$$I_{max} = 11.38\ A$$

Multiplicando a corrente máxima calculada pela tensão máxima (V_{max}) utilizada, é possível determinar a potência (P) do módulo de aquecimento:

$$P = I_{max} \times V_{max}$$
$$P = 11.38 \times 12$$
$$P = 136.56\ W$$

Desta forma, o módulo de aquecimento necessita de uma potência de 136.56 W.

3.1.3.2. Circuito de Alimentação dos Módulos *Peltier*

O controlo da variação do calor libertado pelos módulos *peltier* é fundamental para estabelecer a temperatura pretendida para a água dentro de cada tanque.

Para o controlo do calor libertado pelos módulos *peltier* é necessário um circuito que controle a corrente que os *peltier* recebem. Dessa forma, idealizou-se o circuito seguinte (Figura 16). Neste circuito a corrente é imposta por uma tensão de controlo (ver na secção 4.2) que varia entre 0 e 5V. A escolha de um circuito de atuação dos módulos *peltier* baseado numa fonte de corrente constante em detrimento de um sistema PWM (*Pulse Width Modulation*) deve-se a proporcionar um maior rendimento e um melhor (menor) envelhecimento dos referidos módulos como é apresentado em [30].

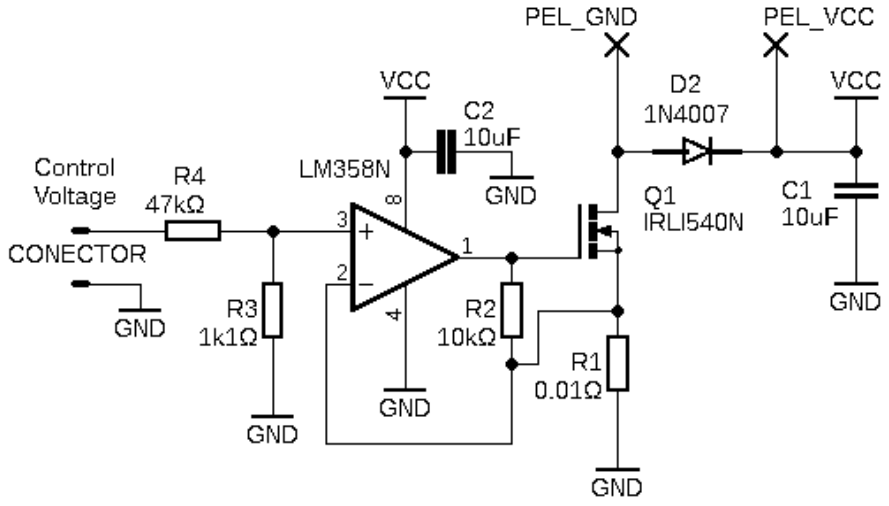


Figura 16 - Circuito de alimentação dos módulos peltier para o módulo de aquecimento.

No caso do módulo de aquecimento, ao circuito apresentado em cima serão ligados a saída negativa e positiva de dois módulos *peltier* aos portos PEL_GND e PEL_VCC, respetivamente.

Visto que cada módulo *peltier* necessita de uma corrente de 5A para o seu correto funcionamento, tem-se a necessidade do uso de um *mosfet* com uma corrente de *dreno* superior à soma das correntes dos módulos *peltier* utilizados:

$$I_D = 5 \times 2$$

$$I_D = 10A$$

Após o cálculo da corrente I_D, demonstrado acima, concluiu-se que o *mosfet* a utilizar tem de ter uma corrente de *dreno* superior a este valor. O *mosfet* escolhido para o efeito foi o IRLI540N que possui um I_D de 23A. De notar que a potência máxima dissipada pelo *mosfet* não acontece para a corrente máxima, pois nesse caso o valor da tensão *dreno-source* (V_{DS}) é relativamente baixo.

No que diz respeito à resistência R_1, esta tem de ter um valor muito baixo, pois pretende-se que também tenha uma tensão baixa, para que os módulos *peltier* sejam alimentados por uma tensão muito próxima dos 12V. Sendo a corrente elevada, optou-se por uma resistência de 0.01Ω indicada para medição de corrente. A sua capacidade de dissipação de potência foi sobredimensionada para garantir que a sua temperatura não sofre grandes variações. A malha de realimentação que engloba esta resistência mantém uma tensão na entrada negativa do *opamp* constante, V_-, e igual à tensão de referência. Para a corrente máxima temos:

$$V_- = I_D \times R_1$$
$$V_- = 10 \times 0.01$$
$$V_- = 100mV$$

Tendo como referência V_-, consideramos V_+ com um valor aproximado de 110mV, por razões de margem de segurança. Pretende-se agora dimensionar o divisor resistivo composto pelas resistências R_3 e R_4, de tal forma que este transforme a tensão recebida no conector, V_{CONmax}, 5V em 110mV.

$$\frac{V_{CONmax}}{R_4 + R_3} = \frac{V_+}{R_3}$$
$$R_4 = \left(\frac{V_{CONmax}}{V_+} - 1\right) R_3$$
$$R_4 = \left(\frac{5}{0.11} - 1\right) R3$$
$$R_4 = 44.45R_3$$

Analisando todas as resistências SMD disponíveis, encontrou-se o seguinte par de resistências R_3=1.1KΩ e R_4=47KΩ que se aproxima da relação deduzida acima.

Desta forma, a corrente de *dreno* do *mosfet* será:

$$V_+ = \frac{R_3 V_{CONmax}}{R_4 + R_3}$$

$$V_+ = \frac{1100 \times 5}{47000 + 1100}$$

$$V_+ = 114.3mV$$

$$I_D = \frac{V_+}{R_1} = \frac{0.1143}{0.01} = 11.43A$$

Já a resistência R_2 tem o valor de 10KΩ, para salvaguardar que o *mosfet* esteja sempre cortado, mesmo em situações temporárias como durante o arranque do sistema.

Os condensadores C_1 e C_2 são condensadores de desacoplamento do circuito, tendo o valor de 10µF.

Concluído o dimensionamento do circuito, este funcionará do seguinte modo. Aquando a receção de um aumento da tensão de controlo em V_{CON}, a entrada não-inversora do *opamp* terá um valor superior ao valor da entrada inversora do *opamp*, logo à sua saída haverá um aumento de tensão que é transmitida à porta do *mosfet*. Esse aumento de tensão levará ao aumento da corrente de *dreno* do *mosfet*, diminuindo assim a tensão *dreno-source*, V_{DS}, do *mosfet*. Desta forma, a tensão dos módulos *peltier*, $V_{Peltier}$, aumenta. O circuito comporta-se de forma complementar quando a tensão de controlo diminui.

Devido ao valor elevado de corrente que pode atravessar os pinos 2 e 3 do *mosfet* (*dreno* e *source*, respetivamente), as pistas do circuito impresso (PCB) devem ter uma largura diferente do normal utilizado noutros circuitos com correntes reduzidas. Para determinar a largura adequada para as pistas utilizou-se uma calculadora *online* [31], que permitiu concluir que a largura das pistas deve ser superior a 5.51mm, como exemplificado na Figura 17.

Current	10		Amps
Thickness	0.03		mm

Optional Inputs:

Temperature Rise	20	Deg C
Ambient Temperature	25	Deg C
Trace Length	156	mm

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	14.3	mm
Resistance	0.00665	Ohms
Voltage Drop	0.0665	Volts
Power Loss	0.665	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	5.51	mm
Resistance	0.0173	Ohms
Voltage Drop	0.173	Volts

Figura 17 - Cálculo online da largura das pistas dos pinos 2 e 3 do mosfet.

Tendo em atenção as dimensões anteriores (Figura 17) e o circuito idealizado acima, foi possível desenhar (como mostrado na Figura 18), e posteriormente fabricar o PCB deste circuito.

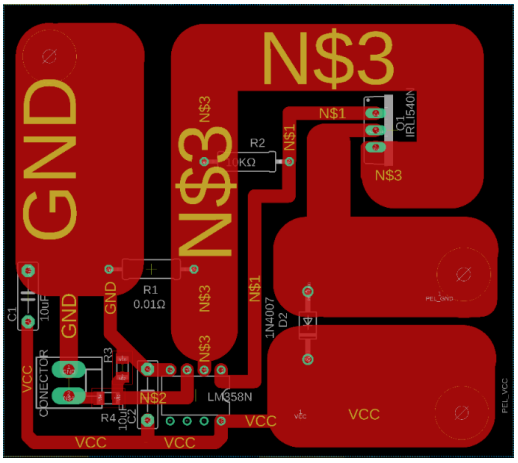


Figura 18 - Layout do PCB (EAGLE).

Após a impressão do PCB soldaram-se todos os componentes (Tabela 7) e obteve-se o PCB final (Figura 19).

Componentes	**Quantidades**	**Características**
Condensador Eletrolítico 10µF	2	V_{CC}: 50V; Tol.: 20%; ΔT: -40ºC a 105ºC;
Conector *Molex*	1	
Díodo 1N4007	1	V_f: 1V; I_f: 1A; V_r: 1000V; I_r: 5µA; ΔT: -65ºC a 150ºC;
IRLI540N	1	V_{DSS}: 100V; $R_{DS(on)}$: 0.044Ω; I_D: 23A;
LM358N	1	V_{CC}: 3 a 30V; A_G: 65dB; SR: 0.1V/µs;
Resistência (Sensor de Corrente) 0.01Ω	1	Tol.: 1%; CT: 20ppm/ºC; P@85ºC: 1W;
Resistência (Óxido de Metal) 10KΩ	1	Tol.: 5%; CT: 300ppm/ºC; P: 0.25W;
Resistência (SMD) 1K1Ω	1	Tol.: 5%; P: 0.125W;
Resistência (SMD) 47KΩ	1	Tol.: 5%; P: 0.250W;
Solda Estanho/Chumbo	1	60% Estanho; 40% Chumbo;

Tabela 7 - Componentes utilizados para o PCB.

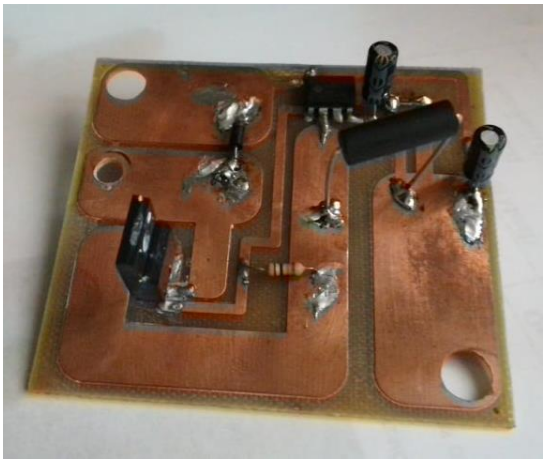


Figura 19 - Circuito com os componentes.

3.1.3.3. Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura têm uma grande importância neste projeto, pois serão estes que nos permitirão saber a que temperatura se encontra a água dos tanques e assim aquecer ou arrefecer a mesma.

A construção dos sensores é relativamente simples, embora minuciosa. Para esta montagem são necessários os materiais apresentados na Tabela 8.

Material	**Quantidades**	**Características**
Cola Quente	1	
Conector *Molex* Fêmea (2 pinos)	4	
Fio Elétrico	8 coloridos 8 riscados	Dimensões: 1.200m×0.0005m (c×d);
LM335	8	Output: 10mV/°K; I: 450µA - 5mA;
Massa Térmica	1	CT: >3.2W/m-K; R_T: <0.06ºC-in^2/W; ΔT: -50ºC a 180ºC;
Solda Estanho	1	60% Estanho; 40% Chumbo;
Tubo Metálico	8	Dimensões: 0.065m×0.008m (c×d);
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0254m > 0.0127m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0191m > 0.0095m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0127m > 0.0064m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0095m > 0.0047m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0064m > 0.0032m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0048m > 0.0024m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0035m > 0.0017m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0020m > 0.0010m 125ºC
Manga Termorretrátil	1	d: 0.0015m > 0.0008m 125ºC

Tabela 8 - Material utilizado para a construção dos sensores de temperatura.

Inicialmente solda-se o fio colorido no pino "+" (*Out*) e o fio riscado no pino "–" (*Ground*) do LM335 (Figura 20). De seguida, isolam-se os 3 pinos do LM335 com cola quente para evitar curto circuitos (Figura 21).

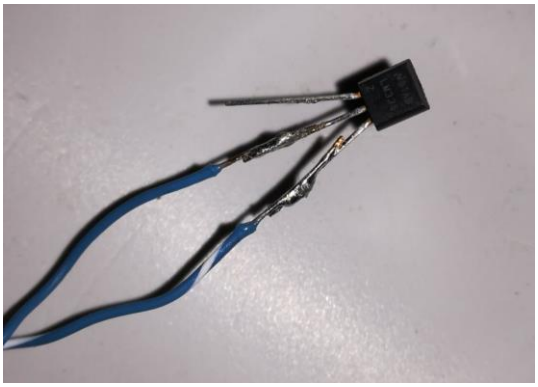


Figura 20 - Pinos Ground e Out do LM335 soldados aos fios riscado e colorido, respetivamente.

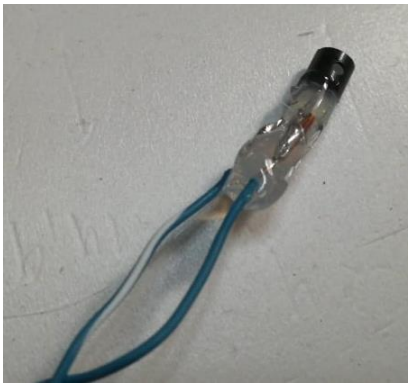


Figura 21 - Uso da cola quente para isolar os pinos do LM335.

Após este processo enche-se o tubo metálico com massa térmica até cerca de dois terços da sua altura. Depois, insere-se o LM335 e certifica-se se fica coberto na totalidade com a massa térmica. Por fim, sela-se o tubo com cola quente, deixando passar apenas os dois fios (Figuras 22, 23 e 24).

Figura 22 - Massa térmica dentro do tubo.

Figura 23 - Colocação do LM335 dentro do tubo com massa térmica.

Figura 24 - Sensor vedado.

No processo final utiliza-se as mangas termorretráteis para proteção dos fios e do sensor, e colocam-se os conectores *molex* fêmea nas extremidades dos fios do sensor (Figuras 25 e 26).

Figura 25 - Sensor com mangas termorretráteis.

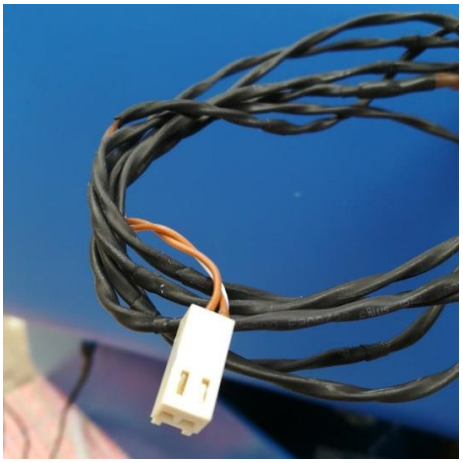


Figura 26 - Conector molex colocado no sensor.

Este processo repete-se oito vezes para finalizar todos os sensores para os dois tanques.

3.1.4. Arquitetura do Módulo de Aquecimento

O módulo de aquecimento é, resumidamente, o módulo que permite manter a temperatura da água constante a 37ºC num dos tanques utilizados.

Neste processo existem quatro bombas que se encontram sempre ligadas, três das quais desempenham a função simples de manter a água em circulação, retirando a água do tanque e logo de seguida recolocando-a em outro ponto do mesmo tanque. Estas três bombas tornam a temperatura da água dentro do tanque homogénea. No que diz respeito à quarta bomba, esta retira a água do tanque e de seguida envia-a de novo para o tanque, mas passando pelo módulo de aquecimento.

O módulo de aquecimento, cuja arquitetura se exemplifica na Figura 27, como o próprio nome indica, irá aquecer a água que por ele passa, usando os dois módulos *peltier* referidos acima. Estes módulos *peltier* terão a face quente junto do bloco de aquecimento de água, e as suas faces frias estarão a ser mantidas a uma temperatura relativamente próxima à temperatura ambiente com recurso a um dissipador com duas ventoinhas, tornando assim possível uma diferença de temperatura entre as faces dos módulos *peltier* maior.

Os módulos *peltier* serão controladas, pelo circuito de controlo, de tal forma que a alimentação que lhes é fornecida varie de acordo com a necessidade de aquecer mais ou menos a água que passa pelo bloco de aquecimento. Essa variação da tensão nos módulos *peltier* está diretamente relacionada com as leituras recebidas através dos quatro sensores,

presentes no tanque. Ou seja, se a temperatura estiver abaixo dos 37ºC a tensão recebida pelos módulos *peltier* aumenta, caso a temperatura seja superior a 37ºC a tensão nos módulos *peltier* diminui (o algoritmo utilizado será explicado mais à frente, em 4.2).

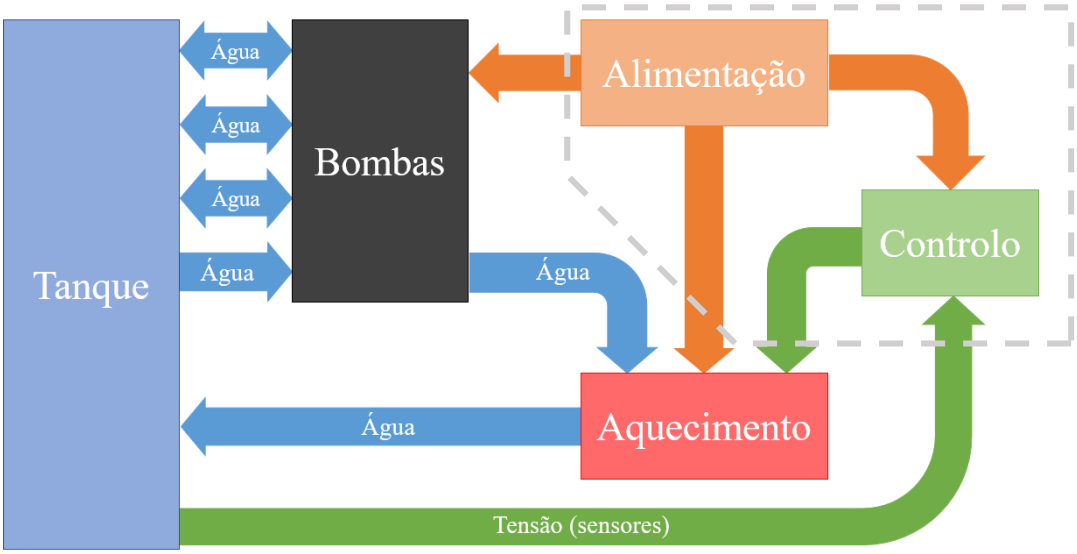


Figura 27 - Arquitetura do Módulo de Aquecimento.

3.2. Módulo de Arrefecimento

Para desenvolver o módulo de arrefecimento é necessário calcular os ganhos que o sistema deve compensar aquando a colocação da mão e antebraço na água a 7ºC.

3.2.1. Cálculo das Perdas Teóricas

No que diz respeito ao módulo de arrefecimento, a água existente dentro do tanque encontra-se a 7ºC (280.15 K), tendo em conta que a temperatura exterior ao tanque é a temperatura ambiente, aproximadamente 25ºC (298.15 K), e que a temperatura do corpo humano é de cerca de 33.44ºC (306.59 K) [25], a potência dissipada em forma de calor total (Q_f) é a soma da potência dissipada através do tanque (Q_{Tf}) com a potência dissipada em contacto com o braço (Q_{Bf}).

Tendo como base a lei de Fourier (equação (8)), novamente, temos:

$$Q_f = Q_{Tf} + Q_{Bf}\ [W] \tag{24}$$

Visto que a área da superfície atravessada pelo calor é igual à calculada para o módulo de aquecimento (equação (10)), tem-se, portanto:

$$A_T = 0.554\ m^2$$

Considerando a temperatura da água ($T_{água}$), a temperatura do ar (T_{ar}), o coeficiente de condutividade térmica da arca (k_T), a espessura do tanque (E_T) e a área da superfície de contacto pode-se calcular Q_{Tf} através da equação (25), tem-se:

$$Q_{Tf} = k_T A_T \frac{(T_{água} - T_{ar})}{E_T} \quad (25)$$

$$Q_{Tf} = 0.042 \times 0.554 \frac{(298.150 - 280.150)}{0.021}$$

$$Q_{Tf} = 19.94\ W \quad (26)$$

Neste caso a temperatura do corpo humano é superior à temperatura da água, por isso, mais uma vez, as perdas não são desprezáveis.

Tendo em conta as dimensões apresentadas na Figura 15, e as equações (8), (17) e (18), e sabendo que o coeficiente de condutividade térmica da pele, k_p, é 0.47 W/(m K) [27], pode-se calcular:

$$Q_{Bf} = k_p A_{pele} \frac{(T_{quente} - T_{frio})}{E_p} \quad (27)$$

$$Q_{Bf} = 0.470 \times 0.1276 \frac{(306.590 - 280.150)}{0.0019}$$

$$Q_{Bf} = 834.56\ W \quad (28)$$

Por fim, pela equação (24):

$$Q_f = 19.94 + 834.56$$

$$Q_f = 854.50\ W \quad (29)$$

Tal como no módulo de aquecimento, importa referir que este valor é meramente teórico, permitindo, apenas, ter um ponto de partida no que diz respeito às perdas que se têm de compensar.

3.2.2. Número de Módulos *Peltier* Necessários

Mais uma vez, é necessário compensar as perdas calculadas anteriormente. Para isso é preciso determinar o número de módulos *peltier* necessários para que seja possível manter a temperatura da água a 7 ºC (280.15 K).

Usando, novamente, a equação (15), as características dos diferentes *peltier'*s e tendo em conta a equação (7), é possível calcular-se a corrente (I_f) que deverá percorre cada módulo *peltier* e consequentemente o número de módulos necessários (n_f), para cada modelo *peltier*, que possibilita compensar as perdas.

Módulo *Peltier*	**V [V]**	**T_{ar} [K]**	**$T_{água}$ [K]**	**I_f [A]**	**n_f**
TEC1-12703	12.00	298.15	280.15	3.07	38.39
TEC1-12704	12.00	298.15	280.15	3.72	31.68
TEC1-12705	12.00	298.15	280.15	4.94	23.88
TEC1-12706	12.00	298.15	280.15	5.96	19.79
TEC1-12710	12.00	298.15	280.15	9.78	12.06
TEC1-12715	12.00	298.15	280.15	14.53	8.12

Tabela 9 - Cálculo da corrente (I_f) e o número de módulos peltier (n_f).

Com a análise da Tabela 9, conclui-se que, para compensar as perdas do módulo de arrefecimento, o número de módulos *peltier* necessários varia consoante o modelo escolhido. A escolha recaiu sobre o modelo TEC1-12705 (24 módulos), pois apresentam uma boa relação preço-potência.

3.2.3. Circuitos Elétricos do Módulo de Arrefecimento

O módulo de arrefecimento é constituído por uma fonte de alimentação, por diversos circuitos de alimentação dos módulos *peltier*, controlados pelo módulo de controlo, e por sensores de temperatura, conectados ao módulo de controlo.

3.2.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Arrefecimento

Tendo como base os cálculos teóricos e a situação descrita em 6.2, optou-se pela utilização de dois módulos *peltier* para o módulo de arrefecimento do sistema. Assim, a alimentação necessário para os diferentes elementos do módulo de arrefecimento é a apresentada na Tabela 10.

Elementos	Quantidade	Tensão	Corrente
Módulo *Peltier*	2	12 V	5 A
Ventoinha	1	12 V	0.20 A
Ventoinha	1	12 V	0.28 A
Bomba	4	12 V	0.30 A

Tabela 10 - Correntes e tensões máximas utilizadas no módulo de arrefecimento.

Logo, para o cálculo da potência deste módulo, tal como em 3.1.3.1, é necessário o cálculo inicial da corrente máxima utilizada (I_{max}):

$$I_{max} = 2 \times 5 + 0.20 + 0.28 + 4 \times 0.30$$
$$I_{max} = 11.68\ A$$

Multiplicando a corrente máxima calculada pela tensão máxima (V_{max}) utilizada, obtém-se a potência (P) do módulo de arrefecimento:

$$P = I_{max} \times V_{max}$$
$$P = 11.68 \times 12$$
$$P = 140.16\ W$$

Logo, o módulo de arrefecimento necessita de uma potência de 140.16 W, para o seu correto funcionamento.

3.2.3.2. Circuito de Alimentação dos Módulos *Peltier*

O circuito de alimentação dos módulos *peltier* é idêntico ao utilizado para o módulo de aquecimento, no entanto, devido à quantidade de módulos *peltier* utilizados foi necessário dimensionar novamente parte do circuito, mais concretamente das resistências R_3 e R_4. Pois, neste caso, para o mesmo *mosfet* (IRLI540N) pode-se utilizar até quatro módulos *peltier* em cada circuito, o que aumenta a corrente de *dreno* do *mosfet*, I_D.

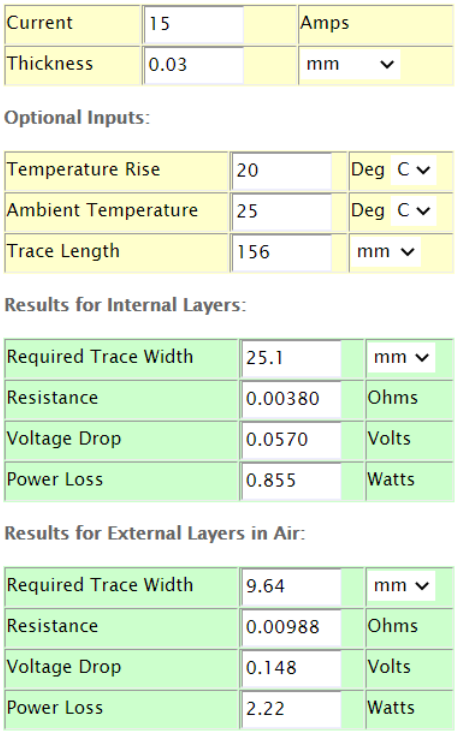
Lembrando que cada módulo *peltier* necessita de uma corrente de 5A, temos um I_D para três módulos *peltier*:

$$I_D = 5 \times 3$$
$$I_D = 15A$$

E para quatro módulos *peltier*:

$$I_D = 5 \times 4$$
$$I_D = 20A$$

Analisando a largura das pistas necessária, como realizado anteriormente, temos os resultados das Figuras 28 e 29.



Current	15		Amps
Thickness	0.03		mm

Optional Inputs:

Temperature Rise	20	Deg C
Ambient Temperature	25	Deg C
Trace Length	156	mm

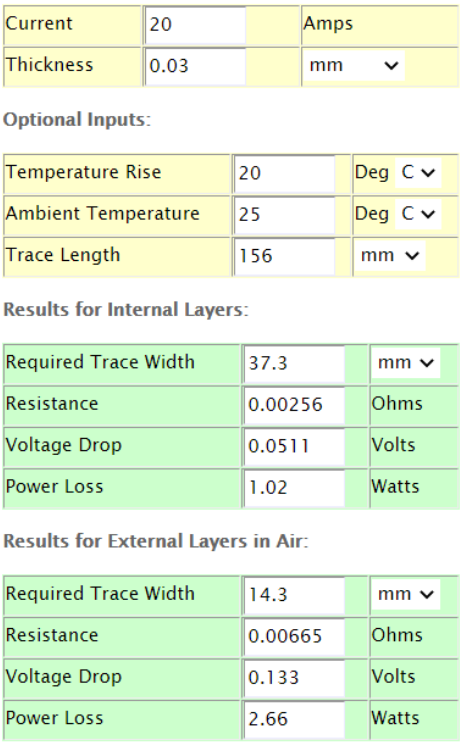
Results for Internal Layers:

Required Trace Width	25.1	mm
Resistance	0.00380	Ohms
Voltage Drop	0.0570	Volts
Power Loss	0.855	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	9.64	mm
Resistance	0.00988	Ohms
Voltage Drop	0.148	Volts
Power Loss	2.22	Watts

Figura 28 - Cálculo da largura das pistas para os pinos 2 e 3 do mosfet para 3 módulos peltier.



Current	20		Amps
Thickness	0.03		mm

Optional Inputs:

Temperature Rise	20	Deg C
Ambient Temperature	25	Deg C
Trace Length	156	mm

Results for Internal Layers:

Required Trace Width	37.3	mm
Resistance	0.00256	Ohms
Voltage Drop	0.0511	Volts
Power Loss	1.02	Watts

Results for External Layers in Air:

Required Trace Width	14.3	mm
Resistance	0.00665	Ohms
Voltage Drop	0.133	Volts
Power Loss	2.66	Watts

Figura 29 - Cálculo da largura das pistas para os pinos 2 e 3 do mosfet para 4 módulos peltier.

Tendo em atenção a Figura 30 que mostra a corrente de *dreno* máxima, I_{Dmax}, em função da temperatura da caixa do *mosfet*, disponível no seu *datasheet*, conclui-se que é preferível cada circuito ter associado apenas três módulos *peltier*, pois para temperaturas superiores a 50ºC, a corrente de *dreno* máxima do *mosfet* baixa dos 21A. Para além disso com três módulos *peltier* a largura das pistas necessária no PCB é menor (Figuras 28 e 29).

Com o uso de apenas três módulos *peltier* por PCB, leva à necessidade da produção de oito PCB's idênticos aos apresentados em 3.1.3.2.

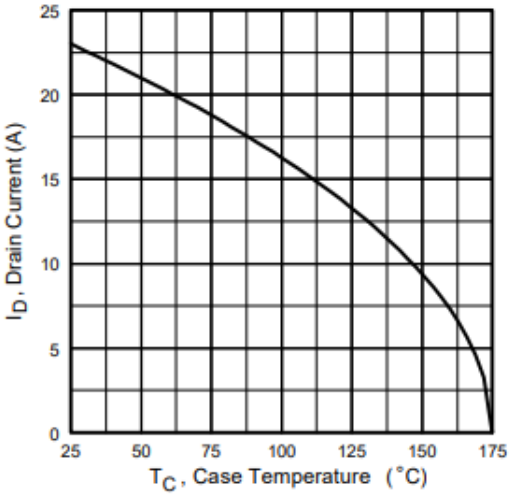


Figura 30 - Corrente de dreno máxima em função da temperatura da caixa do mosfet. Imagem retirada de [32].

Tendo como base a corrente de *dreno* do *mosfet*, I_D, para os três módulos *peltier*, pode-se agora calcular os valores das resistências R_3 e R_4.

$$V_- = I_D \times R_1$$
$$V_- = 15 \times 0.01$$
$$V_- = 150mV$$

Tendo como referência V_-, consideramos V_+ com um valor aproximado de 160mV, por razões de margem de segurança. A partir desta tensão, pretende-se que o divisor resistivo composto pelas resistências R_3 e R_4, reduza a tensão recebida no conector, V_{CONmax}, 5V para 160mV.

$$\frac{V_{CONmax}}{R_4 + R_3} = \frac{V_+}{R_3}$$
$$R_4 = \left(\frac{V_{CONmax}}{V_+} - 1\right) R_3$$
$$R_4 = \left(\frac{5}{0.16} - 1\right) R3$$
$$R_4 = 30.25R_3$$

Com base na relação deduzida acima, e tendo em atenção as resistências SMD disponíveis, concluiu-se que se pode usar R_3=3.6KΩ e R_4=100KΩ.

Neste caso a tensão máxima em V_+ será:

$$V_+ = \frac{R_3 V_{CONmax}}{R_4 + R_3}$$

$$V_+ = \frac{3600 \times 5}{100000 + 3600}$$

$$V_+ = 172.7mV$$

Portanto,

$$I_D = \frac{0.1727}{0.01}$$

$$I_D = 17.27A$$

Já com o circuito redimensionado (Figura 31), soldaram-se todos os componentes (Tabela 11). Obtendo-se assim o PCB (Figura 32) final do circuito de alimentação dos módulos *peltier* para o módulo de arrefecimento.

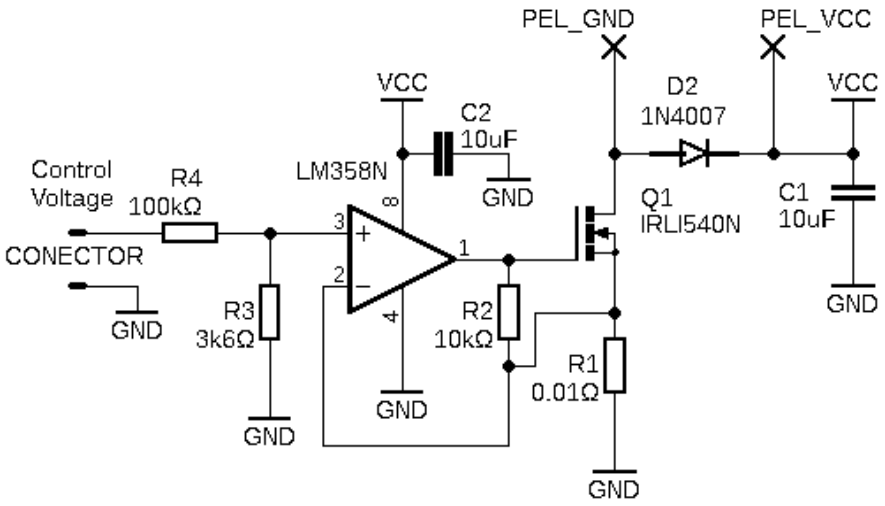


Figura 31 - Circuito de alimentação dos módulos peltier para o módulo de arrefecimento.

Componentes	Quantidades	Características
Condensador Eletrolítico 10µF	2	V_{DC}: 50V; Tol.: 20%; ΔT: -40ºC a 105ºC;
Conector *Molex*	1	2 pinos
Díodo 1N4007	1	V_f: 1V; I_f: 1A; V_r: 1000V; I_r: 5µA; ΔT: -65ºC a 150ºC;
IRLI540N	1	V_{DSS}: 100V; $R_{DS(on)}$: 0.044Ω; I_D: 23A;
LM358N	1	V_{CC}: 3 a 30V; A_G: 65dB; SR: 0.1V/µs;
Resistência (Sensor de corrente) 0.01Ω	1	Tol.: 1%; CT: 20ppm/ºC; P@85ºC: 1W;
Resistência (Óxido de Metal) 10KΩ	1	Tol.: 5%; CT: 100ppm/ºC; P: 0.25W;
Resistência (SMD) 3K6Ω	1	Tol.: 5%; P: 0.250W;
Resistência (SMD) 100KΩ	1	Tol.: 5%; P: 0.125W;
Solda Estanho/Chumbo	1	60% Estanho; 40% Chumbo;

Tabela 11 - Componentes utilizados no PCB.

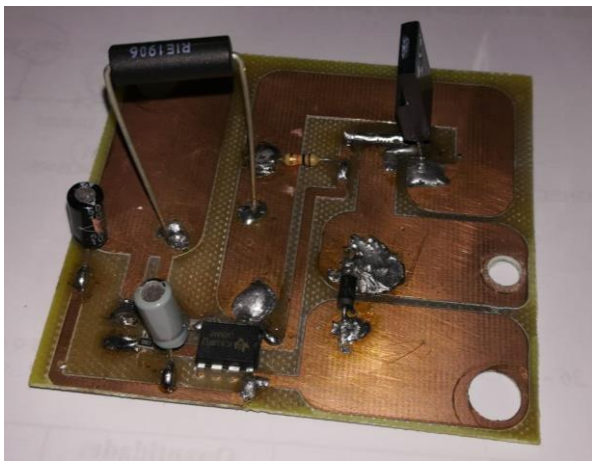


Figura 32 - Circuito com os componentes.

Importa ainda referir, que, caso fosse necessário, para que as pistas tivessem a capacidade de corrente necessária havia a possibilidade de fazer um reforço das mesmas com solda, aumentando assim a espessura das pistas (logo a sua capacidade de suportar a corrente descrita aumentava).

3.2.3.3. Sensores de Temperatura

O módulo de aquecimento contém no interior do tanque quatro sensores (como descrito em 3.1.3.3), para o tanque do módulo de arrefecimento o número de sensores é exatamente o mesmo. Estes quatro sensores, tal como no módulo de aquecimento, servirão para controlar a temperatura da água dentro deste tanque.

3.2.4. Arquitetura do Módulo de Arrefecimento

O módulo de arrefecimento é, em tudo, muito idêntico ao módulo de aquecimento, variando apenas alguns aspetos, como as quantidades dos componentes utilizados, como referido anteriormente. Por isso, a arquitetura deste módulo é a apresentada na Figura 33.

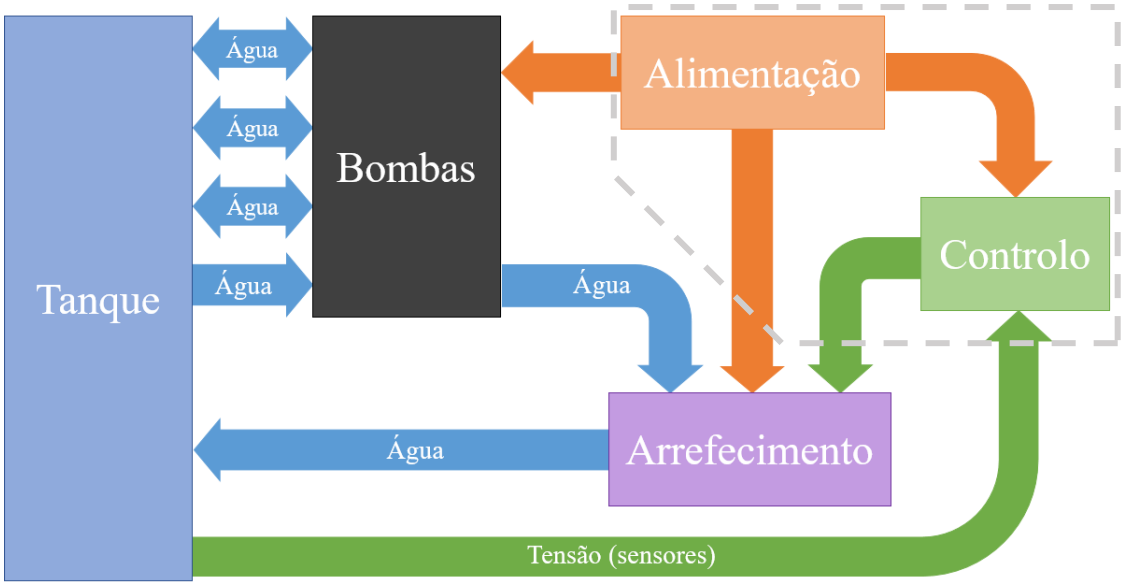


Figura 33 - Arquitetura do Módulo de Arrefecimento.

3.3. Módulo de Controlo

Numa primeira parte deste subcapítulo serão identificadas e calculadas as correntes e tensões utilizadas para o correto funcionamento do módulo de controlo (3.3.1). Numa segunda parte, secção 3.3.2, será retratada toda a arquitetura do módulo de controlo.

3.3.1. Potência Consumida pelo Módulo de Controlo

A alimentação do módulo de controlo pode dividir-se em duas partes: a alimentação do circuito de controlo e a alimentação das ventoinhas anexas aos dissipadores de calor dos *mosfet*'s.

A alimentação do circuito controlador é feita através da porta USB aquando a sua conexão ao PC. A alimentação das ventoinhas é feita diretamente da fonte de alimentação. Desta forma é possível obter-se a Tabela 12.

Elementos	Quantidade	Tensão	Corrente
Ventoinha	5	12 V	0.18 A
Circuito Controlador	1	5 V	0.50 A [33]

Tabela 12 - Correntes e tensões utilizadas no módulo de controlo.

Assim é possível concluir-se que a corrente máxima (I_{max}) necessária para alimentar as ventoinhas é de 900mA, como é calculado de seguida:

$$I_{max} = 5 \times 0.18$$
$$I_{max} = 0.9\ A = 900mA$$

Portanto, a potência (P) necessária para o correto funcionamento deste módulo é obtida da seguinte forma:

$$P = 0.9 \times 12 + 0.5 \times 5$$
$$P = 13.3\ W$$

3.3.2. Arquitetura do Módulo de Controlo

O módulo de controlo é constituído por duas secções: secção de alimentação e secção de controlo. A secção de controlo é o que se pode chamar de ‘a cabeça’ deste sistema. E a secção de alimentação é a região onde é fornecida energia ao sistema.

O circuito de controlo permite, como o próprio nome indica, controlar todo o sistema. É este circuito que receberá as tensões transmitidas pelos sensores de temperatura LM335 e as transformará em tensões adequadas para serem lidas pelos portos analógicos do microcontrolador STM32F446RE da STM. Este microcontrolador está montado numa placa de desenvolvimento NUCLEO-STM32F446RE. É, também, este circuito que enviará as tensões e todas as informações de controlo para os circuitos de alimentação dos módulos *peltier* de ambos os tanques. É ainda este circuito que permite a troca de informação com um PC.

O circuito começa por receber a informação proveniente dos sensores (LM335), que são conectados ao circuito principal através de conectores *molex*, formando vários circuitos como o da Figura 34.

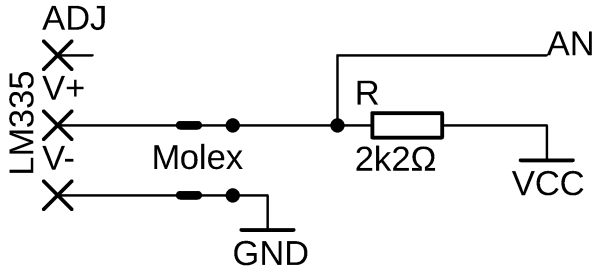


Figura 34 - Circuito total de cada sensor.

Como referido em 3.1.3.3, os sensores colocados nos tanques são constituídos apenas pelo LM335. No entanto, há a necessidade da colocação de uma resistência, em cada sensor, que garanta que a tensão direcionada para uma entrada analógica da placa NUCLEO STM32F446RE não exceda os 3.3V, pois é a tensão máxima de cada pino do NUCLEO [34]. Para garantir que isso não acontece, considerou-se uma tensão máxima permitida de apenas 3V. Dessa forma, já é possível calcular o valor da resistência, R, pois sabe-se que VCC é 5V e que a corrente que atravessa a resistência é de 1mA (de acordo com o *datasheet* do LM335 o valor mínimo é de 450µA [35]).

$$R = \frac{VCC - V_{AN}}{I_R}$$
$$R = \frac{5 - 3}{0.001}$$
$$R = 2K\Omega$$

O valor comercial mais próximo para resistência calculada é uma resistência de 2200Ω. Com este valor para a resistência, a tensão V_{ANmax} é:

$$V_{ANmax} = VCC - I_R R$$
$$V_{ANmax} = 5 - 0.001 \times 2200$$
$$V_{ANmax} = 2.8V$$

A secção de controlo dos circuitos de alimentação dos módulos *peltier* é composta por uma DAC (LTC1665CN [36]), um condensador de desacoplamento de 1µF e os *molex*'s de conexão com os circuitos de alimentação dos módulos *peltier*. Esta secção tem como objetivo receber a informação do núcleo e redirecioná-la para os circuitos de alimentação dos módulos *peltier* adequados.

Optou-se pelo uso de uma DAC em vez de usar PWM para geração da tensão de controlo dos módulos *peltier*, pois uma abordagem com recurso a PWM necessitaria de um filtro passa-baixo para suavizar os sinais PWM, e mesmo assim haveria um pouco de ondulação no sinal de saída analógica.

A referida DAC utiliza um protocolo SPI: recebe no pino 7 (CHIP_SELECT) a tensão 3.3V ou 0V ('1' e '0', respetivamente), que desativa e ativa a transferência dos dados recebidos em DATA_IN para a saída adequada (pinos 2, 3, 4, 5, 12, 13, 14 ou 15). O pino 8 (CLOCK) da DAC recebe o relógio, importante para a transferência de dados, visto que é transferido um *bit* por ciclo de relógio. Os pinos 6, 11 e 16 são alimentados pela tensão de 5V e o pino 1 é ligado à massa. Importa relembrar que a seleção do pino de saída é feita dentro da DAC, através de um conjunto de *bit*'s de seleção, enviados a partir do NUCLEO, juntamente com a informação da tensão a enviar nessa mesma saída. No entanto, aquando da explicação do código implementado no NUCLEO haverá um esclarecimento mais aprofundado do assunto.

Uma outra secção do circuito é a ligação do mesmo ao módulo LC231X [37], que permite a comunicação do circuito com um PC através de uma porta USB deste (do ponto de vista da programação este módulo cria uma porta COM que é muito mais fácil de programar). Nesta secção voltamos a ter um condensador de desacoplamento de 1µF.

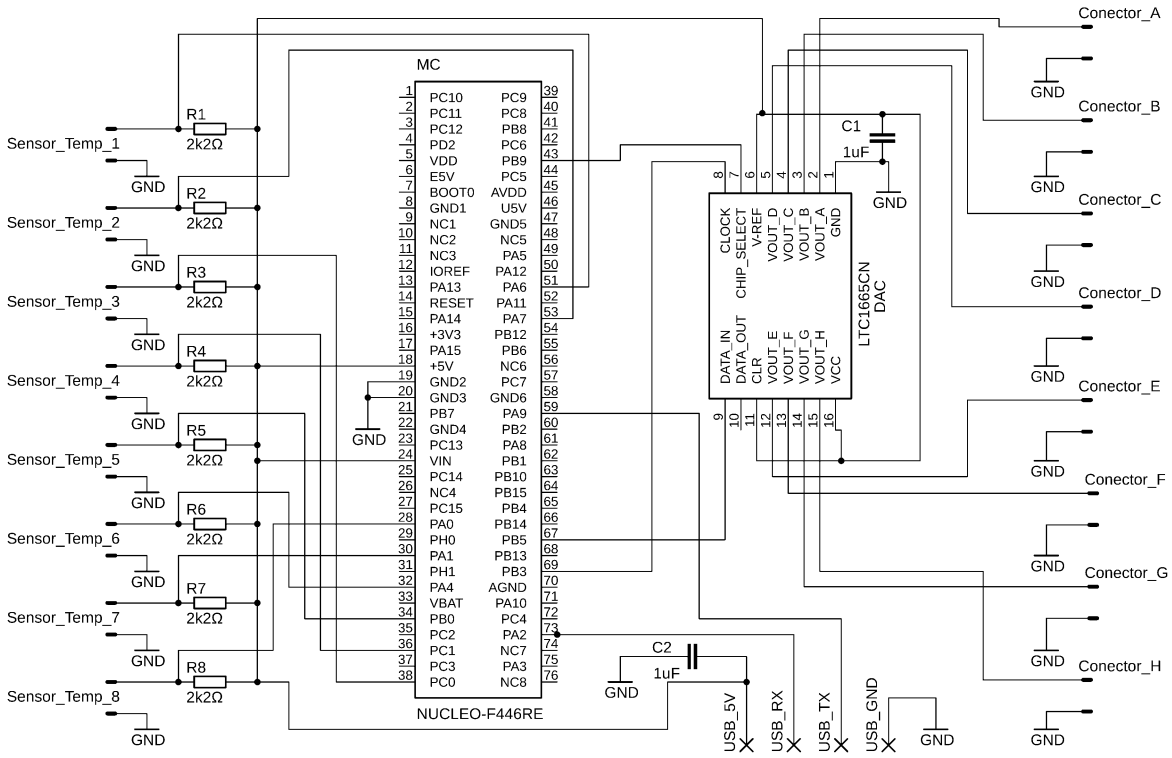


Figura 35 - Esquema do circuito controlador.

A placa de desenvolvimento NUCLEO-F446RE tem as seguintes características (Tabela 13). Os portos que disponibiliza estão nas Figuras 36 e 37.

Nucleo-64 STM32-F446RE

• Arm® Cortex®-M4 core a 180 MHz;
• VDD de 1.7 V a 3.6 V;
• 512 Kbytes Memória *Flash*;
• 128 Kbytes SRAM;
• Duas tipos de extensões:
  ○ Conectividade Arduino Uno V3 (não utlizada);
  ○ Pinos de extensão ST para acesso total a todas as STM32 E/S;
• Programador e Compilador ST-LINK/V2-1 embutidos;
• Arm® Mbed Enabled™

Tabela 13 - Características do NUCLEO.

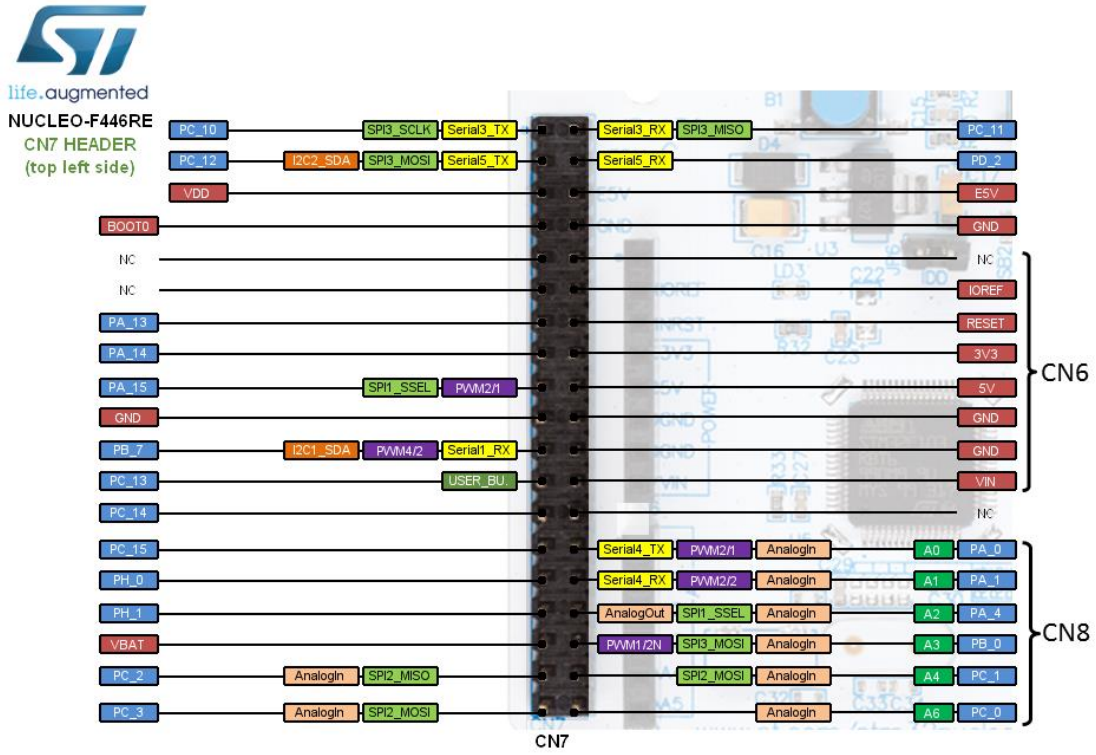


Figura 36 - Funcionalidades disponíveis dos portos/pinos da esquerda (CN7). Imagem retirada de [38].

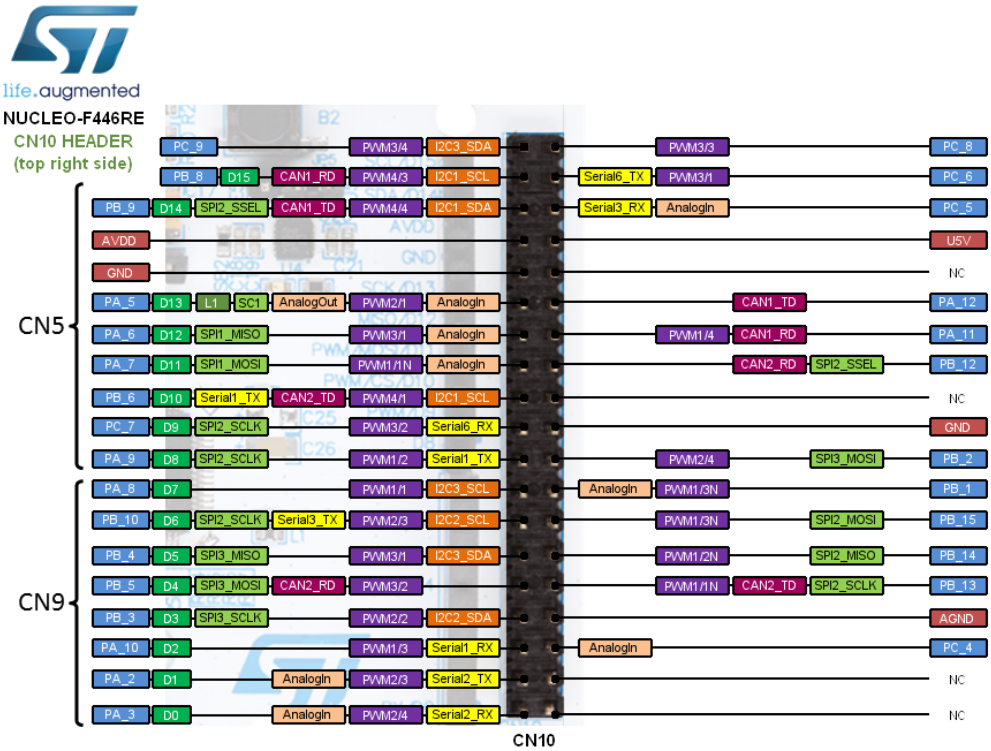


Figura 37 - Funcionalidades disponíveis dos portos/pinos da direita (CN10). Imagem retirada de [38].

Após a análise dos portos disponibilizados (Figuras 36 e 37), optou-se pela utilização dos portos como na Tabela 14.

Portos do Núcleo	Funcionalidade
A0 (PA0), A1 (PA1), A2 (PA4), A3 (PB0), A4 (PC1), A5 (PC0), D11 (PA7) e D12 (PA6)	(Sensores) Entradas Analógicas
D2 (PA10) e D8 (PA9)	(USB) UART_Rx e UART_Tx
D3 (PB3), D4 (PB5), D5 (PB4) e D14 (PB9)	(DAC) SPI_CLK, SPI_MOSI, SPI_MISO, CHIP_SELECT
GND, 5V, VIN	(Alimentação) GND, 5V, VIN

Tabela 14 - Portos do NUCLEO utilizados.

Finalmente, é possível desenhar o *layout* do PCB (Figura 38) e posteriormente enviá-lo para fabricação.

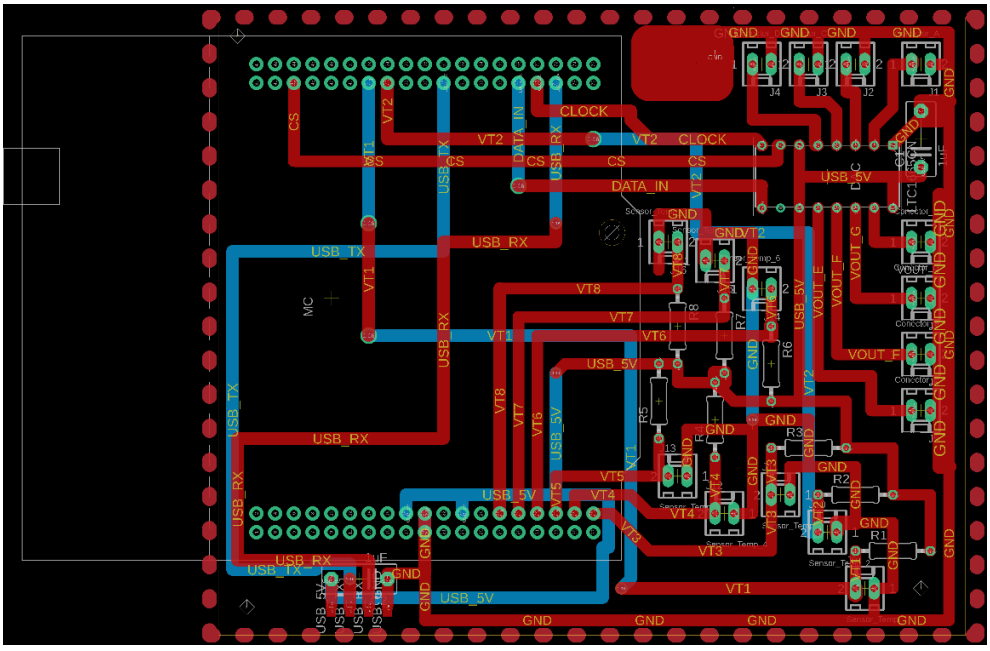


Figura 38 - Layout do PCB (EAGLE).

Ao circuito impresso foram adicionados todos os componentes necessários (Tabela 15), obtendo o circuito PCB final (Figura 39). A placa NUCLEO-F446RE é montada em *piggyback* como também se pode ver na figura referida.

Componentes	**Quantidades**	**Características**
Barra de pinos fêmea PCB	2	Pinos: 2x19
Condensador Eletrolítico 1µF	2	V_{DC}: 100V; T: 20%; ΔT: -40ºC a 105ºC
Conector *Molex*	16	
LC231X (USB)		ΔT: -20ºC a 70ºC
LTC1665CN (DAC)	1	V_{CC}: 2.7V a 5.5V; 8 canais; 8 *bit*'s; t_d: 30µs
Nucleo-64 STM32-F446RE	1	(referidas na tabela 10)
Resistência (Óxido de Metal) 2.2KΩ	8	Tol.: 5%; CT: 300ppm/ºC; P: 0.25W;
Solda Estanho	1	60% Estanho; 40% Chumbo;
Suporte Maquinado	1	Pinos: 16

Tabela 15 - Componentes utilizados no PCB do controlador.

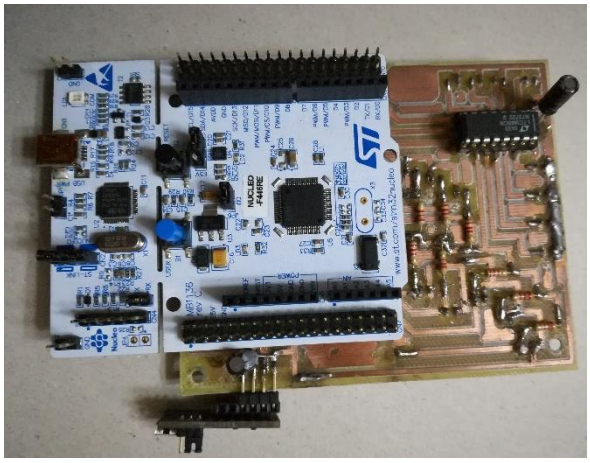


Figura 39 - Circuito final mostrando em primeiro plano a placa de desenvolvimento NUCLEO-F446RE.

3.4. Fonte de Alimentação

Todo o sistema elétrico precisa de ser alimentado, neste caso, optou-se pelo uso de uma fonte de alimentação comutada de 12V e 30A (Figura 40).

Figura 40 - Fonte de alimentação.

Para a escolha desta fonte de alimentação, foi necessário efetuar o cálculo de toda a potência utilizada pelo sistema. Para além da potência consumida pelos módulos de aquecimento (Tabela 6) e arrefecimento (Tabela 10) é também de ter em conta a potência consumida no módulo de controlo (Tabela 12). Desta forma, para além da alimentação feita através da conexão da porta USB, todo o sistema necessita de uma corrente de 23.96 A e uma tensão máxima de 12V, como demonstrado abaixo (Tabela 16).

Módulos do Sistema	**Quantidade**	**Tensão**	**Corrente**	**Potência**
Módulo de Aquecimento	1	12 V	11.38 A	136.56 W
Módulo de Arrefecimento	1	12 V	11.68 A	140.16 W
Módulo de Controlo	1	12 V	0.90 A	13.30 W
		5 V	0.50 A	

Tabela 16 - Potências utilizadas em todo o sistema.

$$I_{max} = 11.38 + 11.68 + 0.90$$

$$I_{max} = 23.96\ A$$

Escolheu-se a fonte comutada na Figura 40, pois tem as características que permitem o funcionamento de todos o sistema (tensão de 12V, como pretendido, e corrente superior (30 A) à necessária para o sistema, dando assim alguma margem de segurança).

A potência (P) total do sistema é calculada somando todas as potências dos diferentes módulos.

$$P = 136.56 + 140.16 + 13.30$$

$$P = 290.02\ W$$

Capítulo 4

4. Desenvolvimento do *Firmware* da Unidade de Controlo

A programação do NUCLEO (microcontrolador) é fundamental neste sistema. É esta programação que permitirá receber a informação dos sensores existentes nos tanques e, de acordo com ela, controlar a corrente que atravessa os módulos *peltier*. Para além disso, permite a interação com o utilizador.

Numa fase inicial são definidos os portos utilizados, de acordo com a Tabela 14, para interação com o exterior e para possibilitar o controlo do sistema. Para além disso, o sistema é inicializado de forma a que a tensão nos módulos *peltier* seja cerca de 8V.

O programa funciona em *loop* constante, repetindo a leitura das temperaturas, o controlo das mesmas (através do controlo das correntes que atravessam os módulos *peltier*) e a interação com o utilizador até à desconexão da porta USB do PC, que alimenta o NUCLEO-F446RE (Figura 41).

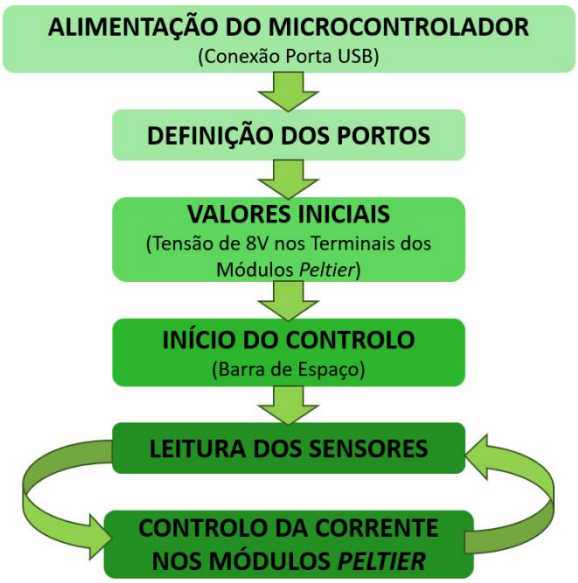


Figura 41 - Diagrama de blocos do programa.

Importa ainda referir que, neste caso, foi utilizado o emulador Tera Term para a interação entre o sistema e o utilizador, embora possa ser utilizado qualquer outro que permita esta interação.

4.1. Leitura da Temperatura da Água dos Tanques

A leitura da temperatura da água de cada tanque é fundamental, pois só sabendo a temperatura atual é que é possível definir se se quer aquecer ou arrefecer a água, de forma a manter a água nos tanques às temperaturas pretendidas.

Para a leitura das temperaturas utilizam-se as entradas analógicas do NUCLEO, referidas na Tabela 14, as quais estão associados os oito sensores de temperatura (Figura 25) através dos circuitos necessários para o efeito (Figura 34). Na Figura 42 pode-se visualizar a distribuição dos sensores nos dois tanques e na Tabela 17 a relação de cada sensor com a respetiva porta analógica.

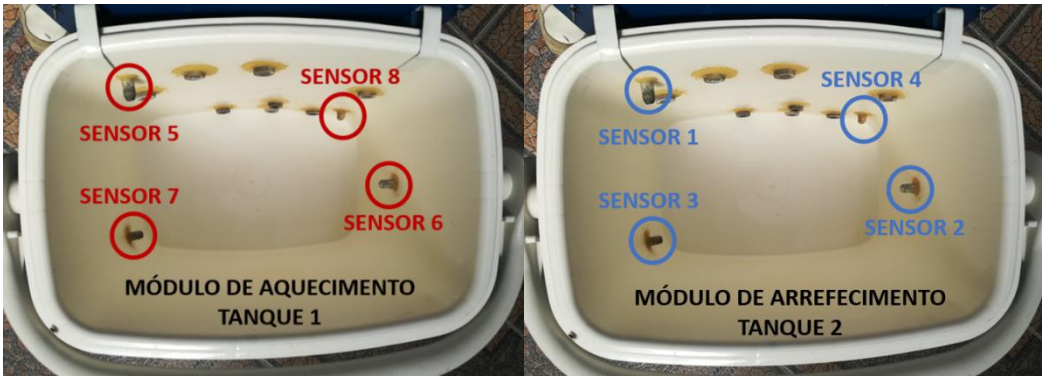


Figura 42 - Disposição dos sensores nos tanques.

Sensor	Porta Analógica
1	A3
2	A2
3	A0
4	A1
5	D12
6	A5
7	A4
8	D11

Tabela 17 - Relação Sensor-Porta Analógica.

A leitura da temperatura da água do tanque de água a 37ºC e do tanque de água a 7ºC é feita, respetivamente, pelas funções 'ler_sensores_quente' e 'ler_sensores_frio'. Estas funções foram criadas para simplificar o processo de leitura dos quatro sensores de cada tanque. Em cada uma destas funções, numa primeira fase, são lidos os sinais recebidos dos quatro sensores associados a cada uma delas. Por cada sensor as funções efetuam dez mil leituras e calculam a média dessas leituras recebidas. O cálculo da média das dez mil amostras permite criar um valor mais preciso e estável, diminuindo erros associados a possíveis oscilações das leituras.

De seguida, em cada sensor, a média do sinal das dez mil amostras é convertida primeiramente para tensão, em milivolts, e posteriormente para temperatura (T), em graus Celsius. O valor médio do sinal (med) em cada pino varia de 0 a 1, onde 0 corresponde a 0V e o 1 a 3.3V. Portanto a tensão (V), em milivolts, é dada pela seguinte expressão:

$$V = med \times 3.3\ [mV]$$

Sabendo que no LM335 por cada variação de um grau leva a uma variação de tensão de 10mV [35]. Tem-se, portanto a temperatura (T), em Kelvin:

$$T = \frac{V}{0.01}\ [K]$$

$$T = \frac{med \times 3.3}{0.01}\ [K]$$

Por fim, converte-se a temperatura de graus Kelvin para graus Celsius, subtraindo ao valor anterior 273.15 [39].

$$T = \frac{med \times 3.3}{0.01} - 273.15\ [°C]$$

Após este processo de conversão, cada sensor é calibrado, adicionando uma constante (Tabela 18) a cada temperatura calculada anteriormente. Esta calibração resulta de uma comparação direta dos valores obtidos para a temperatura da água através dos sensores e de um termómetro digital.

Sensor	Porta Analógica	Constante de Calibração
1	A3	-0.2
2	A2	2.0
3	A0	-1.8
4	A1	1.4
5	D12	-0.5
6	A5	2.5
7	A4	2.7
8	D11	1.9

Tabela 18 - Constante de calibração para cada sensor.

4.2. Algoritmo de Controlo

Chegado o momento do controlo da corrente que percorre os módulos *peltier*, o programa começa por atualizar as variáveis auxiliares ‘ciclos’ e ‘ciclosf’, variáveis essas que foram criadas com o intuito de permitir contabilizar quantos ciclos já passaram desde a última atualização das tensões no tanque quente e frio, respetivamente. Após essa atualização são utilizadas as funções ‘regular_quente’ e ‘regular_frio’, que, como o próprio nome indica, servem para regular a corrente nos módulos *peltier* do tanque quente e do tanque frio, respetivamente.

Para que o sistema não se torne um sistema de controlo *ON/OFF* ou algo muito idêntico, foram definidos treze degraus de tensões (Tabela 19). Desta forma, a ideia é que durante o controlo das correntes nos módulos *peltier* estas não variem abruptamente.

Degraus	Código Escrito (hexadecimal)		Tensão (V)
	DAC A	DAC B	
0	0x1000	0x2000	0
1	0x1080	0x2080	1.04
2	0x1150	0x2150	1.98
3	0x1250	0x2250	2.99
4	0x1310	0x2310	4.04
5	0x13e0	0x23e0	5.03
6	0x14b0	0x24b0	6.02
7	0x1580	0x2580	7.01
8	0x1690	0x2690	8.09
9	0x1730	0x2730	9.02
10	0x1810	0x2810	9.98
11	0x1930	0x2930	11.03
12	0x1ff0	0x2ff0	11.18

Tabela 19 - Variáveis 'dacA' e 'dacB', código enviado, valor da tensão nos terminais dos peltier's.

A função 'regular_quente' utiliza a DAC A do LTC1665 [36], e começa por garantir que esta não irá receber nenhuma informação até que seja necessário, enviando para o pino D14 o valor 1. De seguida, é calculada a média das quatro temperaturas do tanque de água quente e depois, se a temperatura média do tanque for inferior a 36.9ºC e nos últimos 10 ciclos (50 segundos) a variável 'dacA' não tenha sido alterada, esta é incrementada. E posteriormente, com recurso ao comando *switch*, esta variável indicará o novo valor a ser enviado para a DAC A, pelas portas SPI escolhidas para o efeito (Tabela 14). Como referido, a atualização da variável 'dacA', e, consequentemente, da corrente que atravessa os módulos *peltier*, acontece de 50 em 50 segundos sempre que exista alguma necessidade de retificar a temperatura da água existente no tanque do módulo de aquecimento.

A escrita deste novo valor, só pode acontecer após ser ativada a escrita em LTC1665, para isso, é enviado o valor 0 para o pino D14. Após a passagem desta nova informação pela DAC e pelo circuito de controlo de corrente dos módulos *peltier*, a corrente nos módulos *peltier* irá aumentar para o patamar seguinte e consequentemente a tensão aos terminais

destes também aumenta, aquecendo a água um pouco mais, tentando atingir os 37ºC. A situação inversa também acontece, quando a média das temperaturas é superior a 37.1ºC, o pretendido é que a corrente que atravessa os módulos *peltier* diminua e, por isso, a variável 'dacA' é decrementada. Em ambas as situações, existe o cuidado de garantir que as diferentes variáveis permanecem dentro dos seus limites, para que não se criem ciclos infinitos ou erros na execução do programa.

No que diz respeito à função 'regular_frio', esta utiliza a DAC B do LTC1665 (podendo usar mais se necessário). Neste caso a funcionalidade da função é em tudo idêntica à função 'regular_quente', pois o algoritmo é igual, variando apenas o intervalo da temperatura. Isto é, a variável auxiliar 'dacB', que tem a mesma função da variável auxiliar 'dacA' é incrementada quando a temperatura média do tanque de água fria está acima dos 7.1ºC, aumentando a corrente que percorre os módulos *peltier* e arrefecendo, assim, mais a água. Esta variável também é decrementada se a temperatura média for inferior a 6.9ºC, pois neste caso não será necessário arrefecer mais e, por isso, a corrente que atravessa os módulos *peltier* e respetiva tensão têm de diminuir. Também aqui a atualização dos valores enviados para a DAC B acontece de 50 em 50 segundos (10 ciclos).

É importante ainda esclarecer que a seleção da DAC a utilizar e respetivo pino de saída do LTC1665 é feita através do envio, a partir do NUCLEO, de um conjunto de *bit*'s de seleção juntamente com o valor da tensão a colocar nessa saída. Nessa seleção os quatro *bit*'s mais significativos indicam a DAC e respetiva saída que se pretende utilizar e os oito *bit*'s seguintes transportam a informação da tensão a colocar na saída da DAC escolhida (Figura 43).

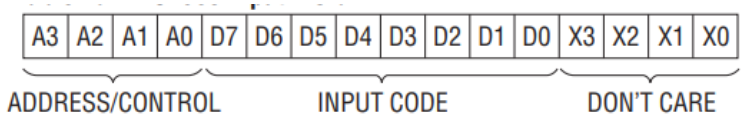


Figura 43 – Construção da palavra enviada com a informação para seleção da DAC e para a tensão. Imagem retirada de [36].

Desta forma, a escolha da DAC a utilizar baseia-se na tabela apresentada na Figura 44, retirada do *datasheet* do LTC1665.

ADDRESS/CONTROL				DAC STATUS	SLEEP STATUS
A3	A2	A1	A0		
0	0	0	0	No Change	Wake
0	0	0	1	Load DAC A	Wake
0	0	1	0	Load DAC B	Wake
0	0	1	1	Load DAC C	Wake
0	1	0	0	Load DAC D	Wake
0	1	0	1	Load DAC E	Wake
0	1	1	0	Load DAC F	Wake
0	1	1	1	Load DAC G	Wake
1	0	0	0	Load DAC H	Wake
1	0	0	1	No Change	Wake
1	0	1	0	No Change	Wake
1	0	1	1	No Change	Wake
1	1	0	0	No Change	Wake
1	1	0	1	No Change	Wake
1	**1**	**1**	**0**	**No Change**	**Sleep**
1	1	1	1	Load **ALL** DACs with Same 8/10-Bit Code	Wake

Figura 44 - Seleção da DAC. Imagem retirada de [36].

4.3. Protocolo *Ad Hoc* de Comunicação com o PC

O protocolo *ad hoc* de comunicação com o PC resume-se ao envio, para o PC, da informação relativa à temperatura da água nos oito sensores e ao número de amostragem destas temperaturas, de forma a que o utilizador consiga visualizar a variação da temperatura nos oito pontos de recolha e o número de amostras (dez mil leituras por amostra para cada sensor). Desta forma o sistema utiliza os pinos D2 e D8 (Tabela 14), configurados como portas UART_RX e UART_TX, respetivamente. Assim, é possível receber informação do exterior (UART_RX) e, também, enviar informação para o exterior (UART_TX), através do LC231X, como explicado anteriormente.

Numa primeira fase da interação com o utilizador, o programa aguarda a comunicação do utilizador para começar o seu funcionamento, isto é, o NUCLEO só começa a leitura, o controlo das temperaturas e a exposição das mesmas após o utilizador pressionar a barra de espaço do teclado do computador.

Após inicializar o programa, este começa por enviar o cabeçalho e de seguida a cada 5 segundos envia os dados relativos ao número de leituras realizadas (o utilizador não sabe que uma leitura para ele corresponde a uma média de dez mil leituras por sensor), à temperatura em cada sensor do tanque frio e à temperatura em cada sensor do tanque quente (Figura 45 e Tabela 20).

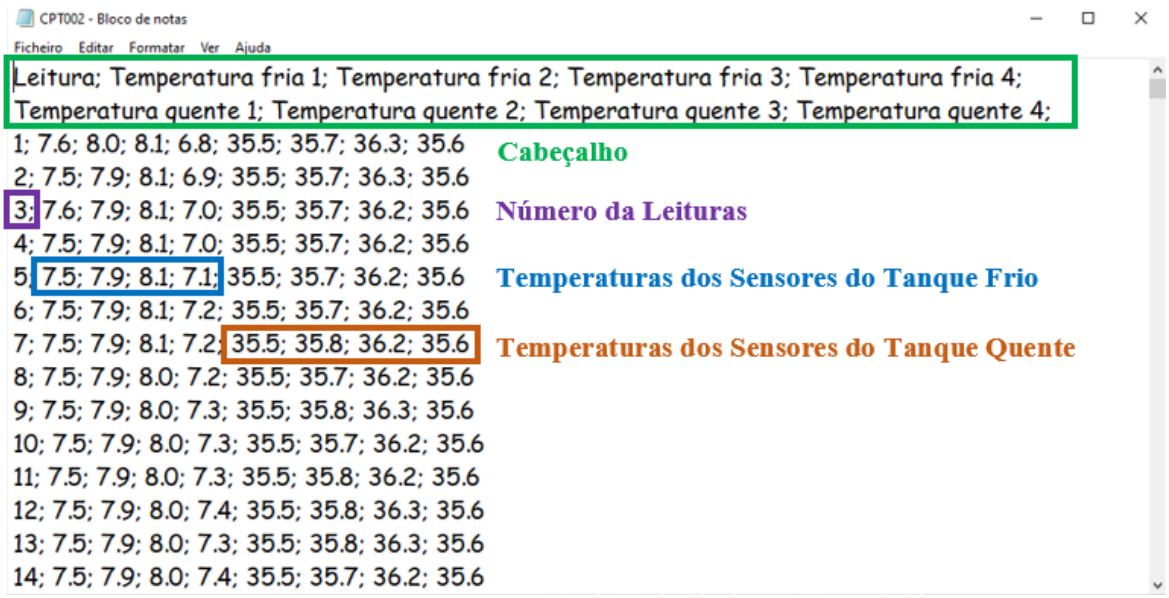


Figura 45 - Registo do cabeçalho e das primeiras leituras apresentadas ao utilizador.

	Tamanho do Frame	**Frame**
Cabeçalho	176 caracteres	"Leitura; Temperatura fria 1; Temperatura fria 2; Temperatura fria 3; Temperatura fria 4; Temperatura quente 1; Temperatura quente 2; Temperatura quente 3; Temperatura quente 4;"
Linhas	Ajustável (min: 41 caracteres)	"[nº de leitura]; [temperatura no sensor 1]; [temperatura no sensor 2]; [temperatura no sensor 3]; [temperatura no sensor 4]; [temperatura no sensor 5]; [temperatura no sensor 6]; [temperatura no sensor 7]; [temperatura no sensor 8]"

Tabela 20 - Características do cabeçalho e da informação apresentada ao utilizador.

Capítulo 5

5. Protótipo Final

Depois da construção e da montagem dos diferentes módulos (aquecimento, arrefecimento e controlo), foi necessário interligá-los. Para isso, usaram-se 2 cabos de rede, destinados a transportar dados dos sensores para o microcontrolador, 4 cabos de dois fios destinados à alimentação de todos os componentes elétricos (bombas, *peltier*'s e ventoinhas), e 1 cabo USB-USB destinado à conexão entre o sistema e o PC (Figura 46).

Figura 46 - Cabos do sistema.

Os cabos apresentados anteriormente são conectados seguindo as identificações presentes nestes e nos módulos do sistema (Figuras 47 e 48).

Figura 47 - Ligações no Módulo de Controlo.

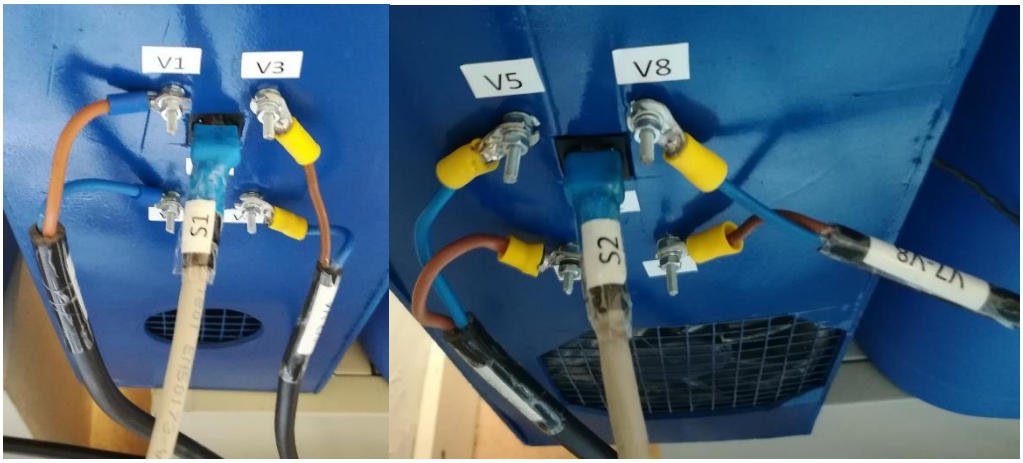


Figura 48 - Ligações nos Módulos de Aquecimento e Arrefecimento.

Após esta ligação, o sistema está montado e pronto a ser utilizado (Figura 49).

Figura 49 - Sistema finalizado.

Para a interação com o utilizador, instalou-se o emulador Tera Term, que permite receber a informação transmitida pelo sistema (número de leituras e temperaturas) através das portas serie (Figura 50). Importa referir que pode ser utilizado outro emulador que não este, a escolha deste é simplesmente uma escolha pessoal.

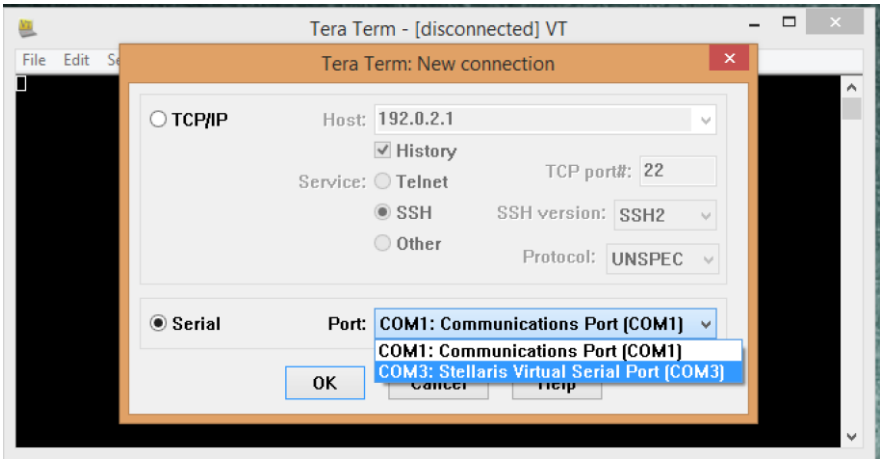


Figura 50 - Inicialização do emulador Tera Term.

Capítulo 6

6. Validação Experimental

A criação deste sistema implicou alguns testes durante e após a sua construção. Inicialmente foram realizados testes em laboratório para verificar que todos os componentes funcionavam de acordo com o esperado. Nestes testes foram usadas as fontes de alimentação descritas na Tabela 21 e os resultados são apresentados em 6.1 e 6.2. Após a validação inicial foram realizados testes em participantes voluntários, aquando do uso do sistema desenvolvido para um estudo de indução de dor (Figura 51), que são apresentados em 6.3.

Fontes	**Características**
Fonte de Alimentação RACPAC-Series B32-20R, Oltronix	0 – 32 V; 0 – 20A; Dimensões: 430 mm x 132 mm x 410 mm;
Fontes de Alimentação DC de Saída Tripla Modelo 1760A, BK Precision	0-30 V (duas saídas), 4–6.5 V (uma saída); 0-2 A (duas saídas), 5 A (uma saída); Dimensões: 145 mm x 267 mm x 381 mm;

Tabela 21 - Fontes e suas características.

Figura 51 - Utilização do sistema para indução de dor num voluntário.

6.1. Módulo de Aquecimento

Aquando a idealização deste sistema, para o módulo de aquecimento de água concluiu-se que, teoricamente, bastaria apenas um módulo *peltier*, no entanto, devido às características dos *kit*'s de aquecimento, optou-se pelo uso de dois módulos *peltier*, como já referido anteriormente.

Os primeiros testes tiveram ainda lugar com o módulo de aquecimento incompleto (Figura 52) e alimentado por fontes de tensão existentes no laboratório (Figura 53).

Figura 52 - Módulo de aquecimento incompleto.

Figura 53 - Fontes utilizadas para alimentação do módulo de aquecimento.

Nestes primeiros testes, pretendia-se analisar o comportamento do módulo de aquecimento e dos módulos *peltier*. Para isso, variou-se a tensão, de 5 em 5 minutos, nos terminais dos módulos *peltier* (Tabelas 22, 23 e Gráfico 1).

Tensão (V)	**Corrente *Peltier* 1 (A)**	**Corrente *Peltier* 2 (A)**	**T_{amb} (ºC)**	**$T_{água}$ (ºC)**
0	0	0	23.2	37.0
12	3.50	3.90	23.3	37.2
11	3.20	3.56	23.3	37.3
10	2.87	3.22	23.3	37.3
9	2.58	2.82	23.4	37.3
8	2.30	2.51	23.5	37.3
7	2.02	2.19	23.5	37.2
6	1.73	1.88	23.5	37.2
5	1.40	1.48	23.5	37.1
4	1.03	1.14	23.6	37.0
3	0.73	0.73	23.8	36.8
2	0.37	0.42	23.8	36.7

Tabela 22 - Variação da tensão nos terminais dos peltier's, com intervalos de 5 minutos.

t (minutos)	**Tensão (V)**	**T_{amb} (ºC)**	**$T_{água}$ (ºC)**
-	0	23.9	36.7
0	12	23.9	36.7
1	12	23.9	36.8
5	12	23.8	36.9
6	11	23.9	36.9
8	11	23.9	37.0
9	10	23.9	37.0
18	10	23.9	37.1
19	9	23.9	37.1
22	9	23.9	37.0
23	8	23.9	37.0
46	8	24.0	36.9
47	7	24.0	36.9

Tabela 23 - Variação da tensão de 0.1ºC em 0.1ºC.

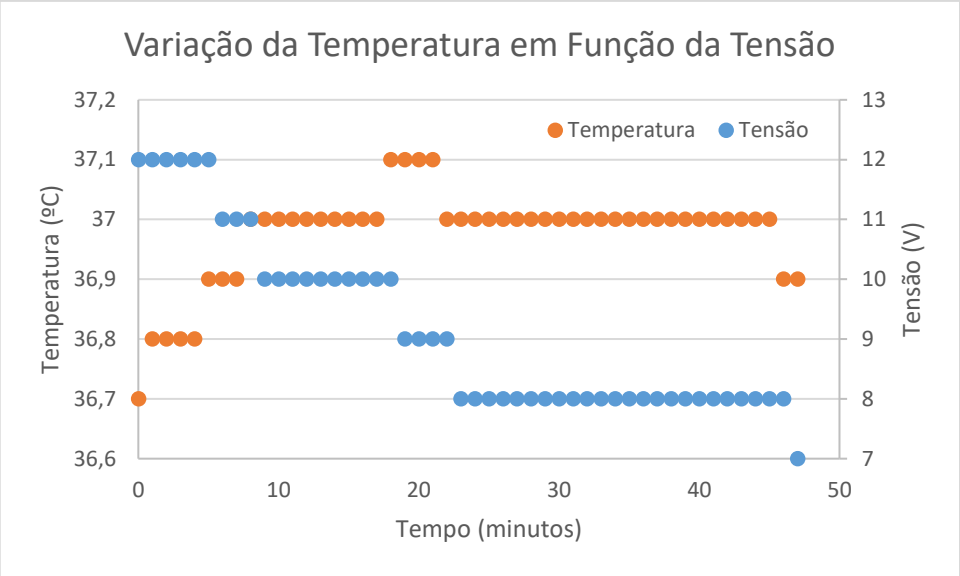


Gráfico 1 - Variação da temperatura em função da tensão.

Pela análise destes dados percebe-se que o controlo da temperatura no módulo de aquecimento é possível de ser realizado, embora os *peltier*'s não sejam tão eficientes como o esperado, pois para os 12V de tensão a sua corrente é apenas cerca de 3A e não os 5A esperados. Para além disso, pela análise do Gráfico 1, ainda se consegue perceber que a temperatura estabiliza nos 37ºC com tensões próximas dos 8V.

Numa segunda fase, fez-se todo o controlo durante um longo período de tempo (cerca de três horas, muito superior a uma recolha de sinais fisiológicos de um participante voluntário) já com o sistema montado e o resultado foi o apresentado no Gráfico 2.

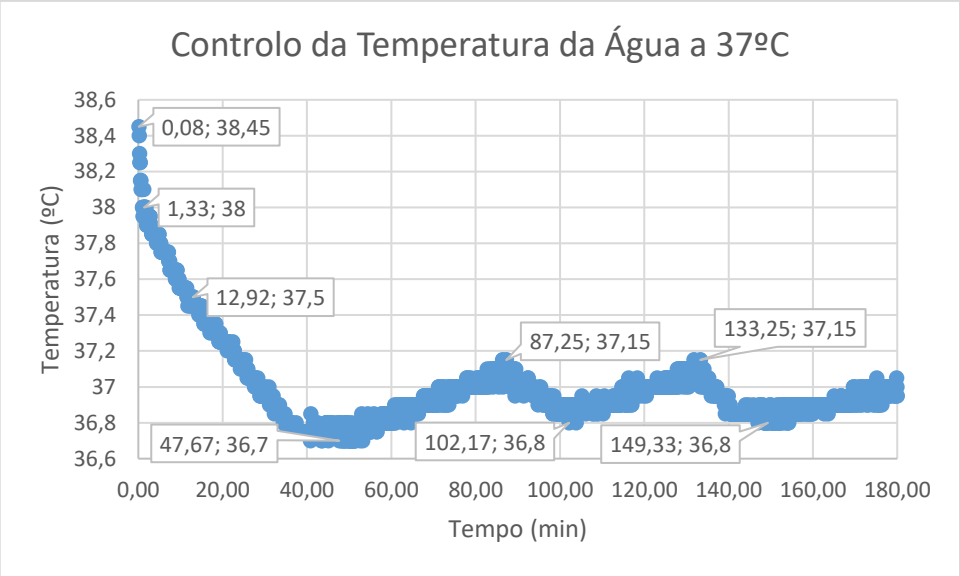


Gráfico 2 - Controlo da temperatura durante um longo período de tempo.

Neste teste a água no tanque começou com uma temperatura de 38.45ºC, mas após 1 minuto e 20 segundos (1.33 min) já se encontrava dentro do intervalo tido como objetivo principal (37±1ºC). Após 12.92 min (12 minutos e 55 segundos) o sistema passa a controlar a temperatura com uma variação inferior a 0.5ºC, mantendo durante o resto do teste (2 horas, 47 minutos e 5 segundos) a temperatura dentro do intervalo [36.5; 37.5] ºC. Ainda é possível perceber que a temperatura tem uma curva oscilatória em torno dos 37ºC, variando cerca de 0.2ºC.

Por fim, comprovou-se a funcionalidade com todo o sistema em utilização para a realização da tarefa de indução de dor por estímulo a exposição ao frio em participantes voluntários (Gráfico 3).

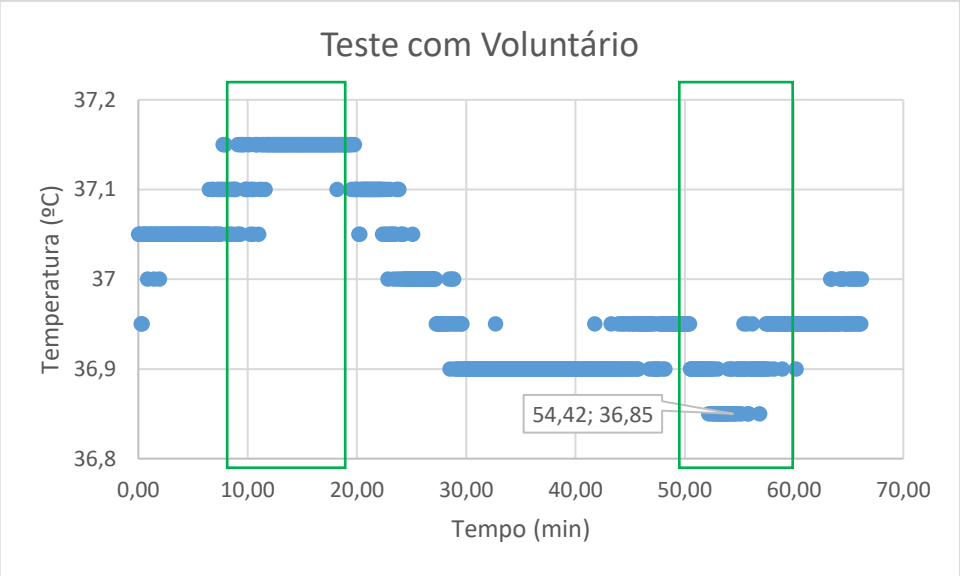


Gráfico 3 - Estudo com voluntário.

Ao analisar este gráfico, com dados recolhidos aquando da realização da experiência de indução de dor num voluntário, consegue-se perceber que a temperatura da água permanece entre os 36.8ºC e os 37.2ºC durante todo o tempo da experiência. É possível perceber também que durante a introdução do antebraço na água (retângulos verdes) o sistema tentou sempre recuperar a temperatura ideal (37ºC). Na primeira vez que o voluntário mergulhou o antebraço no tanque não se notam grandes alterações na temperatura da água, o que é normal pois a temperatura corporal é semelhante à temperatura da água do tanque quente. Já na segunda colocação do antebraço, a temperatura deste é muito inferior, pois a mesma acontece após a colocação do antebraço no tanque de água fria (cerca de 7ºC) e, por esse motivo, é visível que, pouco antes da introdução do antebraço, a temperatura da água estava a subir, mas com o mergulho deste a temperatura baixou ligeiramente, tendo mesmo atingido o pico mínimo (36.85ºC).

6.2. Módulo de Arrefecimento

Na idealização deste sistema, o módulo de arrefecimento tinha como objetivo manter a temperatura da água a 7±1ºC. Para isso, mantendo o método idealizado para o módulo de aquecimento, seriam necessários 24 módulos *peltier* (segundo as contas teóricas). No entanto, logo nos primeiros testes percebeu-se que não seria possível arrefecer a água com uma montagem idêntica à do tanque de aquecimento.

Nos primeiros testes, ainda com uma montagem muito simples, tentou-se arrefecer a água do tanque com apenas 2 *peltier*'s e, como esperado, não atingiu o arrefecimento necessário (Gráfico 4). Ao fim de 18 minutos, com os *peltier*'s alimentados a 12V, a temperatura que tinha iniciado nos 7.2ºC tinha aumentado para os 7.8ºC. Para além do número reduzido de módulos *peltier*, percebeu-se que os dissipadores não estavam a conseguir dissipar a temperatura da face quente por completo, fazendo com que, com o tempo, a face quente dos *peltier*'s transferisse calor para a face fria e para o bloco de arrefecimento.

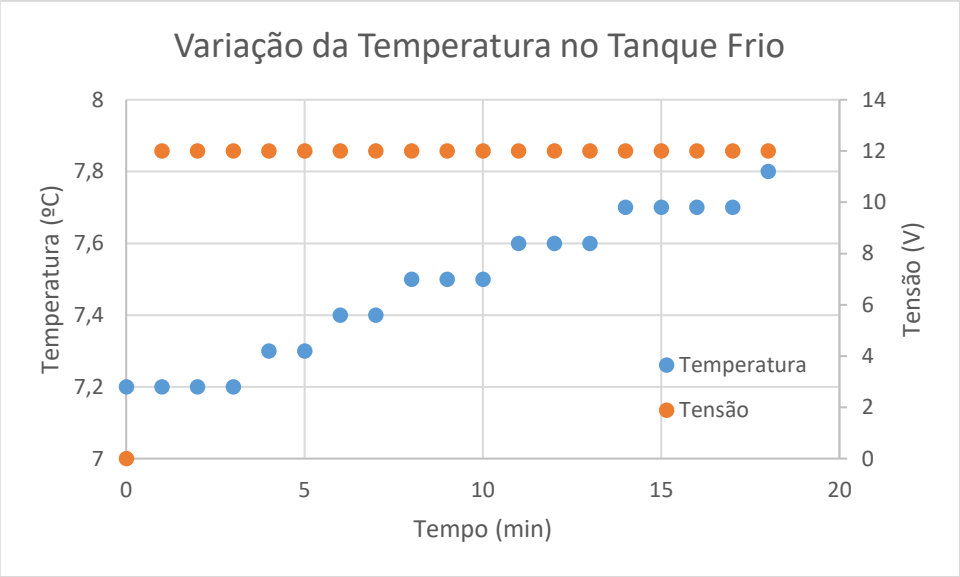


Gráfico 4 - Evolução da temperatura do tanque frio.

De seguida, por forma a simplificar as análises, reduziu-se o tamanho do tanque para um garrafão de 5 litros, diminuindo assim o volume de água para um sexto da capacidade do tanque (Figura 54). Para estes testes utilizou-se, também, um dissipador e umas ventoinhas maiores.

Figura 54 - Testes com garrafão de 5 litros.

Os dados recolhidos neste teste são apresentados no Gráfico 5, onde é possível observar que, mais uma, vez o sistema não arrefece. Mesmo começando numa temperatura mais elevada (7.9ºC) os dois *peltier*'s não conseguem arrefecer ou manter a temperatura. Ainda que não satisfatório, era de esperar um resultado similar, pois para 5 litros de água só se verificariam alterações utilizando quatro módulos *peltier* (um sexto do tanque frio). Mais ainda, neste teste, o arrefecimento é dificultado pois o garrafão não tem um isolamento semelhante ao do tanque.

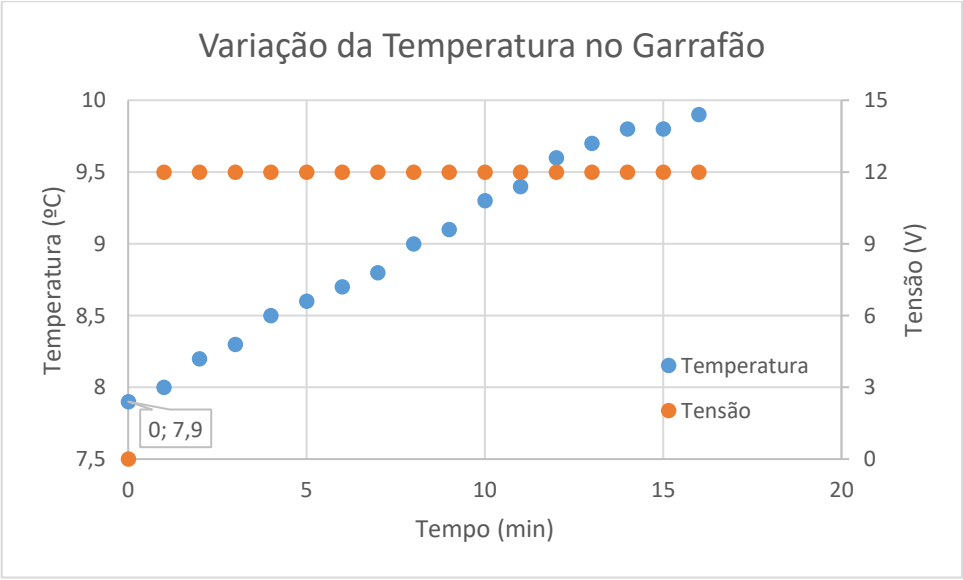


Gráfico 5 - Variação da temperatura no garrafão de 5 litros.

Numa terceira tentativa utilizou-se uma garrafa de 1.5 litros, onde se realizaram testes para 1 e 0.5 litros de água. Em ambos, os resultados voltaram a não ser os desejados. Tanto para um como para o outro, dois *peltier*'s deveriam ser suficientes para se conseguir controlar a temperatura. E, no pior dos casos, mesmo considerando o fraco isolamento da garrafa, com 0.5 litros era de esperar que se notassem alterações. Contudo, verificou-se que a temperatura, em ambos os testes, aumentou (Gráficos 6 e 7).

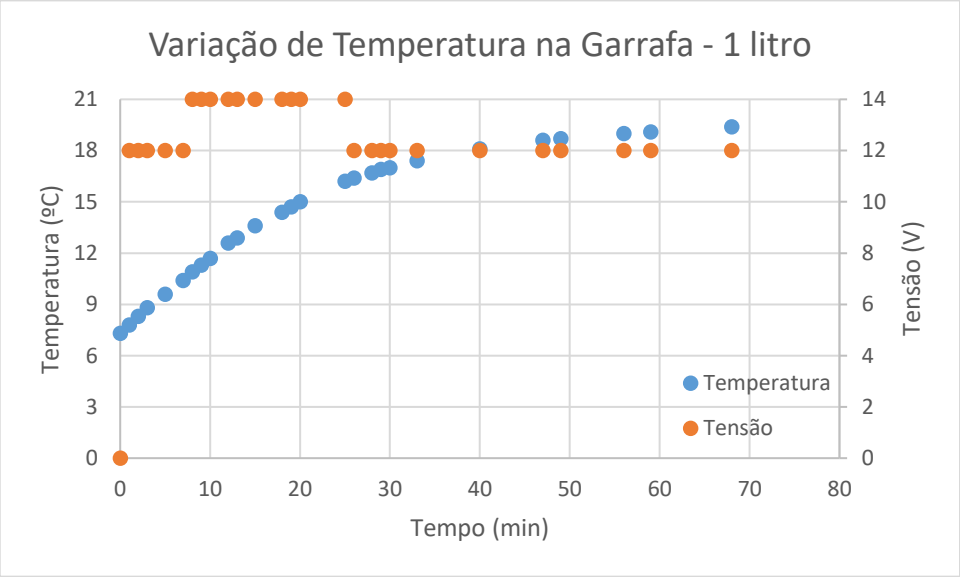


Gráfico 6 - Variação da temperatura de 1 litro de água na garrafa.

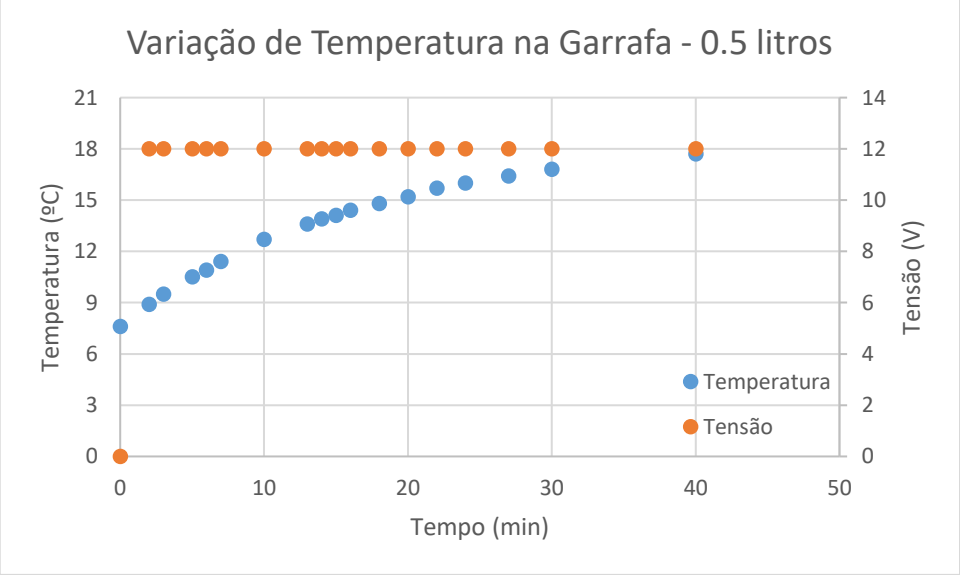


Gráfico 7 - Variação da temperatura de 0.5 litro de água na garrafa.

Em ambos os casos, mesmo com o dissipador maior, este não foi suficiente para dissipar todo o calor da face quente dos *peltier*'s.

Estranhamente, comparando esta situação no módulo de arrefecimento com o que acontece no módulo de aquecimento, percebeu-se que os dissipadores do módulo de aquecimento ficam mais frios que o bloco de arrefecimento no módulo de arrefecimento. A partir desta análise, percebeu-se que uma dissipação de calor mais eficiente deveria ser efetuada recorrendo a um líquido, por exemplo água a circular noutro bloco de arrefecimento junto à face quente de cada *peltier*, algo idêntico ao esquema da Figura 55.

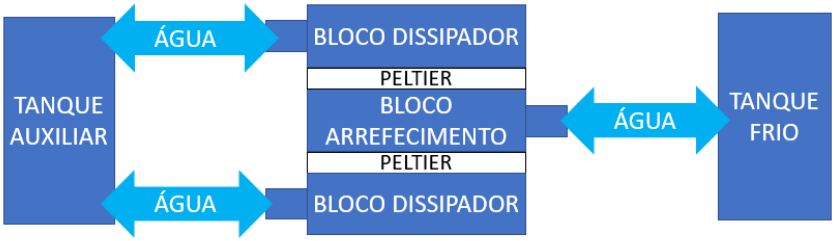


Figura 55 - Esquema de uma possível solução.

Embora esta alternativa possa ser uma possível solução para este problema, não chegou a ser implementada no sistema final. A não implementação desta solução deveu-se ao motivo de que mesmo não conseguindo controlar a temperatura, como acontece no módulo de aquecimento, este módulo de arrefecimento garante a possibilidade da realização dos testes de indução de dor. Isto acontece, pois, como se vê no Gráfico 8, mesmo quando se coloca o antebraço e a mão dentro do tanque frio (região a verde no gráfico), a temperatura do tanque permanece entre os 6ºC e os 8ºC. Este teste contribuiu para uma primeira validação do módulo de arrefecimento, pois o voluntário que o realizou esteve 4 minutos e 20 segundos com o antebraço dentro do tanque, tempo superior ao necessário para a realização dos testes de indução de dor. Neste mesmo teste foi possível ainda perceber que a variação da temperatura entre os 6.6ºC e os 7.28ºC demora 9 minutos e 5 segundos.

Numa outra medição (Gráfico 9), foi possível verificar que a duração da variação da temperatura entre os 6ºC e os 8ºC é de 41 minutos e 30 segundos. Em ambos os casos, o tempo é suficiente para a realização dos testes de indução de dor, dentro da variação máxima de temperatura pretendida.

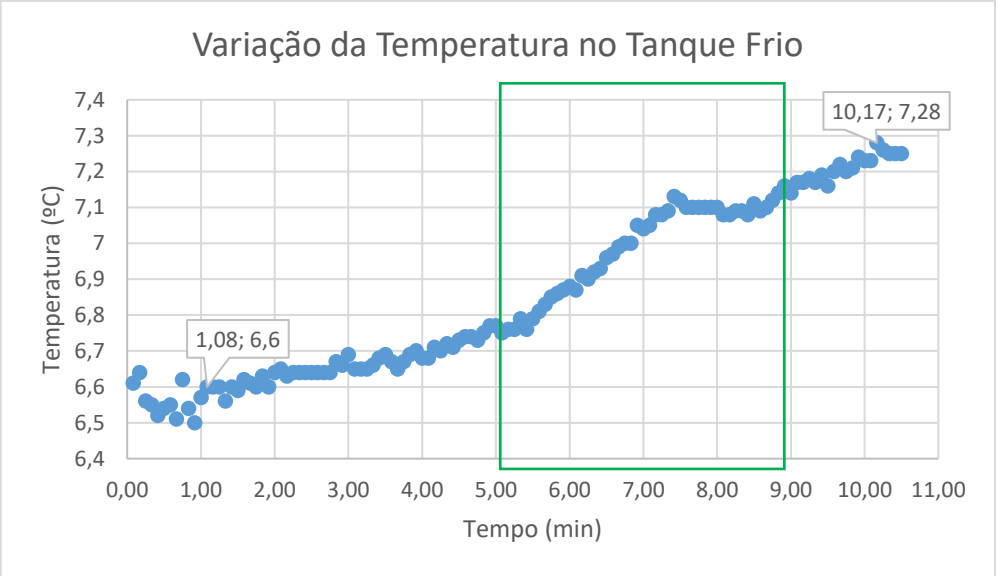


Gráfico 8 - Variação da temperatura no tanque frio, com a colocação do antebraço e mão.

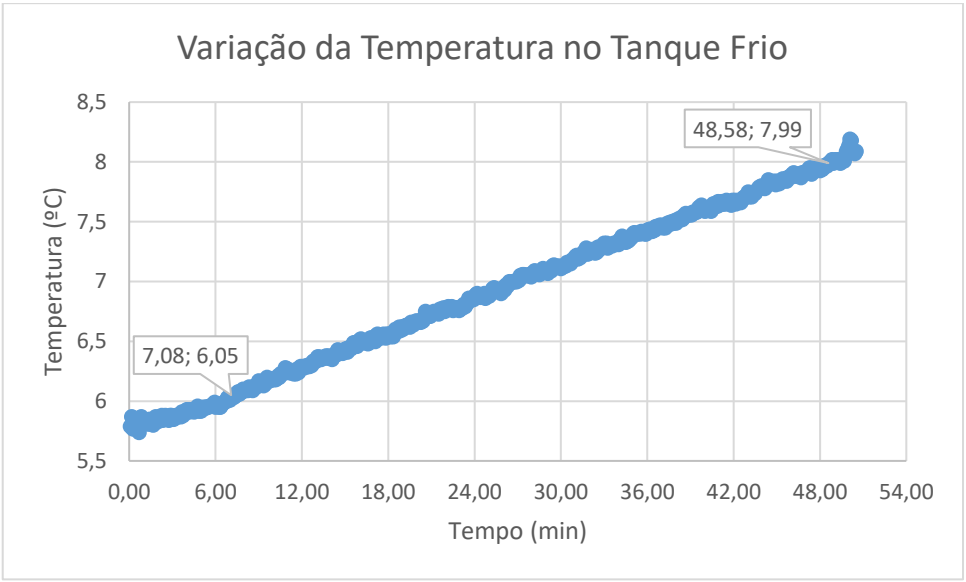


Gráfico 9 - Variação da temperatura no tanque frio, sem a colocação do antebraço.

Numa terceira fase de validação da funcionalidade do módulo de arrefecimento, para avaliar se o módulo de arrefecimento permite manter a temperatura dentro de valores aceitáveis para a realização da experiência e durante o tempo necessário para a realização da mesma (tempo máximo de 2 minutos), recorreu-se aos dados recolhidos durante o estudo de indução de dor num dos participantes voluntários (Gráfico 10). Neste caso, a temperatura manteve-se entre os 6.7ºC e os 8ºC, durante 34 minutos e 15 segundos.

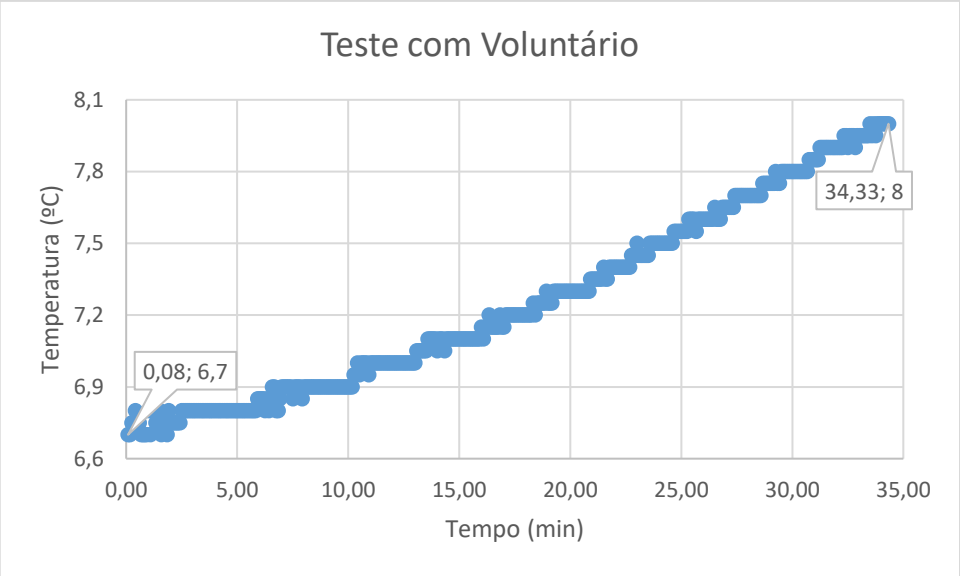


Gráfico 10 - Variação da temperatura no tanque frio durante o estudo com um voluntário.

6.3. Estudo de Indução de Dor

Como referido anteriormente, em 6.1 e 6.2, numa fase final, o funcionamento do sistema foi testado e validado com a utilização deste para a realização de um estudo de indução de dor (CPT). Na realização desta tarefa, são recolhidos, ao mesmo tempo que é induzida dor, alguns sinais fisiológicos, tais como: ECG (eletrocardiograma), SEMG (eletromiografia de superfície), EDA (atividade eletrodérmica) e PA (pressão arterial), com equipamento não invasivo.

Para a realização deste estudo o sistema foi montado numa sala do IEETA - Instituto de Engenharia Eletrónica e Informática de Aveiro (Figura 56), onde se realizou o estudo com cerca de 40 participantes voluntários.

Figura 56 - Sistema montado na sala utilizada para a realização do CPT.

Neste estudo, após um período inicial de recolha de sinais em estado de *baseline* (sem indução de dor, estando o participante em descanso sentado confortavelmente na cadeira), o participante inicia por mergulhar a mão e o antebraço, não dominantes, no tanque do módulo de aquecimento (37±1ºC), com o objetivo de se estabelecer um padrão entre todos os participantes (Figura 57).

Figura 57 - Participante com a mão e antebraço não dominante dentro do tanque de água quente.

Após dois minutos de estabilização, o participante retira a mão e o antebraço de dentro do tanque e de seguida (Figura 58), mergulha os mesmos no tanque de água fria (7±1ºC), por um período máximo de 2 minutos (podendo retirar antes do período máximo, caso a dor seja intolerável). Importa referir que é necessária a utilização de gelo antes da participação

de cada voluntário, para arrefecer a água até à temperatura desejada, e que o mesmo não se encontra no tanque aquando da colocação da mão e do antebraço do participante.

Figura 58 - Participante voluntário com a mão e antebraço colocado no tanque de água fria.

Após o tempo de exposição no tanque de água fria, o participante retira a mão e o antebraço do tanque frio e volta a colocá-los no tanque de água quente.

Durante todo este processo, os sinais fisiológicos são recolhidos (Figura 59): ECG de 1 lead (3 elétrodos colocados sobre a zona do peito e abdómen), EDA (recolhido na palma da mão não dominante), EMG de superfície (recolhido nos músculos trapézio e tríceps) e PA (em 3 momentos distintos).

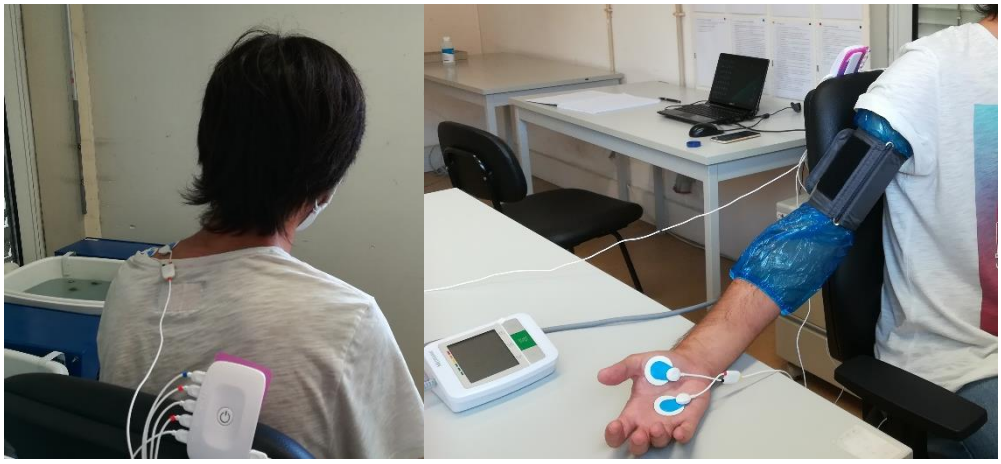


Figura 59 - Recolha dos sinais fisiológicos.

A experiência de dor e a experiência máxima de dor são também avaliadas, através de uma escala numérica, em quatro momentos distintos (antes do início da CPT, antes do fim da CPT, imediatamente a seguir ao fim da CPT e 5 minutos após finalização da CPT). Por fim, o sistema permite a visualização da temperatura da água nos tanques durante todo este processo, podendo auxiliar na análise e interpretação dos dados recolhidos no estudo.

Importa referir que este estudo de indução de dor não se enquadra no âmbito da realização desta dissertação de mestrado. Por este motivo, a análise deste estudo não será apresentada neste documento, no entanto alguns dos registos da variação da temperatura, apresentados (Gráficos 3 e 10), permitem verificar a utilidade e viabilidade do sistema.

Capítulo 7

7. Conclusão e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas após a finalização do sistema e possíveis melhoramentos do mesmo no futuro.

7.1. Conclusão

Esta dissertação de mestrado tinha como objetivo principal a construção de um sistema elétrico que permitisse a realização de CPT, com segurança para os participantes e atingindo temperaturas dentro do requerido.

Numa fase inicial houve uma revisão da literatura existente sobre estudos com CPT. Com a análise destes estudos foi possível conhecer melhor o sistema que permite a realização da CPT e perceber o que era pretendido com a construção deste sistema. Da análise dos diferentes estudos, percebeu-se que para a construção deste sistema, pretendia-se melhorar alguns aspetos referidos em estudos anteriores de forma a possibilitar um ajuste de acordo com as necessidades de diferentes estudos de indução de dor.

Estabelecida a idealização do sistema, foram escolhidos todos os componentes do mesmo, tendo-se desenhado, teoricamente, o seu funcionamento. Para esta idealização foram tidas em consideração todas as especificações necessárias, de forma que o sistema cumprisse todos os critérios que eram requeridos: circulação de água permanente, segurança do participante e controlo da temperatura durante o(s) estudo(s).

A circulação da água foi, provavelmente, o objetivo mais fácil de idealizar a sua solução, pelo menos teoricamente. Pois, para este sistema a circulação da água resumiu-se à utilização de quatro bombas pequenas, tradicionalmente conhecidas como bombas de aquário, fazendo a circulação em cada tanque. No entanto, a idealização foi muito mais fácil que a sua concretização, isto porque, aquando da perfuração das arcas (que seriam os tanques do sistema), para a colocação de toda a tubagem necessária para a circulação de água o seu isolamento revelou-se um trabalho bastante difícil e moroso. Este processo levou, inclusive, à compra de duas novas arcas e de testes com diversas colas isoladoras. Embora já fosse percetível que a escolha das bombas e da sua colocação resolveria o problema da circulação

de água, era essencial conseguir estancar os tanques, evitando fugas para o exterior ou fugas para o interior das paredes das arcas. Após alguns testes foi, finalmente, possível vedar os tanques e garantir que a circulação da água era homogénea.

No que diz respeito à segurança e conforto dos participantes, foi efetuada a construção de um apoio para a mão e para o antebraço, tornando a realização da tarefa mais confortável para os participantes. Outro aspeto importante a ter em conta para a segurança dos participantes era a utilização de gelo durante o estudo. O uso de gelo aquando a imersão da mão e do antebraço poderia ser perigoso, podendo causar queimaduras. Neste sistema o uso de gelo é apenas necessário para arrefecer a água, pois o módulo de arrefecimento consegue manter a temperatura da água entre os 6ºC e os 8ºC, durante o tempo necessário para a realização da tarefa. Outra situação a considerar, provavelmente a mais importante no que diz respeito a segurança, é a proteção dos circuitos elétricos de forma a evitar o contacto dos participantes ou da água com os mesmos. Para a resolução desta situação optou-se pela criação de caixas de proteção para cada módulo (aquecimento, arrefecimento e controlo), sendo a maioria dos circuitos elétricos transferidos para o módulo de controlo, com o qual os participantes não estão em contacto direto. Desta forma a segurança dos participantes é garantida.

Por fim, o controlo da temperatura dos tanques foi o objetivo proposto mais difícil e exigente, a nível temporal e laboral, de ser concretizado. Para o controlo da temperatura idealizou-se o uso de dois tanques, um para a água fria e outro para a água quente. Após uma procura de diferentes recipientes que fornecessem ao sistema uma boa capacidade de isolamento térmico, a escolha recaiu sobre duas arcas térmicas de 30 litros de capacidade. Outro aspeto a ter em consideração foi a escolha dos componentes elétricos que permitissem o aquecimento e o arrefecimento da água. Por uma questão de homogeneidade, optou-se pelo uso de módulos *peltier*, pois possuem uma face que aquece e outra face que arrefece devido ao efeito termoelétrico. Desta forma, o mesmo tipo de componentes poderia ser usado para ambos os casos. Para cada módulo foi calculado o número de *peltier*'s necessários, teoricamente, mas se no módulo de aquecimento o número de *peltier*'s foi suficiente, já para o módulo de arrefecimento percebeu-se que o número de *peltier*'s calculado traria um gasto enorme de energia elétrica. Para além disso tornou-se muito difícil de dissipar o calor das faces quentes dos *peltier*'s, o que impossibilitou o controlo da temperatura no tanque de água fria. Mesmo assim foi possível, através dos sensores idealizados e colocados nos dois

tanques, perceber que a água do tanque de arrefecimento permanecia entre os 6ºC e os 8ºC durante o tempo necessário para a realização da CPT. Os sensores implementados no módulo de aquecimento permitiram perceber que a temperatura desse tanque era regulada automaticamente, pelo sistema de controlo, mantendo a temperatura entre os 36ºC e os 38ºC, como pretendido. O controlo da temperatura é realizado no módulo de controlo do sistema, e possui circuitos elétricos que permitem receber o sinal dos sensores, serem lidos pelo microcontrolador e serem analisados e tratados pelo microcontrolador. Após o tratamento de dados no microcontrolador este envia um sinal para a DAC do circuito impresso, que por sua vez converte o sinal digital em tensão que é reencaminhada para o circuito impresso onde estão conectados os *peltier*'s, controlando assim a sua alimentação. Desta forma foi possível, no módulo de aquecimento, observar que o sistema controla a temperatura da água, mantendo esta a uma temperatura oscilante em torno do valor pretendido (37ºC).

Por fim, e em modo de conclusão final, considero que os objetivos foram cumpridos. Embora no módulo de arrefecimento não tenha sido possível controlar a temperatura de modo análogo ao módulo de aquecimento, é possível garantir que o tempo em que o tanque mantém a temperatura entre os valores pretendidos é suficiente para a utilização deste sistema na realização de estudos com CPT.

7.2. Trabalho Futuro

Embora o sistema construído seja funcional, este pode sofrer algumas alterações que possibilitem o seu aperfeiçoamento. Num trabalho futuro, a primeira alteração seria no módulo de arrefecimento, tentando, através da sugestão apresentada nesta dissertação ou de outra, controlar a temperatura do tanque da mesma forma que é controlada a temperatura no tanque do módulo de aquecimento. Neste caso, todo o sistema poderia manter-se, sendo alterado apenas o *kit* de arrefecimento e toda a tubagem adjacente.

Outra possibilidade de melhoria do sistema, seria a criação de uma comunicação com o utilizador mais aliciante e interativa, por exemplo, através da criação de uma aplicação onde se visse o gráfico da variação da temperatura dentro do tanque, ou de um esquema/imagem dos oito sensores, mostrando na imagem as temperaturas atuais em cada um deles.

Estas são algumas melhorias, de nível mais técnico. A nível visual, todo o sistema poderia ter uma imagem mais atrativa e igualmente funcional, por exemplo, caixas de

proteção com um melhor *design*, a montagem dos circuitos ser substituída por uma montagem menos arcaica, ou ainda o suporte para a mão e antebraço ser algo visualmente mais agradável. Contudo, estas alterações não invalidam as decisões tomadas, nem sequer a funcionalidade do sistema neste momento.

Anexos

A. Construção do Protótipo

Neste anexo é descrito todo o processo de montagem do sistema, sendo explicados todos os passos realizados para a finalização do sistema (montagem dos diferentes módulos e respetivos componentes).

a. Montagem do *Kit* de Aquecimento

Para se aquecer a água do tanque quente utiliza-se o *kit* de aquecimento.

A montagem do *kit* de aquecimento requer os elementos que estão apresentados na Tabela 24 e na Figura 60.

Material	Quantidades	Características
Bloco de Aquecimento	1	Dimensões: 0.040m×0.040m×0.012m;
Dissipador de Calor	2	Dimensões: 0.060m×0.045m×0.026m;
Massa Térmica		CT: >3.2W/m-K; R_T: <0.06ºC-in^2/W; ΔT: -50ºC a 180ºC;
Módulos *Peltier*	2	(Descrito em 2.4)
Parafusos de Rosca	2	Dimensões: 0.037m×0.003m (c×R)
Parafusos de Ponta	8	Dimensões: 0.020m×0.003m (c×R)
Ventoinhas	2	V_{CC}: 12V; I: 0.09A; Dimensões: 0.040m×0.040m×0.010m;

Tabela 24 - Material necessário para a montagem de um kit de aquecimento.

Figura 60 - Elementos do kit de aquecimento.

A montagem de cada *kit* é uma montagem simples. Primeiro espalha-se a massa térmica sobre a superfície inferior e superior do bloco de aquecimento. De seguida coloca-se os módulos *peltier* encostados às faces cobertas por massa térmica, tendo em atenção que a face do módulo *peltier* que aquece deve ser colocada junto ao bloco de aquecimento.

A terceira etapa consiste em colocar os dissipadores de calor junto às faces dos módulos *peltier* que arrefecem, previamente preenchidas com massa térmica, e com os parafusos unir todo o bloco. Para finalizar, colocam-se as ventoinhas sobre os dissipadores de calor com o auxílio de parafusos.

Desta forma, obtém-se o *kit* de aquecimento completo e devidamente montado (Figura 61).

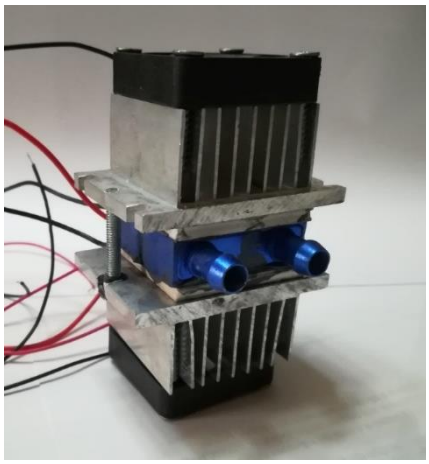


Figura 61 - Kit de aquecimento.

b. Montagem do *Kit* de Arrefecimento

Esta montagem sofreu algumas alterações. Inicialmente, estava previsto uma montagem idêntica à do *kit* de aquecimento, mas com cerca de 24 módulos *peltier* (4 kits de arrefecimento com 6 módulos *peltier* cada). Mais tarde, como descrito em 6.2, devido ao não correto funcionamento do sistema de arrefecimento, a montagem do sistema de arrefecimento requereu um novo *kit* de arrefecimento. Esse novo *kit* utiliza os elementos descritos na Tabela 25.

Material	Quantidades	Características
Bloco de Arrefecimento	1	Dimensões: 0.040m×0.040m×0.012m; d_{in}: 0.008m;
Braçadeiras Plásticas	3	
Dissipador de Calor	2	Dimensões: 0.150m×0.060m×0.025m
Massa Térmica	1	CT: >3.2W/m-K; R_T: <0.06ºC-in^2/W; ΔT: -50ºC a 180ºC;
Módulos *Peltier*	2	(Descrito em 2.4)
Ripa de Madeira	1	Dimensões: 0.150m×0.020m×0.020m

Tabela 25 - Material necessário para a montagem de um kit de arrefecimento.

Embora este *kit* tenha dimensões e elementos diferentes do *kit* de aquecimento, a sua montagem é idêntica, como se mostra na Figura 62.

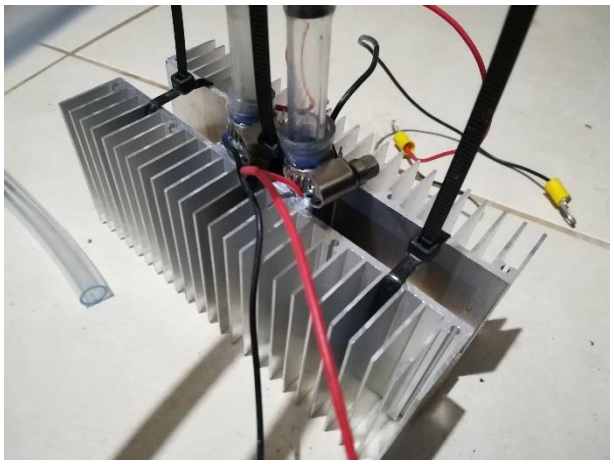


Figura 62 - Kit de arrefecimento.

Como se pode observar, neste caso, o *kit* de arrefecimento não tem as ventoinhas incorporadas. As ventoinhas que ajudam na dissipação do calor estarão fixas à caixa de proteção.

c. Montagem das Caixas de Proteção dos Módulos de Aquecimento e Arrefecimento

Este sistema possui circuitos elétricos com correntes elevadas, e para além disso os *kit*'s de arrefecimento dissipam temperaturas elevadas. Como ambos os casos podem causar danos ao ser humano, foram contruídas caixas de proteção para os dois módulos.

i. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Aquecimento

A caixa de proteção do módulo de aquecimento necessita dos componentes apresentados na Tabela 26:

Material	Quantidades	Características
Anilha de Aba Larga	10	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.011m;
Anilha de Pressão	4	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.006m;
Apoio no Tanque	2	Dimensões: 0.054m×0.045m×0.063m× 0.016m×0.002m (c_i×c_s×c_e×l×e);
Calços de Madeira	2	Dimensões: 0.040m×0.020m×0.018m;
Cola PVC	1	EN14680/EN14814
Cola Quente	1	
Parafusos de Rosca	4	Dimensões: 0.160m × 0.003m (c×R);
Parafusos de Ponta	2	Dimensões: 0.021m× 0.004m (c×R)
Porca Sextavada	4	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.006m;
PVC 3mm (Base Inferior/Superior)	2	Dimensões: 0.380m×0.345m×0.371m (B×b×a);
PVC 3mm (Lateral-Superior)	1	Dimensões: 0.380m×0.140m;
PVC 3mm (Lateral-Inferior)	1	Dimensões: 0.343m×0.140m;
PVC 3mm (Lateral)	2	Dimensões: 0.365m×0.140m;
PVC 3mm (Apoio)	4	Dimensões: 0.038m×0.038m×0.054m;
Rede 10mm×10mm (Superior)	1	Dimensões: 0.125m×0.068m;
Rede 10mm×10mm (Inferior)	1	Dimensões: 0.115m×0.069m;
Rede 10mm×10mm (Lateral)	2	Dimensões: 0.078m×0.076m;
Spray Azul	1	
Spray Primário	1	

Tabela 26 - Material utilizado para a construção da caixa de proteção do módulo de aquecimento.

Como se pode ver na Figura 63, a base inferior possui uma perfuração específica para permitir a passagem dos tubos, mangueiras e fios elétricos entre o tanque e o interior da caixa de proteção. A base superior e as laterais (Figura 64) serão perfuradas para permitir uma boa circulação de ar e para possibilitar a conexão elétrica entre o módulo de aquecimento e o módulo de controlo (Figura 65).

Figura 63 - Base inferior da caixa de proteção.

Figura 64 - Base superior e laterais da caixa de proteção.

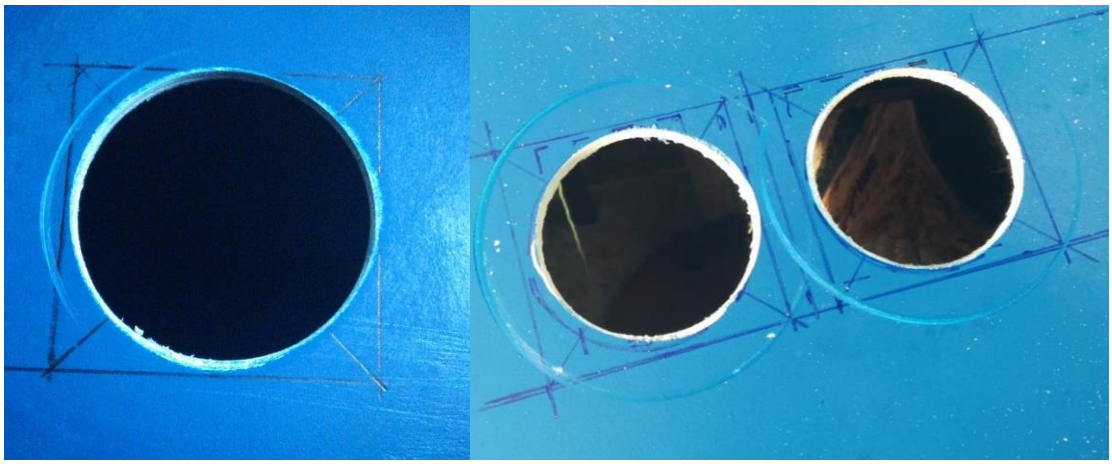


Figura 65 - Furação que permitirá a ventilação no interior da caixa de proteção.

A caixa de proteção é de montagem simples, dividida em cinco partes. A primeira etapa consiste em colar as faces laterais na base inferior e os cantos de apoio (Figura 66) aos parafusos. De seguida, são colocadas as redes de proteção das ventoinhas nos orifícios respetivos, com o auxílio de cola quente (Figura 67).

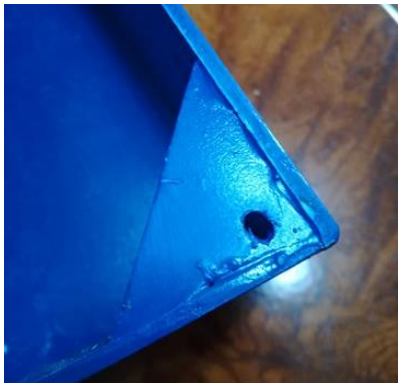


Figura 66 - Canto de apoio.

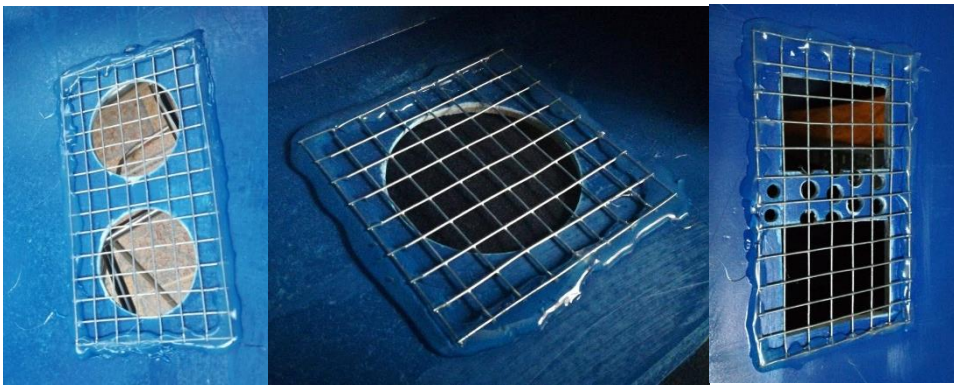


Figura 67 - Redes de proteção.

Na terceira etapa, por questões estéticas, a caixa é pintada. Na quarta parte colocam-se os calços de madeira e os apoios na base inferior. Por fim, na quinta e última etapa, unem-se as montagens anteriores usando parafusos (Figura 68).

Figura 68 - Caixa finalizada.

ii. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Arrefecimento

A caixa de proteção do módulo de arrefecimento teve uma montagem muito idêntica à caixa de proteção do módulo de aquecimento, apresentado no anexo A.c.i, necessitando dos elementos na Tabela 27.

Material	Quantidades	Características
Anilha de Aba Larga	10	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.011m;
Apoio no Tanque	2	Dimensões: 0.054m×0.045m×0.063m× 0.016m×0.002m (c_i×c_s×c_e×l×e);
Calços de Madeira	2	Dimensões: 0.040m×0.020m×0.018m;
Cola PVC	1	EN14680/EN14814
Cola Quente	1	
Parafusos (Pequenos)	8	Dimensões: 0.160m × 0.003m (c×R);
Parafusos de Ponta (Pequenos)	2	Dimensões: 0.021m× 0.004m (c×R)
Porca Sextavada	8	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.006m;
PVC 3mm (Base Inferior)	1	Dimensões: 0.415m×0.390m×0.375m (B×b×a);
PVC 3mm (Base Superior)	1	Dimensões: 0.415m×0.390m×0.375m (B×b×a);
PVC 3mm (Lateral-Superior)	1	Dimensões: 0.415m×0.150m;
PVC 3mm (Lateral-Inferior)	1	Dimensões: 0.390m×0.150m;
PVC 3mm (Lateral)	2	Dimensões: 0.363m×0.150m;
PVC 3mm (Apoio)	8	Dimensões: 0.032m×0.018m (b×a);
Rede 10mmx10mm (Lateral-Esquerda)	1	Dimensões: 0.080m×0.080m;
Rede 10mmx10mm (Frente)	1	Dimensões: 0.170m×0.070m;
Rede 10mmx10mm (Lateral-Direita)	1	Dimensões: 0.130m×0.130m;
Spray Azul	1	
Spray Primário	1	

Tabela 27 - Material utilizado para a construção da caixa de proteção do módulo de arrefecimento.

Embora a montagem seja muito idêntica, a perfuração é adequada às necessidades deste módulo.

Seguindo o mesmo critério utilizado para a montagem da caixa do módulo de aquecimento, chegou-se, assim, à caixa de proteção final deste módulo.

d. Montagem da Caixa de Proteção do Módulo de Controlo

O módulo de controlo possui a maioria dos componentes elétricos de maior tensão e corrente, por isso, é fundamental a existência de uma caixa de proteção. Para a construção da mesma utilizou-se o material apresentado na Tabela 28.

Material	**Quantidades**	**Características**
Anilha de Aba Larga	8	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.011m;
Niveladores	4	d_{ext}: 0.022m;
Cola PVC	1	EN14680/EN14814
Cola Quente	1	
Parafusos	8	Dimensões: 0.160m × 0.003m (c×R);
Porca Sextavada	8	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.006m;
PVC 3mm (Base Inferior/Superior)	2	Dimensões: 0.330m×0.330m
PVC 3mm (Lateral)	2	Dimensões: 0.33m×0.140m;
PVC 3mm (Lateral)	2	Dimensões: 0.324m×0.140m;
PVC 3mm (Apoio)	8	Dimensões: 0.032m×0.018m (b×a);
Rede 10mmx10mm (Superior)	1	Dimensões: 0.070m×0.080m;
Rede 10mmx10mm (Superior)	1	Dimensões: 0.330m×0.040m;
Rede 10mmx10mm (Frontal)	1	Dimensões: 0.330m×0.070m;
Spray Azul	1	
Spray Primário	1	

Tabela 28 - Material utilizado na elaboração da caixa de proteção do módulo de controlo.

A sua construção consiste, numa fase inicial, na colagem das faces laterais na base inferior (Figura 69).

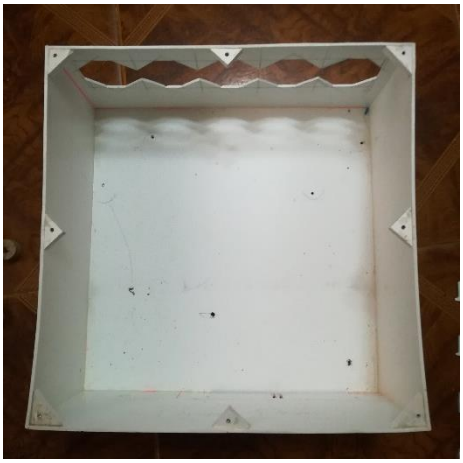


Figura 69 - Parte inferior da caixa de proteção.

Para a circulação de ar e para a alimentação deste módulo e dos outros dois módulos, foram abertos alguns orifícios como se observa nas Figuras 69 e 70 . Na Figura 69 também se podem ver os apoios já colados, apoios esses que permitirão o fecho correto da caixa.

Figura 70 - Alguns dos orifícios abertos na caixa de proteção.

Após a abertura de orifícios necessários são colocadas todas as redes de proteção nas aberturas destinadas a circulação de ar (Figura 71).

Figura 71 - Redes colocadas nos orifícios destinados para a circulação de ar.

Após estes passos, por questões estéticas, a caixa é pintada (Figura 72), terminando a construção com a fixação da tampa com parafusos (Figura 73).

Figura 72 - Parte inferior da caixa pintada.

Figura 73 - Caixa finalizada.

e. PCB's de Entrada/Saída dos Módulos

Aquando a montagem das caixas de proteção dos diferentes módulos, percebeu-se a necessidade da criação de circuitos que permitissem colocar os conectores de entrada e saída de cada módulo. Desta forma, recorreu-se, novamente, a circuitos impressos (PCB).

Usando novamente o *software* EAGLE, idealizou-se um circuito e respetivo esquemático do circuito impresso (Figura 74).

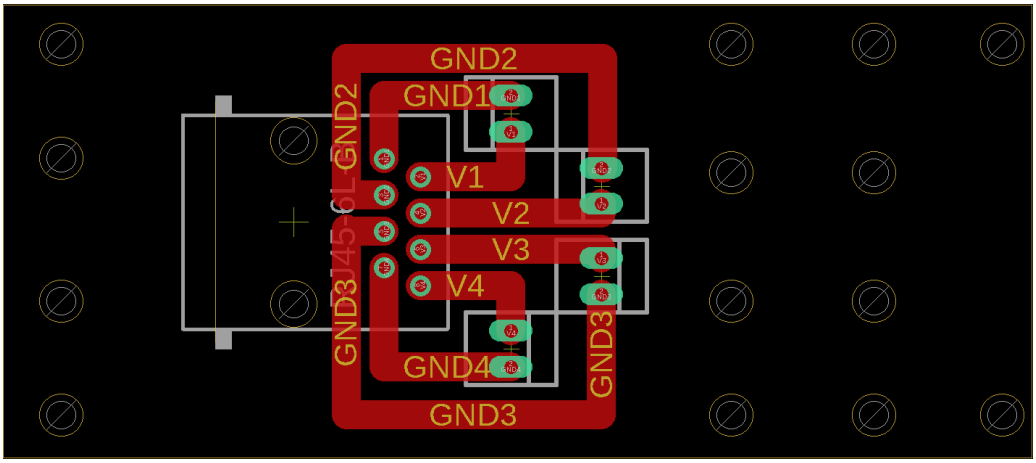


Figura 74 - Layout do PCB (EAGLE)

O circuito é muito simples, no entanto, tem como objetivo a fixação dos conectores necessários para interação entre os três módulos do sistema, que, como se pode ver na Figura 75, é extremamente necessária.

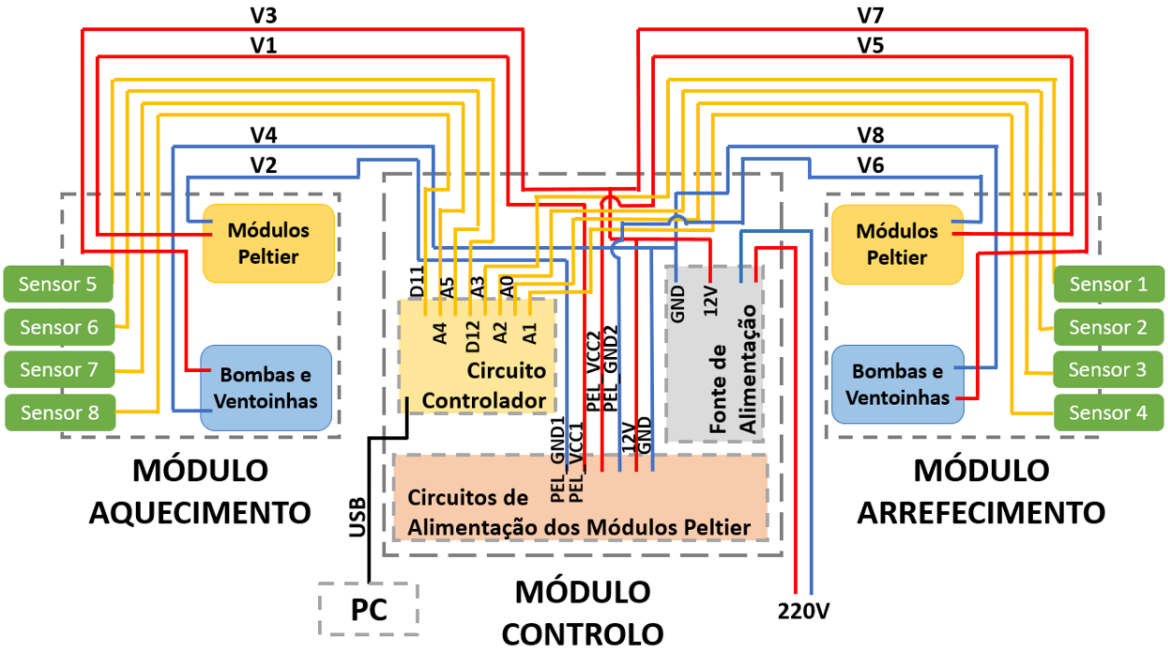


Figura 75 - Esquema do sistema.

O PCB idealizado (Figura 76) possui quatro conectores *molex* macho e um conector RJ45 fêmea, que permite a troca de informação relativa aos sensores de cada tanque e o

módulo de controlo. Para além disso, possui orifícios que permitem a conexão das alimentações necessárias para o funcionamento do módulo (Figura 77).

É importante referir que, embora o PCB seja igual para os diferentes módulos do sistema, de acordo com as necessidades de cada módulo, pode variar na utilização do número de orifícios, pois depende do número de módulos *peltier* utilizados em cada módulo.

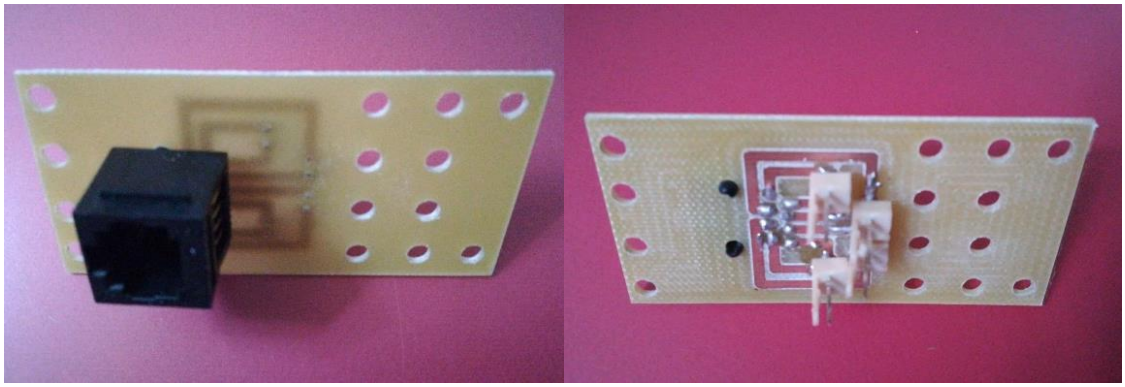


Figura 76 - PCB do circuito: face superior (esquerda) e inferior (direita).

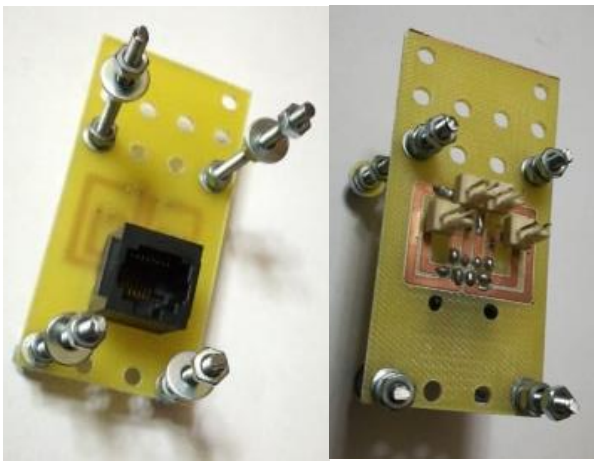


Figura 77 - PCB E/S usado no módulo de aquecimento.

f. Módulo de Aquecimento

No que diz respeito à construção do módulo de aquecimento foram necessários vários materiais, os quais são apresentados na Tabela 29.

Material	Quantidades	Características
Anilha Aba Curta	12	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.007m;
Anilha Aba Longa	5	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.009m;
Anilha de Pressão	17	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.005m;
Barão Roscado	4	Dimensões: 0.050m×0.003m (c×R)
Bombas	4	(descrito em 2.3)
Braçadeiras Inox	8	d: 0.008m – 0.014m
Braçadeiras Plásticas	2	
Caixa de Proteção	1	(descrito em A.c.i)
Circuito Controlador*	1	(descrito em 3.3)
Circuito E/S	1	(descrito em A.e)
Cola Araldite	1	ΔT: -30ºC a 80ºC
Cola e Veda	1	
Cola PVC	1	EN14680/EN14814
Engate Rápido 3/8	8	d_{int}: 0.010m
Fio Elétrico		d: 0,002m
Fio Elétrico		d: 0.005m
Fonte de Alimentação*	1	(descrito em 3.1.3.1.)
Kit Aquecimento	1	(descrito em 4.1.)
Manga Termoretrátil	1	d: 0.002m>0.001m 125ºC
Mangueira	2.5m	d_{int}: 0.008m; d_{ext}: 0.010m
Montagem dos Circuitos *Peltier**	1	(descrito em A.h.i)
Parafuso de Ponta (Pequeno)	8	Dimensões:0.012m×0.003m (c×R)
Porca Sextavada	24	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.007m;
Sensor de Temperatura	4	(descrito em 3.1.3.3)
Solda Estanho	1	60% Estanho; 40% Chumbo;
Suporte para o Braço	1	(descrito em 2.5)
Tanque	1	(descrito em 2.2)
Terminal Circular	4	
Torneira PVC	1	d_{int}: 0.008m
Tubo de Canalização (PVC) – L	22	d_{int}: 0.008m
Tubo de Canalização (PVC) – T	1	d_{int}: 0.008m

* Material comum, também, ao módulo de arrefecimento.

Tabela 29 - Materiais usados na montagem do módulo de aquecimento.

Inicialmente, furou-se o tanque e, de seguida, colocaram-se os engates rápidos, com a utilização de cola e veda e araldite, para eliminar eventuais fugas, como se pode ver nas Figuras 78 e 79. Ao mesmo tempo, foram abertos os buracos no tanque para se inserirem os sensores de temperatura e de seguida foram colados com cola araldite (Figura 80).

Figura 78 - Tanque com furação adequada para a colocação da canalização e dos sensores.

Figura 79 - Tanque com engates rápidos colocados.

Figura 80 - Tanque com os sensores já colocados.

Após o adequado tempo de espera para secagem das colas, testou-se o tanque, enchendo-o de água com o objetivo de despistar eventuais fugas. De seguida, montou-se a parte inferior da caixa de proteção, Figura 81, onde assentam todos os outros elementos necessários (bombas e *kit* aquecimento).

A partir deste momento, iniciou-se a aplicação das bombas, respetivas mangueiras, e do *kit* de aquecimento, como se pode ver na Figura 82.

Figura 81 - Tanque com a base da caixa de proteção já colocada.

Figura 82 - Tanque com as bombas, mangueiras e o kit de aquecimento aplicados.

Por último, juntou-se à caixa de proteção o circuito E/S (Figuras 82 e 83) e, de seguida, fechou-se a caixa de proteção do módulo de aquecimento (Figura 84), após efetuar todas as ligações elétricas necessárias (Figura 83).

Figura 83 - Circuito E/S inserido na caixa de proteção.

Figura 84 - Módulo de Aquecimento finalizado.

Por razões de segurança, a montagem dos circuitos elétricos deste módulo será feita no módulo de controlo, para evitar o contacto da água com a eletricidade. Também aí será explicada a sua montagem (anexo A.h.i).

g. Módulo de Arrefecimento

Na construção do módulo de arrefecimento, os materiais necessários foram muito idênticos aos necessários para o módulo de aquecimento, como se pode ver na Tabela 30.

Material	Quantidades	Características
Anilha Aba Curta	16	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.007m;
Anilha de Pressão	16	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.005m;
Barão Roscado	4	Dimensões: 0.050m×0.003m (c×R)
Bombas	4	(descrito em 2.3)
Braçadeiras Inox	8	d: 0.008m – 0.014m
Braçadeiras Plásticas	2	
Caixa de Proteção	1	(descrito no anexo A.c.ii)
Circuito Controlador*	1	(descrito em 3.3)
Circuito E/S	1	(descrito no anexo A.e)
Cola Araldite	1	ΔT: -30ºC a 80ºC
Cola e Veda	1	
Cola PVC	1	EN14680/EN14814
Engate Rápido 3/8	8	d_{int}: 0.010m
Fio Elétrico		d: 0.002m
Fio Elétrico		d: 0.0005m
Fonte de Alimentação*	1	(descrito em 3.1.3.1)
Kit Arrefecimento	1	(descrito no anexo A.b)
Manga Termoretrátil	1	d: 0.002m>0.001m 125ºC
Mangueira	3m	d_{int}: 0.008m; d_{ext}: 0.010m
Montagem de Circuitos *Peltier**	1	(descrito no anexo A.h.i)
Parafuso de Ponta (Médios)	9	Dimensões:0.012m×0.003m (c×R)
Parafuso de Ponta (Pequenos)	2	Dimensões:0.009m×0.004m (c×R)
Parafuso de Ponta (Grandes)	1	Dimensões:0.028m×0.003m (c×R)
Porca Sextavada	24	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.007m;
Sensor de Temperatura	4	(descrito em 3.1.3.3)
Solda Estanho	1	60% Estanho; 40% Chumbo;
Suporte para o Braço	1	(descrito em 2.5)
Tanque	1	(descrito em 2.2)
Terminal Circular	4	
Torneira PVC	1	d_{int}: 0.008m
Tubo de Canalização (PVC) – L	22	d_{int}: 0.008m
Tubo de Canalização (PVC) – T	1	d_{int}: 0.008m
Ventoinha Grande	1	Dimensões: 0.120m×0.120m V: 12V; I: 0.28 A
Ventoinha Pequena	1	Dimensões: 0.080m×0.080m V: 12V; I: 0.20 A

*Material comum, também, ao módulo de aquecimento.

Tabela 30 - Materiais usados na montagem do módulo de arrefecimento.

A construção do módulo de arrefecimento é idêntica à anterior descrita para o módulo de aquecimento. A colocação do *kit* de arrefecimento é ligeiramente diferente da colocação do *kit* de aquecimento, isto porque as suas dimensões e características são distintas, contudo toda a montagem do sistema é igual, como se pode ver nas Figuras 85 e 86.

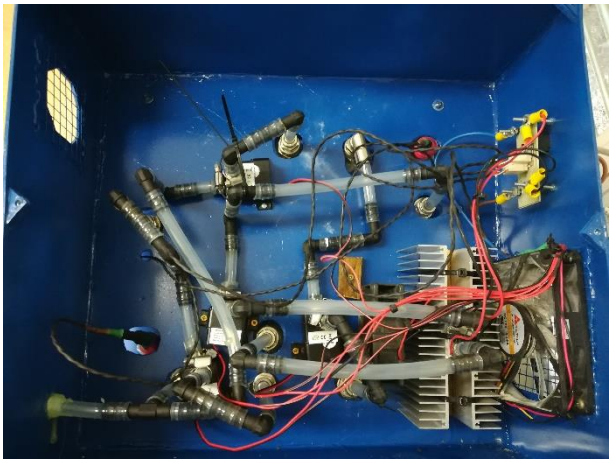


Figura 85 - Módulo de Arrefecimento.

Figura 86 - Módulo de Arrefecimento completo.

Tal como no módulo de aquecimento, a montagem dos circuitos elétricos de alimentação dos módulos *peltier* e a sua explicação será feita no módulo de controlo (anexo A.h.i).

h. Módulo de Controlo

Neste módulo de controlo foram montados os circuitos de alimentação dos módulos *peltier* que fazem parte dos módulos de aquecimento e arrefecimento. Embora não pertençam ao módulo de controlo, por razões de segurança, serão aqui colocados, evitando assim o contacto da água com os circuitos elétricos.

Para além destes circuitos de alimentação dos módulos *peltier*, neste módulo de controlo foi também montado o circuito controlador.

i. Montagem dos Circuitos de Alimentação dos Módulos *Peltier*

Os circuitos descritos em 3.1.3.2 e 3.2.3.2, e referidos nos anexos A.f e A.g são alimentados recorrendo a uma montagem simples, como descrita de seguida. Para essa montagem é necessário o material da Tabela 31.

Material	Quantidades	Características
Anilha Aba Curta	4	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.009m;
Anilha Aba Longa	12	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.012m;
Anilha de Pressão	12	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.007m;
Barra de Cobre	2	Dimensões: 0.252m×0.015m×0.003m (c×l×e);
Circuito *Peltier*	4	(descrito em 3.1.3.2)
Dissipador de Calor	2	Dimensões: 0.150m×0.060m×0.025m;
Massa Térmica	1	CT: >3.2W/m-K; R_T: <0.06ºC-in^2/W; ΔT: -50ºC a 180ºC;
Parafuso de Ponta (Médio)	4	Dimensões: 0.021m× 0.004m (c×R)
Parafuso de Rosca (Grande)	8	Dimensões: 0.030m× 0.004m (c×R)
Parafuso de Rosca (Médio)	4	Dimensões: 0.022m×0.004m (c×R)
Parafuso de Rosca (Pequeno)	4	Dimensões: 0.022m×0.003m (c×R)
Porca Sextavada	4	d_{int}: 0.003m; d_{ext}: 0.007m;
Porca Sextavada	12	d_{int}: 0.004m; d_{ext}: 0.007m;
Espaçador Baseado em Rolhas de Cortiça	6	Dimensões: 0.008m×0.023m (c×d)
Espaçador Baseado em Rolhas de Cortiça	12	Dimensões: 0.020m×0.023m (c×d)

Tabela 31 - Material necessário para a montagem dos circuitos de alimentação dos módulos peltier.

A escolha da utilização de espaçadores cortados a partir de rolhas de cortiça deve-se à inexistência de condutividade térmica e elétrica neste material. O primeiro passo desta montagem consiste na furação das barras de cobre e posteriormente na fixação destas a duas rolhas de cortiça (Figura 87). A utilização de barras de cobre deve-se às elevadas correntes que, como vimos, podem percorrer o circuito.

De seguida, são colocados em cada circuito *peltier* três parafusos de fixação que permitirão a ligação dos módulos *peltier* e a alimentação dos circuitos *peltier*, bem como a fixação dos circuitos nas barras de cobre (Figuras 88 e 89).

Figura 87 - Barras de cobre com rolhas de cortiça.

Figura 88 - Circuito com espaçador de cortiça colocado.

Figura 89 - Circuitos montados nas barras de ferro.

O último passo consiste na colocação dos dissipadores de calor dos *mosfet*'s (Figura 90).

Figura 90 - Circuitos com os dissipadores de calor dos mosfet's.

Esta montagem é utilizada para todos os circuitos *peltier* do sistema (módulo de aquecimento e arrefecimento). A montagem é composta por quatro circuitos *peltier*, sendo que um dos circuitos corresponde ao módulo de aquecimento e os restantes ao módulo de arrefecimento.

ii. Montagem do Circuito Controlador

O circuito controlador tem uma montagem relativamente simples, que permitirá a sua fixação à caixa de proteção do módulo de controlo. O material utilizado é o referido na Tabela 32.

Material	Quantidades	Características
Circuito Controlador	1	(descrito em 3.3)
Parafusos de Ponta	3	Dimensões: 0.030m× 0.003m (c×R)
Espaçadores Baseados em Rolhas de Cortiça	3	Dimensões: 0.037m×0.023m (c×d)

Tabela 32 - Componentes necessários para a montagem do circuito controlador no módulo de controlo.

A montagem resume-se à colocação de três pontos de apoio (espaçadores de cortiça) no circuito de controlo (Figura 91).

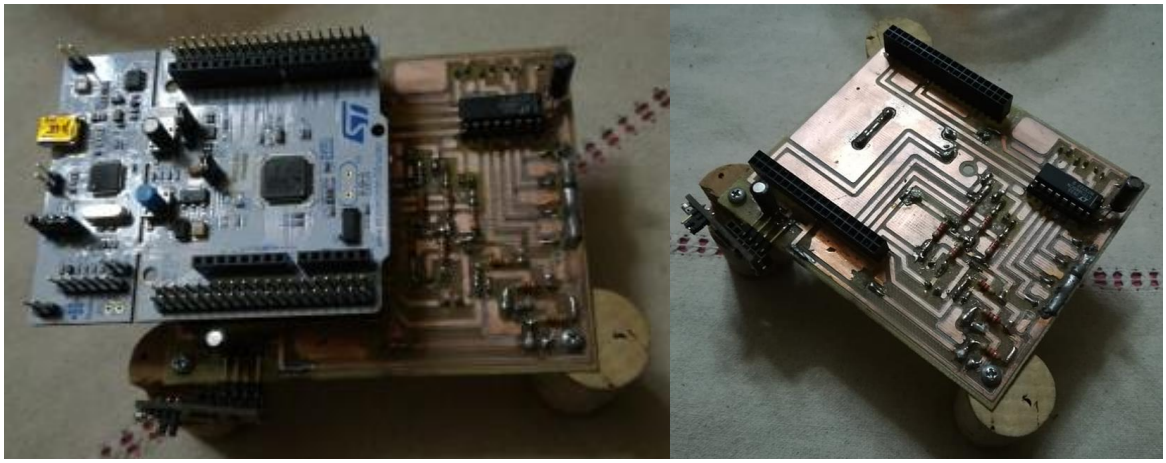


Figura 91 - Circuito controlador com as rolhas de suporte.

iii. Finalização da Montagem do Módulo de Controlo

A finalização da montagem do módulo de controlo é o processo que termina toda a montagem deste módulo, onde todos os circuitos elétricos são colocados. Esta montagem final necessita do material apresentado na Tabela 33.

Material	Quantidades	Características
Adaptador	1	Micro USB (macho) – USB (fêmea)
Fonte de Alimentação	1	(descrito em 3.4)
Montagem do Circuito Controlador	1	(descrito no anexo A.h.ii)
Parafuso de Ponta (Médio)	17	Dimensões: 0.019m× 0.003m (c×R)
Parafuso de Ponta (Pequeno)	3	Dimensões: 0.009m× 0.004m (c×R)
Montagem dos Circuitos *Peltier*	1	(descrito no anexo A.h.i)
Cabo de 2 Fios	1	Dimensões: 1m× 0.002m (c×d)
Caixa de Proteção	1	(descrito no anexo A.d)
Circuito E/S	2	(descrito no anexo A.e)
Terminal Circular	20	
Ventoinhas	5	Dimensões: 0.060m×0.060m V: 12V; I: 0,18 A

Tabela 33 - Material utilizado na finalização da montagem do módulo de controlo.

A primeira etapa da montagem do módulo de controlo resume-se à fixação dos componentes elétricos do sistema na base da caixa de proteção deste módulo.

Numa segunda parte deste processo, são fixados os circuitos E/S e as ventoinhas à caixa de proteção. Numa última fase é finalizado todo este processo com a ligação de todos os circuitos e a vedação da caixa de proteção (Figuras 92, 93, 94 e 95).

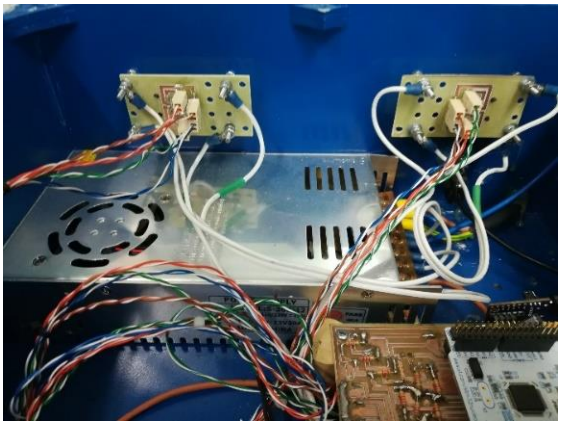


Figura 92 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo.

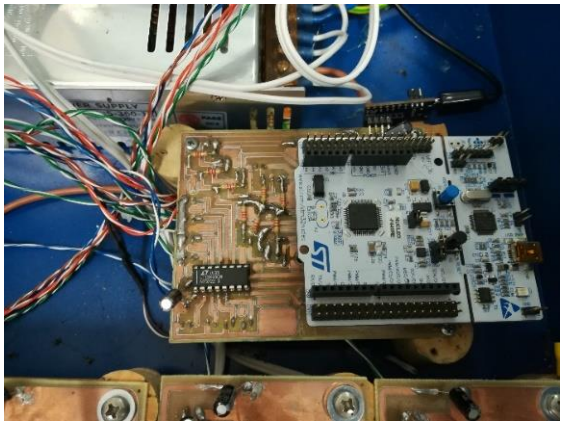


Figura 93 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo.

Figura 94 - Detalhes do interior do Módulo de Controlo.

Figura 95 - Montagem completa do Módulo de Controlo.

Referências

[1] A. Streff, L. Kuehl, G. Michaux e F. Anton, "Differential physiological effects during tonic painful hand immersion tests using hot and ice water," *European Journal of Pain,* vol. 14, pp. 266-272, 2010.

[2] E. L. Santarcangelo, G. Paoletti, I. Chiavacci, C. Palombo, G. Carli e M. Varanini, "Cognitive Modulation of Psychophysical, Respiratory and Autonomic Responses to Cold Pressor Test," *PLoS ONE,* vol. 8, nº 10, 2013.

[3] D. C. Chambers, 6 outubro 2015. [Online]. Available: https://twitter.com/DrCChambers/status/651334583988920320/photo/1. [Acedido em 6 março 2021].

[4] IUPUI Pain Research Laboratory, "Current Studies," IUPUI Pain Research Laboratory, 2020. [Online]. Available: https://www.iupuipainlab.com/current-studies. [Acedido em 6 março 2021].

[5] Northern Arizona University, "Cardiovascular Regulation Laboratory," Sara Jarvis, [Online]. Available: https://nau.edu/biological-sciences/cardiovascular-regulation-laboratory/. [Acedido em 6 março 2021].

[6] American Heart Association, "Cold pressor pain tolerance test," [Online]. Available: https://newsroom.heart.org/file?fid=5853fa922cfac204863a3448. [Acedido em 6 março 2021].

[7] Healthskills, "DON'T WORRY, BE HAPPY: COULD OPTIMISM COUNTERACT NEGATIVE EFFECTS OF PAIN?," 2014. [Online]. Available: https://healthskills.wordpress.com/2014/02/24/dont-worry-be-happy-could-optimism-counteract-negative-effects-of-pain/. [Acedido em 6 março 2021].

[8] E. A. Hines e G. E. Brown, "The cold pressor test for measuring the reactibility of the blood pressure: Data concerning 571 normal and hypertensive subjects.," *American Heart Journal,* vol. 11, nº 1, pp. 1-9, 1936.

[9] L. A. Mitchell, R. A. MacDonald e E. E. Brodie, "Temperature and the cold pressor test," *The Journal of Pain,* vol. 5, nº 4, pp. 233-237, 2004.

[10] W. Lovallo, "The Cold Pressor Test and Autonomic Function: A Review and Integration," *Psychophysiology,* vol. 12, nº 13, pp. 268-282, 1975.

[11] M. D. Douglas L. Wood, M. D. Sheldon G. Sheps, P. D. Lila R. Elveback e M. D. Alexander Schirger, "Cold Pressor Test as a Predictor of Hypertension," *Hypertension,* vol. 6, pp. 301-306, 1984.

[12] A. Peckerman, B. E. Hurwitz, P. G. Saab, . M. M. Llabre, P. M. McCabe e N. Schneiderman, "Stimulus dimensions of the cold pressor test and the associated patterns of cardiovascular response," *Psychophysiology,* vol. 31, nº 3, pp. 282-290, 1994.

[13] C. L. Baeyer, T. Piira, C. T. Chambers, M. Trapanotto e L. K. Zeltzer, "Guidelines for the Cold Pressor Task as an Experimental Pain Stimulus for Use With Children," *The Journal of Pain,* vol. 6, nº 4, pp. 218-227, 2005.

[14] L. Schwabe, L. Haddad e H. Schachinger, "HPA axis activation by a socially evaluated cold-pressor test," *Psychoneuroendocrinology,* vol. 33, pp. 890-895, 2008.

[15] G. J. S. Hollin e S. W. G. Derbyshire, “Cold Pressor Pain Reduces Phobic Fear But Fear Does Not Reduce Pain,” *The Journal of Pain,* vol. 10, nº 10, pp. 1058-1064, 2009.

[16] K. A. Birnie, M. Noel, C. T. Chambers, C. L. Baeyer e C. V. Fernandez, “The Cold Pressor Task: Is it an Ethically Acceptable Pain Research Method in Children?,” *Journal of Pediatric Psychology,* vol. 36, nº 10, pp. 1071-1081, 2011.

[17] M. J. Oaten, R. J. Stevenson e T. I. Case, “The effect of disgust on pain sensitivity,” *Physiology & Behavior,* vol. 138, pp. 107-112, 2015.

[18] A. Chwalczynska, K. Gruszka, I. Calkosinski e K. A. Sobiech, “Thermovision Analysis Changes of Human Hand Surface Temperature in Cold Pressor Test,” *Hindawi Publishing Corporation, BioMed Research International,* vol. 2015, nº 783642, p. 5, 2015.

[19] Plastimar, “EPS - Propriedades Físicas do EPS,” 2011. [Online]. Available: http://www.plastimar.pt/index.php?id=61. [Acedido em 20 janeiro 2019].

[20] J. J. A. Giner, “Medida de Parámetros Termoeléctricos en un Sistema Constituido por Dispositivos Peltier Seebeck,” Vilanova i la Geltrú, 2013.

[21] Projeto Garagem, “Cooler com peltier para resfriamento de bebidas,” 23 outubro 2015. [Online]. Available: https://projetogaragem.wordpress.com/2015/10/23/cooler-com-peltier-para-resfriamento-de-bebidas/. [Acedido em 27 fevereiro 2019].

[22] Z. Luo, “A Simple Method to Estimate the Physical Characteristics of a Thermoelectric Cooler from Vendor Datasheets,” *TECs,* vol. 14, nº 3, 2008.

[23] PeltierModules.com, “Peltier Thermoelectric Cooling Modules,” [Online]. Available: http://peltiermodules.com/peltier.datasheet/Peltier_Modules.pdf. [Acedido em 27 janeiro 2019].

[24] Ponto da Eletrônica, “PASTILHA PELTIER TEC1-12707 40X40,” [Online]. Available: https://www.pontodaeletronica.com.br/Produto-PRODUTOS-Arduino--Raspberry-PASTILHA-PELTIER-TEC1-12707-40X40-versao-15438-15438.aspx. [Acedido em janeiro 2019].

[25] D. Fiala, “Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort,” Leicester, 1998.

[26] R. Carneiro e M. V. Heitor, Activa&Multimédia - Ciências Experimentais, vol. 3, Lexicultural, 2004, p. 56.

[27] B. D. Bandeira, “Análise das Trocas de Calor Realizadas entre o Corpo Humano e o Ambiente: Estudos de Caso para uma Pessoa Realizando Atividade Física,” Rio de Janeiro, 2016.

[28] N. Wang, J. Ma, D. Jin e B. Yu, “Hindawi, BioMed Research International,” *A Special Golden Curve in Human Upper Limbs’Length Proportion: A Functional Partition Which Is Different from Anatomy,* vol. 2017, p. 6, 2017.

[29] D. Fiala, K. Lomas e M. Stohrer, “A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system,” *Journal of Appl Physiol,* vol. 87, nº 5, pp. 1957-1972, 1999.

[30] Texas Instruments, “Driving a Peltier Element (TEC): Efficiency and Aging,” 2019-2020.

[31] The CircuitCalculator.com Blog, “PCB Trace Width Calculator,” 31 janeiro 2006. [Online]. Available: http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/. [Acedido em 23 outubro 2018].

[32] Internacional Rectifier, “IRLI540N - Datasheet,” 1998.

[33] ST, “UM1724 - User manual - STM32 Nucleo-64 boards (MB1136),” 2020.

[34] STMicroelectronics, “STM32F446xC/E,” 2016.

[35] ST, “LM135-LM235-LM335,” 2008.

[36] Linear Technology, “LTC1665/LTC1660,” 1999.

[37] FTDI Chip, “LC231X MODULE DATASHEET,” 2017.

[38] MBED, “NUCLEO-F446RE,” [Online]. Available: https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F446RE/. [Acedido em 30 maio 2019].

[39] Metric Conversions, “Metric Conversions,” 2018. [Online]. Available: https://www.metric-conversions.org/pt/temperatura/kelvin-em-celsius.htm. [Acedido em 14 Novembro 2019].