



Universidade de Aveiro Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e  
2016 Informática

**RICARDO  
FIGUEIREDO REIS**

**SISTEMA DE AQUECIMENTO VESTÍVEL  
INTELIGENTE PARA AMBIENTES EXTREMOS**

**SMART WEARABLE HEATING SYSTEM FOR  
EXTREME ENVIRONMENTS**





**RICARDO  
FIGUEIREDO REIS**

**SISTEMA DE AQUECIMENTO VESTÍVEL  
INTELIGENTE PARA AMBIENTES EXTREMOS**

**SMART WEARABLE HEATING SYSTEM FOR  
EXTREME ENVIRONMENTS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Doutor Dinis Gomes de Magalhães dos Santos, Professor Catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e coorientada pelo Mestre David Paulo Torres Macário, Especialista da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho a todos aqueles que me acompanharam ao longo deste percurso.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves**  
Professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da  
Universidade de Aveiro

**Prof. Doutora Luísa Rita Brites Sanches Salvado**  
Professora auxiliar do Departamento de Ciência e Tecnologia Têxtil da Universidade da Beira  
Interior

**Mestre David Paulo Torres Macário**  
Diretor de Inovação da Heliotextil - Etiquetas e Passamanarias S.A.





## **agradecimentos**

Agradeço à minha família por todo o apoio demonstrado das mais variadas formas, sem eles isto não seria possível.

À minha namorada, Ana Tavares, pela compreensão demonstrada ao longo destes cinco anos de formatura, que por vezes foram tempos de distância.

Ao meu orientador, Doutor Dinis Gomes de Magalhães Santos, por me ter dado todas as condições de trabalho necessárias para o decorrer do projeto.

Ao Eng.º David Paulo Torres Macário, pela disponibilidade demonstrada e pelos conhecimentos e ideias partilhadas que me permitiram evoluir.

Ao Joel Flávio, por ser o meu parceiro durante a minha formação académica, permitindo-me ultrapassar obstáculos que sem ele não seria capaz.

Ao Sr. Pereira, por proporcionar o seu sentido de humor enquanto se pediam os componentes e os materiais do armazém.

Ao Paulo Gonçalves, pela disponibilidade e ajuda ao soldar os componentes nas placas de circuito impresso.

À Universidade de Aveiro e ao Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática, que me proporcionaram o melhor ambiente de trabalho.

A todos os colegas de curso com quem me cruzei, que, por pouco que fosse, influenciaram o meu percurso académico.

Muito obrigado!



**palavras-chave**

Aquecimento, baterias, computadores vestíveis, controlo de temperatura, sensores de temperatura, sistemas embutidos, tecnologia têxtil.

**resumo**

Trabalhadores, militares e desportistas são alguns exemplos de pessoas que, devido à sua ocupação, poderão estar expostos a temperaturas extremamente baixas. Para estes, o uso de um número significativo de camadas de roupa ou de materiais especiais é fundamental para se protegerem e aquecerem. Assim, têxteis normais poderão não ser suficientes para sobreviver a estes ambientes extremos, sendo necessária alguma fonte de calor externa. Neste projeto desenvolve-se um sistema de aquecimento para produtos têxteis baseado em bandas de aquecimento inovadoras experimentais realizadas pela Heliotextil. Foca-se no desenvolvimento de uma fonte de alimentação adequada, recarregável, com dimensões reduzidas e que possa ser incorporada em produtos têxteis. O sistema, baseado num microcontrolador, possui uma interface de seleção de modo de funcionamento, sensores de temperatura para controlo em malha fechada e um indicador de estado da bateria bem como um circuito de carga da bateria. O equipamento possui um módulo Bluetooth que permite a comunicação com um *smartphone* através de uma aplicação Android criada, possibilitando a indicação da temperatura desejada bem como das temperaturas medidas pelos sensores. No fim do trabalho, com a criação de uma caixa com as medidas mínimas suficientes para a acomodação dos circuitos realizados, através de um software de desenvolvimento 3D, foi alcançado um protótipo funcional que posteriormente foi submetido a vários testes de forma a avaliar o seu desempenho.



**keywords**

Heating, batteries, wearable computers, temperature control, temperature sensors, embedded systems, textile technology.

**abstract**

Workers, military and sportspeople are some examples of people who, due to their occupation, may be exposed to extremely low temperatures. For these, the use of a significant number of clothing layers or special materials is essential to protect and warm themselves. Thus, normal textiles may not be enough to survive to these extreme environments, being necessary some external heat source. In this project is developed a heating system for textile products based on experimental innovative heating bands performed by Heliotextil. Focuses on the development of a suitable power supply, rechargeable, with small dimensions that can be incorporated into textiles products. The system, based on a microcontroller, has an operating mode selection interface, temperature sensors for closed-loop control and a battery status indicator as well as a battery charging circuit. The device has a Bluetooth module that allows communication with a smartphone trough a created Android application, making possible the desired temperature indication as well as the temperatures measured by the sensors. In the end of the work, with the creation of a box with minimum and sufficient measures for the accommodation of made circuits, through a 3D development software, was achieved a functional prototype that was subsequently subjected to various tests to assess their performance.



# Índice

Índice de Figuras .....	i
Índice de Tabelas.....	iii
Lista de Acrónimos .....	iv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação .....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Metodologia.....	3
1.5 Organização da Dissertação .....	4
2 Estado da Arte .....	5
2.1 Bandas de Aquecimento .....	5
2.2 Sistemas Wearable.....	8
2.3 Vestuário Aquecido .....	10
2.4 Análise Crítica de Diferentes Sistemas .....	11
3 Arquitetura do Sistema .....	13
3.1 Tipos de Bateria.....	14
3.2 Formas de Carregamento das Baterias.....	19
3.3 Step-Up/Boost Converters .....	20
3.4 Microcontroladores.....	22
3.5 Sensores de Temperatura .....	24
3.6 Controladores de Temperatura.....	27
3.7 Sistemas de Comunicação Sem Fios – Bluetooth .....	30
4 Hardware .....	31
4.1 Carregador da Bateria .....	31

4.2	Step-Up/Boost Converter.....	32
4.3	Arduino .....	34
4.4	Termístora.....	35
4.5	Medir Estado da Bateria.....	36
4.6	Seletor de Função.....	37
4.7	Transístora de Potência.....	38
4.8	Sistema de Comunicação Sem Fios .....	39
5	Software .....	41
5.1	Arduino .....	41
5.2	Controlador PID.....	44
5.3	Android .....	44
6	Construção do protótipo .....	47
6.1	Eagle – PCB.....	47
6.2	Caixa – SolidWorks .....	48
7	Testes e Resultados Experimentais.....	49
7.1	Resistência das Bandas .....	49
7.2	Potência Necessária Para Atingir a Temperatura Requerida.....	50
7.3	Sensor de Temperatura .....	51
7.4	Indicador do Estado da Bateria .....	52
7.5	Autonomia .....	52
7.6	Tempo de Carga.....	54
7.7	Resposta do Sistema Sem Qualquer Tipo de Controlo .....	56
7.8	Ajuste dos Parâmetros do Controlador PID .....	58
8	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	61
8.1	Conclusões .....	61
8.2	Desenvolvimentos Futuros.....	62
	Referências .....	65
	Anexos.....	69



# Índice de Figuras

Figura 1: Exemplo de um fato típico de proteção para ambientes frios [3] .....	2
Figura 2: Condutor retangular de material uniformemente distribuído [7] .....	7
Figura 3: Medidor de resistência do quadrado [6] .....	8
Figura 4: Cobertor elétrico moderno [22].....	11
Figura 5: Exemplo de aplicação do sistema desenvolvido .....	13
Figura 6: Esquema de funcionamento do sistema .....	14
Figura 7: Comparação das várias tecnologias de baterias [34] .....	17
Figura 8: Bateria utilizada .....	18
Figura 9: Ciclo de carga de uma bateria com o método CC-CV [37].....	20
Figura 10: Esquema do princípio de funcionamento de um conversor do tipo Boost .....	21
Figura 11: Exemplo de conversor Boost utilizado com as respetivas formas de onda .....	22
Figura 12: Arduino Nano utilizado.....	24
Figura 13: Sistema de controlo não realimentado [41] .....	27
Figura 14: Sistema de controlo realimentado [41].....	28
Figura 15: Esquema típico de um controlador PID [41].....	29
Figura 16: Aplicação típica do MCP73213 [44].....	31
Figura 17: Placa de avaliação do carregador de baterias .....	32
Figura 18: Circuito simulado.....	33
Figura 19: Módulo Step-Up com entrada micro USB utilizado .....	34
Figura 20: Circuito de condicionamento do sinal do termistor.....	35
Figura 21: Circuito de condicionamento do sensor de tensão da bateria.....	36
Figura 22: LED bicolor com dois ânodos (para a cor verde e vermelha) e um cátodo comum .....	37
Figura 23: Circuito seletor de função .....	38
Figura 24: Circuito de controlo da banda de aquecimento .....	39
Figura 25: Módulo de comunicação Bluetooth HC-06.....	40
Figura 26: Esquema simplificado das funções readThermistorTemperature(int thermistorPin) .....	41
Figura 27: Esquema simplificado da função readBatteryVoltage(int batteryPin) .....	42
Figura 28: Esquema simplificado da função lowBatteryWarning(float batteryVoltage, int redPin, int greenPin) .....	42
Figura 29: Fluxograma representativo do funcionamento do programa .....	43

Figura 30: Sistema de controlo de temperatura da banda de aquecimento .....	44
Figura 31: Ícone representativo da aplicação .....	45
Figura 32: Écrans disponíveis na aplicação criada .....	46
Figura 33: PCB impresso e caixa provisória do sistema .....	47
Figura 34: Caixa realizada no SolidWorks .....	48
Figura 35: Banda disponibilizada, com 2 termístores à vista (à esq.). Banda sem qualquer tipo de ornamento (à dir.) .....	49
Figura 36: Casaco com o sistema de aquecimento incluído .....	54
Figura 37: Resposta do sistema em temperatura sem qualquer tipo de controlo .....	56
Figura 38: Resposta do sistema em temperatura com bateria de 3,7 V .....	57
Figura 39: Resposta do sistema quando a temperatura imposta é 40°C .....	59
Figura 40: Exemplo de um ciclo de funcionamento do sistema .....	59
Figura 41: Esquema da PCB impressa .....	69
Figura 42: Layout da PCB impressa .....	70
Figura 43: Resultados das simulações do circuito step-up .....	71

## Índice de Tabelas

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cada método de carga [36] .....	19
Tabela 2: Comparação dos sensores de temperatura [40].....	26
Tabela 3: Medições da temperatura da banda.....	50
Tabela 4: Valores de temperatura medidos pelos sensores.....	51
Tabela 5: Valores de tensão medidos pelo sensor .....	52
Tabela 6: Tempos de carga da bateria com os diferentes carregadores testados .....	56

## Lista de Acrónimos

PWM	Pulse-Width Modulation
USB	Universal Serial Bus
LED	Light Emitting Diode
PCB	Printed Circuit Board
AC	Alternate Current
DC	Direct Current
PCM	Phase Change Materials
NiCd	Nickel-Cadmium
NiMH	Nickel-Metal Hydride
SLA	Sealed Lead-Acid
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
SOC	State Of Charge
CPU	Central Processing Unit
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
RAM	Random-Access Memory
SRAM	Static Random-Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
ADC	Analog-to-Digital Converter
DAC	Digital-to-Analog Converter
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IDE	Integrated Development Environment
RTD	Resistance Temperature Detector

NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
PID	Proportional-Integral-Derivative
UWB	Ultra-WideBand
AREF	Analog Reference
TX	Transmitter
RX	Receiver
GND	Ground



# 1 Introdução

Neste primeiro capítulo é descrito o enquadramento do trabalho realizado. É apresentada a motivação que levou à sua realização, são indicados os objetivos pretendidos e é também descrita a metodologia utilizada ao longo do projeto. Por último, é resumida a estrutura do documento.

## 1.1 Enquadramento

A empresa de consultoria IHS projeta que mais de 230 milhões de dispositivos “wearable” serão vendidos em 2019 [1].

Um dispositivo “wearable” (ao longo deste texto será utilizada a tradução portuguesa “vestível”, que já entrou em uso na literatura) é um computador concebido para ser usado, quer como peça de roupa ou como acessório. Como todos nós usamos, habitualmente, roupa e acessórios, muitas empresas do ramo das novas tecnologias estão focadas em dispositivos que possamos usar todos os dias, especialmente roupas inteligentes. Estes incluem camisas inteligentes, que monitoram a frequência cardíaca do portador e sapatos inteligentes, que contam os seus passos. Em alguns casos, os próprios materiais têm propriedades eletrónicas, tornando-os assim chamados de tecido inteligente (ou têxteis inteligentes) [2].

A Heliotextil apresentou, na Tectextil2015 (Frankfurt), uma banda de aquecimento inovadora para têxteis técnicos. Este produto experimental com menos de 150 µm de espessura foi conseguido utilizando tecnologia de “transfer” têxtil com funcionalização da qual a Heliotextil é proprietária. Esta tecnologia permite a impressão de circuitos simples em várias camadas com diferentes funcionalidades.

## 1.2 Motivação

Em diversas atividades laborais (atividades realizadas em câmaras frigoríficas, trabalhos de embalagem de carnes e demais alimentos, operação portuária, nas quais se manuseiam cargas congeladas e outros) os trabalhadores estão expostos a ambientes extremamente frios, constituindo um risco para a sua saúde. A hipotermia é um dos riscos a que os trabalhadores estão sujeitos, pois devido ao frio extremo há uma perda excessiva de calor, diminuindo a temperatura no centro do corpo. Para evitar a hipotermia a temperatura central do corpo não deve descer abaixo dos 36°C [3].

Tal como os trabalhadores, outras pessoas estão expostas a temperaturas extremamente baixas devido à sua ocupação, por exemplo: militares treinando em países nórdicos, atletas de desportos de inverno, etc. Para se protegerem do frio e se aquecerem eles usam um número significativo de camadas de roupa, ver Figura 1, ou



*Figura 1: Exemplo de um fato típico de proteção para ambientes frios [3]*

roupas de materiais especiais, porque têxteis normais poderão não ser suficientes para sobreviver a estes ambientes extremos.

No entanto, como se consegue imaginar ao visualizar a figura anterior, o uso deste tipo de roupas não é confortável para o portador, podendo reduzir a mobilidade e o desempenho na atividade que estará a realizar.

Daqui surge a motivação para este projeto, reduzir a quantidade de roupa mantendo o conforto térmico a partir de uma fonte de calor externa, isto é, vestuário aquecido através de bandas de aquecimento com uma pequena fonte de alimentação portátil (bateria).

O vestuário aquecido pode ser usado, para além das atividades anteriores, em aplicações clínicas, pois os pacientes em bloco operatório e sob anestesia tornam-se “poiquilotérmicos” [4], não têm a capacidade de regular a temperatura corporal, estando à mercê das baixas temperaturas, apropriadas para os cirurgiões, que se fazem sentir nas salas.

### **1.3 Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação é o desenvolvimento de um sistema de aquecimento para produtos têxteis. O trabalho estará focado no desenvolvimento de uma fonte de alimentação adequada, recarregável, com dimensões reduzidas e que possa ser incorporada em produtos têxteis. A fonte deve contar com uma interface de seleção de modo de funcionamento, prever a ligação de um sensor de temperatura para controlo em malha fechada, indicador de estado da bateria e uma caixa simples, mas elegante. No fim do trabalho



deve obter-se um protótipo reproduzível semelhante ao produto final com a fonte de alimentação, sensor e bandas de aquecimento.

Os requisitos indicados para o sistema são os seguintes:

- Tensão de saída:  $7 V \leq V_o \leq 12 V$  (max.);
- Corrente por saída: 1 A (max.);
- Autonomia: 4 h (min.);
- Tempo de carga (100%):  $\leq 3$  h;
- Proteção contra curto-circuito da saída;
- Dimensões (max.): 100×70×25 mm;
- 2 Saídas PWM (2 bandas de aquecimento);
- Ficha de carga USB micro;
- Seletor de função: On(normal)/Off/On(hi power);
- Sensor de temperatura corporal:  $0^\circ\text{C}$  a  $45^\circ\text{C} \pm 1,5^\circ\text{C}$ ;
- Indicador de estado de bateria: LED bicolor / indicador sonoro.

É também objetivo do trabalho avaliar a viabilidade da realização da carga sem fios.

O equipamento a desenvolver terá as interfaces indicadas, o núcleo será um microcontrolador de baixo custo que controla as saídas de potência e os indicadores, consoante o estado do seletor de função e o valor da temperatura corporal. O sistema deve também conter um circuito de carga da bateria.

Os meios e competências utilizados no decurso do trabalho foram os seguintes:

- Desenho, simulação e teste de circuitos eletrónicos com microprocessador;
- Desenho de PCB;
- Programação e desenvolvimento de sistemas embebidos de baixa potência;
- Prototipagem de sistemas;
- Baterias;
- Aprovisionamento de componentes eletrónicos para produção em massa.

## ***1.4 Metodologia***

Na primeira fase do desenvolvimento do projeto estudaram-se as bandas de aquecimento disponibilizadas pela empresa, para perceber a resposta em temperatura destas relativamente à potência fornecida às mesmas. Seguidamente, foi realizado um estudo sobre o mercado de baterias, fazendo a escolha da bateria mais indicada para o sistema.

Numa segunda fase, foi estruturada a arquitetura do projeto escolhendo como núcleo base um microcontrolador que controlaria todas as interfaces e indicadores do sistema.

Posteriormente, implementou-se todo o hardware necessário para os sensores de temperatura, para o sensor do estado da bateria e para as saídas de potência. Este hardware estava ligado ao microcontrolador que foi programado para realizar todas as tarefas necessárias.

Estudaram-se os métodos de carga de baterias, bem como os circuitos existentes capazes de realizar a carga.

Realizou-se uma aplicação Android que permitia visualizar os valores de temperatura medida das bandas e do estado da bateria, bem como indicar a temperatura desejada. Esta aplicação comunica com o sistema através de um módulo Bluetooth adicionado.

Por fim, foi construída uma caixa numa ferramenta de desenvolvimento 3D para o protótipo final, com as dimensões requeridas para conter todos os elementos dos circuitos realizados. Esses circuitos foram executados numa PCB final. Depois de toda a montagem efetuada, comprovou-se o adequado funcionamento do mesmo.

## **1.5 Organização da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em oito capítulos, onde se descrevem todos os estudos e procedimentos efetuados para alcançar o resultado final deste projeto.

No primeiro capítulo é feita a introdução ao projeto, onde é descrito o enquadramento do trabalho realizado e a motivação que levou a sua realização, são indicados os objetivos pretendidos e é também descrita a metodologia utilizada ao longo do projeto.

No segundo capítulo é analisado o estado da arte, mostrando a evolução e o que já existe no mercado para resolver totalmente ou parcialmente o problema detetado que motivou esta dissertação.

O terceiro capítulo desta dissertação mostra a arquitetura do sistema implementado e analisa teoricamente todos os pontos fundamentais para a realização das partes constituintes do sistema.

No capítulo quatro é analisado todo o hardware necessário e implementado no sistema, descrevendo todos os componentes usados.

No quinto capítulo é explicado o software desenvolvido, tanto para o microcontrolador como para a aplicação do *smartphone* para comunicação com o sistema.

O sexto capítulo mostra os desenvolvimentos para a construção do protótipo final, o circuito impresso bem como a caixa.

No capítulo sete são apresentados os testes e os resultados experimentais obtidos.

No oitavo e último capítulo expõem-se as conclusões retiradas, face ao trabalho realizado. São também apresentados alguns tópicos para desenvolvimentos futuros, no sentido de melhorar ou aprofundar o trabalho desenvolvido na presente dissertação.

## 2 Estado da Arte

Neste capítulo pretendem estudar-se as soluções disponíveis para resolver total ou parcialmente o problema definido anteriormente e que esta dissertação tem como fundamento. São analisadas as bandas de aquecimento disponibilizadas bem como bandas disponíveis no mercado. É apresentado um estudo sobre os sistemas vestíveis existentes bem como as suas aplicações e, dentro destas, o vestuário aquecido. Por fim serão apresentados sistemas de aquecimento equivalentes comparando-os com a solução proposta.

### 2.1 Bandas de Aquecimento

Quando se pensa em aquecer algo com uma fonte de energia elétrica o primeiro aspeto a considerar é a lei de Joule  $P = RI^2$ , que nos mostra a relação entre o calor gerado e a corrente elétrica que percorre um condutor num determinado tempo. A temperatura atingida pela resistência e pelo corpo que se pretende aquecer depende de vários fatores, tais como a forma e as dimensões do objeto, a condutividade térmica e a capacidade de dissipação de calor para o exterior. De qualquer forma, o aquecimento elétrico passa sempre pela circulação de corrente elétrica numa resistência e este princípio está presente em qualquer dispositivo que tenha como função o aquecimento, tal como um forno de cozinha ou um aquecedor doméstico. A solução para qualquer engenho que tenha como função o aquecimento de algo será então uma fonte de energia elétrica e uma resistência (isto caso se pense em aquecimento de forma elétrica, pois existem outras formas de aquecimento, nomeadamente para vestuário, que veremos mais à frente).

Pensando num sistema de aquecimento vestível, usar uma pequena resistência para aquecer o corpo humano não seria o mais apropriado, pois a zona de aquecimento não é um ponto, mas sim uma área significativa do corpo. A utilização de uma placa aquecedora seria uma opção pois liberta o calor numa zona significativamente maior. No entanto, uma placa de material condutor rígido não seria uma solução muito viável pois limitaria os movimentos do corpo humano, podendo mesmo ser motivo de lesão para o portador do sistema.

A solução pensada pela empresa *Heliotextil Etiquetas e Passamanarias S.A.* (<http://www.heliotextil.com/en/>) que desenvolve e fabrica uma gama variada de acessórios para a indústria têxtil, foi a integração da resistência de aquecimento no próprio têxtil através de impressão por serigrafia<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Técnica de impressão que consiste na deposição de tinta através de uma tela. Essa tela possui um desenho que somente permite a passagem da tinta através de certas regiões. A aplicação sucessiva de tintas diferentes por telas com desenhos diferentes permite a reprodução de desenhos relativamente complexos.

Esta solução faz com que a placa/banda de aquecimento seja maleável e que se adapte aos movimentos do corpo, ocupando uma área relativamente grande, aumentando significativamente o conforto térmico do portador do sistema de aquecimento.

Outras empresas também possuem produtos semelhantes e procuram novos materiais para conseguirem a melhor banda de aquecimento para têxteis, tendo como principais características de comparação a forma de potência energética (AC/DC), os tamanhos mínimos e máximos possíveis, o consumo necessário para atingir uma certa temperatura, o peso, o preço do material, a viabilidade dos processos de fabrico, a flexibilidade, a resistência, entre outros.

Alguns exemplos de soluções já existentes são: i) fibras de carbono (que têm como desvantagem poderem quebrar-se variando a performance do aquecimento e com o aumento da temperatura a resistência do material decresce); ii) placas de circuito impresso flexíveis (que têm como desvantagem uma limitada flexibilidade devido aos materiais de construção dos substratos serem plásticos, não ser possível soldar diretamente fios de ligação e é ainda um processo de fabrico bastante dispendioso) e, iii) fibras de aço inoxidável (que tal como as de carbono podem quebrar-se, requerendo proteção extra) [5].

Um importante parâmetro comparativo nas bandas e nos seus materiais de fabrico é a sua resistência e a respetiva resistividade, implicando os limites mínimo e máximo das dimensões das bandas para uma certa gama das temperaturas desejadas. Quando se fala em condutores impressos, tal como são realizadas as bandas, é importante compreender as diferenças entre resistência, resistência superficial e resistividade. Duas tintas que originaram valores de resistência iguais para a mesma impressão podem proporcionar um desempenho bastante diferente. Se uma das tintas foi impressa com metade da espessura da outra, o seu desempenho será duas vezes melhor, podendo mesmo poupar-se economicamente pois gasta-se menos produto e reduz-se o processo industrial para obter o mesmo efeito. Para avaliar com precisão a relação preço/desempenho real para tintas condutoras, medidas de resistência não são suficientes. A resistência superficial é a métrica que descreve o verdadeiro desempenho de um condutor [6].

No caso de um condutor filiforme, a relação entre a resistência e a resistividade é expressa como:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

onde:

$\rho$  é a resistividade elétrica ( $\Omega \cdot m$ )

$A$  é a área transversal ( $m^2$ )

$L$  o comprimento (m)

e  $R$  a resistência ( $\Omega$ ) (ver Figura 2)

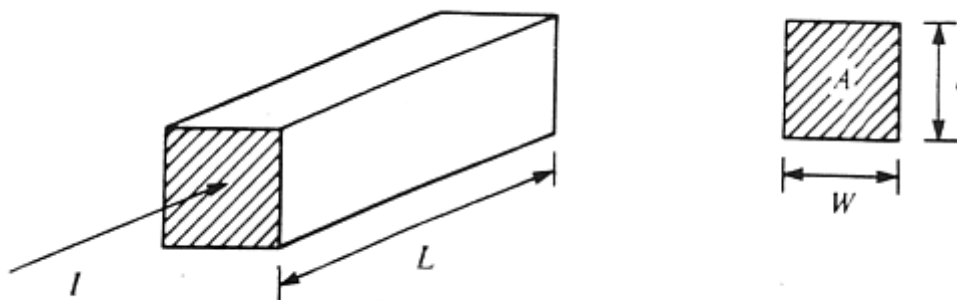


Figura 2: Condutor retangular de material uniformemente distribuído [7]

No caso de um condutor em forma de folha, como é o caso dos condutores impressos, o parâmetro mais útil é o da chamada resistência superficial, a que por vezes se chama resistência de folha (*sheet resistance*). Suponhamos uma superfície condutora com uma espessura constante,  $t$ .

A expressão da resistência toma neste caso a forma:

$$R = \rho \frac{L}{Wt} = \frac{\rho}{t} \frac{L}{W} = R_{\square} \frac{L}{W} \quad (2.2)$$

em que:

$t$  = espessura (m)

$W$  = largura (m)

O que a equação (2.2) nos diz é que a resistência entre os lados de um retângulo do condutor superficial com comprimento  $L$  e largura  $W$  só depende, para um dado material e uma espessura constante, da relação  $\frac{L}{W}$ .

Quando  $L$  e  $W$  são iguais (um quadrado), a resistência entre lados é igual a  $\frac{\rho}{t} = R_{\square}$ , que por isso se designa por resistência da folha, ou, mais vulgarmente, resistência do quadrado. Isto também leva à conclusão algo surpreendente de que a resistência entre lados de um quadrado, para um condutor deste tipo (em forma de folha) é sempre a mesma, quer o quadrado tenha 1 m, quer tenha 1 mm de lado.

Vemos, portanto, que o parâmetro que importa conhecer, para uma dada espessura de impressão e para uma dada tinta condutora, é a resistência do quadrado, pois a partir dela pode-se calcular a resistência de uma folha com quaisquer dimensões (e às vezes até com formas irregulares). Esta propriedade é aproveitada sistematicamente no projeto de circuitos integrados.

Por exemplo, considerando que a resistência de folha é  $100 \Omega/\square$ , um quadrado teria uma resistência de  $100 \Omega$ . Duplicar a relação  $\frac{L}{W}$  é equivalente a colocar dois quadrados em série, pelo que a resistência total seria de  $200 \Omega$ . Se, pelo contrário, fizermos  $W = 2L$ , isso é equivalente a colocar dois quadrados em paralelo, pelo que a resistência total seria de  $50 \Omega$ . Este raciocínio pode ser generalizado para outros retângulos e até

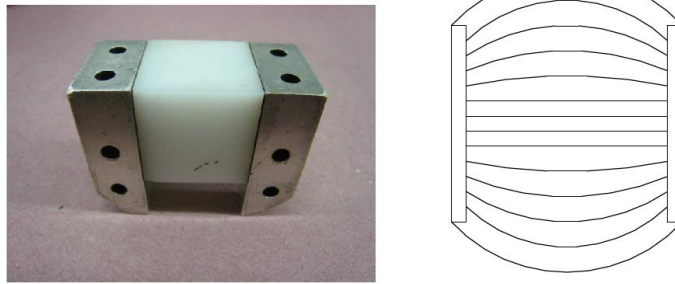


Figura 3: Medidor de resistência do quadrado [6]

para outras formas, o que é uma ferramenta essencial para o cálculo de resistências de condutores em forma de folha, como é o caso das bandas de aquecimento.

Para conseguir medir a resistência do quadrado de um determinado condutor é usado um sistema como o representado na Figura 3, e a partir dessa medida e das medidas das dimensões da banda de aquecimento é possível obter a sua resistência e verificar se esta cumpre os requisitos especificados.

Para cumprir os requisitos de temperatura necessária para aquecer o portador do sistema, com uma fonte de energia portátil de reduzidas dimensões, foram disponibilizadas duas bandas de aquecimento, uma para colocação na frente do indivíduo e outra nas costas.

O posicionamento das bandas de aquecimento tem que ver com o facto de os órgãos vitais do corpo humano estarem no tronco, que possui a temperatura interna do organismo mais elevada. Colocar as bandas nas extremidades do corpo (por exemplo: pés e mãos) não seria solução, pois aquecendo as extremidades o sangue frio é impulsionado para o coração podendo causar um decréscimo mais rápido da temperatura central do corpo, podendo aumentar a pressão arterial e as possibilidades de coagulação do sangue, levando à eventualidade da ocorrência de uma paragem cardíaca [8].

No peito e nas costas, um pequeno decréscimo da temperatura da pele induz uma grande sensação de frio. As costas (mais concretamente junto à pélvis) e o peito são as partes “dominantes” que influenciam fortemente a sensação térmica em geral [9]–[11].

## 2.2 *Sistemas Wearable*

As tecnologias estão em constante evolução e uma das últimas ondas revolucionárias são os dispositivos móveis que, estando cada vez mais miniaturizados, nos permitem andar com eles constantemente ou até mesmo vesti-los. O termo “wearable technology” surge devido ao facto de podermos usar (vestir) a tecnologia tal como se veste uma peça de roupa ou acessório de moda [12].

Sendo o termo “wearable” relativamente recente devido à massificação deste tipo de dispositivos nos últimos anos, o conceito é bem mais ancestral. Desde os tempos passados da pré-história que os acessórios, tais como brincos e pulseiras, eram usados como elementos ornamentais ou culturais, não possuindo um carácter de proteção como o do vestuário [12].

Aos “antigos” objetos vestíveis sem qualquer tipo de tecnologia extraordinária incorporada, tais como óculos e relógios, são agora incorporadas novas tecnologias que possibilitam novas funções que não as básicas para as quais esses objetos foram pensados primeiramente. Óculos com câmaras e sensores incorporados e os recentes “smartwatches” com possibilidade de comunicação com o *smartphone* são alguns exemplos desses objetos.

A aplicação militar tem sido o principal impulsionador das investigações em torno das novas tecnologias, dentro das quais, as tecnologias vestíveis. No entanto, a saúde, a segurança, o desporto e até mesmo o lazer, são algumas das aplicações em que os sistemas vestíveis estão a ser usados [13].

Existem vários dispositivos médicos vestíveis que fazem a prevenção da saúde dos pacientes. Um deles pode ser aplicado por doentes com diabetes para medirem os níveis de glicose de forma rápida e cómoda [14].

A Walt Disney Parks investiu para que todos os seus visitantes utilizem a Disney MagicBand, uma pulseira que permite a entrada nas várias zonas dos parques, identificando cada um dos portadores. Das várias funções que esta pulseira tem, salienta-se a função de segurança, já que os pais das crianças podem ficar tranquilos, pois em caso de desaparecimento, o filho pode ser encontrado rapidamente [15].

No desporto temos o VitalJacket, que é uma *t-shirt* que mede os sinais vitais do corpo humano, tais como o batimento cardíaco, evitando possíveis ataques cardíacos aos atletas [16].

Vários sistemas têm sido desenvolvidos para lazer e bem-estar. Estes são provavelmente os principais responsáveis por trazer a tecnologia vestível para o nosso dia-a-dia. Para os praticantes de “fitness” existem várias opções para os ajudar nos tipos de treino e resultados obtidos. Uma dessas opções pode ser o “Fitbit Surge”, um relógio/pulseira que apresenta a distância percorrida, o batimento cardíaco e outras funcionalidades enquanto a pessoa faz exercício [17].

Quando se fala numa *t-shirt* que consegue medir os sinais vitais do corpo humano pensamos numa *t-shirt* semelhante às tradicionais usadas normalmente, no entanto esta necessita de sensores que meçam os devidos sinais. Na eletrónica tradicional os sensores são desenhados de forma rígida como qualquer componente. Na área dos têxteis é preocupação que os materiais sejam confortáveis e adaptados anatomicamente ao corpo humano. Foi necessária uma fusão destas áreas para assim criar os têxteis eletrónicos, permitindo criar computadores vestíveis [18].

Utilizar placas de circuito impresso (PCB) junto ao corpo não é confortável para o utilizador. Utilizando técnicas de inserção de materiais condutores nos têxteis, sem prejudicar o seu *design* anatómico e conforto, tais como, estampagem, jato de tinta ou a inclusão de fios condutores tecidos nos próprios têxteis, é possível substituir as rígidas PCB [19].

Devido às roupas estarem muito próximas ou até mesmo em contacto com o corpo, utilizando estas roupas inteligentes, é possível monitorizar o corpo humano, antecipar ou prevenir problemas de saúde, bem como implementar muitas outras funções úteis.

## **2.3 Vestuário Aquecido**

Um dos hábitos mais conhecidos da população mundial em geral, usado para se protegerem do frio aquando das baixas temperaturas, é fecharem-se em casa e acenderem lareiras, o aquecimento central ou aquecedores, usando lenha, eletricidade ou óleo. No entanto, aquecer uma habitação inteira é muito mais dispendioso do que aquecer apenas o microclima em torno do corpo, desperdiçando-se muita energia [20].

Para aquecer o corpo inventaram-se roupas para aquecimento pessoal. Segundo [21] existem cinco tipos de roupas para aquecimento pessoal: eletricamente aquecida, com materiais de mudança de fase (PCM, do inglês “Phase Change Materials”), quimicamente aquecida, aquecida por fluxo de ar ou líquido.

PCMs são combinações de diferentes tipos de parafinas, cada uma com diferentes pontos de fusão e de cristalização. Ao alterar a quantidade proporcional de cada tipo de parafina, diferentes pontos de fusão e solidificação podem ser obtidos. Quando incorporados nos têxteis, os PCMs podem armazenar o calor que o corpo humano gera e, posteriormente, libertá-lo de volta para o corpo, pois quando há uma mudança do estado sólido para o líquido há um armazenamento de energia na forma de calor, este calor é libertado quando há uma mudança do estado líquido para o sólido. No entanto, uma desvantagem da utilização destes materiais é que são pesados e não é confortável para o utilizador, para além de não terem o melhor comportamento quando utilizados junto ao corpo humano, pois têm apenas um pequeno efeito calorífico.

Para aquecer a roupa quimicamente são usadas reações de substâncias químicas para gerar calor, por exemplo, energia química pode ser transformada em energia térmica por oxidação. Este tipo de vestuários é usado por mergulhadores para os proteger da água fria, aquecendo as partes do corpo próximas das zonas de reação que produzem o calor. Embora as bandas químicas de aquecimento sejam baratas, a sua temperatura não é possível de controlar, podendo mesmo causar queimaduras na pele quando atingem temperaturas superiores a 42°C. Outra desvantagem deste tipo de solução de aquecimento é o facto de poderem ser tóxicos para as pessoas e para o meio ambiente, dependendo do tipo de materiais utilizados para as reações químicas, sendo necessário um especial cuidado no manuseamento destas roupas.

Vestuário aquecido por fluxo de ar ou líquido possui um sistema de tubagem inserido na roupa por onde flui o líquido ou o ar. O correto funcionamento deste tipo de vestuário é assegurado por uma unidade, que possui um aquecedor e uma bomba, ligada ao sistema de tubagem, fazendo aquecer o líquido ou o ar impulsionando-o pelo sistema de tubos. Sendo evidente que estas roupas possuem um efeito de aquecimento eficaz, ter um sistema de tubagens dentro da roupa torna-a mais rígida, limitando os movimentos humanos.

Por fim, o sistema de aquecimento com um futuro mais promissor é o vestuário aquecido eletricamente. Usando elementos de aquecimento embutidos na roupa é gerado o calor, sendo, na maioria das vezes, usado apenas um fio eletricamente aquecido conectado a uma fonte de alimentação. O fio resistivo gerador do calor é inserido no próprio tecido, aquecendo quando lhe é aplicada potência elétrica.

Um dos primeiros sistemas elétricos de aquecimento e dos mais utilizados nos dias de hoje é o cobertor elétrico, Figura 4.





*Figura 4: Cobertor elétrico moderno [22]*

Foi no início do século XX que apareceram os primeiros cobertores elétricos, grandes, pesados e de utilização perigosa devido à inexistência de qualquer tipo de controlo de temperatura [23].

Hoje em dia os elementos elétricos usados para o aquecimento estão mais modernizados, sendo usados elementos de grafite, borrachas eletricamente condutoras, polímeros com coeficiente de temperatura positivo e polímeros de carbono [24].

Para além dos cobertores elétricos, novas ideias e produtos surgiram aproveitando a mesma teoria, tais como casacos, sapatos e roupas interiores [25].

Ainda que os sistemas elétricos de aquecimento vestíveis estejam em evolução, exemplo das novas bandas com fibras de carbono ou outros elementos, a maioria dos sistemas existentes utiliza fios de aquecimento embutidos, causando alguns problemas. Os fios de aquecimento limitam os movimentos do corpo, têm um diâmetro muito baixo, fazendo com que atinjam temperaturas elevadas e podem partir-se facilmente, e não produzem calor uniformemente por uma determinada área do corpo, pois devido ao seu diâmetro, dissipam pouca energia térmica. Os métodos de controlo de temperatura ainda não são convenientemente desenhados e a capacidade das baterias ainda não é realmente suficiente para conseguir uma grande autonomia, com os requisitos do sistema, para longos períodos de frio.

## ***2.4 Análise Crítica de Diferentes Sistemas***

Como se pode constatar já existem ideias e produtos para as pessoas usarem/vestirem no seu dia-a-dia para aquecerem o corpo ou partes deste, protegendo-se das baixas temperaturas que se possam fazer sentir.

Em 2007 foi apresentada uma patente para uma forma de aquecimento de calçado, sendo este realizado por indução [26]. O aquecimento é efetuado quando os sapatos, que possuem na sola um material condutor, são colocados em cima de uma placa indutora, sendo-lhes induzida uma corrente elétrica, produzindo calor. Este produto tem um grande entrave que é o facto de não ser amovível, isto é, não é possível utilizá-lo na rua durante alguma atividade. Apenas pode ser usado, por exemplo, quando o utilizador está em casa sentado e com os pés colocados por cima da placa indutora.

Dispositivos semelhantes ao anterior, mas agora mais portáteis são os apresentados em [27] e [28]. Nestes casos a solução de aquecimento apresentada tem como fonte de alimentação uma bateria e ambos possuem

controlo de temperatura. Salienta-se o facto de no primeiro caso o aquecimento da palmilha poder ser controlado através de controlo remoto, comunicando através de rádio frequência. É confortável ter os pés quentes em dias frios, no entanto em caso de ambientes extremos se não proteger o corpo e os órgãos vitais não será possível sobreviver.

Quatro estudantes trabalharam num projeto de desenvolvimento de um casaco que mantivesse o equilíbrio de temperatura do corpo humano, quer com temperaturas altas ou baixas [29]. Analisando a parte de aquecimento, verifica-se que estes usaram apenas um fio condutor que, como já foi referido anteriormente, caso se quebre impossibilitará todo o processo de aquecimento. É usada uma bateria de 15 V para aquecer o fio, que é um tipo de bateria pouco vulgar e para que o carregamento seja feito através de uma entrada USB, como um dos requisitos do trabalho da presente dissertação, é necessário a utilização de um circuito *step-up*, implicando um tempo de carga muito superior.

A Warmx GmbH é uma empresa dedica aos têxteis inteligentes que introduziu no mercado roupas interiores aquecidas [30]. Tem à venda camisolas e calças com fibras condutoras elásticas que através de um “Mini-Power-Controller”, comprado separadamente, permite aquecer as fibras e controlar a respetiva temperatura. Têm como vantagem poderem ser lavadas na máquina de lavar (sem o controlador) e não terem fios rígidos que inibam o total movimento do corpo. Possuem 3 níveis de calor, proteção contra sobreaquecimento e curto-circuito. É indicada uma autonomia de até 6 horas com uma única carga de apenas 3 horas. É necessário um carregador de 12 V. O peso do controlador é de 130 g. O preço das roupas vai desde os 129 € aos 289 €, no entanto este valor não inclui o controlador (129 €) nem o carregador (24 €).

Outra empresa que apresenta produtos semelhantes é a Gyde Supply Co. [31]. Desde casacos, a calças e a luvas, são disponibilizados vários produtos para aquecimento pessoal através de bandas patenteadas constituídas por vários filamentos condutores. Estas bandas conseguem aquecer até 60°C quando alimentadas por baterias de 12 V. A grande vantagem deste produto relativamente ao apresentado pela Warmx GmbH é o facto de a temperatura poder ser controlada através de uma aplicação para *smartphone*, possuindo um dispositivo de comunicação sem fios, possibilitando também verificar o estado da bateria. No entanto, este meio de comunicação sem fios é um adaptador que se pode comprar separadamente, não estando incluído na própria fonte de alimentação.

### 3 Arquitetura do Sistema

O sistema portátil que se pretende implementar tem como principal funcionalidade o aquecimento e o controlo da temperatura de duas bandas que podem estar incorporadas em vestuário. A Figura 5 mostra uma possível utilização final do sistema desenvolvido.

Neste exemplo, o utilizador possui um casaco com as duas bandas, uma na parte frontal e outra na parte das costas. Para aquecer estas bandas e alimentar toda a eletrónica envolvente é necessária uma fonte de energia elétrica, que para sistemas portáteis é comum o uso de baterias. Esta bateria tem de ser carregada através de uma ficha micro USB e o sistema tem de informar o utilizador do estado da carga da bateria, para que este saiba quando é necessário recarregar a bateria. Para tal será necessário um sensor para ler o estado atual da carga da bateria e algo que avise o utilizador desse estado, que no caso será um LED bicolor. São necessários sensores de temperatura para ler a temperatura à qual estão as bandas de aquecimento e para realizar o respetivo controlo. Para controlar todo o sistema, é necessário um microcontrolador que processe todas as informações e atue da forma desejada. De forma a facilitar todo o processo de controlo e leitura por parte do utilizador há a possibilidade de ser apresentada a temperatura das bandas e o estado de carga da bateria numa aplicação para *smartphone*. Nessa mesma aplicação é possível impor a temperatura desejada para as bandas de aquecimento. Todos estes elementos estão dentro de uma caixa que comunica com o *smartphone* através

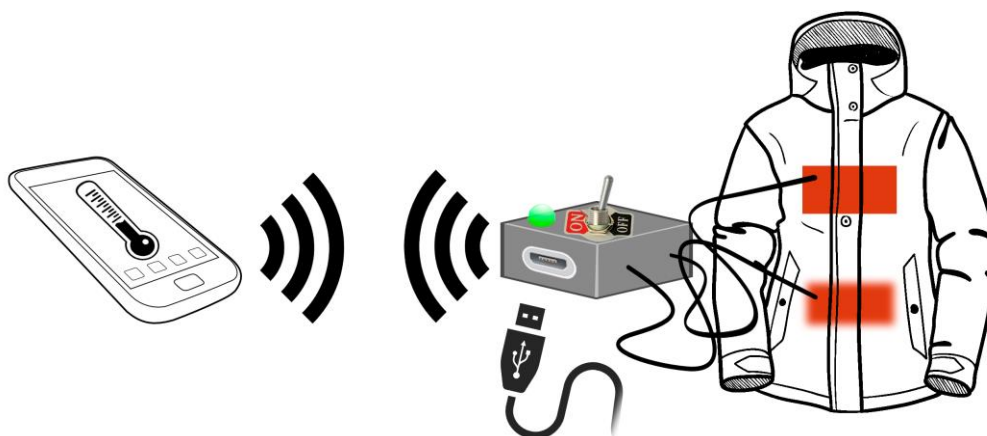


Figura 5: Exemplo de aplicação do sistema desenvolvido

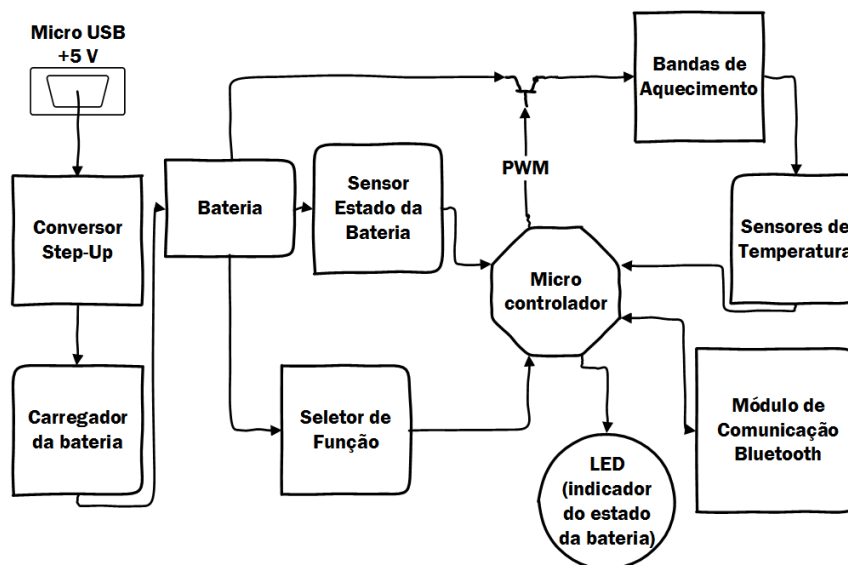


Figura 6: Esquema de funcionamento do sistema

de um sistema comunicação sem fios. Há ainda um interruptor que permite ligar e desligar todo o sistema e seleccionar um dos dois modos de funcionamento possíveis (normal e *hi-power*).

Neste capítulo descrevem-se os diferentes blocos constitutivos do sistema desenvolvido, mostrando as várias soluções existentes para cada funcionalidade.

A Figura 6 ilustra um esquema do funcionamento geral do sistema, onde se podem ver todos os blocos constituintes bem como as interações entre eles.

### 3.1 Tipos de Bateria

Uma vez que o sistema a desenvolver é um sistema portátil, é necessária uma fonte de alimentação para garantir a energia e a portabilidade do sistema. A mais comum e simples fonte de energia é a bateria devido às suas reduzidas dimensões, ao baixo custo, à variedade e durabilidade.

As baterias são elementos que transformam energia química em energia elétrica, estando divididas em 2 grupos, as primárias, que são baterias não recarregáveis, e as secundárias, que são baterias recarregáveis. Nas últimas, o processo químico associado à descarga pode ser reversível, o que não acontece nas baterias primárias [32].

O estudo aqui realizado incidirá nas baterias recarregáveis, pois são estas as utilizadas em dispositivos móveis que necessitam que a bateria seja recarregada, como é o caso do sistema em desenvolvimento.

A investigação na área das baterias tem vindo a ter mais empenho devido à recente evolução dos sistemas portáteis, tais como, computadores e *smartphones*, que cada vez mais têm um maior número de funcionalidades e precisam de mais energia para o proveito do utilizador. Nestes casos, e no estado atual de maturidade da tecnologia de baterias, as células de iões de Lítio (Li-Ion) são geralmente consideradas como a melhor opção, devido à sua portabilidade, relação peso/energia e durabilidade.

As células das baterias são os constituintes das baterias, podendo ligar-se em série e/ou em paralelo para constituir uma bateria de maior capacidade. A capacidade (C) é definida pelos fabricantes das baterias, representando a carga máxima que a bateria pode armazenar, em geral expressa em A·h. Existem vários tipos de materiais de que estas são feitas, fazendo com que a capacidade energética seja diferente de um tipo para o outro.

Os principais tipos de baterias existentes no mercado atualmente são [33]:

- NiCd (Nickel Cadmium)

Vantagens:

- Carregamento rápido e simples, mesmo após armazenamento prolongado;
- Elevado número de ciclos de carga/descarga, com a devida manutenção pode chegar acima de 1000;
- Permite o carregamento a baixas temperaturas;
- Tem um longo tempo de vida quando armazenada durante longos períodos em qualquer estado de carga;
- Fácil armazenamento e transporte. A maioria das companhias aéreas aceita o seu transporte sem condições especiais;
- Bom desempenho a baixas temperaturas;
- Uma das mais robustas baterias recarregáveis;
- Têm o preço mais baixo em termos de custo por ciclo;
- Disponíveis em vários tamanhos e opções de desempenho, sendo a maioria das células cilíndricas.

Desvantagens:

- Densidade energética baixa comparativamente com novos sistemas;
- Têm efeito de memória. As células têm de ser totalmente descarregadas periodicamente;
- Prejudiciais para o meio ambiente devido ao facto de conterem metais tóxicos. Alguns países já limitam a sua utilização;
- Têm auto descarga elevada, precisando de ser recarregadas depois de algum tempo de armazenamento.

- NiMH (Nickel-Metal Hydride)

Vantagens:

- 30 a 40 % de maior capacidade relativamente às de NiCd, tendo potencial para densidades de energia ainda maiores;
- Menor suscetibilidade ao efeito de memória, requerendo ciclos de descarga completa menos frequentes;
- Fácil armazenamento e transporte;
- Amigas do ambiente. Contêm toxinas mais leves e permitem a sua reciclagem.

Desvantagens:

- Tempo de vida limitado caso sejam repetidamente descarregadas com correntes muito elevadas;
  - Corrente de descarga limitada a 0,5C para salvaguardar o tempo de vida da bateria;
  - É necessário um algoritmo de carga mais complexo devido ao calor gerado durante a carga pela bateria, precisando de um tempo de carga superior ao das de NiCd;
  - Elevada auto descarga. 50% mais elevada comparando com as de NiCd;
  - O desempenho é degradado se armazenada a elevadas temperaturas, devendo ser armazenadas num local frio com uma carga próxima dos 40%;
  - As baterias necessitam de descargas completas regulares;
  - São cerca de 20% mais caras que as de NiCd.
- Chumbo-Ácido (Lead-Acid)
    - Vantagens:
      - Baixo custo e simples construção, sendo as SLA (Sealed Lead-Acid) as mais baratas em termos de custo por Watt;
      - Tecnologia bastante estudada e compreendida. Quando usadas corretamente, são bastante duradouras;
      - Baixa auto descarga, possuindo a taxa mais baixa de todas os sistemas de baterias recarregáveis;
      - É necessária muito pouca manutenção, não possui efeito de memória;
      - Capaz de altas taxas de descarga.
    - Desvantagens:
      - Não pode ser armazenada descarregada;
      - Densidade energética baixa;
      - Permite apenas um limitado número de ciclos de descarga completa, sendo indicadas apenas para aplicações que necessitam de descargas totais ocasionalmente;
      - Prejudiciais para o meio ambiente. O eletrólito e o chumbo podem causar danos ambientais;
      - Restrições ao seu transporte devido às preocupações ambientais relativas ao derrame em caso de acidente;
      - Aumento descontrolado da temperatura em casos de carregamento inapropriados.
  - Iões de Lítio (Lithium-Ion)
    - Vantagens:
      - Elevada densidade energética, tendo ainda potencial para capacidades maiores;
      - Auto descarga relativamente baixa, menos de metade das NiCd e NiMH;
      - Baixa manutenção. Não é necessária uma descarga completa periódica e não possui o efeito de memória.
    - Desvantagens:
      - Requer circuito de proteção para limitar a tensão e a corrente;

- Sujeita ao envelhecimento, mesmo sem estar em uso. Deve ser armazenada em local frio a 40% da carga para diminuir o efeito de envelhecimento;
  - Corrente de descarga moderada;
  - Sujeita a regulações para o transporte quando transportadas em grandes quantidades;
  - Construção dispendiosa. O preço de construção é 40% superior às de NiCd. No entanto, com os novos desenvolvimentos, esperam-se preços mais reduzidos;
  - Tecnologia ainda em desenvolvimento.
- **Lítio-Polímero**

Vantagens:

    - Espessura bastante baixa. Podem ser construídas baterias com a espessura de um cartão de crédito;
    - Formato flexível, podendo ser adaptadas às necessidades dimensionais de cada projeto;
    - Bastante leves, devido ao facto de não haver eletrólitos líquidos, a embalagem pode ser simplificada;
    - Mais seguras, sendo mais resistentes a sobrecargas e não haver a possibilidade de derrame de eletrólitos, pois estes são sólidos neste tipo de células.

Desvantagens:

    - Menor densidade energética e número de ciclos de descarga quando comparadas com as Li-Ion, no entanto há potencial para melhoramentos futuros;
    - Fabrico dispendioso.

Como este projeto tem especificações de dimensões e peso bastante apertadas, a escolha do tipo de bateria a utilizar tem de ter em conta a densidade energética por peso e volume que cada célula apresenta tipicamente. Essa informação pode ser visualizada no gráfico da Figura 7.

Neste momento já existem tipos de baterias diferentes das referenciadas anteriormente, com diferentes materiais e com melhores características, por exemplo baterias de Lítio-Enxofre [34], no entanto ainda não estão geralmente disponíveis no mercado por terem custo elevado e terem ainda problemas de segurança por resolver.

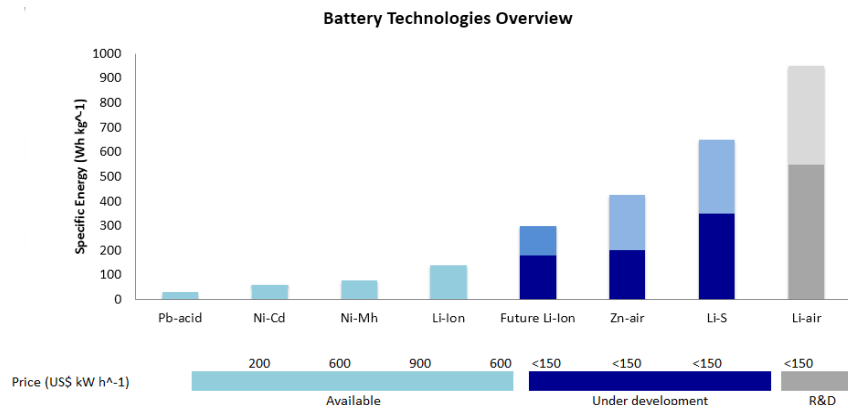


Figura 7: Comparação das várias tecnologias de baterias [34]

Após a análise dos vários tipos de baterias e as suas características, a escolha do tipo de bateria a utilizar no sistema recaiu sobre as células de Li-Ion, do tipo 18650 (nome dado devido às dimensões da célula, 18 mm de diâmetro e 65 mm de comprimento), que apresentam a melhor relação entre a densidade energética, o peso, o volume e o preço. As células deste tipo têm capacidades definidas entre os 1500 mAh e os 3400 mAh, dependendo do fabricante.

Tendo em conta os testes realizados às bandas de aquecimento (que são explicados no capítulo dedicado aos testes e aos resultados), as dimensões máximas exigidas, a autonomia do sistema e a forma de carregamento da bateria, verificou-se que uma célula de íões de Lítio do tipo 18650 não seria suficiente pois possui apenas 3,7 V de tensão aos seus terminais, o que não é suficiente para que as bandas atinjam as temperaturas necessárias. Foi testado um elevador de tensão para elevar a tensão da bateria e assim alimentar as bandas de aquecimento, no entanto a bateria não conseguia fornecer a corrente necessária para que a tensão se mantivesse enquanto aquecia as bandas.

A solução passou então por utilizar uma bateria com duas células de Lítio em série, perfazendo uma tensão aos terminais de 7,4 V, valor que permite que as bandas de aquecimento atinjam as temperaturas necessárias.

As características da bateria escolhida, Figura 8, são obtidas a partir da informação do fabricante das células constituintes da bateria (duas em série) [35]:

- Capacidade nominal: 2600 mAh;
- Tensão mínima:  $2 \times 2,75 \text{ V} = 5,5 \text{ V}$ ;
- Tensão de carga:  $2 \times 4,2 \text{ V} = 8,4 \text{ V}$ ;
- Tensão nominal:  $2 \times 3,63 \text{ V} = 7,26 \text{ V}$ ;
- Corrente máxima de carga: 2600 mA;
- Corrente máxima de descarga: 5200 mA;
- Peso:  $2 \times 47 \text{ g} = 94 \text{ g}$ ;
- Dimensões:  $65,0 \times 36,8 \times 18,4 \text{ mm}$ .

É importante fazer referência à proteção de segurança embecida na bateria utilizada, já que esta possui um circuito de proteção contra curto-circuito que limita a corrente de descarga.



*Figura 8: Bateria utilizada*



## 3.2 Formas de Carregamento das Baterias

A forma de carga é o aspeto mais importante após a escolha da bateria a utilizar, pois também ela afeta a autonomia do sistema.

Sabendo que existem vários tipos de baterias, é de esperar que a forma mais eficaz de carregamento de cada uma seja diferente de um tipo para o outro. Assim, existem diferentes métodos para carregar baterias, desde carregamentos com tensão constante (tipicamente aplicados na carga de baterias de chumbo-ácido) a cargas realizadas por corrente constante (método mais utilizado no carregamento de baterias de iões de Lítio). A forma de carregamento das baterias tem impacto na vida útil da mesma, não havendo um método eficaz que possa ser aplicado a todo o tipo de baterias, devendo ser selecionado de acordo com o tipo de bateria e segundo as instruções do fabricante.

Na tabela seguinte são apresentados os principais métodos de carga de baterias com as respetivas vantagens e desvantagens de cada um.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens de cada método de carga [36]

Método	Vantagem	Desvantagem
<b>Corrente Constante (CC)</b>	A limitação de corrente previne sobrecargas durante a carga inicial.	Possibilidade de sobrecarga durante a fase final de carga.
<b>Tensão Constante (CV)</b>	A limitação de tensão previne sobretensões durante a fase final da carga.	Durante a fase de carga inicial a corrente pode ser muito elevada.
<b>Corrente Constante/Tensão Constante (CC-CV)</b>	Há limitação de tensão e corrente.	Tempo de carga muito longo.
<b>Carga por pulsos e método Reflex</b>	Pode reduzir o problema da polarização das células que limita a carga máxima da bateria.	O controlo é complexo.

Tipicamente, as baterias de iões de Lítio são carregadas de acordo com o método CC-CV (corrente constante, tensão constante). Neste método o processo de carga é realizado, essencialmente, em duas fases distintas. Numa primeira fase a carga é feita com uma corrente constante até que a tensão máxima aos terminais da bateria seja alcançada. Terminada a fase anterior, a carga passa a ser realizada com uma tensão constante até que a corrente diminua até um determinado limiar (normalmente, em A, 1/10 da capacidade estipulada da bateria em A·h), a partir do qual se considera que a bateria está totalmente carregada. Este método apresenta como principal desvantagem o elevado tempo de carga, devido essencialmente à segunda fase do processo (carga com tensão constante), pois como se pode ver pela Figura 9, o estado de carga (SOC) da bateria chega, aproximadamente, aos 95% apenas na fase de carga com corrente constante e num menor intervalo de tempo [37].

Utilizando o método de carga CC, o tempo de carga é reduzido muito significativamente e permite que o carregador seja mais compacto, robusto e económico comparativamente a um carregador do tipo CC-CV. Outra vantagem deste método é o facto de este permitir prolongar o tempo de vida útil da bateria uma vez

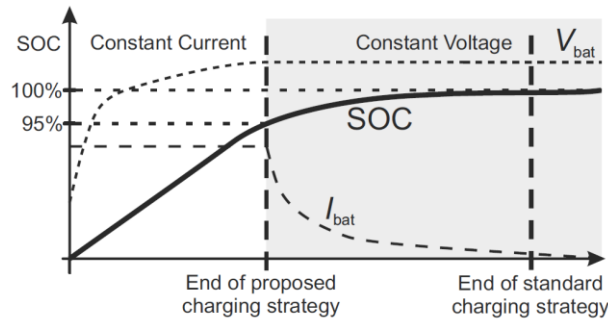


Figura 9: Ciclo de carga de uma bateria com o método CC-CV [37]

que o tempo a que esta fica sujeita a elevadas tensões é menor [37]. No entanto, 5% da capacidade da bateria não seria utilizada, implicando uma diminuição da autonomia de todo o sistema alimentado pela bateria.

Como a autonomia é um fator determinante no sistema a desenvolver, 5% da capacidade da bateria não pode ser desperdiçada, portanto o método de carga CC-CV foi o escolhido, prejudicando o tempo de carga em prol da autonomia.

### 3.3 Step-Up/Boost Converters

Como já foi referido anteriormente a bateria de iões de Lítio escolhida tem uma tensão nominal de 7,26 V e uma tensão de carga de 8,4 V. O método de carga a aplicar é o CC-CV, logo será necessário carregar a bateria, em certas ocasiões, com tensão constante de 8,4 V.

Um dos requisitos do sistema é que a ficha de carga seja micro USB, podendo ser passível de carregar com qualquer carregador já existente no mercado, por exemplo de um *smartphone*, ou através de uma porta USB de um computador.

No entanto, os carregadores USB ou as portas USB proporcionam apenas uma tensão de 5 V, sendo a corrente variável de carregador para carregador e dependente da versão das portas USB. Assim, não é possível carregar a bateria diretamente a partir de uma tomada USB.

A solução passa por inserir no sistema uma fonte comutada (conversor DC-DC), que possibilitará a conversão dos 5 V provenientes da ficha micro USB numa tensão mais elevada permitindo o carregamento da bateria.

Não seria possível utilizar uma fonte do tipo linear pois estas não permitem obter à saída uma tensão superior à da entrada. Há ainda o problema da eficiência, as fontes do tipo linear possuem eficiências da ordem dos 30% enquanto as fontes comutadas conseguem atingir os 80%.

As topologias mais simples e comuns deste tipo de conversores são:

- Conversor Buck (ou conversor série ou conversor *step-down*): a tensão de saída é inferior à tensão de entrada;
- Conversor Boost (ou conversor *step-up*): a tensão de saída é superior à tensão de entrada;

- Conversor Flyback (ou conversor inversor): a tensão de saída é de polaridade oposta à tensão de entrada.

As outras topologias existentes são variantes das anteriores que não têm muito interesse neste contexto.

A topologia que interessa estudar é a do conversor “boost”, pois é com este que é possível obter uma tensão mais elevada a partir de uma tensão mais baixa. O esquema de princípio de funcionamento de um conversor deste tipo é apresentado na Figura 10.

Consideremos que o circuito está a funcionar há muito tempo em regime permanente. Suponhamos que o interruptor está fechado no intervalo de tempo  $[0, \delta T)$  e aberto durante o resto do período. Quando o interruptor está fechado, o diódo está cortado e a indutância carrega linearmente (numa indutância,  $v = L \frac{di}{dt}$  e se  $v = V_{in}$  (constante) a corrente cresce linearmente). Quando o interruptor abre ( $t = \delta T$ ) a corrente na indutância não pode interromper-se e continua a circular através do diódo e da carga. No intervalo  $[\delta T, T]$  a tensão na carga é maior que a tensão de entrada  $V_{in}$ , pelo que a corrente tem derivada negativa e decresce linearmente. A tensão na carga mantém-se constante em todo o ciclo, supondo que o condensador C tem um valor suficientemente elevado.

Em regime permanente o valor médio da tensão na indutância é zero (se não o fosse, a corrente na indutância crescería indefinidamente e deixaríamos de estar em regime permanente) o que permite determinar imediatamente o valor da tensão de saída em função da tensão de entrada e do fator de serviço  $\delta$ :

$$V_{in} \delta T - (V_{out} - V_{in})(1 - \delta)T = 0 \Rightarrow V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - \delta}. \quad (3.1)$$

Como  $\delta$  está compreendido entre 0 e 1, temos sempre  $V_{out} > V_{in}$ , como era de esperar.

Assim, no caso da utilização deste tipo conversor como forma de elevar a tensão de 5 V para os 8,4 V necessários para a carga da bateria, o sinal de comutação a usar teria de ter um *duty-cycle*  $\left( \delta = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \right)$  de aproximadamente 40%.

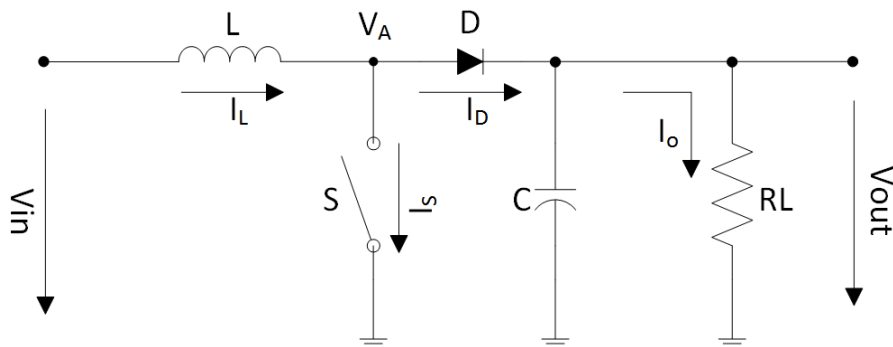


Figura 10: Esquema do princípio de funcionamento de um conversor do tipo Boost

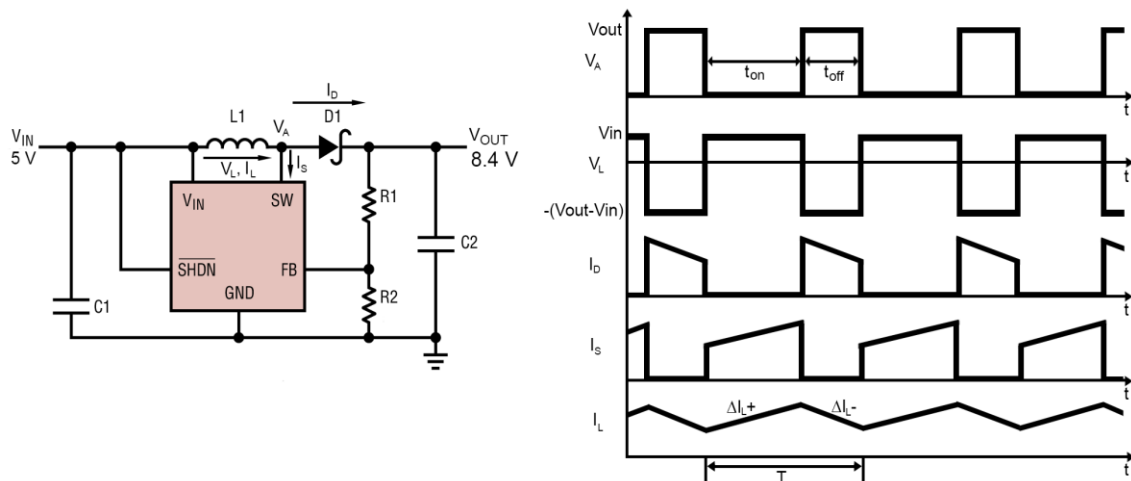


Figura 11: Exemplo de conversor Boost utilizado com as respectivas formas de onda

Neste trabalho a fonte comutada foi implementada com um circuito integrado ao qual se adicionaram alguns componentes passivos. Um exemplo dessa configuração está presente na Figura 11, onde também é possível visualizar as formas de onda dos sinais mais característicos nos vários pontos do circuito.

É possível verificar as equivalências com o circuito de funcionamento teórico explicado acima. O interruptor é realizado através do circuito integrado (através do pino “SW”), sendo o tempo a ON e OFF impostos pelo sinal de feedback que provem da saída e pelo divisor resistivo. Tal como no circuito teórico, verifica-se a existência da indutância e de um diodo, neste caso o diodo é do tipo Schottky, devido às frequências de comutação elevadas e para melhorar a eficiência da fonte.

### 3.4 Microcontroladores

Atualmente a grande maioria dos sistemas eletrônicos possui uma unidade central que processa todos os dados recebidos pelos sensores, podendo ou não armazená-los, e faz o sistema responder de acordo com o seu objetivo. Esta unidade dedica-se à execução de tarefas como a instrumentação (na leitura dos valores recebidos), o controlo (na resposta a uma determinada situação) e às comunicações em rede (no caso de haver ligações à internet ou a partilha de informações com outros dispositivos).

Em projetos de eletrónica, os microcontroladores podem ser uma opção muito atrativa para implementar o controlo automático, pois possuem dimensões reduzidas, preços acessíveis e interfaces de fácil utilização. Os microcontroladores desempenham a função de unidade de processamento central num único circuito integrado ou num módulo de reduzidas dimensões. Este dispositivo programável aceita dados digitais ou analógicos, processa-os de acordo com instruções armazenadas e fornece as saídas desejadas para o utilizador.

Todos os sistemas de aquecimento baseados em bandas condutoras exigem alguma eletrónica de suporte, nomeadamente para gerir a temperatura e outras variáveis, validar as medidas e torná-las disponíveis para o utilizador. Isto exige que se possam adquirir e traduzir os sinais elétricos para o domínio da compreensão humana.

Microcontroladores são como minicomputadores que possuem uma unidade de processamento central (CPU) juntamente com uma variedade de periféricos embutidos como memórias e portas de entrada e saída (I/O ports). Possuem memórias *flash* não voláteis, como EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*), memórias voláteis como DRAM (*Dynamic Random Access Memory*) e SRAM (*Static Random Access Memory*), dispositivos de comunicação de entrada e saída tais como UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), USB (*Universal Serial Bus*) ou até mesmo Ethernet. Estão aptos a conectar e interagir com componentes externos e assegurar processos automáticos através de ADCs (*Analog to Digital Converters*), pinos digitais de entrada e saída (I/O pins) e DACs (*Digital to Analog Converters*). As tarefas programadas podem ser realizadas com um elevado nível de abstração permitindo o desenvolvimento de código com linguagens de programação como C, evitando as linguagens intrínsecas nativas de cada construtor [38].

Para escolher a unidade correta para um determinado projeto deve-se pensar sobre a capacidade de processamento, a quantidade de pinos de entrada e saída, o número de temporizadores (*timers*), a quantidade de memória, etc. Para este projeto em particular o microcontrolador deve poder ser alimentado pela bateria escolhida (aproximadamente 7 V), ter pinos de entrada disponíveis para os sensores de temperatura e de estado da bateria, ADCs disponíveis para as respetivas leituras, pinos de saída para o indicador do estado da bateria (LED), ter 2 saídas PWM para o controlo da temperatura das bandas de aquecimento, porta de comunicação para o computador e reduzidas dimensões.

Existem no mercado inúmeras plataformas de microcontroladores com um extenso conjunto de especificações que variam de fabricante para fabricante e de modelo para modelo. No âmbito desta dissertação optou-se pelo uso da plataforma *Arduino* devido ao facto de ser do tipo de “software livre” (*opensource*) e de fácil uso quer em termos de software quer de hardware [39].

O número de utilizadores desta plataforma é muito grande e por isso estão disponíveis no mercado placas de desenvolvimento de preço acessível em relação a outras plataformas de microcontroladores; o software de desenvolvimento (IDE) corre em vários sistemas operativos (Windows, Macintosh OSX e Linux), ao contrário de outros que se limitam ao Windows, tendo uma interface de fácil utilização; todo o software é *opensource*, estando disponíveis vários exemplos de utilizações; e os esquemas das placas são igualmente disponibilizados, permitindo que cada utilizador possa realizar a sua própria placa adaptada ao seu projeto [39].

Estão disponíveis no mercado algumas placas *Arduino* com diferentes características, tamanhos e funções. A placa de desenvolvimento escolhida foi a *Arduino Nano*, Figura 12, que possui todas as funcionalidades necessárias para o projeto e, como fator determinante, é de reduzidas dimensões (45×18 mm), permitindo manter todo o sistema dentro das dimensões especificadas. Inicialmente foi utilizada a placa *Arduino Uno*, no entanto as suas dimensões eram demasiado grandes para o objetivo final do projeto, obter um demonstrador prático, além de possuir um conjunto de funcionalidades mais vasto do que o necessário para este projeto.

Outra placa *Arduino* disponível e desenhada especificamente para projetos para têxteis inteligentes e wearables é a *LilyPad*. Esta placa é de muito reduzidas dimensões e possui capacidades suficientes para o

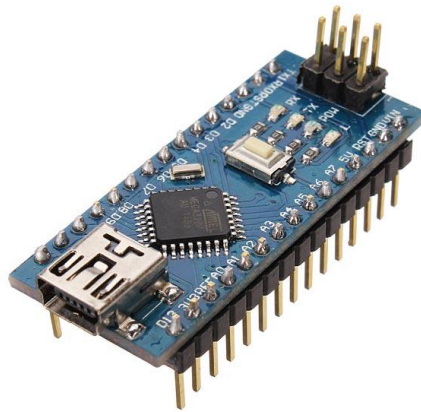


Figura 12: Arduino Nano utilizado

projeto em desenvolvimento, no entanto para testes com placa de prototipagem, a *LilyPad* não é muito adequada e portanto optou-se pela utilização do *Arduino Nano*.

### 3.5 Sensores de Temperatura

Um fator determinante no sistema é a medição da temperatura das bandas de aquecimento, que possibilita o controlo da potência a fornecer-lhes para atingir a temperatura desejada pelo utilizador.

As diferentes opções para a implementação de sensores de temperatura foram analisadas, apresentando-se a seguir o resultado dessa análise, bem como uma descrição sucinta do princípio de funcionamento de cada uma.

Um dos mais comuns e divulgados sensores de temperatura é o termopar. O termopar é um sensor bastante simples, sendo constituído por apenas dois fios condutores, de metais diferentes, em contacto.

Suponha-se um circuito fechado constituído por dois metais diferentes, A e B. Se as temperaturas das duas junções forem diferentes, aparece no circuito uma força eletromotriz (f.e.m.),  $e_{AB}$ , que é aproximadamente proporcional à diferença das temperaturas das duas junções:

$$e_{AB} = \alpha \Delta \theta . \quad (3.2)$$

Este efeito é conhecido como efeito Seebeck.  $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck e  $\theta$  a temperatura. Em rigor, a relação não é exatamente linear, mas, para os efeitos que aqui nos interessam, a gama de temperaturas é suficientemente estreita para se poder desprezar a não linearidade.

A leitura da tensão gerada aos terminais de um termopar devido ao aquecimento não está livre de problemas, pois ao introduzir um instrumento de medida (um voltímetro, por exemplo) são geradas novas junções de materiais diferentes, fazendo com que a leitura esteja incorreta. Acresce que, se a temperatura da junção fria não for constante (o que é o caso), são necessários circuitos e/ou software para fazer aquilo que se designa por “compensação de temperatura da junção fria”. A solução destes e de outros problemas implica hardware e/ou software adicional que tornam o sistema mais “pesado”.

Outro tipo de sensor de temperatura são os sensores de resistência (RTD – *Resistance Temperature Detector*). Baseiam-se no princípio da dependência da resistividade de um material condutor com a temperatura. Estes sensores são normalmente frágeis devido à sua forma e materiais de construção, o que implica uma cautela especial na escolha do local a aplicar.

Em primeira aproximação, o valor da resistência,  $R$ , a uma certa temperatura,  $\theta$ , pode ser representado pelo seguinte modelo linear:

$$R = R_o(1 + \alpha(\theta - \theta_o)) \quad (3.3)$$

em que  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura do material constituinte,  $R$  é o valor da resistência à temperatura  $\theta$ , e  $R_o$  o valor da resistência à temperatura  $\theta_o$  (em geral 0°C). Dentro dos materiais mais normalmente utilizados em RTDs, a platina é, quase sempre, o material utilizado, pois apresenta os melhores resultados, sobretudo de linearidade, sendo aplicado até em sensores de elevado desempenho, por exemplo para calibração.

Para além da fragilidade, estes sensores possuem outra diferença para os termopares. A diferença é o facto de o RTD ser um dispositivo passivo, sendo necessária a injeção de corrente para medir a tensão aos seus terminais. Esta corrente faz com que o sensor aqueça devido ao efeito Joule induzindo erros na leitura da temperatura.

Semelhantes aos RTDs temos os termístores, em que a resistência é função da temperatura, no entanto são baseados em semicondutores.

Existem basicamente dois tipos de termístores, os NTC (do inglês *Negative Temperature Coefficient*) e os PTC (do inglês *Positive Temperature Coefficient*), sendo que os mais utilizados são os do tipo NTC. Neste caso, a sua resistência diminui com a temperatura.

Um NTC é um sensor com uma resposta não linear, logo a expressão que mostra a relação entre a resistência e a temperatura não é simples, sendo necessário recorrer a algumas simplificações. A aproximação exponencial da resposta leva a uma expressão empírica relativamente simples:

$$R = R_o e^{\frac{\beta}{\theta - \theta_o}} \quad (3.4)$$

Além de ser não linear, a curva de variação com a temperatura não é exatamente conhecida, sendo que o valor de  $\beta$  pode variar de dispositivo para dispositivo, ainda que dentro de um mesmo tipo. Esta equação é uma simplificação do modelo de Steinhart-Hart<sup>2</sup>, mas este modelo é mais complicado e exige um conhecimento mais detalhado das características do termístor.

Portanto, os termístores são um tipo de sensor de temperatura de baixa precisão, embora suficiente para a aplicação que temos em vista. A não linearidade pode ser reduzida utilizando técnicas de circuito adequadas (por exemplo introduzindo uma resistência independente da temperatura em série ou em paralelo com o termístor) ou por software, mediante a utilização de *lookup tables*.

---

<sup>2</sup> O modelo de Steinhart-Hart foi publicado em 1968, num contexto diferente.

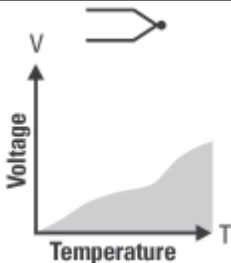
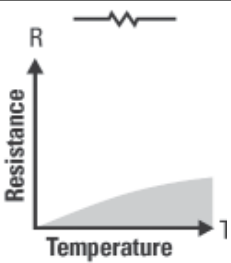
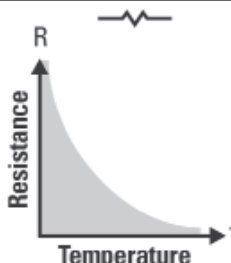
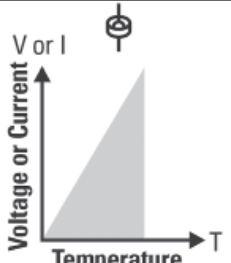
A seu favor, os termístores têm o preço reduzido e uma variação grande com a temperatura (cerca de 10 vezes maior que as resistências RTD) o que facilita muito o projeto da interface elétrica do dispositivo. São o sensor preferido nas aplicações industriais em que uma exatidão superior a cerca de 0,5°C não seja exigida.

Por último temos os sensores de temperatura integrados. São baseados num circuito eletrónico que se comporta como uma fonte de corrente ou de tensão, sendo a corrente ou a tensão proporcional à variação da temperatura.

Todos eles se baseiam, de uma forma ou de outra, na variação da tensão de uma junção semicondutora com a temperatura.

Estes sensores apresentam geralmente uma boa linearidade, mas estão limitados às temperaturas a que se podem operar os circuitos integrados, entre os -50°C e os 150°C.

Tabela 2: Comparação dos sensores de temperatura [40]

Termopar	RTD	Termístor	Integrado
			
<b>Vantagens</b>			
Ativo Simples Robusto Barato Grande variedade de formas Grande gama de temperaturas	Mais estável Exato Mais linear que o termopar	Sensível Rápido Medição fácil	O mais linear Gama de saída elevada Barato
<b>Desvantagens</b>			
Não linear Baixa tensão Necessária compensação Pouco estável Pouco sensível	Caro Lento Requer fonte de corrente Pequena variação de resistência Leitura a 3 ou 4 fios	Não linear Gama de temperaturas limitada Frágil Requer fonte de corrente Autoaquecimento	$\theta < 250^{\circ}\text{C}$ Necessita de alimentação Lento Autoaquecimento Configurações limitadas



Os melhores sensores de temperatura integrados baseiam-se num circuito conhecido por “célula de Brokaw”, constituída por transístores bipolares com diferentes áreas de emissor. Mediante certas condições, que não referiremos aqui por estar fora do âmbito deste trabalho, é possível obter uma relação linear entre a tensão ou a corrente de saída e a temperatura.

Na Tabela 2 encontra-se a comparação entre os quatro sensores referidos anteriormente, mostrando as suas respostas, as vantagens e as desvantagens de cada um.

Foi a partir daqui que se escolheu o tipo de sensor a utilizar, recaindo essa escolha para o termístor (NTC) devido ao facto de ser sensível para a gama de temperaturas que se desejam medir, ser rápido e possuir reduzidas dimensões, não sendo necessário muitos componentes adicionais para a realização da leitura.

### 3.6 Controladores de Temperatura

Nesta secção procuram mostrar-se alguns dos sistemas de controlo existentes bem como o seu princípio de funcionamento, sendo um deles o implementado para o controlo de temperatura exigido pelo presente trabalho. Um sistema de controlo define-se como “um sistema em que se manipula o elemento causa tendo em vista, se possível, atingir um efeito desejado” [41]. No nosso dia-a-dia utilizamos frequentemente operações de controlo sem termos essa noção. Qualquer movimento do corpo humano é comandado através de um sistema de controlo, tal como agarrar um objeto. Este movimento é controlado pelo cérebro e coordenado com a informação recebida pelos sentidos, neste caso, o tato (o peso do objeto) e a visão (a posição do objeto). O mesmo acontece, por exemplo, num forno de cozinha, em que a temperatura no interior do forno é controlada através de um sistema de controlo.

Existem dois tipos de controlo de um sistema, o controlo em malha aberta ou não realimentado e o controlo em malha fechada ou realimentado. Nos sistemas de controlo de malha aberta a entrada (referência) não é afetada pela saída (Figura 13). A resposta de um sistema em malha aberta, o sinal de saída, depende apenas do sinal de entrada e das características do sistema, não havendo qualquer comparação entre o sinal de saída medido e o sinal de entrada. Este tipo de sistemas é de realização quase impossível, pois implica um conhecimento total do processo a controlar e este tem de manter o seu comportamento ao longo do tempo, caso ocorra algum tipo de perturbação o objetivo a atingir é alterado, não havendo possibilidade alguma de correção.

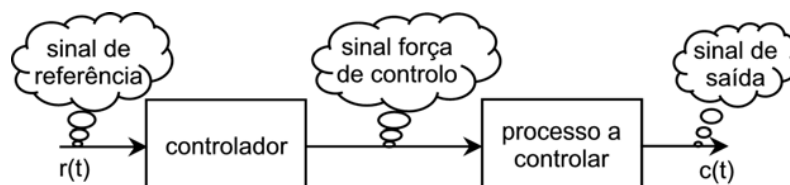


Figura 13: Sistema de controlo não realimentado [41]

O controlo em malha fechada resolve o problema relatado do controlo em malha aberta, pois o sinal de saída vai ser comparado com o sinal de entrada afetando o respetivo sinal de controlo (Figura 14). Define-se por sistema de controlo em malha fechada um sistema em que o sinal de saída é adicionado algebricamente ao

sinal de entrada. Normalmente o sinal de realimentação é subtraído ao sinal de entrada, originando o sinal de erro (realimentação negativa), contudo pode ser também adicionado (realimentação positiva), o que conduz, em geral, a instabilidade no sistema. Nos casos em que a realimentação é negativa, pretende-se reduzir o erro e conseguir na saída o valor esperado.

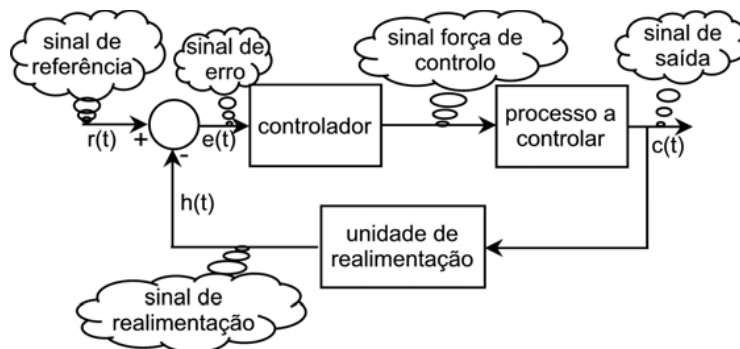


Figura 14: Sistema de controlo realimentado [41]

Nos sistemas de controlo em malha fechada com realimentação negativa existem unidades e sistemas que produzem sinais característicos, tais como:

- Sinal de referência/entrada: sinal que representa o objetivo a atingir.
- Sinal de erro: sinal resultante da diferença entre o sinal de referência e o sinal de realimentação.
- Sinal de controlo: sinal que atua diretamente no sistema a controlar.
- Sinal de retorno: sinal de saída utilizado para comparação algébrica com o sinal de entrada.

O que caracteriza os diferentes modos de controlo é a função implementada pelo bloco a que chamámos “controlador”. Dentro destes, o mais elementar e de mais fácil implementação é o controlador ON-OFF.

Neste tipo de controladores a função implementada é a de um comparador. A saída do controlador só pode assumir dois valores distintos, um máximo e um mínimo. Se o sinal de erro é superior a um dado valor, é aplicada ao sistema a saída máxima. Caso contrário, é aplicada a saída mínima. Transportando esta explicação para o caso do controlo de temperatura no projeto, quando a temperatura medida (saída) é inferior à temperatura solicitada (entrada), o controlador toma a posição “ON” e faz com que a temperatura suba, caso contrário, a temperatura medida é superior à solicitada, o controlador toma a posição “OFF” e a temperatura tende a descer e assim sucessivamente.

Este tipo de controlador apresenta uma saída oscilatória, no caso da temperatura, a temperatura vai estar constantemente a oscilar perto da temperatura solicitada, no entanto nunca permanece fixa nesse valor.

Para evitar esse problema, uma solução é a utilização de um controlador proporcional (P) em que o sinal de controlo é diretamente proporcional ao sinal de erro através da constante de proporcionalidade  $K_p$ . Para determinados valores de  $K_p$  a resposta do sistema não apresenta qualquer tipo de oscilação, contudo pode ser gerado um erro em regime estacionário não nulo, também conhecido como erro de *offset*. Com o aumento do valor de  $K_p$  a resposta torna-se mais rápida, no entanto pode aparecer o fenómeno do *overshoot*, ou mesmo um comportamento oscilatório em torno da saída esperada, tornando-se o sistema instável.

A forma de eliminar o erro em regime estacionário é a introdução de uma componente integral (I) ao sistema. A ação integral no sistema produz uma saída que é proporcional ao erro acumulado, isto é, ao valor do erro e à sua duração. Com isto, o processo é acelerado e o erro em regime estacionário é eliminado. No entanto, o *overshoot* não é eliminado, podendo mesmo ser aumentado com esta ação. É assim necessário outra forma para eliminar este problema.

A solução é a adição de um termo derivativo (D) ao processo. A derivada do sinal de erro é calculada produzindo uma saída proporcional à velocidade de variação do erro. Esta componente antecipa a tendência do sinal de erro e permite diminuir significativamente o *overshoot*, com a contrapartida de atrasar um pouco a resposta do sistema.

Com a conjugação dos três tipos de controladores referidos acima, obtém-se o controlador PID (Proporcional Integrador e Derivativo). Este tipo de controladores é o mais utilizado na indústria, pois apresenta um desempenho robusto para uma grande variedade de condições de funcionamento, simplicidade funcional, que permite operá-los diretamente de forma simples, e é composto por três componentes ajustáveis (proporcional, integrador e derivativo) [41].

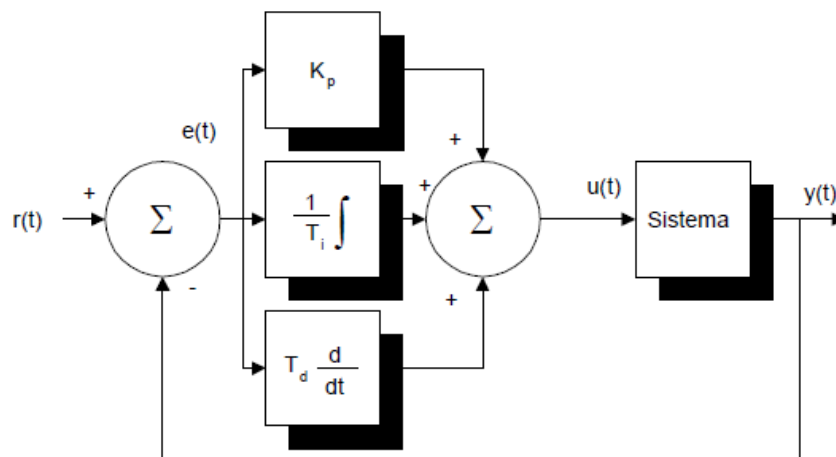


Figura 15: Esquema típico de um controlador PID [41]

Existem outros tipos de controladores com aplicações mais focadas em certos tipos de aplicações, porém para esta dissertação a escolha recaiu no controlador PID.

Através da Figura 15 obtém-se a expressão do sinal de controlo que é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d(e(t))}{dt} . \quad (3.5)$$

No entanto, como os sinais são processados no microcontrolador, a expressão anterior tem de ser transformada para o domínio discreto. Com algumas simplificações, nomeadamente para o cálculo da derivada, obtém-se [42]:

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + \frac{1}{T_i} e(k) \cdot h + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{h} \quad (3.6)$$

em que  $h$  é o período de amostragem.

### **3.7 Sistemas de Comunicação Sem Fios – Bluetooth**

Uma vez que foi decidido que o sistema de controlo de temperatura iria possibilitar a comunicação com um *smartphone*, para a apresentação de dados ao utilizador bem como a possibilidade da programação da temperatura desejada, foi necessário selecionar o protocolo de comunicação mais apropriado.

A utilização de cabos de ligação foi descartada, pois pretende-se que o sistema seja o mais portátil possível e confortável para o utilizador, reduzindo-se assim ao máximo o impedimento dos movimentos do corpo.

Em [43] foi apresentada uma visão geral dos quatro protocolos standard mais populares para comunicações sem fios de curto alcance e baixo consumo de energia. São eles: Bluetooth (IEEE 802.15.1), ultra-wideband (UWB, IEEE 802.15.3), ZigBee (IEEE 802.15.4) e Wi-Fi (802.11). No entanto, apenas dois estão massificados no mundo dos *smartphones*, que é o caso do Bluetooth e do Wi-Fi. O UWB e o ZigBee são mais direcionados para ligações multimédia de grande largura de banda e para monitoração e domótica respetivamente.

Comparando o Bluetooth e o Wi-Fi, o primeiro foi desenhado para dispositivos baratos e de curto alcance, para substituir cabos de ligação entre o computador e os periféricos, enquanto o Wi-Fi está mais direcionado para comunicações computador-computador substituindo as redes cabladas.

O Wi-Fi proporciona taxas de transferência de dados muito elevadas e com um maior alcance comparativamente com o Bluetooth, no entanto, o consumo energético do Wi-Fi é muito mais elevado, já que o Bluetooth foi projetado para produtos portáteis limitados à energia de baterias.

Como a rede formada será de apenas 2 dispositivos, não necessitando de altas taxas de transferência nem muita rapidez, com a preocupação da poupança da energia da bateria, o protocolo escolhido foi o Bluetooth que é simples e seguro de usar.

## 4 Hardware

Neste capítulo são apresentados os componentes utilizados para a realização de todo o sistema. São apresentadas todas as características de cada um bem como a forma como foram implementados no projeto.

### 4.1 Carregador da Bateria

Escolhida a bateria e o método de carga a utilizar, era necessário realizar ou encontrar um circuito capaz de executar essa tarefa. Depois de alguma pesquisa verificou-se que existem circuitos integrados e até placas de avaliação que efetuam a carga inteligente (com as respectivas fases de corrente contínua e tensão contínua) das baterias de íões de Lítio.

O circuito integrado selecionado para realizar essa tarefa foi o MCP73213, desenvolvido pela Microchip, que é específico para controlar o ciclo de carga de baterias de íões de Lítio de duas células com proteção de entrada contra sobre tensões [44].

Segundo a nota de aplicação do fabricante, este circuito integrado é utilizado da forma indicada na Figura 16.

Verifica-se que a utilização de componentes externos é muito reduzida e a aplicação é feita exatamente a uma bateria com duas células de íões de Lítio em série como a bateria escolhida para a aplicação.

A Microchip disponibiliza uma placa de avaliação do circuito integrado com o esquema da figura, de reduzidas dimensões e ideal para dispositivos portáteis. Esta placa foi adquirida para inserir no sistema a desenvolver já que tem as especificações requeridas para efetuar a carga da bateria escolhida e tem

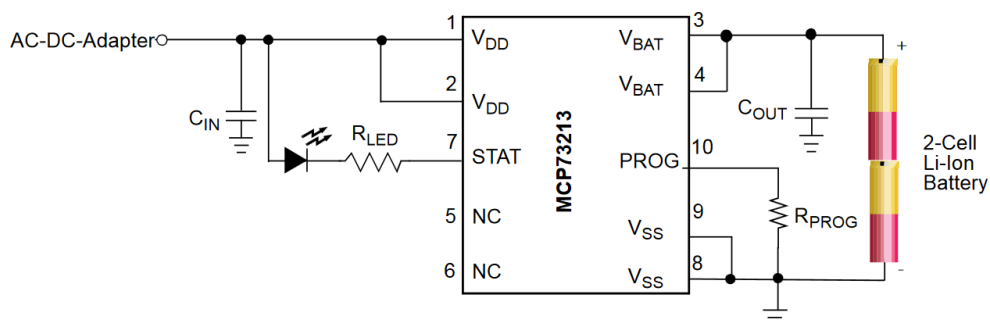


Figura 16: Aplicação típica do MCP73213 [44]

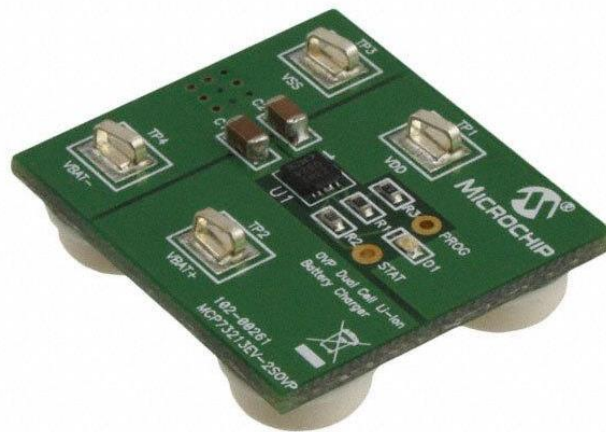


Figura 17: Placa de avaliação do carregador de baterias

dimensões, 31,75×28 mm, que não ultrapassam os limites impostos.

A placa escolhida tem as seguintes características [45] importantes para o projeto em causa:

- Utiliza um algoritmo de carga CC/CV;
- Proteção contra sobre tensões à entrada de 13 V;
- Tensão de carga da bateria: 8,4 V (dentro de outras possibilidades);
- Corrente de carga de 500 mA ou 1000 mA;
- Recarga automática;
- Regulação térmica;
- LED indicador do estado da carga;
- Intervalo de temperatura: -40°C a +85°C.

Um valor importante que não se pode esquecer é o valor da tensão de entrada que tem de ser seguramente superior à tensão de carga, 8,4 V. O fabricante indica que o valor mínimo é  $8,4\text{ V} + 0,3\text{ V} = 8,7\text{ V}$ , mas para obter um correto funcionamento, sem falhas, e devido ao facto de a tensão de entrada poder conter *ripple*, é conveniente usar uma tensão de entrada 1 V superior à tensão de carga, logo 9,4 V. Isto implica que o conversor *boost* a utilizar precisa de fazer subir a tensão da porta USB, 5 V, para 9,4 V (praticamente duplicar a tensão).

## 4.2 Step-Up/Boost Converter

Como já foi indicado, é necessário elevar a tensão da ficha micro USB para os 9,4 V com um conversor DC-DC.

Inicialmente pensou utilizar-se uma solução a partir do circuito integrado da Linear Technology, LT3479, que se trata de um conversor DC-DC *step-up* que consegue eficiências de até 89%. Foram realizadas simulações do comportamento do circuito em conjunto com os demais componentes que perfazem o completo conversor *step-up*, utilizando o simulador da mesma Linear Technology, o LTspice IV, que possui um modelo do

LT3479. O circuito simulado está presente na Figura 18 e alguns sinais das simulações estão presentes na Figura 43 em anexo, demonstrando o correto funcionamento para o caso em questão.

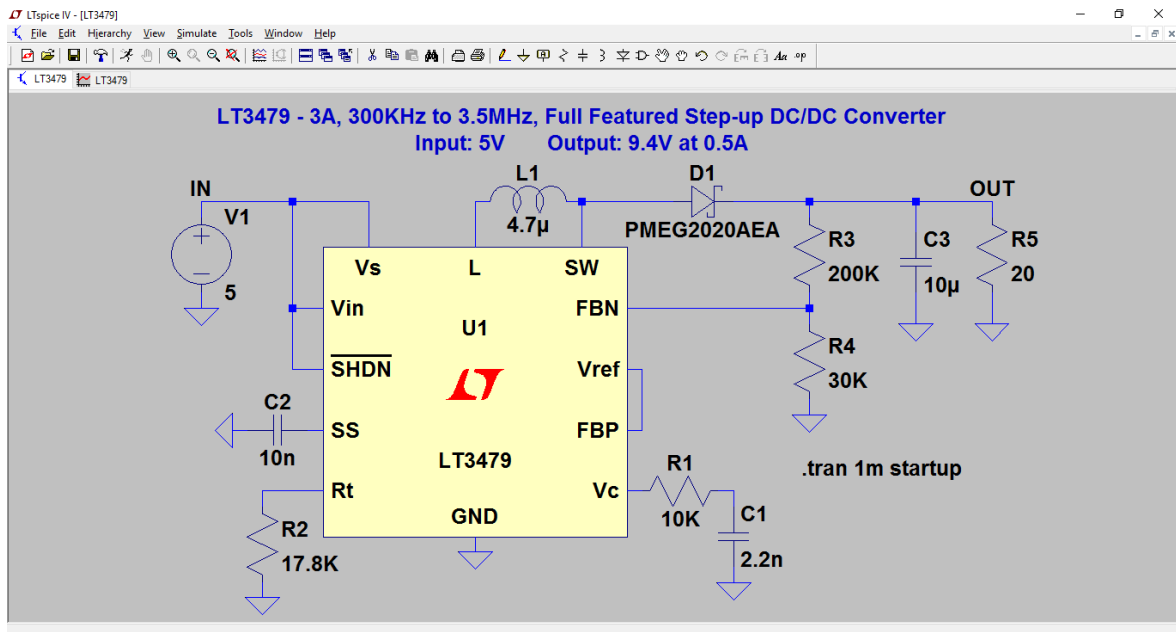


Figura 18: Circuito simulado

Seguidamente, e pelo facto de o circuito integrado ser de muito reduzidas dimensões e não ser de fácil teste em placa de prototipagem, foi realizado um PCB correspondente ao circuito de conversão e posteriormente testado, utilizando os devidos componentes externos, tal como um diódo *Schottky* que aguentava correntes elevadas e uma bobine indicada para o efeito. No entanto, o comportamento do circuito não foi o esperado, pois a saída apenas era mantida no valor esperado aquando da imposição de uma carga à saída de valor elevado, isto é, uma corrente de saída baixa, apresentando um *ripple* bastante significativo. Quando a resistência de saída era inferior, uma corrente de saída maior, a tensão de saída baixava e o circuito integrado aquecia, acabando mesmo por destruí-lo.

Abandonou-se a ideia anterior e procurou-se um conversor *step-up* integrado, isto é, um que não precisasse de componentes externos, tendo apenas a entrada, a saída e a massa. Não foi possível encontrá-lo, no entanto foi descoberto um módulo conversor do tipo *step-up* ajustável. A tensão de saída é ajustada a partir de um potenciómetro e possui uma entrada micro USB que permite ligar diretamente o carregador, evitando ter de adicionar uma entrada micro USB ao protótipo final comprada separadamente.

Este módulo é de reduzidas dimensões (30×17×14 mm) o que permite que as dimensões do protótipo final não ultrapassem as indicadas nos objetivos. O princípio de funcionamento está descrito na secção 0, mas é possível reconhecer a presença da indutância, do diódo e do condensador de saída. O sinal de comutação (PWM) que faz abrir e fechar o interruptor, como foi explicado, é gerado a partir de um circuito integrado, MT3608 [46], que com a variação da resistência de *feedback*, neste caso no potenciómetro, faz variar a tensão de saída. Este possui uma gama de valores de entrada de 2V a 24V e uma tensão máxima de saída de



Figura 19: Módulo Step-Up com entrada micro USB utilizado

28V, apresentado uma eficiência que pode chegar aos 93% (o *datasheet* indica este valor para o caso:  $V_{in} = 5\text{ V}$ ,  $V_{out} = 12\text{ V}$  e  $I_{out} = 200\text{ mA}$ ).

### 4.3 Arduino

Como já foi discutido anteriormente, o módulo microcontrolador escolhido foi o *Arduino Nano*. Aqui vão ser apresentadas as suas características e discutidas algumas das mais influentes para o presente projeto.

Esta placa baseia-se num processador da Atmel, ATmega328, com uma velocidade de processamento de 16 MHz. Funciona com tensões de alimentação entre 7 V e 9 V, operando com 5 V obtidos de um regulador linear. Possui 8 entradas analógicas ligadas a um ADC de 10 bits de resolução (1024 valores diferentes) e 14 pinos digitais de I/O, com possibilidade para 6 saídas digitais de PWM de 8 bits. Em termos de memória, possui 1 kB de EEPROM, 2 kB de SRAM e 32 kB de Flash. Tem uma plataforma de comunicação UART e uma ficha mini USB que permite a ligação ao computador para programação e ou alimentação.

O *Arduino Nano* pode ser alimentado através de uma fonte externa (pino 30), com uma tensão não regulada entre 6V e 20V, sendo por este meio que a alimentação será feita no projeto, através da bateria. A partir desta alimentação, um regulador incorporado de 5 V (UA78M05 da Texas Instruments) alimenta todos os pinos, sendo este o valor da lógica de operação (0 V – Low, 5 V – High), podendo ser alterado para um valor de referência diferente. Cada pino pode fornecer ou receber um máximo de 40 mA.

A forma de programação da placa é facilitada através do software de programação disponível (IDE), estando o processador já composto com um *bootloader* que permite a transferência de um novo código sem ser necessário a utilização de programadores externos.

Para a aplicação em causa, esta placa tem uma excelente performance e com um preço relativamente baixo, sendo de fácil aprendizagem mesmo para pessoas com pouca experiência em programação devido à informação abundante que é disponibilizada por outros utilizadores.



## 4.4 Termistor

O termistor NTC foi o elemento escolhido para converter a temperatura a medir numa grandeza elétrica na qual se pode trabalhar com um microcontrolador. Como são implementadas duas bandas de aquecimento são necessários dois termistores para a medição da temperatura de ambas as bandas. Foram escolhidos dois termistores semelhantes para se obterem as medições o mais idênticas possível.

Como foi explicado, para medir a temperatura com termistores é necessário medir a resistência. No entanto, um microcontrolador não consegue medir resistências diretamente, pois não possui nenhum ohmímetro embutido. Em vez disso, possui apenas um medidor de tensão através de um ADC. É necessário converter a resistência em tensão através de um divisor de tensão. Para fazer isso colocou-se uma resistência de valor conhecido em série com o termistor e a tensão é medida no ponto entre elas, ver Figura 20.

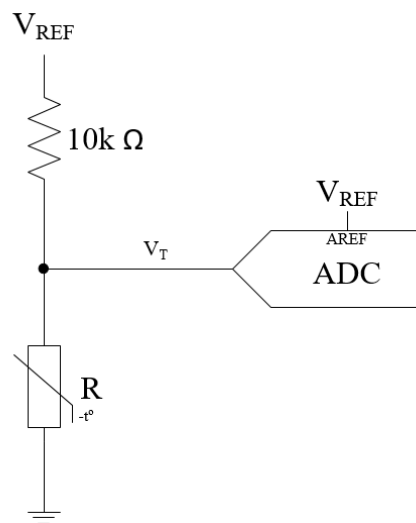


Figura 20: Circuito de condicionamento do sinal do termistor

Como o conversor do *Arduino* é de 10 bits, consegue-se medir 1024 valores diferentes, de 0 (valor mínimo) a 1023 (máximo). Através da expressão típica de um divisor resistivo, o valor lido pelo ADC é dado por:

$$V_{ADC} = \frac{R}{R + 10k} \times 1023 \therefore R = \frac{10k}{\frac{1023}{V_{ADC}} - 1} \quad (4.1)$$

Para obter melhores resultados, reduzindo o efeito do ruído da placa, foi utilizado o valor de 3,3 V provenientes de um pino do *Arduino* para o valor mais alto da lógica de acondicionamento e não os 5 V. Os 3,3 V foram ligados ao pino de referência analógica (AREF) e assim o valor mais alto medido será sempre 3,3 V em qualquer medida analógica. Isto favorece o desempenho pois os 3,3 V são conseguidos através de um segundo regulador, o que implica um sinal mais constante. Para reduzir igualmente o efeito do ruído, o *Arduino* foi programado para fazer várias medições, determinar a média e apresentar a esse valor.

O valor obtido é a resistência, porém o que se procura é o valor da temperatura medida. É necessário converter a resistência medida no valor de temperatura correspondente. Como já vimos, a equação de

Steinhart-Hart apresenta uma boa aproximação para a conversão, no entanto é necessário conhecer algumas variáveis que não se conhecem para os termístores utilizados. Assim foi utilizada a equação (4.2) com o parâmetro beta:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta_0} + \frac{1}{\beta} \frac{R}{R_0}. \quad (4.2)$$

Em que apenas é preciso saber  $\theta_0$ , (que é a temperatura ambiente,  $25^\circ\text{C} = 298.15\text{K}$ ),  $\beta$  e  $R_0$  (a resistência do termístor à temperatura ambiente).

A partir daqui torna-se fácil obter o valor da temperatura no microcontrolador. Os termístores utilizados são de  $10\text{ k}\Omega$  (apresentam uma resistência de  $10\text{ k}\Omega$  à temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ ) com um fator  $\beta$  de  $3977\text{K}^{-1}$  (este valor foi retirado de [47] podendo não estar totalmente de acordo com os termístores utilizados, pois este valor pode variar mesmo dentro da mesma gama de termístores). O fator  $\beta$  foi modificado na programação após várias medições para se obter a melhor aproximação possível de leituras efetuadas com um termómetro real. A resistência série utilizada foi de  $10\text{ k}\Omega$  para que à temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$  o valor lido no ADC fosse aproximadamente um valor médio (512), permitindo medir uma gama elevada de temperaturas tanto inferiores como superiores.

#### 4.5 Medir Estado da Bateria

De forma a informar o utilizador sobre o estado da capacidade da bateria, era necessário medir a tensão aos terminais da bateria e assim dizer se a bateria ainda se encontrava num estado em que podia manter o dispositivo ligado ou se era necessário efetuar o carregamento da mesma.

Neste caso, ao contrário da temperatura, não será necessário nenhum transdutor, pois os sinais já são elétricos e a grandeza a medir pode ser medida diretamente pelo *Arduino*. Contudo, a bateria utilizada possui uma tensão superior a  $7\text{ V}$  e o *Arduino* foi configurado anteriormente para funcionar com o valor lógico máximo de  $3,3\text{ V}$ , logo qualquer tensão apresentada à entrada de um pino analógico superior a  $3,3\text{ V}$  será considerado  $3,3\text{ V}$ . Foi necessário reduzir a tensão da bateria para valores mais baixos, para possível medição com o

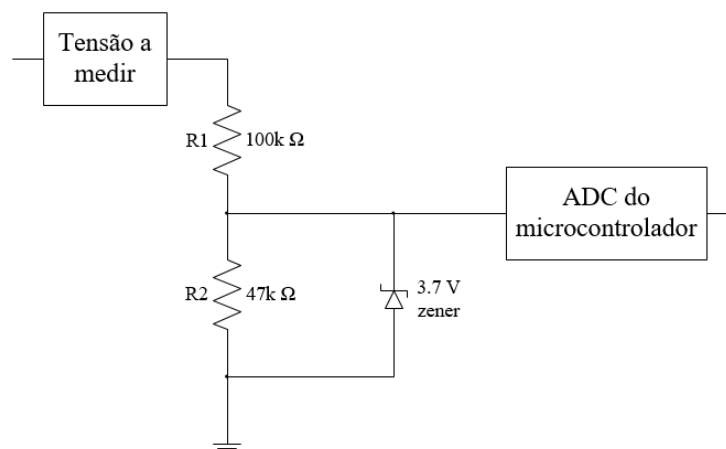


Figura 21: Circuito de condicionamento do sensor de tensão da bateria

*Arduino* (Figura 21). Para isso recorreu-se a um divisor de tensão, fazendo com que a gama de medição do sensor de tensão fosse de 0 V a 10 V, permitindo, por segurança, medições de valores superiores à tensão da bateria. Assim, quando for apresentada uma fonte com 10 V, estes serão convertidos em 3,3 V e medidos pelo *Arduino*.

Para a realização do divisor de tensão teve-se o cuidado de dimensionar as resistências para que a corrente consumida fosse muito baixa para não prejudicar a eficiência do sistema. As resistências devem ser elevadas e seguir a seguinte equação:

$$3,3 = 10 \frac{R_2}{R_1 + R_2} . \quad (4.3)$$

Com o objetivo de proteger o pino analógico de entrada do sensor de tensão para tensões muito elevadas, já que estas poderiam danificar o microcontrolador, foi adicionado um díodo zener de 3,7 V em paralelo com a resistência  $R_2$ , fazendo com que para valores de tensão superiores o díodo entra em condução, protegendo o pino dessas tensões.

Depois de lida a tensão da bateria é necessário avisar o utilizador caso seja necessário carregá-la. Como já foi discutido, a tensão mínima da bateria utilizada é de 5,5 V, logo quando é atingido esse valor o utilizador tem de ser avisado. Para isso foi utilizado um LED bicolor funcionando da seguinte forma: quando a bateria está com tensões superiores a 5,5 V o LED está verde, caso contrário o LED fica vermelho, avisando o utilizador da carga baixa da bateria.

O LED utilizado é equivalente ao da Figura 22, onde se podem visualizar as 3 ligações. Ao cátodo é ligada uma resistência à massa, impondo a corrente de polarização e aos ânodos são ligados dois pinos digitais de saída do *Arduino*, um correspondente à cor verde e outro à vermelha.

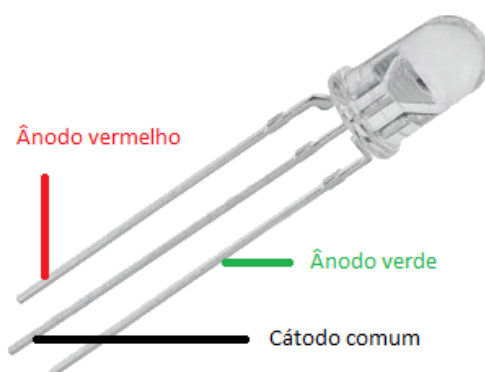


Figura 22: LED bicolor com dois ânodos (para a cor verde e vermelha) e um cátodo comum

## 4.6 Seletor de Função

Um dos requisitos do sistema era a necessidade de um seletor de função do tipo “*On(normal)/Off/On(hi power)*”, em que na posição *Off* o sistema está desligado. Na posição *On(normal)* o sistema está a funcionar com uma temperatura desejada para as bandas de aquecimento de 30°C, por se tratar

de uma temperatura mais confortável e não de extremo calor (abaixo da temperatura do núcleo do corpo). Na posição *On*(hi power) o sistema funciona com uma temperatura mais elevada, 40°C, um pouco acima da temperatura do interior do corpo (37°C), para situações extremas de frio e compensar o calor dissipado pelo vestuário. Nesta posição, quando utilizado junto à pele, é possível que funcione como analgésico para as dores musculares e das articulações, pois as faixas térmicas terapêuticas patenteadas pela ThermaCare atingem essa temperatura [48].

A seleção de função será efetuada a partir de um interruptor com 3 posições e 6 pinos (2 circuitos). A posição central do interruptor indica a posição *Off*, que faz com que a bateria seja desconectada do circuito, não havendo qualquer ligação. As outras duas posições fazem com que a bateria fique conectada e, dependendo da posição, lida através de dois pinos no microcontrolador, fique a funcionar no modo normal ou *hi-power*. Um esquema do circuito com o seletor de função está apresentado em seguida, onde se pode ver a forma como foi realizado.

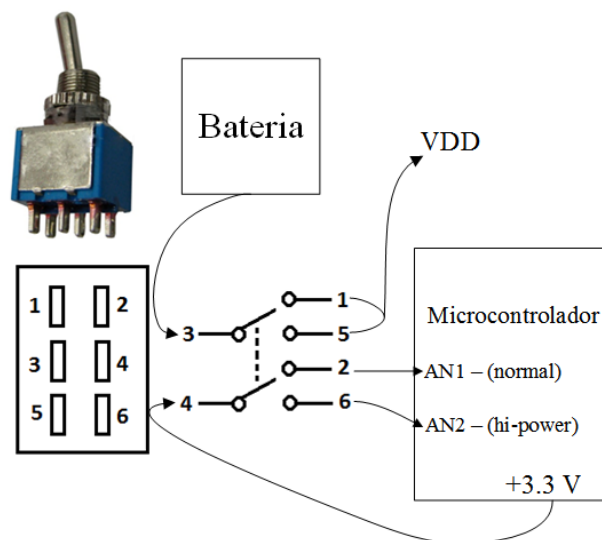


Figura 23: Circuito seletor de função

## 4.7 Transístor de Potência

A temperatura das bandas de aquecimento é controlada através do microcontrolador que, de acordo com as temperaturas lidas e a temperatura desejada pelo utilizador, gera um sinal PWM que coloca um transístor em condução ou na zona de corte. A forma detalhada do circuito está apresentada no esquema da Figura 24.

É possível verificar que quando o sinal PWM que controla a base do transístor possui um *duty-cycle* de 100%, isto é, no nível máximo no tempo total, o transístor conduz, pelo que passa corrente permanentemente na banda de aquecimento. Caso o *duty-cycle* seja de 0%, o transístor está cortado todo o tempo, fazendo com que não exista qualquer corrente a atravessar a banda, logo a banda não aquece. O controlo é assim efetuado variando os tempos de condução do transístor de acordo com o maior ou menor *duty-cycle*.

Para as correntes que iremos encontrar, é necessária a utilização de transístores de potência.

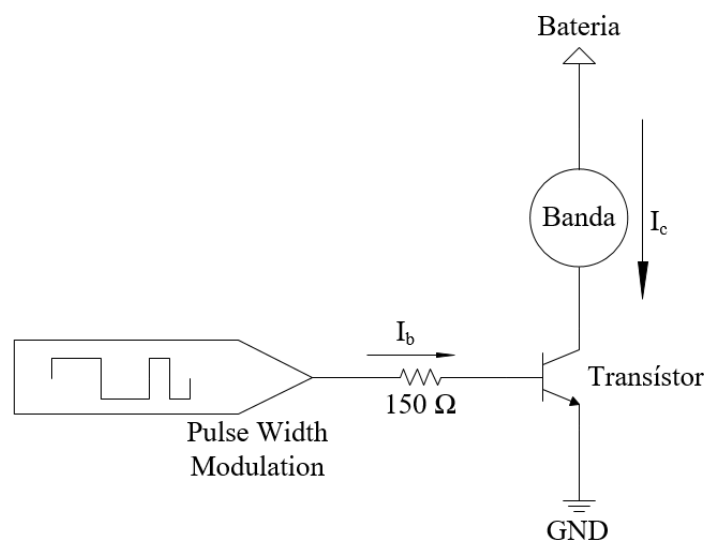


Figura 24: Circuito de controlo da banda de aquecimento

Utilizaram-se transístores do tipo *npn* BD203 [49] da Comset Semiconductores, que têm como características de interesse para o projeto: suportam 60 V de tensão entre o coletor e o emissor e entre o coletor e a base (mais do que suficiente para a aplicação que terá um máximo para a tensão da bateria utilizada); suportam 8 A de corrente de coletor (no projeto só é necessário suportar correntes de 1 A ou 2 A máximo); uma corrente de base máxima de 3 A; consegue dissipar até 60 W; o valor da tensão base-emissor de saturação é 2 V (os 5 V do sinal de *duty-cycle* serão suficientes para colocar o transístor na saturação) e as suas dimensões são comportáveis para o projeto possuindo um encapsulamento do tipo TO-220.

#### 4.8 Sistema de Comunicação Sem Fios

Depois de todo o processamento e controlo feito através do microcontrolador, surgiu a ideia de se poder criar uma aplicação para *smartphone* para o utilizador do dispositivo poder indicar a temperatura que deseja para as bandas de aquecimento, visualizar a temperatura corrente das bandas e a tensão da bateria em valor absoluto ou em percentagem da carga máxima, não estando sujeito apenas às temperaturas de funcionamento normal (30°C) ou *hi-power* (40°C), sem saber concretamente as temperaturas das bandas nem o estado da bateria (para além do LED bicolor).

No entanto, para haver essa troca de informação entre o dispositivo e o *smartphone*, não seria desejável ter um cabo USB a ligar ambos e portanto foi feito um estudo sobre os sistemas de comunicação sem fios apresentado anteriormente, onde foi escolhido o protocolo Bluetooth.

A maior parte dos *smartphones* já possui um módulo de comunicação Bluetooth incorporado (do tipo *master*), porém a aplicação em desenvolvimento não, nem o *Arduino* tem essa funcionalidade já incorporada.

Para resolver esse entrave foi necessário encontrar um dispositivo que possibilita a conexão ao *Arduino* e que proporcione a comunicação através de Bluetooth entre o *Arduino* e o *smartphone*. Devido à globalização dos projetos utilizando *Arduinos*, existem muitos exemplos e documentação de como resolver muitos problemas

com este tipo de dispositivos. O problema aqui relatado sobre a comunicação Bluetooth é resolvido, em muitos exemplos, utilizando o módulo HC-06 (do tipo *slave*) Figura 25. Este módulo é de reduzidas dimensões (27×13×2 mm) e tem uma interface de conexões indicada para a utilização com os pinos do *Arduino*.

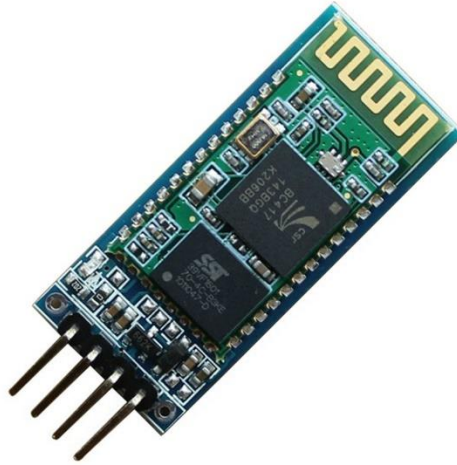


Figura 25: Módulo de comunicação Bluetooth HC-06

Uma das várias empresas a comercializar este tipo de módulo fornece as informações características presentes em [50]. O módulo possui vários pinos, no entanto apenas 4 são suficientes para as necessidades do projeto. Os pinos são o de alimentação, que permite tensões entre 3,1 e 4,2 V, consumindo no máximo 40 mA no emparelhamento e 8 mA em comunicação, podendo ser alimentado diretamente a partir dos 3,3 V provenientes da placa *Arduino*; o de massa e os de transmissão e recepção que também podem ser ligados diretamente à placa *Arduino*, aos pinos GND, TX e RX respetivamente. Com isto verifica-se que este módulo é ideal para funcionar com o *Arduino*. Para além destas vantagens, o seu custo é baixo, apresentando uma performance muito elevada como transmissor sem fios.

## 5 Software

Neste capítulo é apresentado o software desenvolvido para o *Arduino*, com especial ênfase para a programação do controlador, e para a aplicação para *smartphone*.

### 5.1 *Arduino*

A placa *Arduino Nano* é o “cérebro” de todo o sistema e é nele que são programadas todas as tarefas que se desejam realizar. Para a sua programação foi utilizado o IDE disponível para todos os utilizadores, sendo a comunicação e o carregamento do código feita entre a placa e o computador através de um cabo USB que liga à porta mini USB da placa.

Antes de proceder à criação do algoritmo que vai permitir o controlo de todo o sistema, é necessário conseguir efetuar todos os procedimentos básicos que constituem a totalidade do sistema, tais como a leitura de valores e a forma de atuação de determinados pinos de I/O.

Estes procedimentos básicos são considerados como funções do programa geral, que as invoca aquando da respetiva necessidade.

No presente sistema a ação mais essencial é a leitura do valor da temperatura através dos termístores. Para tal foram criadas duas funções (uma para cada termístor, pois mesmo sendo iguais existem diferenças entre as suas respostas em temperatura) que leem o respetivo valor do ADC e o convertem na unidade pretendida, que para o caso é °C. As funções responsáveis por esta tarefa têm como nome `readThermistorTemperature1/2`, sendo o pino correspondente de leitura passado como argumento da função. Para reduzir o erro das medições, são lidos 200 valores da ADC, diminuindo o efeito do ruído, e guardados num *array*. Desses valores é feita a média e a posterior conversão para a temperatura da banda, devolvendo o valor. Um esquema simplificado desta função encontra-se na Figura seguinte.

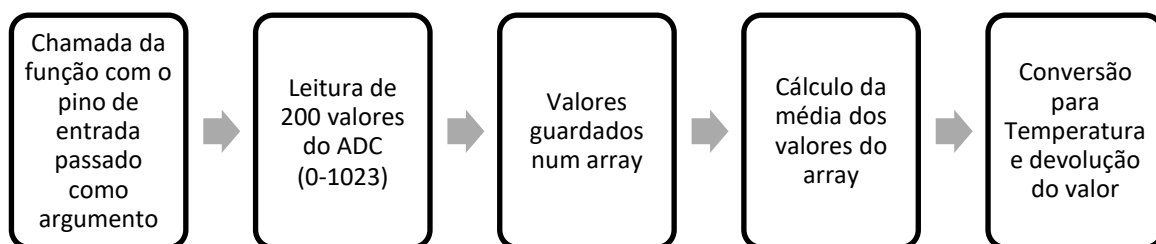


Figura 26: Esquema simplificado das funções `readThermistorTemperature(int thermistorPin)`

Outra função necessária para o sistema é a medição da tensão aos terminais da bateria para verificar o seu estado. A função criada (`readBatteryVoltage(batteryPin)`) lê o valor do ADC correspondente que provem do divisor resistivo e converte na unidade pretendida, V. Posteriormente retorna o valor lido. A figura seguinte mostra o esquema simplificado desta função.

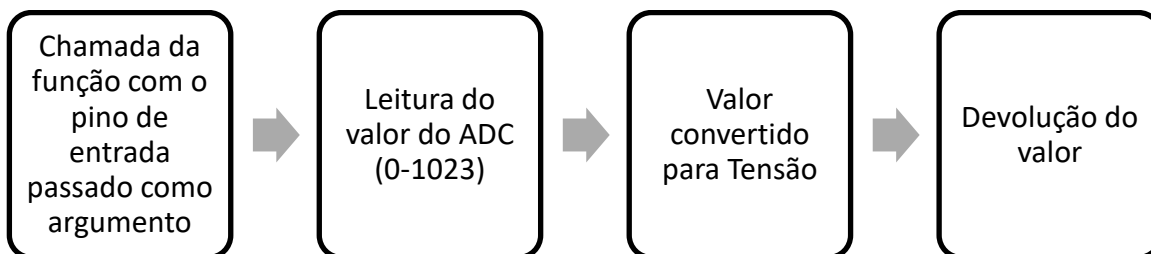


Figura 27: Esquema simplificado da função `readBatteryVoltage(int batteryPin)`

Obtido o valor da tensão da bateria é calculado através deste a percentagem do estado da carga da bateria para posterior apresentação ao utilizador. Esta percentagem é calculada baseando-se no facto de 7,4 V corresponder a 100% e 5,5 V corresponder a 0%. Lido o estado da bateria, é preciso informar o utilizador através do LED bicolor desse mesmo estado. Para tal foi criada a função `lowBatteryWarning()` que através do valor da tensão da bateria lido e dos pinos de saída que ligam aos ânodos verde e vermelho, faz acender o LED com a cor verde ou vermelha consoante o valor da tensão da bateria. Um esquema simplificado do funcionamento desta função pode ser visualizado na seguinte figura.

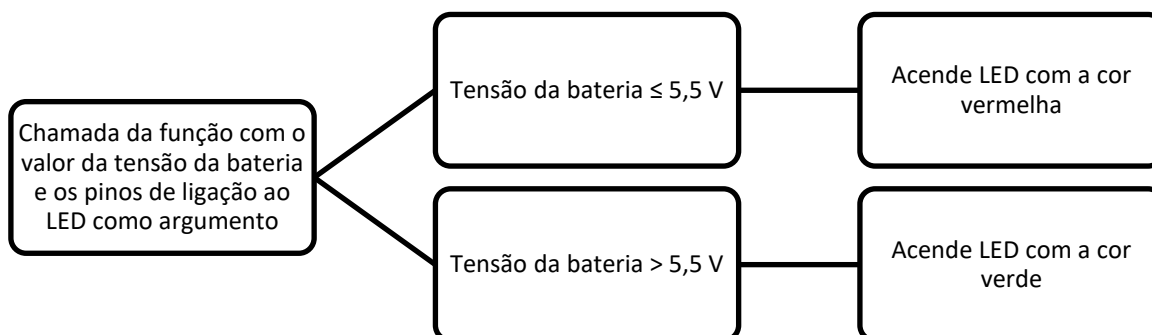


Figura 28: Esquema simplificado da função `lowBatteryWarning(float batteryVoltage, int redPin, int greenPin)`

Para estabelecer a temperatura desejada para as bandas foi criada uma função que lê um valor da porta série do *Arduino*. A função tem como nome: `readDesiredTemperature()`, que lê o valor disponível na porta série e converte-o em valor inteiro, não sendo possível estabelecer como temperatura desejada um valor com casas decimais. Esta função é usada para ler os valores que o utilizador indica na aplicação como sendo o valor desejado de temperatura.

Caso não exista valor disponível na porta série como valor para a temperatura desejada, este é imposto pelo seletor de função. São feitas leituras aos pinos analógicos que estão conectados ao interruptor e dependendo de qual deles está ligado aos +3,3 V é imposta a temperatura desejada de 30 ou 40°C.



Depois de todas as leituras realizadas e os sinais de controlo alcançados (mais pormenores sobre a programação do sistema de controlo na secção seguinte) os dados são enviados para o *smartphone* através da comunicação série do *Arduino*. Os pinos transmissor e recetor estão ligados diretamente ao módulo de comunicação Bluetooth, permitindo assim que qualquer informação impressa na porta série seja recebida pela aplicação do telemóvel. As informações são enviadas ordenadamente através de uma sequência do tipo: “#TemperaturaDesejada+TemperaturaDoTermistor1+TemperaturaDoTermistor2+TensãoDaBateria+PercentagemDaBateria~” para facilitar a receção das mesmas.

Após a verificação do correto funcionamento de cada função em particular, procedeu-se à criação da função

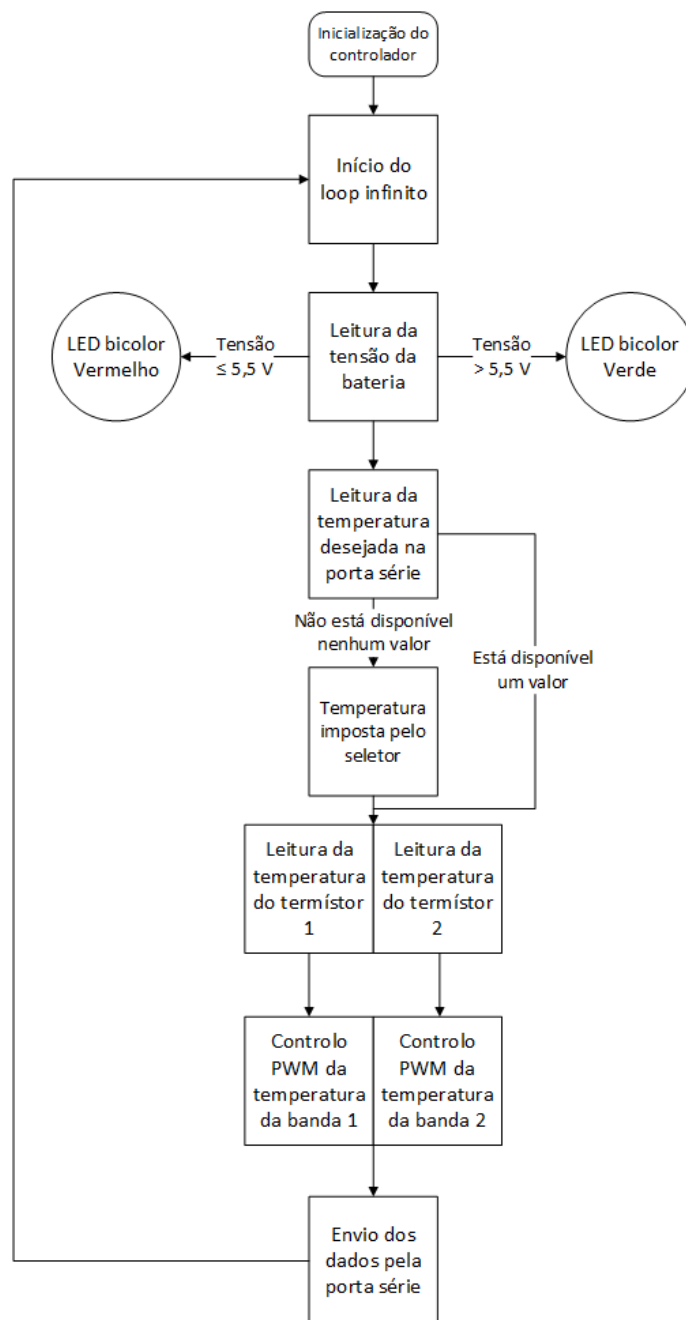


Figura 29: Fluxograma representativo do funcionamento do programa

global (main) que utiliza todas funções descritas anteriormente para que o sistema tenha o comportamento especificado. Esta função entra em ciclo *while* infinito para o controlo da temperatura das bandas de aquecimento. A Figura 29 representa o fluxograma explicativo do funcionamento do programa criado para o *Arduino* que controla todo o sistema.

## 5.2 Controlador PID

O mecanismo de controlo implementado no atual sistema está representado na Figura 30. A temperatura desejada é comparada com a temperatura medida pelo termístor, que mede a temperatura da banda de aquecimento, gerando o sinal de erro. Este sinal de erro é processado pelo controlador PID que vai gerar o sinal de controlo da banda de aquecimento (o sinal PWM).

O sinal de controlo (PWM) gerado pelo controlador PID é baseado na equação (3.6), sendo as variáveis  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  impostas no momento da programação do *Arduino*. O sinal de erro é filtrado, usando os últimos 10 valores deste mesmo sinal, para obter uma resposta mais imune ao ruído que possa haver nas medições da temperatura.

O sinal PWM está constantemente inicializado para possuir um *duty-cycle* de 50% para que quando o sinal de erro é nulo (a temperatura medida e a temperatura desejada é igual) a temperatura da banda se mantenha e não baixe, como seria o caso se o *duty-cycle* fosse 0%. Assim, caso o sinal de erro seja positivo, o *duty-cycle* será sempre maior que 50%, fazendo aquecer a banda, caso contrário, o *duty-cycle* será inferior, permitindo a que a banda baixe a sua temperatura.

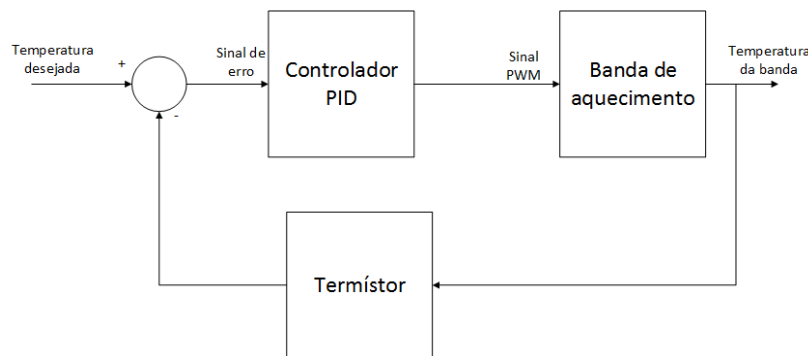


Figura 30: Sistema de controlo de temperatura da banda de aquecimento

## 5.3 Android

Antes de partir para a explicação da aplicação desenvolvida para *smartphone* que comunica com o sistema de aquecimento, é necessário explicar o porquê da plataforma e do sistema operativo para o qual a aplicação foi desenvolvida.

A aplicação móvel foi desenvolvida para *smartphones* com o sistema operativo Android, pois é o sistema operacional móvel mais utilizado do mundo, sendo que dispositivos vendidos com o sistema Android vendem mais do que dispositivos com sistemas Windows e iOS juntos [51]. Para além disso o sistema é *opensource* e gratuito para desenvolver, permitindo um número muito elevado de programadores para esta

plataforma. Cerca de 71% dos programadores para sistemas móveis desenvolvem software para Android por ser um sistema com uma diversidade muito grande de plataformas de aplicação [52]. É ainda um sistema operativo personalizável e de fácil utilização que equipa mais de mil milhões de dispositivos em todo mundo, em várias plataformas (telemóveis, *tablets*, relógios e TVs) [53].

Nas milhares de aplicações existentes disponíveis para Android, já existem aplicações para comunicação entre o *smartphone* e outro dispositivo através do Bluetooth, no entanto nem o aspeto gráfico nem a interface são o desejado para o sistema a desenvolver, não sendo atrativo para o utilizador, e portanto a decisão foi criar uma aplicação única para o sistema.

Para a criação da aplicação foi utilizada a ferramenta de desenvolvimento (IDE) oficial para desenvolvimento Android, o Android Studio. Esta ferramenta permite a criação de aplicações para todo o tipo de dispositivos Android de forma mais rápida, fácil e eficaz.

Como em qualquer programa ou aplicação, seja para computador ou *smartphone*, é necessário haver um nome e um ícone representativo da aplicação. Para a aplicação desenvolvida o nome escolhido foi Heating Control, tendo em conta o facto de ser possível controlar o aquecimento das bandas a partir da aplicação. O ícone desenvolvido está representado na Figura 31.

A aplicação criada tem como base de funcionamento 2 *écrans*, Figura 32, um em que são listados todos os dispositivos Bluetooth emparelhados com o *smartphone* e outro em que são apresentadas as informações relativas às bandas de aquecimento e à bateria e onde é possível alterar a temperatura desejada para as bandas.



Figura 31: Ícone representativo da aplicação

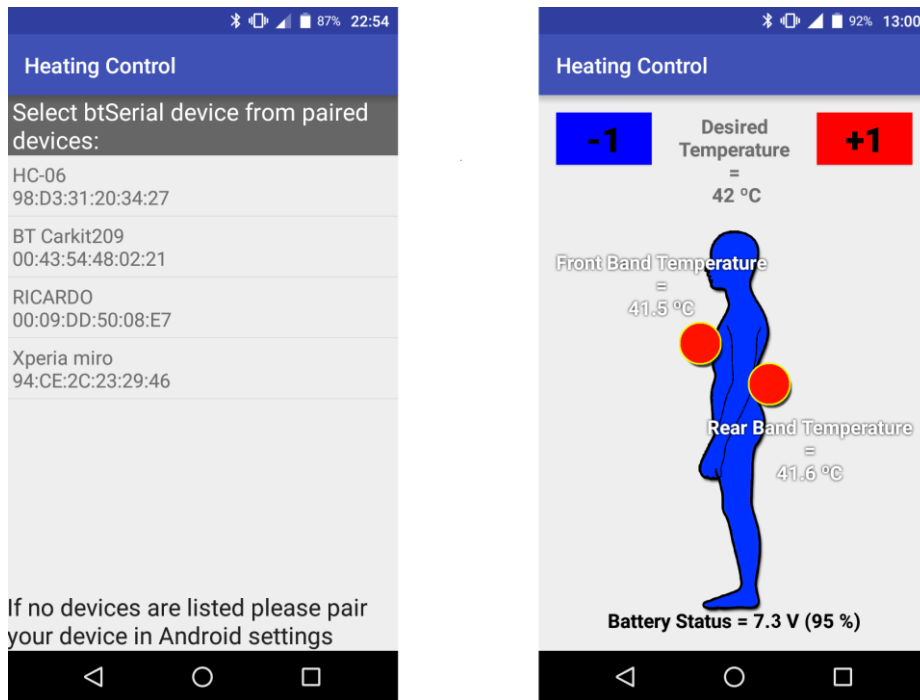


Figura 32: Écrans disponíveis na aplicação criada

Caso o dispositivo já tenha sido emparelhado com o *smartphone*, através das definições do próprio, no primeiro *écran* da aplicação aparecerá o dispositivo com o nome HC-06, que é o módulo de comunicação Bluetooth utilizado no sistema. Quando clicado, a conexão inicia-se, aparecendo um balão informativo dizendo “Connecting”. Se a conexão for bem realizada o segundo *écran* aparecerá (no módulo HC-06 a conexão é informada com a utilização de um LED vermelho que para de piscar quando está conectado a algum dispositivo) permitindo todas as funcionalidades especificadas.

Os botões posicionados no topo do *écran* permitem, quando clicados, o aumento (botão vermelho (+1)) ou a diminuição (botão azul (-1)) da temperatura desejada em uma unidade. Na parte central do *écran* são apresentadas as medidas de temperatura das duas bandas. A informação sobre o estado de carga da bateria, a tensão medida e a correspondente percentagem, são apresentadas na parte inferior do *écran*.

## 6 Construção do protótipo

Depois de testado todo o hardware e desenvolvido todo o software foi criado um protótipo do sistema final, onde é possível demonstrar o comportamento geral do circuito apresentado de uma forma muito próxima da qual pode ser o produto final. Neste capítulo dá-se especial atenção ao desenvolvimento da PCB que comporta todos os circuitos e componentes necessários para o funcionamento do sistema e à realização de uma caixa com as medidas corretas para o acondicionamento de todo o sistema.

### 6.1 Eagle - PCB

De forma a realizar a placa de circuito impresso final para o sistema de aquecimento, recorreu-se ao software Eagle de desenho de PCBs.

O esquema e o layout (com as dimensões) da placa podem ser encontrados no anexo (Figuras 41 e 42). O resultado final da placa impressa e com todos os componentes colocados está representado na Figura 33.

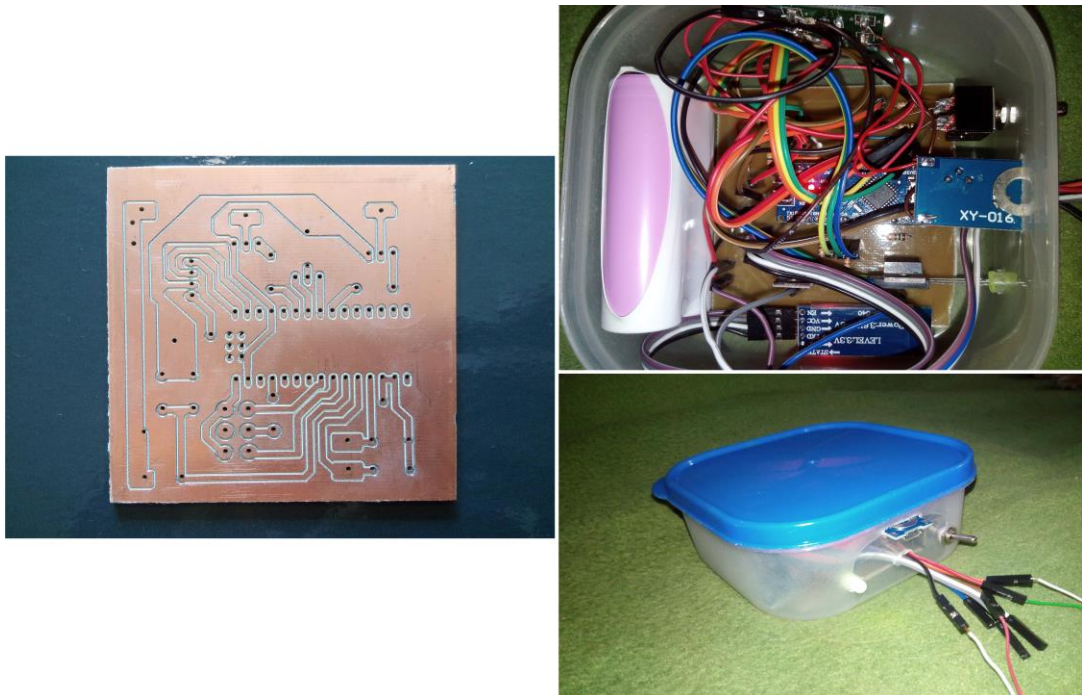


Figura 33: PCB impresso e caixa provisória do sistema

É possível verificar que todo o sistema já está numa caixa, no entanto esta é ainda uma versão provisória, não sendo feita totalmente à medida do sistema, que permite ter a noção do aspeto final do sistema. Foi com este circuito e com esta caixa que todos os testes foram realizados. Todas as funcionalidades estão presentes sendo de notar no exterior da caixa o interruptor/seletor de função, o LED bicolor indicador do estado da bateria, o módulo *step-up* com a entrada micro USB para posterior carga da bateria e os fios de ligação para duas bandas de aquecimento e dois termístores.

## 6.2 Caixa – SolidWorks

Os circuitos, os módulos e a bateria não podem ficar “pendurados” no utilizador, portanto recorreu-se a uma ferramenta de desenvolvimento 3D, SolidWorks, para desenhar uma caixa para acondicionar todo o hardware utilizado da forma mais compacta possível, tendo especial cuidado para não ultrapassar as dimensões impostas nos requisitos. Eram necessárias cavidades para a saída/entrada das ligações para as bandas e respetivos sensores, para o LED indicador do estado de carga da bateria, para a ficha micro USB e para o interruptor/seletor de função.

O resultado final da caixa realizada no SolidWorks pode ser visto na figura seguinte, onde do lado esquerdo da imagem se consegue visualizar as estruturas criadas separadamente (a base com as respetivas cavidades, a tampa e os parafusos para a fixação) e do lado direito a caixa fechada com o LED, a ficha micro USB, o interruptor e os fios de ligação à vista, simulando o aspeto final.

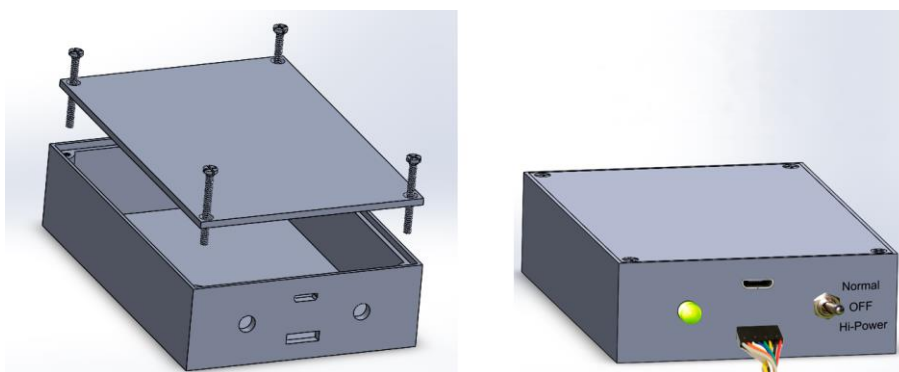


Figura 34: Caixa realizada no SolidWorks

## 7 Testes e Resultados Experimentais

Neste capítulo serão expostos todos os testes e resultados experimentais obtidos quer durante a fase de desenvolvimento como depois do protótipo realizado.

### 7.1 Resistência das Bandas

Recorrendo à banda de aquecimento fornecida para testes que já incluía dois terminais de ligação, Figura 35, realizaram-se vários testes. O primeiro foi a medição da sua resistência aos terminais.



Figura 35: Banda disponibilizada, com 2 termístores à vista (à esq.). Banda sem qualquer tipo de ornamento (à dir.)

De forma a verificar a resistência vista aos terminais da banda disponibilizada, foi imposta uma tensão conhecida aos seus terminais e mediu-se a corrente que por ela atravessava.

Com 5,0 V aos terminais, a corrente medida foi de 0,77 A. Logo, pela lei de Ohm,  $R = \frac{V}{I}$ , a resistência da banda tem o valor:  $6,5 \Omega = 5,0/0,77$ .

Repetindo o mesmo teste, mas impondo uma tensão diferente, com 6,1 V aos terminais, a corrente medida foi de 0,96 A. Logo, a resistência apresentada pela banda tem o valor:  $6,35 \Omega = 6,1/0,96$ .

Não havendo uma discrepância muito grande entre os dois valores de resistência obtidos, pode retirar-se daqui que o valor da resistência da banda de aquecimento, arredondado às unidades, é de 6  $\Omega$ .

## 7.2 Potência Necessária Para Atingir a Temperatura Requerida

Um dos fatores influentes na escolha da bateria para o projeto foi a potência necessária para fazer aquecer a banda a uma elevada temperatura (40°C).

Utilizando uma fonte de tensão variável e um termómetro, registaram-se alguns valores de temperatura da banda para uma determinada potência imposta aos terminais (teste realizado à temperatura ambiente, 25°C). Considerando a resistência da banda de 6  $\Omega$  e os diferentes valores de tensão calculou-se a respetiva potência fornecida à banda. Essas medições estão assinaladas na tabela seguinte.

Tabela 3: Medições da temperatura da banda

Potência (W)	Temperatura (°C)
0,43	25,4
0,96	28,4
2,28	35,7
2,41	36,3
3,68	39,7
4,17	44,7
5,04	46,5

Deste teste verifica-se que para conseguir uma temperatura próxima dos 40°C, quando a temperatura ambiente é aproximadamente 25°C, logo um aumento de temperatura de apenas 15°C, é necessário aplicar à banda uma potência próxima dos 4 W, logo uma tensão próxima de 4,9 V ( $P = \frac{V^2}{R} \therefore V = \sqrt{P \times R} \Rightarrow V = \sqrt{4 \times 6}$ ). Este teste foi realizado com a banda exposta, sem qualquer tipo proteção entre esta e o ambiente, o que não acontecerá quando esta estiver incluída no vestuário, já que terá sempre o corpo humano e a roupa que impõem uma maior capacidade de armazenamento do calor e diminuem o calor dissipado para o meio envolvente. Mesmo assim, pode-se afirmar que a realização do sistema com uma bateria de 3,7 V impossibilitaria que a temperatura das bandas atingisse a temperatura desejada, isto sem qualquer tipo de conversor *step-up*.

Com uma bateria de 7,4 V e com esta tensão aplicada à banda, a corrente que a atravessa é de aproximadamente 1,23 A = 7,4/6 (superior ao requisito que indica a corrente máxima por saída de 1 A). A potência ( $P = V \times I$ ) aqui aplicada será de 9,1 W = 7,4 × 1,23.

No sistema com duas bandas e com a bateria com esta tensão, a corrente consumida pode chegar aos 2 × 1,23 A = 2,46 A, logo a bateria tem de aguentar descargas com esta corrente. A bateria utilizada no sistema consegue suportar correntes de descarga de 5,2 A, logo está preparada para o correto funcionamento do sistema.



### 7.3 Sensor de Temperatura

A correta medição da temperatura corrente das bandas de aquecimento é fundamental para todo o funcionamento do sistema, portanto não pode ser permitido que as medições da temperatura resultem em determinados valores quando na realidade a temperatura a medir é totalmente diferente. Para isso não acontecer foi necessário calibrar os dois sensores de temperatura. Na parte 4.4 foi apresentado o circuito de medição bem como a respectiva expressão para a obtenção do valor da temperatura. Nesta expressão, os valores das resistências dos termístores e das respectivas resistências de *pull-up* (resistência ligada à tensão de referência, em série com o termistor) são muito influentes, logo para a obtenção dos melhores resultados, mediram-se as resistências dos termístores e das respectivas resistências de *pull-up* à temperatura ambiente, para implementar as funções de leitura da temperatura pelo *Arduino*, não utilizando os valores teóricos quer da resistência do termistor a 25°C quer da resistência de *pull-up*.

Depois de vários testes e alterações dos parâmetros da função de leitura, tal como o fator beta dos termístores, chegou-se ao ponto em que as medições efetuadas e a temperatura real se aproximaram. Utilizando um termómetro digital para indicar a temperatura ideal a medir, fizeram-se algumas medições de temperatura com ambos os sensores de temperatura. A calibração e teste dos termístores foi realizada colocando tanto os termístores como a ponta de prova do termómetro no local com a temperatura a medir, tendo o particular cuidado de colocar os termístores e a ponta de prova o mais perto possível. Para as temperaturas mais baixas colocou-se os elementos de teste num congelador e num frigorífico, enquanto para as temperaturas mais elevadas foi utilizado um forno de cozinha. Os resultados obtidos estão presentes na tabela seguinte.

Tabela 4: Valores de temperatura medidos pelos sensores

Temperatura a medir (°C)	Valor medido pelo sensor 1 (°C)	Erro (°C)	Valor medido pelo sensor 2 (°C)	Erro (°C)
-9,4	-7,7	1,7	-7,1	2,3
3,3	3,5	0,2	3,7	0,4
12,5	12,7	0,2	13,3	0,8
22,8	22,2	0,6	22,8	0,0
40,7	41,1	0,4	41,7	1,0
71,0	72,4	1,4	72,2	1,2

Um dos requisitos do sistema era que os sensores de temperatura tivessem uma gama de medições, dos 0 aos 40°C, com um erro inferior a 1,5°C. Podemos afirmar que para essa gama esse requisito é cumprido, já que de entre os valores mais próximos dos limites dessa gama medidos, 3,3°C e 40,7°C, o erro máximo medido foi de apenas 1,0°C. Para valores de temperatura superiores esse requisito é ainda cumprido, no entanto, para valores mais baixos de temperatura (temperaturas negativas) o erro da medição torna-se um pouco superior.

## 7.4 Indicador do Estado da Bateria

Outro sensor que precisa de estar calibrado para apresentar os valores das suas medições o mais próximo possível dos valores reais é o sensor de tensão do indicador do estado da bateria. Este tem de ler a tensão aos terminais da bateria de forma precisa para que o sistema avise o utilizador do estado da bateria de forma correta. Não pode acontecer que o sistema fique com a bateria fraca sem avisar o utilizador, nem que avise que a bateria precisa de ser carregada quando esta está ainda com a carga máxima.

A gama de medição fundamental para o sensor do sistema está entre os 5,5 V (tensão mínima da bateria) e os 7,4 V (tensão nominal de uma bateria com duas células de íões de Lítio em série), pois é entre estes valores que a tensão da bateria varia ao longo do tempo de utilização.

Depois de algumas calibrações, quer das resistências do divisor resistivo do circuito de leitura, como da função de leitura do *Arduino*, foram realizados alguns testes a este sensor, obtendo-se os seguintes resultados.

Tabela 5: Valores de tensão medidos pelo sensor

Tensão a medir (V)	Valor medido pelo sensor (V)	Erro (V)
5,5	5,8	0,3
6,5	6,4	0,1
6,9	6,6	0,3
7,0	6,7	0,3
7,2	7,2	0,0

Analisando os valores medidos, verifica-se que estes estão próximos dos valores reais a medir. O maior erro de medição é encontrado para o valor mais baixo medido, 5,8 V, com um erro de cerca de 5%. Esta medição é bastante afetada quando o sistema completo está em funcionamento, já que, quando o sensor foi testado ainda sem qualquer tipo de controlo de temperatura ou bandas de aquecimento, as medições eram efetuadas com maior precisão.

O controlo de temperatura das bandas é feito, simplifadamente por conexão/desconexão da bateria às bandas de aquecimento. Como as bandas têm uma resistência baixa (6  $\Omega$ ), quando as bandas estão a aquecer a corrente imposta à bateria é muito elevada, o que faz com que o restante circuito seja afetado, principalmente o sensor de tensão. Contudo, perante os resultados obtidos podemos considerar que o sensor está a medir o valor da tensão da bateria eficazmente, permitindo avaliar o estado da bateria corretamente.

## 7.5 Autonomia

Para testar a autonomia mínima que o sistema desenvolvido possui, impôs-se o modo de funcionamento *hi-power* (bandas a 40°C) que leva a um maior consumo por parte do sistema, logo uma menor autonomia.

Devido ao facto de apenas ter disponível uma banda de aquecimento, realizou-se este teste apenas com uma banda. Com a bateria inicialmente com a carga máxima e com a banda exposta à temperatura ambiente de 22°C, logo uma sobrelevação da temperatura imposta de 18°C, iniciou-se o sistema e esperou-se até ao momento em que o indicador do estado da bateria revelava que a bateria estava com pouca carga. O LED ficou vermelho após, aproximadamente, 5 horas.

Relembrando que apenas foi utilizada uma banda de aquecimento, podemos fazer uma aproximação da autonomia do sistema quando utilizadas duas bandas expostas a uma diferença de temperaturas de 18°C. Devido ao facto de o maior consumo de energia ser feito pelas bandas de aquecimento, comparativamente com o consumo de todos os outros componentes, o consumo com as duas bandas seria sensivelmente o dobro, implicando uma autonomia de aproximadamente metade da medida.

Assim, a autonomia de todo o sistema seria de 2 horas e meia a 3 horas. Este valor está abaixo do requisito que indicava uma autonomia mínima de 4 horas. Ainda assim, lembre-se que o teste foi realizado com o modo de funcionamento *hi-power* e com a banda totalmente exposta, sendo que com um valor de temperatura para as bandas mais baixo e mantendo a temperatura ambiente, a autonomia seria superior.

Para comprovar que o consumo de energia por parte do controlador é muito inferior ao consumo do sistema com as bandas de aquecimento, mediram-se as correntes consumidas pelo controlador sem as bandas conectadas e com as bandas ligadas. Sem as bandas ligadas, o consumo de corrente do controlador era de 0,15 A, logo considerando a tensão da bateria de 7,4 V, a potência consumida era de 1,11 W ( $P = V \times I \Rightarrow P = 7,4 \times 0,15$ ). Com uma banda de aquecimento conectada a corrente máxima medida foi de 1,46 A, uma diferença de 1,31 A para o caso anterior, logo com duas bandas de aquecimento a corrente seria de 1,46 A + 1,31 A = 2,77 A. Assim, a potência total consumida seria de aproximadamente 20,5 W ( $P = V \times I \Rightarrow P = 7,4 \times 2,77$ ). Portanto, poderá dizer-se que em determinadas condições o consumo do controlador é de apenas 5,4% do consumo total do sistema.

Para avaliar a autonomia do sistema quando incorporado em vestuário e simulando uma situação de utilização real, colocou-se a banda de aquecimento na parte de dentro de um casaco situada na zona das costas e a caixa com todo o sistema dentro de um bolso interior, tal como se pode ver na Figura 36.

Com o casaco vestido e com uma temperatura ambiente inicial de 22°C iniciou-se um teste equivalente ao anterior às 14:00h. Simulando um utilizador, por exemplo num escritório, que está sentado numa secretária e que se levanta algumas vezes para realizar as suas tarefas habituais, o sistema manteve a temperatura da banda nos 40°C até às 22:15h, onde o sistema começou a avisar que a bateria estava com pouca carga.

Pode-se afirmar que, neste caso, a autonomia do sistema foi superior a 8 horas. Fazendo a mesma análise como no teste anterior, com duas bandas de aquecimento a autonomia do sistema seria superior a 4 horas, superando o requisito das 4 horas de autonomia mínima para o sistema.

Porém, em casos de ambientes com temperaturas extremamente baixas a dissipação de energia nas bandas de aquecimento é maior, devida à grande diferença entre a temperatura desejada e a temperatura ambiente,



Figura 36: Casaco com o sistema de aquecimento incluído

implicando um consumo de energia superior para manter a mesma temperatura nas bandas, comprometendo a autonomia do sistema.

Deste teste podemos afirmar que o requisito da autonomia mínima do sistema (4 horas) só poderá ser assegurado quando a sobrelevação de temperatura imposta ao sistema relativamente ao meio envolvente é da ordem dos 20°C, ou seja, quando a temperatura ambiente é cerca de 20°C e a temperatura desejada para as bandas de 40°C. Com uma temperatura ambiente de, por exemplo, 0°C e a mesma temperatura desejada, a autonomia poderá diminuir para metade.

É importante ainda referir que o material do casaco ou do vestuário em que as bandas estão colocadas, bem como as camadas de roupa sobrepostas com a banda, influencia na autonomia do sistema, pois as capacidades térmicas variam de material para material.

## 7.6 Tempo de Carga

O tempo de carga da bateria depende diretamente do carregador USB utilizado, pois existem diversos carregadores com valores de corrente de saída diferente. Todos os carregadores micro USB proporcionam uma tensão de 5 V (ou um valor próximo), no entanto a corrente fornecida pode ser diferente. Existem carregadores de *smartphones* com correntes de saída de 500 mA (tal como as portas USB normais dos computadores) e outros, por exemplo de *tablets*, que podem chegar aos 2 A.

Sabendo que no sistema de carregamento da bateria os 5 V do carregador têm de ser praticamente duplicados através do módulo *step-up*, a corrente de carga será reduzida praticamente para metade. Na realidade, como a eficiência das fontes comutadas não é de 100%, alguma potência será aqui desperdiçada, diminuindo ainda mais a corrente de carga.

Tomando o exemplo de a carga ser realizada através de uma porta USB (5 V, 500 mA). A potência disponível é de 2,5 W. Considerando uma eficiência do conversor *step-up* de 80%, a potência de saída deste será de  $2\text{ W} = 0,8 \times 2,5\text{ W}$ . Se a tensão for duplicada, a corrente de saída disponível para o carregamento da bateria será de apenas 200 mA.

Como a bateria descarregada não permite o funcionamento do sistema, utilizando um carregador de um *smartphone* com 1 A de corrente de saída, colocou-se a bateria do sistema a carregar através do módulo *step-up* e do módulo de carga por CC-CV. O tempo de carga foi de aproximadamente 6 horas, até ao LED azul indicador da placa MCP73213 desligar, indicando o fim da carga.

Este resultado indica que usando uma porta USB normal de um computador o tempo de carga será de aproximadamente 12 horas. Para que o tempo de carga seja inferior a 3 horas, como é um dos requisitos do sistema, o carregador a usar precisa de fornecer pelo menos 2 A.

Utilizando um carregador de um *tablet* que fornece na sua saída 10,7 W (5,35 V e 2 A) procedeu-se ao respetivo carregamento da bateria do sistema para averiguar o tempo de carga. O tempo de carga obtido foi de, inesperadamente, 5 horas e 45 minutos, praticamente o mesmo quando usado o carregador de 1 A (6 horas).

Considerando, mais uma vez, a eficiência do conversor *step-up* de 80% e a tensão de saída de 10 V, e calculando a corrente de carga esperada para ambos os carregadores: i) carregador de 5 V e 1 A (5 W): 400 mA; ii) carregador de 5,35 V e 2 A (10,7 W): 856 mA, verifica-se que a corrente de carga do segundo é superior ao dobro da do primeiro, permitindo que o tempo de carga reduzisse aproximadamente para metade.

No teste realizado isso não aconteceu porque o a placa MCP73213 está a limitar a corrente de carga a 500 mA, que é o valor que vem por defeito. Medindo com um amperímetro a corrente de carga, verificou-se que com ambos os carregadores a corrente de carga se fixava em 540 mA. A outra opção é fazer com que a corrente de carga seja de 1 A, bastando para isso ligar o pino PROG da placa à massa.

Feito isto realizou-se mais uma vez o mesmo teste com o mesmo carregador e o tempo de carga diminuiu substancialmente, para 3 horas e meia. Resultado que se aproxima das 3 horas de duração máxima permitida para o carregamento.

Porém, esta solução não pode ser utilizada já que utilizando o carregador com apenas 1 A de corrente de saída, a corrente de carga na saída da placa MCP73213 é praticamente anulada (150 mA medidos com um amperímetro). Este comportamento é devido ao facto de este tipo de carregadores não permitir que a corrente de carga se aproxime do 1 A programado.

Optou-se então por manter a corrente de carga limitada aos 500 mA, permitindo que o carregamento seja efetuado por qualquer carregador micro USB, em detrimento do tempo de carga, que será no mínimo de aproximadamente 6 horas.

Para uma melhor compreensão de todos os resultados obtidos nos ensaios dos ciclos de carregamento, compilaram-se os valores na tabela que se segue.

Tabela 6: Tempos de carga da bateria com os diferentes carregadores testados

Carregador	Corrente de carga	Tempo de carga
5 V, 500 mA	200 mA	12 horas
5V, 1 A	400 mA	6 horas
5,35 V, 2 A	856 mA 540 mA*	3 horas e 30 minutos 5 horas e 45 minutos*

\*Resultado obtido com a placa MCP73213 a limitar a corrente de carga a 500 mA (versão do protótipo).

## 7.7 Resposta do Sistema Sem Qualquer Tipo de Controlo

Antes de aplicar qualquer tipo de controlo de temperatura era interessante verificar a resposta em temperatura do sistema, particularmente da banda de aquecimento. Para isso, utilizando uma vez mais o casaco equipado com o sistema, e com a bateria com a carga máxima, procedeu-se à amostragem de 10 em 10 segundos da temperatura da banda de aquecimento, sem qualquer tipo de temperatura imposta (sistema em malha aberta). Os dados deste teste estão representados no gráfico da Figura 37.

Com uma temperatura inicial de 28°C, verifica-se que a temperatura da banda de aquecimento cresce de forma exponencial, convergindo para um valor limite final de aproximadamente 72°C. Esta resposta é característica de sistemas de primeira ordem, em que o tempo de subida é dependente da resistência e capacidade térmica do sistema (conhecida como constante de tempo,  $\tau=RC$ ) e o valor final dependente da potência da fonte de alimentação e da capacidade térmica do sistema. Assim, dependendo do local e das condições de temperatura nas quais as bandas de aquecimento estão inseridas, bem como da potência disponibilizada pela bateria, a resposta em temperatura da banda modificar-se-á, mantendo a forma exponencial.

Deste teste é possível apurar que a temperatura atingida pela banda de aquecimento é muito elevada, podendo

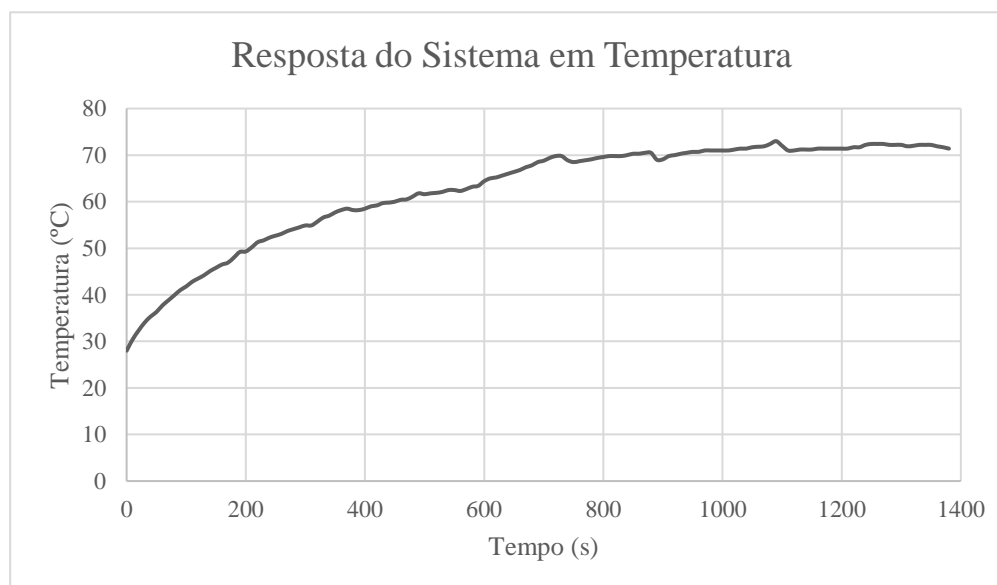


Figura 37: Resposta do sistema em temperatura sem qualquer tipo de controlo

causar perigo para o utilizador caso esta se encoste ao corpo do mesmo, podendo causar queimaduras na pele. Daqui retira-se a grande importância do controlo de temperatura para este tipo de sistemas de aquecimento.

Ainda neste teste, consegue verificar-se que o sistema, nas condições em que foi executado, atinge um aumento da temperatura máximo em relação à temperatura ambiente de  $44^{\circ}\text{C} = 72^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$ . Assim, a temperatura ambiente mínima que ainda permite que o sistema consiga elevar a temperatura da banda e do corpo a  $40^{\circ}\text{C}$  é  $-4^{\circ}\text{C}$ .

Para comprovar que a utilização de uma bateria de 3,7 V não permitia que a banda de aquecimento atingisse temperaturas suficientemente altas para proteger o utilizador de temperaturas ambiente baixas, repetiu-se o teste anterior, mas agora ligando diretamente a bateria de 3,7 V à banda de aquecimento, mantendo toda a alimentação do restante sistema com a bateria de 7,4 V. O resultado deste teste pode ser verificado no gráfico da Figura 38.

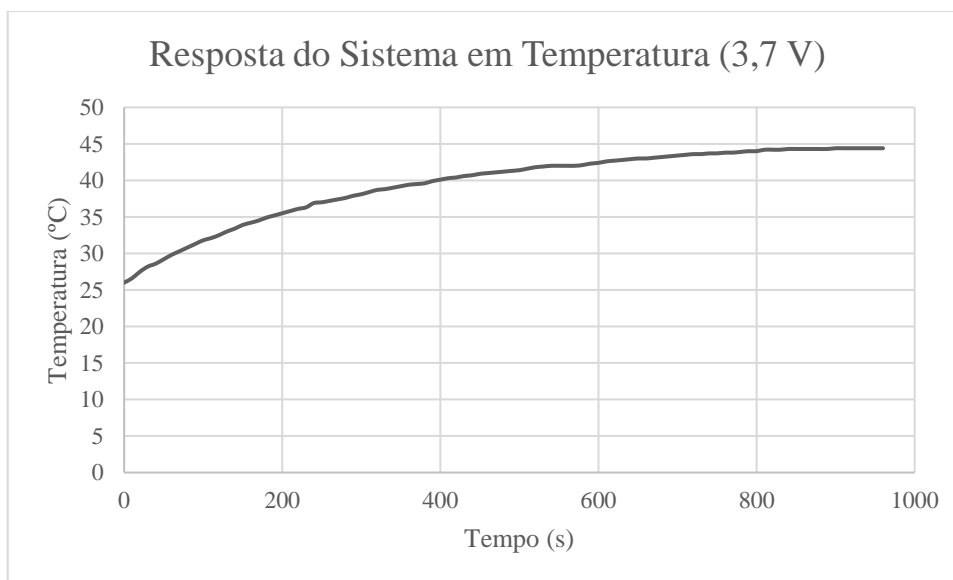


Figura 38: Resposta do sistema em temperatura com bateria de 3,7 V

Deste resultado verifica-se que como a potência fornecida à banda é inferior, a temperatura final por ela atingida é menor, inferior a  $45^{\circ}\text{C}$ , quando a temperatura ambiente se situava próxima dos  $27^{\circ}\text{C}$ . Neste caso, o aumento da temperatura é de apenas  $18^{\circ}\text{C}$ . Este valor é muito baixo para os objetivos do sistema, daí a escolha ter recaído para a bateria de 7,4 V. Teoricamente, como a potência é proporcional à diferença de temperaturas do sistema e proporcional ao quadrado da tensão, duplicando a tensão (3,7 V para 7,4 V) a sobrelevação de temperatura poderá quadruplicar. Assim, se com a bateria de 3,7 V o aumento foi de  $18^{\circ}\text{C}$ , com a bateria de 7,4 V o aumento seria de  $72^{\circ}\text{C}$ . Este valor não foi atingido no teste anterior, apenas foi conseguido  $44^{\circ}\text{C}$ , sendo, algumas das causas para isso, o significativo consumo de potência do restante circuito e o facto de a tensão nominal da bateria utilizada não ser de 7,4 V mas de 7,26 V.

## 7.8 Ajuste dos Parâmetros do Controlador PID

Para calibrar o controlador é necessário variar as constantes de proporcionalidade, integrativa e derivativa de modo a conseguir os melhores resultados possíveis. Esta calibração é feita por tentativa e erro, analisando as respectivas respostas para cada caso. No entanto, como ponto de partida, é frequentemente executado o algoritmo de Ziegler-Nichols para circuitos de malha fechada. Com este algoritmo obtêm-se os primeiros valores para as três constantes, e a partir daqui são realizadas pequenas variações para atingir o resultado esperado.

A aplicação do método de Ziegler-Nichols para controladores do tipo PID baseia-se na determinação do valor da constante  $K_p$  crítico, considerando-se apenas o ganho proporcional, fazendo  $T_d$  igual a zero e  $T_i$  igual a infinito. O valor de  $K_p$  crítico ( $K_{cr}$ ) é o valor para o qual a resposta do sistema começa a ter um comportamento oscilatório. Assim, fazendo aumentar o valor de  $K_p$ , verifica-se para que valor o sistema começa a oscilar e mede-se a frequência dessa oscilação, obtendo-se automaticamente o valor do período crítico  $P_{cr}$ . A partir daqui os valores para as três constantes são obtidos seguindo a regra:  $K_p = 0,6K_{cr}$ ,  $T_i = 0,5P_{cr}$  e  $T_d = 0,125P_{cr}$ .

Seguindo este processo para a determinação dos parâmetros do controlador PID implementado no software do *Arduino*, começou-se por cancelar as componentes integrativa e derivativa impondo um valor muito elevado para  $T_i$  e o valor zero para  $T_d$ . Para valores de  $K_p$  baixos verificava-se a existência de um erro em regime estacionário não nulo, isto é, a temperatura da banda não é igual à temperatura desejada. Por exemplo, quando a temperatura desejada era 30°C a temperatura na banda estabilizava em 31,1°C e quando a temperatura desejada era 40°C a temperatura na banda estabilizava em 40,7°C. Para valores elevados de  $K_p$ , esse erro é eliminado havendo uma total correspondência entre o valor desejado e o valor medido.

Como a variação da resposta da temperatura nas bandas é muito lenta, a otimização do controlador através do método de Ziegler-Nichols é uma tarefa complicada, pois a resposta do sistema não entra em oscilação de forma visível. Então, fixou-se o valor de  $K_p$  que obteve um erro em regime estacionário nulo e observou-se a sua resposta. Como o erro de *offset* era nulo, não houve qualquer melhoramento com a introdução do parâmetro integrador, aumentado mesmo o *overshoot* da resposta do sistema. Afastou-se a parte integradora do controlador e focou-se na tentativa de diminuir o *overshoot* (que já era muito pouco) com a utilização de apenas o termo proporcional. Para isso fez-se aumentar o termo derivador do controlador. A resposta do sistema não melhorou significativamente havendo situações que até degradavam a mesma. Portanto optou-se por manter apenas o controlo por via proporcional que se mostra suficiente para a aplicação em causa.

Na Figura 39 é possível verificar a resposta do sistema com o controlador proporcional ativo quando a banda está inserida no casaco e o utilizador tem o casaco vestido, sendo a temperatura imposta de 40°C. Os valores de temperatura foram medidos em intervalos de 10 s.

É possível averiguar o correto funcionamento do controlo de temperatura da banda do sistema, já que consegue elevar a temperatura da banda dos 28°C para os 40°C em apenas 100 s, tendo uma mínima oscilação nos primeiros segundos seguintes, mantendo o valor imposto estável ao longo do restante tempo.



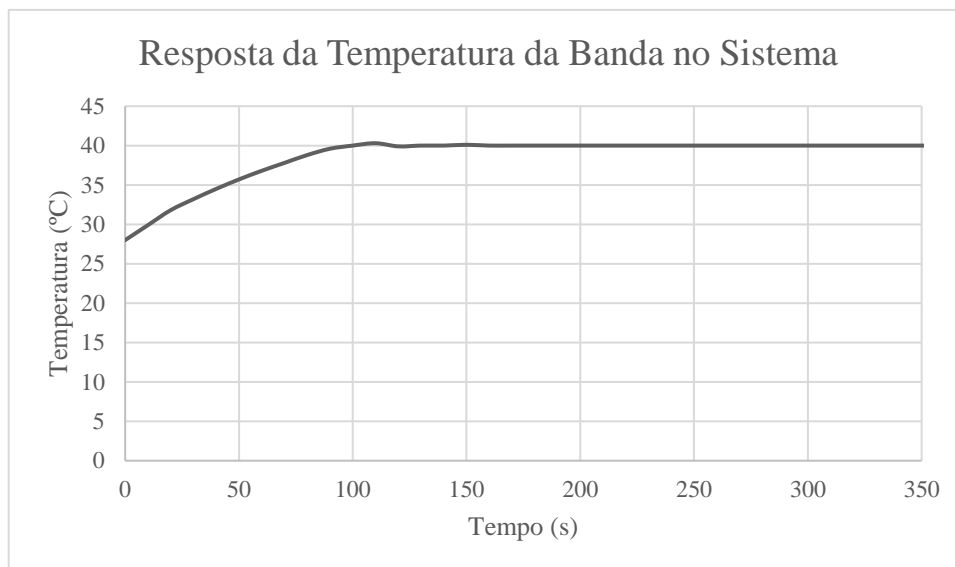


Figura 39: Resposta do sistema quando a temperatura imposta é 40°C

Finalmente, para comprovar o correto funcionamento do sistema ao longo do tempo e com diferentes temperaturas impostas à banda de aquecimento criou-se o ciclo de funcionamento presente na Figura 40, amostrando os dados de 10 em 10 segundos. Mais uma vez o sistema foi testado quando inserido num casaco com a banda de aquecimento posicionada nas costas do utilizador, sendo de realçar que entre a banda de aquecimento e o corpo do utilizador há outra peça de roupa.

Com este teste é possível analisar o comportamento do sistema ao longo de um ciclo de funcionamento, onde são impostas diferentes temperaturas à banda de aquecimento, comparando com a temperatura medida da banda de aquecimento.

Os resultados deste teste são muito conclusivos, permitindo afirmar que o controlo de temperatura é bem realizado mesmo sendo apenas realizado por um controlador proporcional.

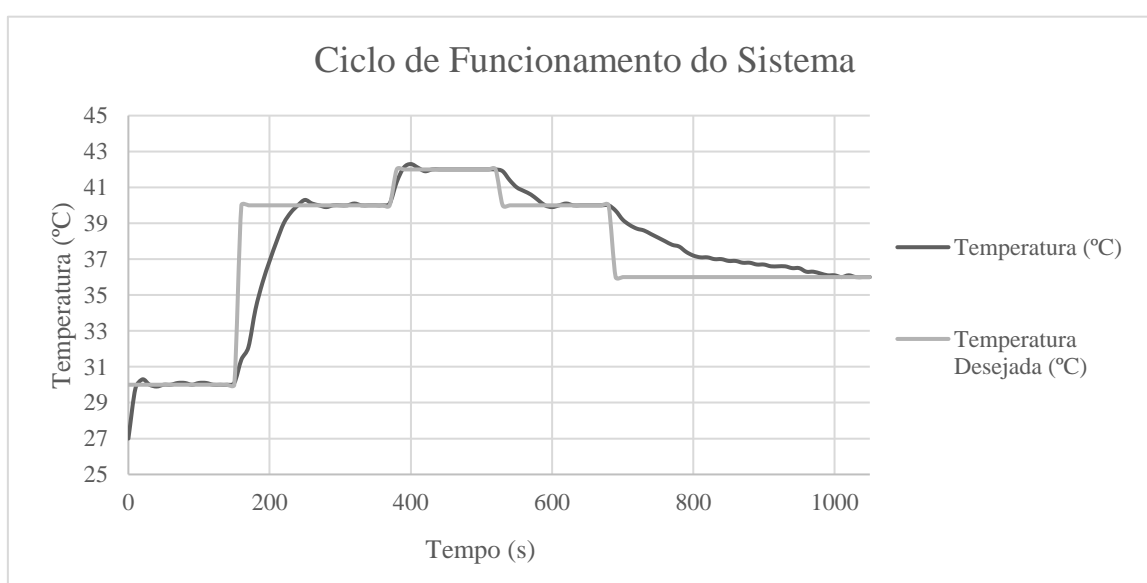


Figura 40: Exemplo de um ciclo de funcionamento do sistema



## 8 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Neste capítulo são expostas as conclusões obtidas com o desenvolvimento deste projeto e são indicados alguns aspetos que podem vir a ser melhorados e incrementados ao resultado obtido.

### 8.1 Conclusões

Nesta dissertação foi alcançado o objetivo principal proposto, o desenvolvimento de um sistema de aquecimento para ser usado em produtos têxteis. A base do trabalho foi a realização de uma fonte de alimentação adequada ao sistema. Esta fonte teria de ser recarregável, daí a utilização de uma bateria recarregável, e as suas dimensões deviam ser o mais reduzidas possível para poder ser incorporada em produtos têxteis. Esta última característica da fonte esteve sempre presente em todas as escolhas dos componentes a utilizar, para que as dimensões não ultrapassassem as impostas.

Foi desenvolvido um protótipo que possibilita a demonstração do sistema em funcionamento. Este protótipo não respeita as dimensões exigidas devido às dimensões da caixa utilizada, no entanto estas podem ser facilmente alcançadas numa nova versão, já que o volume do conjunto de todos os componentes físicos utilizados não ultrapassa o requerido.

A interface de seleção de modo de funcionamento foi realizada com sucesso, permitindo através de um simples interruptor ligar e desligar o sistema, bem como selecionar o modo de funcionamento.

Os sensores de temperatura para controlo em malha fechada foram realizados através de termístores de pequenas dimensões, permitindo medições rigorosas da temperatura das bandas. A gama de valores de medição de temperatura correta supera a gama exigida desde os 0°C aos 40°C.

O indicador do estado da bateria foi baseado num sensor que mede a tensão aos terminais da bateria e em função desta, faz um LED acender a cor correspondente ao estado (verde para bateria em bom estado e vermelho para bateria a precisar de carga).

Era objetivo a criação de uma caixa e de um protótipo para demonstração. A caixa foi desenhada, mas não foi construída em tempo útil, procedendo-se à realização do protótipo através de uma caixa que não possuía as dimensões exatas para o sistema, mas que permite verificar o funcionamento.

A autonomia conseguida foi de aproximadamente 8 horas com apenas uma banda de aquecimento e para um aumento da temperatura de apenas 18°C. Considerando que com duas bandas a autonomia seria metade, 4 horas, o requisito de 4 horas como autonomia mínima só é superado quando a temperatura ambiente tem uma

diferença de até 18°C em relação à temperatura imposta. No entanto este valor varia de acordo com as condições ambientais a que o sistema está exposto, por exemplo o número e o tipo de peças de roupa que o utilizador está a utilizar.

O tempo de carga da bateria depende do carregador utilizado, já que o sistema não possui um carregador próprio, podendo ser utilizado qualquer carregador do tipo micro USB. No entanto o tempo de carga nunca será menor do que 6 horas devido à limitação de corrente de carga por parte da placa MCP73213.

Em termos gerais, verificou-se que os microcontroladores da *Arduino* são de fácil programação, possuindo múltiplas funcionalidades que podem ser utilizadas em vários projetos.

A aplicação criada para *smartphone* não era um dos requisitos, no entanto dá uma vantagem a este sistema relativamente a outros do mesmo tipo (alguns dos sistemas existentes referidos já possuíam esta funcionalidade, bem como o controlo da temperatura por controlo remoto), para além das vantagens que traz ao próprio utilizador do sistema.

Por fim, conclui-se que o funcionamento geral do sistema foi provado, conseguindo-se um controlo da temperatura das bandas de aquecimento eficaz com uma sobrelevação da temperatura das bandas suficiente para a proteção do utilizador em certas ocasiões. Assim, o objetivo fundamental desta dissertação foi conseguido.

## **8.2 Desenvolvimentos Futuros**

Em futuros desenvolvimentos do sistema será interessante avaliar a viabilidade da carga da bateria ser realizada sem fios (era um dos requisitos para este sistema), através de indução magnética, como já é feito em alguns telemóveis.

Seria importante introduzir novas funcionalidades ao sistema, tais como, utilizar um indicador sonoro para que os invisuais pudessem perceber o estado da bateria e utilizar o mesmo LED bicolor para acender a cor laranja quando a bateria está em carga, desligando quando a carga estivesse completa (esta funcionalidade já é provisoriamente assegurada com o LED azul que a placa MCP73213 acende quando a bateria está a carregar). Para acender a cor laranja basta ligar positivamente os dois ânodos, verde e vermelho, que uma cor alaranjada (devida à junção do verde e vermelho) surgirá.

Um outro requisito do sistema que não foi atendido é a inserção de um circuito de proteção contra curto-circuito. A forma mais fácil de proteção seria a introdução de um fusível no circuito que, em caso de excesso de corrente: curto-circuito, quebraria, impedindo a passagem de corrente. No entanto, um fusível normal quebraria permanentemente, exigindo a troca por outro em caso de curto-circuito. Para contornar esse problema o circuito de proteção contra curto-circuito poderia ser baseado num dispositivo PTC, que em caso de curto-circuito, a corrente que o atravessaria seria muito elevada, fazendo com que a sua resistência aumentasse muitas ordens de grandeza, impondo uma diminuição da corrente, tratando-se assim de um fusível “resetável”. Muitas baterias de íões de Lítio, nomeadamente as do tipo 18650 usadas, já possuem esse

dispositivo com essa função, no entanto, em casos de mudança da bateria ou alteração do seu tipo, será mais seguro ter o circuito de proteção implementado no próprio sistema.

Devido ao facto de a bateria do sistema poder ser trocada por qualquer razão, por exemplo por uma com uma maior capacidade, convinha que o sistema possuísse uma proteção contra inversão de polaridade, para o caso em que a bateria fosse colocada com os terminais opostos.

Há ainda a possibilidade da substituição do microcontrolador *Arduino* por um mais pequeno e que fosse implementado apenas para o sistema, já que o *Arduino Nano* está preparado para muitas tarefas, sendo que grande parte delas não foram utilizadas. Uma opção interessante seria a utilização da placa *Arduino LilyPad* que está desenvolvida para projetos vestíveis.

A aplicação para *smartphone* criada apenas para Android limita o número de utilizadores do sistema, assim se fossem desenvolvidas aplicações, iguais ou semelhantes à desenvolvida, para outros sistemas operativos móveis, este impedimento era ultrapassado.

Para um protótipo final, mais semelhante ao produto final, seria interessante a utilização de componentes SMD para a diminuição das dimensões gerais do protótipo. A impressão da caixa desenvolvida (ou com algumas alterações) também melhoraria o aspeto do demonstrador final.

De forma a haver uma medição do estado de carga mais fiel é necessário recorrer a métodos de estimação do estado de carga da bateria (SOC) mais avançados do que apenas a leitura da tensão aos terminais.

Paralelamente a estas possíveis novas inclusões ao sistema, é fundamental melhorar a autonomia do sistema, quer por mudança do tipo de bateria, quer por redução do consumo de todo o sistema, para que este possa ser utilizado durante mais tempo. O tempo de carga também terá de ser reduzido, sendo que para isso talvez a melhor solução seria o desenvolvimento de um carregador próprio para o sistema. Outra solução seria efetuar a carga da bateria com o método de corrente constante, melhorando o tempo de carga, mas prejudicando a autonomia de todo o sistema.

Através das técnicas de impressão por serigrafia das bandas de aquecimento, seria interessante que as ligações entre as bandas de aquecimento e os sensores de temperatura com a caixa do sistema fossem igualmente impressas nos têxteis, evitando a utilização de fios condutores. A investigação de uma forma de os termístores serem realizados no próprio têxtil sobre a mesma técnica também seria deveras interessante, evitando o uso de um componente rígido (mesmo sendo este de reduzidas dimensões).

Em futuras versões do sistema será importante estudar os tipos de materiais existentes nos têxteis para que o sistema seja implementado no vestuário mais adequado, bem como o número de peças de roupa que o utilizador deverá utilizar para obter a melhor performance possível.

Por último, seria aliciente um estudo do comportamento do sistema numa câmara climática com um manequim que simule o corpo humano (este equipamento existe no CITEVE em Famalicão), possibilitando a análise do sistema quando exposto a diferentes ambientes.



## Referências

- [1] S. Walker and R. Roashan, “Wearable Technology: The Small Revolution is Making Big Waves,” IHS, [Online]. Available: <https://technology.ihs.com/api/binary/526640>.
- [2] P. McFedries, “Technically speaking: Ever closer to the machine,” *IEEE Spectr.*, vol. 52, no. 6, pp. 20, 2015.
- [3] M. P. Matos, “Efeitos à saúde pela exposição ao frio,” *Carne*, no. 11, pp. 86-98, 2007.
- [4] T. Chakravorty, “Operating Room Essentials for Budding Doctors - A Perspective,” *Beng. Journ. of Otolaryn. and Head Neck Surger.*, vol. 23, no. 3, pp. 109–115, 2015.
- [5] “Non- Carbon Fiber Electrical Heating Textile.” [Online]. Available: <http://fab.cba.mit.edu/classes/863.15/section.Architecture/people/Bertrand/images/14/heater.pdf>.
- [6] C. Wargo, “Characterization of Conductors for Printed Electronics,” PChem Associates, [Online]. Available: <http://www.nanopchem.com/pdf/understanding.pdf>.
- [7] “Sheet Resistance.” [Online]. Available: <http://www2.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/sheetRes.html>.
- [8] University of Notre Dame, “Heat losses of the body,” *Phys. Med.*, pp. 64–88, 2004.
- [9] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, “Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 380–388, 2010.
- [10] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, “Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 389–398, 2010.
- [11] H. Zhang, E. Arens, C. Huizenga, and T. Han, “Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 399–410, 2010.
- [12] *Any Time, Anywhere Computing*, vol. 522. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [13] A. Viseu, “Simulation and augmentation: Issues of wearable computers,” *Ethics Inf. Technol.*, vol. 5, pp. 17–26, 2003.

- [14] H. Kudo, T. Sawada, E. Kazawa, H. Yoshida, Y. Iwasaki, and K. Mitsubayashi, "A flexible and wearable glucose sensor based on functional polymers with Soft-MEMS techniques," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 22, no. 4, pp. 558–562, 2006.
- [15] "Disney's \$1 Billion Bet on a Magical Wristband." [Online]. Available: <https://www.wired.com/2015/03/disney-magicband/>.
- [16] J. P. S. Cunha, B. Cunha, A. S. Pereira, W. Xavier, N. Ferreira, and L. Meireles, "Vital-Jacket: A wearable wireless vital signs monitor for patients' mobility in cardiology and sports," *Pervasive Comput. Technol. Healthc. (PervasiveHealth)*, pp. 1–2, 2010.
- [17] "Fitbit Surge™ Fitness Super Watch." [Online]. Available: <https://www.fitbit.com/eu/surge>.
- [18] J. Berzowska, "Electronic Textiles: Wearable Computers, Reactive Fashion, and Soft Computation," *Textile.*, vol. 3, no. 1, pp. 2–19, Jan. 2005.
- [19] S. Khan, L. Lorenzelli, and R. S. Dahiya, "Technologies for printing sensors and electronics over large flexible substrates: A review," *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3164–3185, 2015.
- [20] G. R. Newsham, "Clothing as a thermal comfort moderator and the effect on energy consumption," *Energy Build.*, vol. 26, no. 3, pp. 283–291, 1997.
- [21] F. Wang, C. Gao, K. Kuklane, and I. Holmér, "A Review of Technology of Personal Heating Garments," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 16, no. 3, pp. 387–404, Jan. 2010.
- [22] "When was the first electric blanket invented? – When was it invented?" [Online]. Available: <http://www.whenwasit invented.org/when-was-the-first-electric-blanket-invented/>.
- [23] "The History of the Electric Blanket." [Online]. Available: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/ElectricBlanket.htm>.
- [24] F. Wang, C. Gao, and I. Holmér, "Effects of Air Velocity and Clothing Combination on Heating Efficiency of an Electrically Heated Vest (EHV): A Pilot Study," *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 7, no. 9, pp. 501–505, Jul. 2010.
- [25] F. Wang and H. Lee, "Evaluation of an Electrically Heated Vest (EHV) Using a Thermal Manikin in Cold Environments," *Ann. Occup. Hyg.*, vol. 54, no. 1, pp. 117–124, Jan. 2010.
- [26] A. McCoy and M. Tijan, "Induction Heating of Footwear and Apparel," U.S. Patent Applications No. 11/623,511, 2007.
- [27] A. Au, "Electrically heated insoles for footwear and remote control heating system for electrical insoles for footwear." Google Patents, 11-Aug-2010.
- [28] H. Isik and E. Saraçoğlu, "The Design of Thermoelectric Footwear Heating System Via Fuzzy Logic," *J. Med. Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 521–527, 2007.
- [29] "How to make a Heating and Cooling Jacket." [Online]. Available: <http://www.instructables.com/id/How-to-make-a-Heating-and-Cooling-Jacket/>.



- [30] “warmX - warm heated underwear - industry and research.” [Online]. Available: <http://www.warmx.de/index.php/industry-and-research.html>.
- [31] “Technology | Gyde Supply Co.” [Online]. Available: <http://www.gydesupply.com/technology/>.
- [32] M. Winter and R. J. Brodd, “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?,” *Chem. Rev.*, vol. 104, no. 10, pp. 4245–4270, Oct. 2004.
- [33] “What’s the Best Battery?” [Online]. Available: [http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery).
- [34] “Graphene oxide for LithiumSulfur batteries” [Online]. Available: <http://www.idtechex.com/research/articles/graphene-oxide-for-lithium-sulfur-batteries-00008050.asp>.
- [35] “Specification of product for Lithium-ion Rechargeable Cell Model : ICR18650-26H,” Samsung SDI Co.,Ltd., 2011.
- [36] A. C. C. Hua and B. Z. W. Syue, “Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery,” *2010 Int. Power Electron. Conf.*, no. 95, pp. 1478–1483, 2010.
- [37] S. Thomas, M. Stieneker, and R. W. De Doncker, “Development of a modular high-power converter system for battery energy storage systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3049–3056, Dec. 2010.
- [38] V. M. M. Soares, “Handled RF spectrum analyser using Arduino,” M.S. thesis, DETI, UA, Aveiro, PT, 2013.
- [39] “Arduino - Home.” [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [40] Agilent Technology, “Practical Temperature Measurements - Application Note 290.” [Online]. Available: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-7822E.pdf>.
- [41] A. P. de Melo, “Teoria dos sistemas de controlo lineares,” *Univ. Aveiro*, 2010.
- [42] D. Ibrahim, *Microcontroller Based Applied Digital Control*. 2006.
- [43] J. Lee, Y. Su, and C. Shen, “A Comparative Study of Wireless Protocols ;,” *IECON Proc.*, pp. 46–51, 2007.
- [44] “MCP73213 Dual-Cell Li-Ion/Li-Polymer Battery Charge Management Controller with Input Overvoltage Protection.” [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20002190C.pdf>.
- [45] “MCP73213 OVP Dual-Cell Li-Ion Battery Charger Evaluation Board User’s Guide.” [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51849a.pdf>.
- [46] “MT3608 - High Efficiency 1.2MHz 2A Step Up Converter.” [Online]. Available: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>.
- [47] “NTC Thermistors, Radial Leaded, Standard Precision.” [Online]. Available:

- <http://www.vishay.com/docs/29049/ntcle100.pdf>.
- [48] "Home Page | ThermaCare®." [Online]. Available: <http://www.thermacare.com/>.
- [49] "Silicon Epitaxial-Base Power Transistors." [Online]. Available: <http://www.syntax.com.tw/upload/pdf/TR-BD203.pdf>.
- [50] "HC-06 product data sheet." [Online]. Available: <https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>.
- [51] "Android's Share Of The Computing Market - Business Insider." [Online]. Available: <http://www.businessinsider.com/androids-share-of-the-computing-market-2014-3>.
- [52] "71% of developers pick Android as their top platform | FierceWireless." [Online]. Available: <http://www.fiercewireless.com/developer/71-developers-pick-android-as-their-top-platform>.
- [53] "Android." [Online]. Available: <https://www.android.com/>.

# Anexos

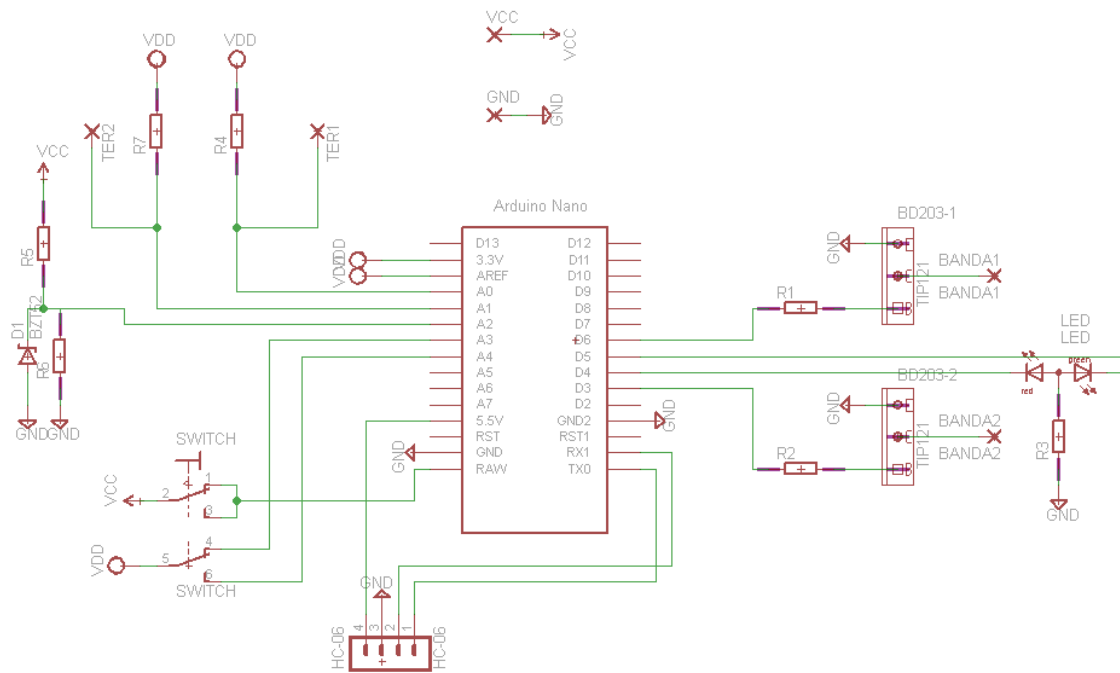


Figura 41: Esquema da PCB impressa

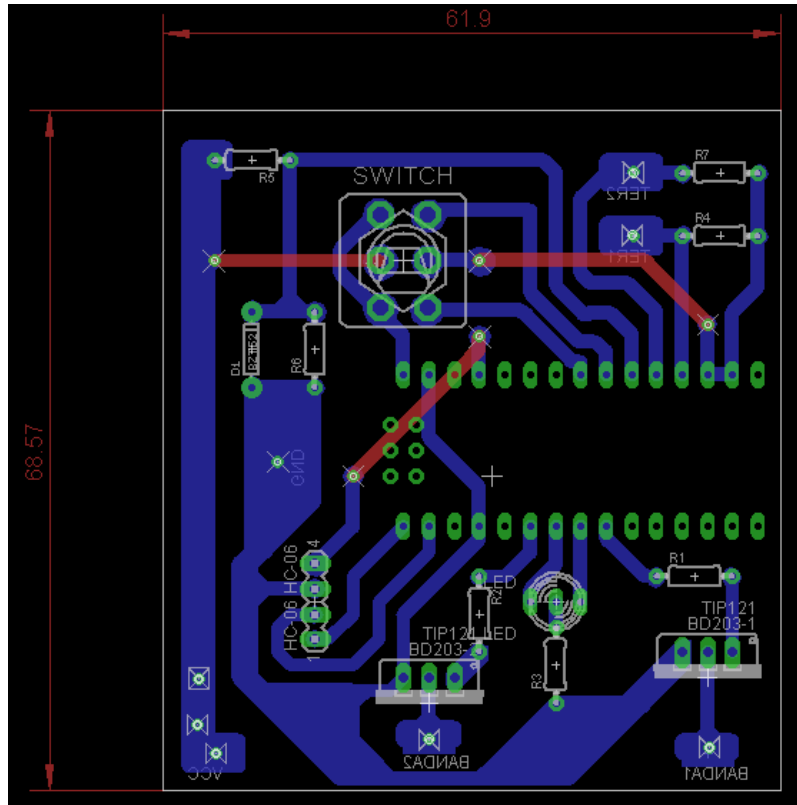
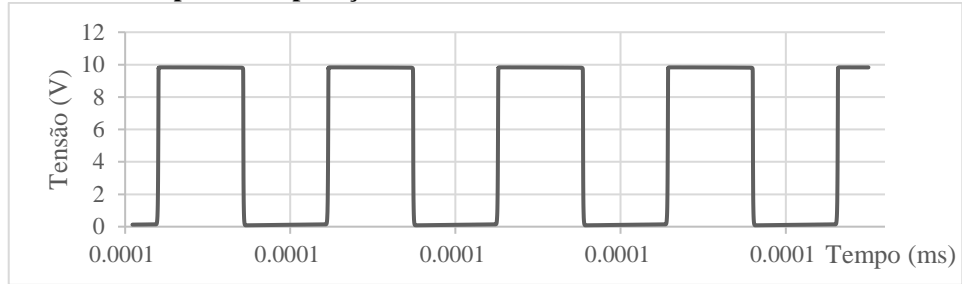
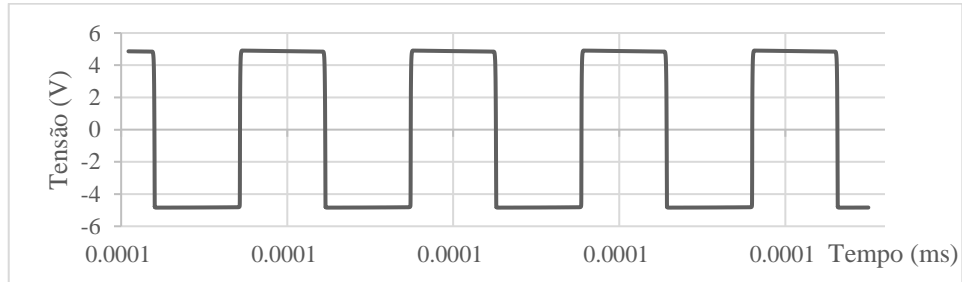


Figura 42: Layout da PCB impressa

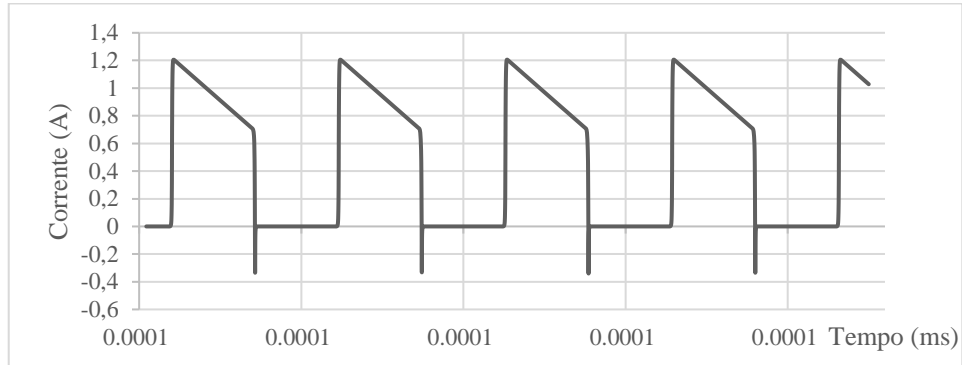
**$V_A$  – Tensão no ponto de aplicação do sinal de switch**



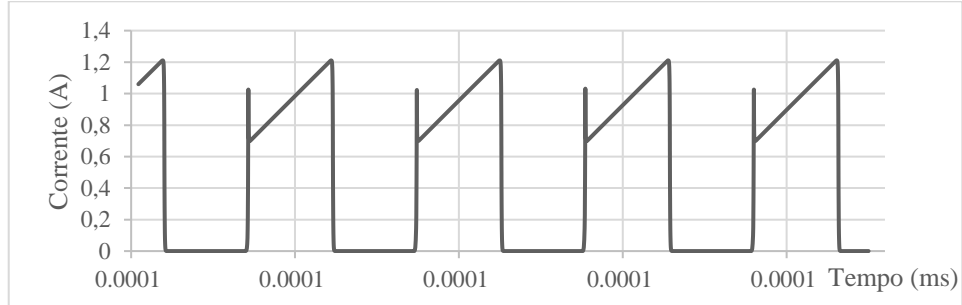
**$V_L$  – Tensão na indutância**



**$I_D$  – Corrente no díodo**



**$I_S$  – Corrente em SW**



**$I_L$  – Corrente na indutância**

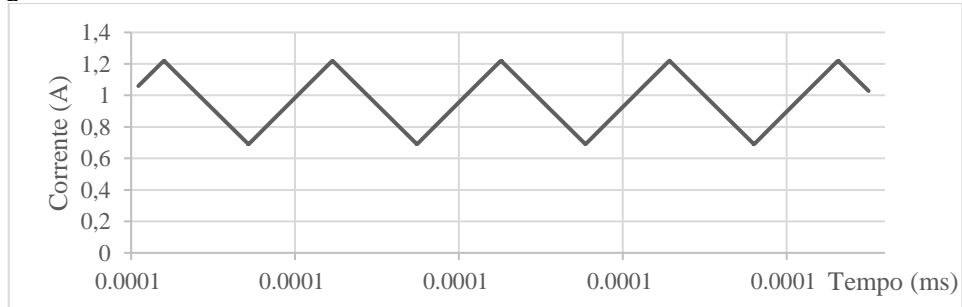


Figura 43: Resultados das simulações do circuito step-up