

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



***Clever Lighting – Desenvolvimento de um sistema de
iluminação inteligente controlado remotamente via
Bluetooth***

Daniel Cardoso Fernandes

VERSÃO FINAL

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Telecomunicações, Eletrónica e Computadores

Orientador Externo: Filipe Tiago Alves de Magalhães
Orientador Interno: Manuel Cândido Duarte dos Santos

25 de junho de 2018

Resumo

O universo *Internet of Things* é já uma realidade contemporânea, criando um cenário no qual objetos, máquinas e computadores, envolvidos numa mesma rede, interagem entre si, trocando dados e cooperam na execução de uma determinada tarefa. A implementação do conceito *Internet of Things* é estendível a diferentes áreas de aplicação, como as indústrias, os cuidados de saúde, a criação de ambientes inteligentes (casas, escritórios, cidades) e também a objetos pessoais e de lazer. É neste contexto de dotar objetos do quotidiano com novas funcionalidades e utilidades que a empresa VI.ME, propôs o desenvolvimento deste projeto de dissertação.

Este projeto, de carácter inovador, consistiu no desenvolvimento de um dispositivo de iluminação inteligente, que visa adicionar a objetos do quotidiano novas funcionalidades de forma a que transcendam a utilização tradicional que lhes é conhecida.

Nesse sentido, o objetivo desta dissertação foi projetar, desenvolver e implementar um pequeno circuito eletrónico para um sistema de iluminação inteligente controlado remotamente via *Bluetooth* por uma aplicação instalada num *smartphone* convencional. O projeto foi composto por várias fases, nomeadamente, a análise de requisitos, a procura de componentes, o desenvolvimento do *firmware*, a implementação e prototipagem do circuito e, por fim, a fase de teste e validação do circuito.

A solução apresentada consiste num dispositivo portátil de reduzidas dimensões, que opera através da autonomia de uma bateria e que possui um circuito de alimentação, que permite carregar a bateria por intermédio de uma porta USB. O dispositivo possui um módulo *Bluetooth* no qual foi desenvolvido o *firmware*. O *firmware* implementa duas *interfaces*, a *interface* entre a aplicação *mobile* e o módulo, utilizando a comunicação *Bluetooth*, e a *interface* entre o módulo e os LEDs, utilizando o protocolo de transmissão de dados I2S. Os LEDs utilizados são endereçáveis individualmente, tendo sido desenvolvida uma placa capaz de albergar o circuito para um único LED e a correspondente *interface* de sinais. Desta forma, obteve-se uma solução adaptável a diferentes casos de uso, satisfazendo-se casos de uso em que há a necessidade de os LEDs serem colocados de forma contígua, próximos uns dos outros, e casos de uso em que os LEDs são distribuídos espacialmente, em redor do dispositivo. Esta solução permite ainda que o número de LEDs no sistema possa ser adaptado.

Abstract

The Internet of Things' universe is already a reality in present times, creating a scenario in which objects, machines and computers, sharing network, interact with each other, exchanging data and cooperating in the execution of tasks. The implementation of the Internet of Things' concept is applicable to different areas, such as industry, healthcare, creation of smart environments (houses, offices, cities), and personal and leisure objects. It was in this context, of endowing everyday objects with new functionalities and utilities, that the VI.ME company proposed the development of this dissertation project.

This innovative project consisted in the development of an intelligent lighting device that, using a color or a color pattern, would be able to add new functionalities to everyday objects, extending their traditional use.

Following that aim, the purpose of this dissertation was to design, develop and implement a small electronic circuit for an intelligent lighting system remotely controlled via Bluetooth by an application installed on a smartphone. This lighting system also incorporated the use of individually addressable LEDs. Several tasks composed this project, namely, the analysis of the requirements, the component procurement, the firmware development and, afterwards, the implementation, prototyping and testing of the whole system.

The presented solution consists in a portable device of small dimensions. It operates through a battery's autonomy and possesses a power circuit which allows the charge of the battery through a USB port. The device possesses a Bluetooth module in which a firmware was developed. The firmware implements two interfaces: the interface between the mobile application and the module, utilizing a Bluetooth communication; and the interface between the module and the LEDs, utilizing the I2S data transmission protocol. The used LEDs are individually addressable, having a board capable of accommodating the circuit to a single LED and the corresponding signal interface been developed. In this way, an adaptive solution was obtained to different use cases: use cases where there is a need to place the LEDs in a contiguous way, close to one another and use cases where the LEDs are spatially distributed around the device. This solution still allows the number of the LEDs in the system to be adapted.

Agradecimentos

Primeiramente, quero começar por agradecer às pessoas que me ajudaram a desenvolver este projeto, desde logo o meu orientador externo Doutor Filipe Magalhães, à sua empresa VI.ME, Lda e ao orientador interno o Professor Cândido Duarte. O vosso apoio foi fundamental para o sucesso deste projeto.

Em segundo lugar, não posso esquecer as pessoas que me acompanharam ao longo destes 5 anos e que ajudaram a tornar possível a concretização deste objeto. Falo de professores, técnicos e obviamente, de colegas. Alguns desses colegas tornaram-se verdadeiros amigos e tenho a certeza de que sem o apoio deles não teria sido possível alcançar este objetivo em apenas 5 anos, refiro-me ao Bruno Pinho, Fábio Pacheco, André Moraes, Rodrigo Passos, Pedro Ferreira, Ricardo Araújo e ao amigo de longa data, Manuel Ferreira.

Em terceiro lugar, quero agradecer aos meus colegas e companheiros da Banda de Músicos dos Mineiros do Pejão. Ao longo destes 5 anos nem sempre foi fácil conseguir conciliar os estudos com os ensaios e as festas da banda, nesse sentido quero agradecer ao maestro Francisco Moreira e aos meus colegas de naipe, Diana Cruz, Ana Santos, João Pereira e Joel Rocha toda a paciência e compreensão que tiveram. A esta lista junto também o Tiago Santos, Joana Pinho, Adriano Silva e Rafael Faísca.

Por fim, e obviamente o agradecimento maior é para toda a minha família, que são o alicerce de tudo isto. À minha mãe Paula Cardoso e ao meu pai Albertino Fernandes agradeço os incansáveis esforços que sempre fizeram para que não me faltasse nada. À minha irmã Mariana Fernandes agradeço todo o apoio, carinho e os momentos que temos vindo a partilhar ao longo da vida. Para os meus avós maternos, Lúcia Pereira e Alberto Cardoso, fica um obrigado gigante por serem das pessoas mais importantes da minha vida, por estarem presentes em todos os momentos e por me ensinarem muito, em especial a avó Lúcia que tenho a certeza, será sempre a pessoa que melhor me conhece e compreende. Por último, tenho de recordar o meu avô paterno Manuel Fernandes, ao longo do tempo que passamos juntos foi sempre um exemplo de trabalho, dedicação, humildade e sobretudo persistência. É como um ídolo que o recorde e lamentando o facto de ele não estar aqui para partilhar esta minha vitória, esteve sempre presente neste percurso.

Com um grande obrigado,

Daniel Cardoso Fernandes

“There are only two days in the year that nothing can be done. One is called Yesterday and the other is called Tomorrow. Today is the right day to Love, Believe, Do and mostly Live.”

Dalai Lama XIV

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Abreviaturas e Símbolos	xix
1. Introdução	1
1.1. Contexto	1
1.2. Motivação	2
1.3. Objetivos	2
1.4. Planeamento e Calendarização	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Internet of Things	5
2.1.1. Conceito	6
2.1.2. História	7
2.1.3. Arquitetura da IoT	8
2.1.4. Áreas de Aplicação	9
2.1.5. Protocolos de Comunicação	12
2.1.6. Desafios	14
2.1.7. Resumo	16
2.2. Bluetooth	17
2.3. Sistemas de iluminação inteligentes – Análise de mercado	19
2.3.1 <i>Tracer 360</i>	19
2.3.2 <i>Lumos Helmet</i>	20
2.3.3 <i>Cosmo Connected</i>	21
2.3.4 <i>Van Der Waals</i>	22

2.3.5 <i>Volvorri Shoes</i>	23
2.3.6 <i>Shiftwear</i>	24
2.3.7 <i>Resumo</i>	25
 3. Especificação do Circuito Eletrónico	 27
3.1. Análise de Requisitos / Procura de Componentes	27
3.1.1 LEDs Endereçáveis	28
3.1.2 Microcontroladores	32
3.1.3 Baterias	35
3.1.4 Regulador de Tensão	37
3.1.5 Gestão da carga da bateria	39
3.2. Esquema do Circuito	40
3.2.1 Circuito de Alimentação	41
3.2.2 Circuito de Comunicação e Controlo	42
3.2.3 Circuito de controlo e alimentação dos LEDs	44
3.2.4 Visão global do circuito	46
3.3. Princípio de Funcionamento do Circuito	46
3.4. Lista de Componentes e Conclusões	48
 4. <i>Firmware</i>	 51
4.1. Interface Aplicação Mobile – Firmware	51
4.1.1 Configuração do protocolo <i>Bluetooth</i>	52
4.1.2 Processamento das tramas BLE para controlo dos LEDs	58
4.2. Interface Firmware – LEDs Endereçáveis	61
4.2.1 Especificações do protocolo I2S	62
4.2.2 Implementação da <i>interface Firmware</i> – LEDs Endereçáveis	64
4.3. Visão Geral do Firmware Desenvolvido	67
 5. Prototipagem das PCBs	 69
5.1. PCB do Sistema	69
5.2. PCB do LED	72
 6. Teste e Validação dos Circuitos	 75
6.1. Dispositivo Desenvolvido	75
6.2. Teste e Consumo de Energia	77
6.3. Alimentação através da Porta USB	78

7. Trabalho Futuro	81
7.1. Alternativas ao desenho da PCB do Sistema	81
7.2. Uso do módulo nRF52832	82
7.3. Criação de uma rede <i>Mesh</i>	83
8. Conclusão	85
9. Referências	87

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de Gantt com as tarefas a realizar	3
Figura 2: Definição de IoT do documento da ITU [8]	7
Figura 3: Evolução dos dispositivos conectados [3] [10]	8
Figura 4: Arquitetura de um dispositivo IoT [11].....	8
Figura 5: A IoT: diferentes serviços, tecnologias e propósitos [10].....	9
Figura 6: Alguns exemplos de etiquetas RFID [14]	13
Figura 7: Alguns exemplos de dispositivos wearable Bluetooth [14]	14
Figura 8: Possível sensor de movimento gerador de energia elétrica [15]	15
Figura 9: Logotipo da tecnologia Bluetooth [16]	17
Figura 10: Produto Tracer 360 [20]	20
Figura 11: Produto Lumos Helmet [21]	21
Figura 12: Produto Cosmo Connected [22]	22
Figura 13: Produto Cosmo Bike [23]	22
Figura 14: Produto Van Der Waals [24]	23
Figura 15: Produto Volvorri Shoes [25].....	24
Figura 16: Produto Shiftwear [26]	24
Figura 17: Pinout do módulo LED WS2812 [27]	28
Figura 18: Método cascata dos LED endereçáveis [27]	29
Figura 19: Pinout do módulo LED WS2813 [28]	30
Figura 20: Diferença entre uma avaria num LED do módulo WS2812 e uma avaria num LED do módulo WS2813 [29].....	30
Figura 21: Pinout do módulo WS2812B [30]	31
Figura 22: Módulo Insight SiP ISP1507 [35]	33
Figura 23: Módulos Rigado: BMD-300 [36] e BMD-330 [38].....	33
Figura 24: BMD-300 Evaluation Kit [39]	34
Figura 25: SEGGER Debug Probes - J-Link [40]	34

Figura 26: Exemplo de baterias Ni-MH [43]	35
Figura 27: Exemplos de baterias Li-Ion [45]	36
Figura 28: Exemplo de baterias LiPo [44]	36
Figura 29: Exemplo de baterias Coin Cell [46]	37
Figura 30: Tensão de Dropout vs Tensão de Entrada do LDO TLV700 [47]	38
Figura 31: Circuito típico de aplicação do LDO TLV7003DDCT [47]	38
Figura 32: Pinout do dispositivo MCP73837 [48]	39
Figura 33: Aplicação típica do dispositivo MCP73837 [48]	40
Figura 34: Esquema do circuito de alimentação do sistema	41
Figura 35: Símbolo do LED de duas cores verde/vermelho	41
Figura 36: Esquemático do circuito de comunicação e controlo	43
Figura 37: Esquemático do circuito de controlo e alimentação dos LEDs	44
Figura 38: Curvas características do transistor NTE4151P [49]	45
Figura 39: Esquema do Circuito	46
Figura 40: Interface aplicação Mobile- Módulo BMD-300	52
Figura 41: Configuração da comunicação Bluetooth	52
Figura 42: Arquitetura do software da série nRF52 [51]	53
Figura 43: Hierarquia de um perfil do GATT [53]	55
Figura 44: Sequência de mensagens de uma configuração típica do módulo advertising [54] .	57
Figura 45: Padronização definida para a trama BLE	58
Figura 46: Resultado do envio de uma trama BLE que define a mesma cor (branco = 0xFFFFF) para todos os LEDs	59
Figura 47: Resultado do envio de uma trama BLE que define uma cor diferente para 5 LEDs .	59
Figura 48: Diagrama explicativo do algoritmo da função on_write()	61
Figura 49: Sequência gráfica dos tempos de transferência de dados [30]	62
Figura 50: Formato original de dois canais I2S [56]	63
Figura 51: Formato I2S alinhado (à esquerda ou à direita) [56]	63
Figura 52: Diagrama sequência das fases da comunicação I2S	64
Figura 53: Forma de onda corresponde ao nível lógico “0”	65
Figura 54: Forma de onda corresponde ao nível lógico “1”	66
Figura 55: Algoritmo da função que constrói as tramas de controlo dos LEDs	67
Figura 56: Interfaces que caracterizam o sistema	67
Figura 57: Layout RF recomendado para o módulo BMD-300 [36]	70
Figura 58: Distribuição dos componentes no layout da PCB do Sistema	70

Figura 59: Camada Top da PCB do Sistema	71
Figura 60: Camada Bottom da PCB do Sistema	71
Figura 61: Layout da PCB do Sistema	72
Figura 62: Representação 3D da peça mecânica que poderá ser encaixada no LED	72
Figura 63: Distribuição dos componentes no layout da PCB do LED	73
Figura 64: Layout da PCB do LED	73
Figura 65: Fotografia dos circuitos implementados, estando representado, à esquerda o circuito principal e à direita o circuito do LED endereçável	76
Figura 66: Exemplo de utilização do Dispositivo Desenvolvido	76
Figura 67: Símbolo do mosfet Power Trench de canal-P FDFS2P106 [58].....	79
Figura 68: Esquema do circuito de alimentação alternativo que permitiria solucionar o condicionamento imposto atualmente pela ausência da bateria	79
Figura 69: Projeto de referência para a utilização do módulo nRF52832 [60].....	82
Figura 70: Arquitetura da pilha de eventos da rede mesh no nRF5 SDK [61]	84

Lista de Tabelas

Tabela 1: Previsão de dispositivos <i>wearable</i> no mundo [13].....	12
Tabela 2: Comparação entre as especificações do Bluetooth 5.0 vs Bluetooth 4.2 [18].....	18
Tabela 3: Caracterização dos parâmetros de iluminação do modelo LED WS2812 [27]	29
Tabela 4: Comparação dos parâmetros de intensidade luminosa entre o WS2812B [30] e o WS2812 [27].....	31
Tabela 5: Características dos módulos nRF52840, nRF52832 e nRF52810	32
Tabela 6: Lista de componentes constituintes do sistema	49
Tabela 7: Gama de softdevices Bluetooth existentes [52]	53
Tabela 8: Dados de configuração do serviço de Informação do Dispositivo	56
Tabela 9: Modos advertising existentes [54]	56
Tabela 10: Códigos hexadecimais dos padrões implementados	60
Tabela 11: Códigos hexadecimais que definem a frequência de repetição dos padrões.....	60
Tabela 12: Tempos de transferência de dados nos LEDs WS2812B [30]	61
Tabela 13: Consumo de corrente do módulo BMB-300	77
Tabela 14: Consumo de corrente dos LEDs Endereçáveis.....	77

Abreviaturas e Símbolos

App	Aplicação Móvel
BLE	Bluetooth Low Energy
CPU	Central Processing Unit
EPC	Electronic Product Code
EDR	Enhanced Data Rate
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
IT	Internet Technology
I2S	Inter-IC Sound
LED	Light Emitting Diode
LDO	Low-Dropout
LSB	Least Significant Bit
mcd	Milicandela
MSB	Most Significant Bit
PCB	Printed Circuit Board
RF	Radiofrequência
RGB	Red - Green - Blue
RFID	Radio Frequency Identification
SKD	Software Development Kit
SoC	System on Chip
ULP	Ultra Low Power
UPC	Universal Product Code
UUID	Universally Unique Identifier

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo tem como objetivo introduzir a dissertação “*Clever Lighting - Desenvolvimento de um sistema de iluminação inteligente controlado remotamente via Bluetooth*”. O capítulo inicia-se com a apresentação da contextualização do tema na secção [1.1](#), seguidamente, na secção [1.2](#), será apresentada a motivação que desencadeou a realização da dissertação, a secção [1.3](#) abordará os principais objetivos deste projeto e, por fim, a secção [1.4](#) apresenta o planeamento e a calendarização do trabalho.

1.1. Contexto

Num mundo cada vez mais tecnológico e numa altura em que a *Internet of Things* é um assunto praticamente omnipresente, a empresa VI.ME, empresa que promove o desenvolvimento desta dissertação, pretende desenvolver um dispositivo de iluminação inteligente, que seja capaz de conferir funcionalidades a objetos / cenários do quotidiano, e que beneficie da capacidade de processamento e sensores tipicamente disponíveis em qualquer *smartphone* atual.

A perceção da cor é algo natural, que nos ajuda a caracterizar os objetos, a interpretar o ambiente e a gerar estímulos que nos fazem ter reações instintivas. Partindo deste pressuposto, a dissertação tem o intuito de desenvolver um dispositivo que apresente um carácter inovador e que seja uma solução para resolver questões que abrangem diferentes áreas do quotidiano como, por exemplo, a segurança, o desporto, o lazer e a moda.

O dispositivo será um pequeno circuito que possa ser instalado num objeto do quotidiano, tal como uma peça de vestuário, uma bicicleta, uma mochila ou no calçado, por exemplo.

O dispositivo será completado com uma aplicação que comunica com o dispositivo através do protocolo de comunicação *Bluetooth*. A aplicação permitirá controlar o dispositivo remotamente e obter funcionalidades que tirem o máximo partido da capacidade de processamento e dos sensores do *smartphone*.

1.2. Motivação

A motivação deste projeto de inovação é sem dúvida a grande utilidade que um dispositivo com estas características pode acrescentar ao dia a dia de uma pessoa, tirando partido dos sensores e funcionalidades de um *smartphone*, que é um dispositivo omnipresente nos dias que correm.

No âmbito da segurança, a ANSR (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária) revelou que no período entre 2010 e 2013, existiram 5.741 acidentes nas estradas portuguesas envolvendo ciclistas, dos quais resultaram 134 mortos e 248 feridos graves, referindo ainda, que o maior número dos sinistros foram registados entre as 18h e as 21h, reforçando a importância de as bicicletas e os ciclistas estarem bem iluminados e sinalizados [1]. Assim, a solução que se pretende desenvolver permitirá tornar, não apenas ciclistas, como também peregrinos e corredores mais visíveis para os condutores, ajudando a melhor perceber o seu movimento relativo.

O dispositivo oferecerá ao utilizador a possibilidade de, por exemplo, conferir a um qualquer objeto uma cor (através da iluminação) consoante esteja em movimento ou parado, definir uma cor para o objeto em função da sua localização geográfica, combinar a cor do objeto com a cor do ambiente envolvente ou até redefinir o aspeto do objeto atribuindo-lhe um novo padrão de cores. Existirá um conjunto de oportunidades, que o utilizador, a partir da aplicação e dos sensores que o *smartphone* contenha, poderá aproveitar e explorar.

1.3. Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é projetar, desenvolver e implementar um pequeno circuito eletrónico para um sistema de iluminação inteligente controlado remotamente por uma *app* instalada num *smartphone* convencional. A elaboração do projeto está dividida em várias fases, sendo que a primeira fase tem como objetivo o levantamento do estado da arte.

O objetivo seguinte incidirá sobre a análise de requisitos e a procura de componentes eletrónicos. O circuito eletrónico desenvolvido será colocado em objetos do quotidiano e, por isso, é requisito fundamental que as dimensões finais do circuito sejam reduzidas e que o tipo de LEDs utilizado seja capaz de produzir o efeito luminoso que se pretende. No que diz respeito à escolha do microcontrolador é fundamental que se enquadre tanto nos requisitos do projeto como nas características dos restantes componentes.

Os objetivos que se seguem dizem respeito à implementação e prototipagem do circuito, que irão requerer a especificação e o projeto prévios, e ao desenvolvimento do *firmware* para o microcontrolador. Por fim serão realizados os testes e a validação do circuito eletrónico e do respetivo *firmware*.

A par do atendimento das diversas tarefas acima enunciadas, será redigida e preparada toda a informação que suportará a redação da dissertação.

1.4. Planeamento e Calendarização

Ao longo da unidade curricular de Preparação da Dissertação foi realizada a revisão bibliográfica e iniciada a fase de procura de componentes, o que permitiu fazer um enquadramento do problema e, consequentemente, definir a estratégia que será seguida.

O plano de desenvolvimento e a atribuição de prazos às tarefas foi elaborado tendo em consideração que o tempo de desenvolvimento da dissertação corresponderá à duração do segundo semestre letivo.

A primeira tarefa consiste em continuar a análise dos requisitos e a procura e escolha de componentes que se encaixem nas especificações anunciadas.

A segunda tarefa consiste na especificação e projeto do circuito eletrónico.

As tarefas que se seguem, consistem no desenvolvimento e prototipagem do circuito e no desenvolvimento do *firmware* para o microcontrolador.

Seguidamente, realizar-se-ão testes para validação do circuito eletrónico e do *firmware*. A última tarefa, culminará com a redação da dissertação.

Seguidamente, será mostrado sobre a forma de um diagrama de *Gantt*, na Figura 1, as tarefas supramencionadas, bem como a sua distribuição ao longo do tempo disponível para a execução da dissertação.

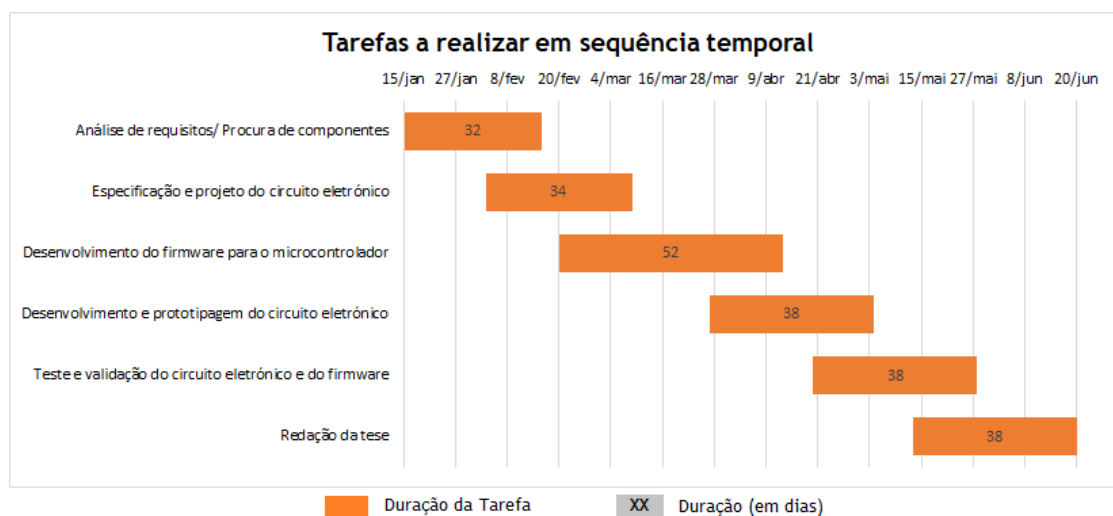


Figura 1. Diagrama de *Gantt* com as tarefas a realizar

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada no âmbito da proposta de dissertação. A pesquisa foi realizada nas diversas plataformas disponíveis e tem como intuito permitir uma melhor contextualização e compreensão do projeto e do trabalho que se pretende desenvolver.

A pesquisa cobriu dois aspetos essenciais, que se encontram divididos nas seguintes secções, respetivamente: [2.1](#). “*Internet of Things*” na qual é apresentada uma visão geral do universo IoT, [2.2](#). “*Bluetooth*” na qual é apresentada a história da tecnologia bem como as suas principais especificações e a [2.3](#). “Sistemas de iluminação inteligentes - Análise de mercado” que descreve um estudo de mercado que visa conhecer as características de produtos semelhantes.

2.1. *Internet of Things*

A presente secção permite conhecer os pontos essenciais do universo da IoT, encontrando-se dividido em 7 subsecções: [2.1.1](#), “Conceito”, que define o termo *Internet of Things*, realça a importância desta tecnologia e apresenta as perspetivas de futuro. A subsecção [2.1.2](#), “História”, que apresenta a origem do termo IoT e factos históricos que sustentam e credibilizam o crescimento da tecnologia. A subsecção [2.1.3](#), “Arquitetura da IoT”, que especifica e define as várias camadas que devem constituir um dispositivo IoT. A subsecção [2.1.4](#), “Áreas de Aplicação”, que apresenta os diferentes domínios e contextos em que a IoT se aplica, demonstrando exemplos e as respetivas vantagens. A subsecção [2.1.5](#), “Protocolos de Comunicação”, que apresenta os principais protocolos *wireless* utilizados nas diferentes áreas de aplicação da IoT. A subsecção [2.1.6](#), “Desafios”, que apresenta as principais barreiras que afetam a IoT atualmente.

Por fim, a subsecção [2.1.7](#), “Resumo” reforça as principais ideias apresentadas.

2.1.1. Conceito

O conceito de *Internet of Things* resulta da junção de dois termos, o primeiro é o termo *internet*, que se define como sendo uma rede global capaz de conectar sistemas de computadores em todo o mundo, com o termo “*things*”, que engloba tudo que existe à nossa volta, desde os objetos mais pequenos, como, por exemplo, uma simples chave ou um comando de garagem, até aos objetos maiores como aviões e navios. Assim, *Internet of Things* designada em português por “*internet das coisas*”, define-se como sendo uma rede em que vários objetos, equipados com um conjunto de sensores, *software* e recursos capazes de guardar e partilhar dados, interagem e comunicam entre si.

O aparecimento da *internet* veio transformar a forma como as pessoas se relacionam, permitindo que comuniquem através de um computador. O aparecimento da IoT, pretende elevar essa relação para outro patamar, permitindo que pessoas, computadores, máquinas e objetos tenham a capacidade de interagir entre si, criando-se uma nova realidade.

O processo, para permitir esta nova realidade, baseia-se em transformar os objetos da vida quotidiana das pessoas em dispositivos, equipados com componentes que permitem executar instruções lógicas, como, por exemplo, um microcontrolador, uma *interface* de comunicação (com ou sem fios), uma fonte de energia elétrica e um conjunto de sensores e atuadores. Desta forma, os objetos pertencentes à IoT têm a capacidade de produzir dados e os comunicar, através da rede a que pertencem, interagindo entre si, trocando informações e cooperando na execução de uma tarefa. Com esta nova visão, os objetos são dotados de novas funcionalidades e novas utilidades, que transcendem a utilização tradicional que outrora lhes era conhecida.

Segundo a empresa de consultoria *Gartner*, foram vendidos 366,2 milhões de *smartphones* no segundo trimestre de 2017, registando-se um aumento de 6,7% em relação ao mesmo período do ano anterior [2]. Este aumento tem vindo a potenciar o crescimento da IoT, possibilitando a criação de produtos e serviços que utilizam as capacidades dos *smartphones* para executar, por exemplo, as tarefas mais complexas, como o processamento de dados e a gestão das comunicações.

Analisando o futuro, os prognósticos de crescimento, segundo a Cisco IBSG (*Internet Business Solutions Group*), apontam para 50 mil milhões de dispositivos conectados em todo o mundo em 2020, esperando-se uma população mundial de, aproximadamente, 7,6 mil milhões. Estes valores resultam numa média de 6,58 dispositivos conectados por pessoa em 2020, perfazendo o dobro dos dispositivos conectados em 2015. Ainda no mesmo estudo, a Cisco IBSG prevê que as empresas e indústrias do IoT lucrem, entre 2013 e 2022, mais de \$14.4 biliões de dólares [3].

Outras grandes empresas do IT como a *Microsoft*, estão a investir substancialmente no negócio da IoT, como ficou patente nas declarações de *Satya Nadella* na *Microsoft Convergence* 2015, onde foi anunciado um plano de trabalhos para a *Windows* e a *Azure*, chamado *Azure IoT Suite*, que desenvolverá uma oferta abrangente de serviços IoT para os seus clientes e parceiros [4].

Em suma, a IoT é definitivamente o futuro e tem potencial para se tornar parte integrante do estilo de vida humano, transformando o mundo e tornando-o num lugar melhor para se viver.

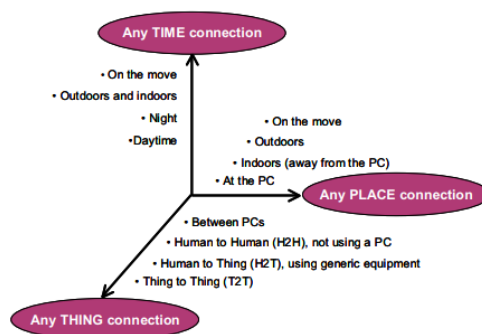
2.1.2. História

Desde o nascimento da *internet* que se imagina a possibilidade de interligar objetos. Contudo, o termo *Internet of Things* surge em 1999 numa conferência na *Procter & Gamble* sobre a tecnologia RFID, onde Kelvin Ashton, cofundador e diretor executivo do Auto-ID Center no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), proferiu a seguinte citação: “*we need to empower computer with their own means of information, so they can see, hear and smell the world themselves, in all its random glory*” [5]. Kelvin Ashton entendia que o mundo é constituído por objetos e não por ideias ou informações. No entanto, a tecnologia da informação existente era construída com base em dados introduzidos por pessoas. Nesse sentido, Ashton propôs que os computadores tivessem a capacidade de autonomamente reunirem dados sobre as coisas que os rodeiam para serem capazes de criar conhecimentos. A utilização desses conhecimentos permite reduzir desperdícios, reduzir custos e até saber quando um objeto precisa ser substituído ou reparado.

Ainda no mesmo ano, o laboratório *Auto-ID Center*, com a participação dos seus fundadores *Kevin Ashton*, *David Brock* e *Sanjay Sarma* desenvolvem o EPC, um sistema de identificação de objetos baseado em RFID com o objetivo de se substituir os códigos de barras UPC.

Nos anos de 2003 e 2004, o termo *Internet of Things* é noticiado em publicações de entidades conceituadas como, *The Guardian* [6], *Scientific American* e *Boston Globe* [7]. No mesmo ano, o departamento de defesa dos Estados Unidos implementa a tecnologia RFID em larga escala através dos seus programas *Savi* e *Walmart* no setor comercial.

Em 2005, a IoT atinge uma nova dimensão quando a ITU (*International Telecommunications Union*) publica o primeiro documento sobre o assunto [8]. Do documento, destaca-se a seguinte frase: “*A new dimension has been added to the world of information and communication technologies (ICTs): from anytime, any place connectivity for anyone, we will now have connectivity for anything. Connections will multiply and create an entirely new dynamic network of networks - an Internet of Things*”. A citação é ilustrada, no documento, através da Figura 2.



Source: ITU adapted from Nomura Research Institute

Figura 2: Definição de IoT do documento da ITU [8]

Em 2008, adquire grande notoriedade com o reconhecimento e a primeira conferência por parte da União Europeia sobre o tema *Internet of Things* [9]. Posteriormente, um grupo de empresas lança o *IPSO Alliance*, para promover o uso de protocolos de *internet* em redes de *smart objects* e abrir portas à *Internet of Things*. No mesmo ano, a FCC (*Federal Communications Commission*) aprovou o uso do *White Space Spectrum*.

De acordo com a Cisco IBSG, a IoT nasceu entre 2008 e 2009, na altura em que passaram a existir mais objetos e coisas conectados à internet do que pessoas, como ilustra a Figura 3.

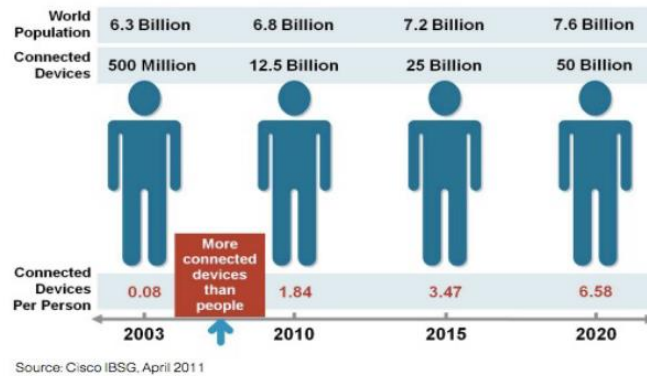


Figura 3: Evolução dos dispositivos conectados [3] [10]

Em 2011, o lançamento do IPv6 que permite a existência de 2^{128} endereços, foi apresentado por *Steven Leibson* com a seguinte citação: “*we could assign an IPV6 address to every atom on the surface of the earth, and still have enough addresses left to do another 100 earths*”. O novo protocolo, desencadeou um enorme interesse e crescimento da IoT, levando gigantes do IT como a Cisco, IBM e Ericsson a avançarem com iniciativas educacionais e comerciais no campo da IoT.

Atualmente, a *IPSO Alliance* conta com mais de 50 empresas associadas, das quais se destacam a Bosch, Cisco, Ericsson, Intel, SAP, Sun, Google e Fujitsu.

2.1.3. Arquitetura da IoT

O conceito IoT é amplamente sofisticado e abrange várias áreas de conhecimento como a ciência da computação, as comunicações, a microeletrónica e a tecnologia de sensores.

A arquitetura principal de um dispositivo capaz de pertencer à IoT pode ser dividida em 4 camadas. A Figura 4 representa essas 4 camadas.

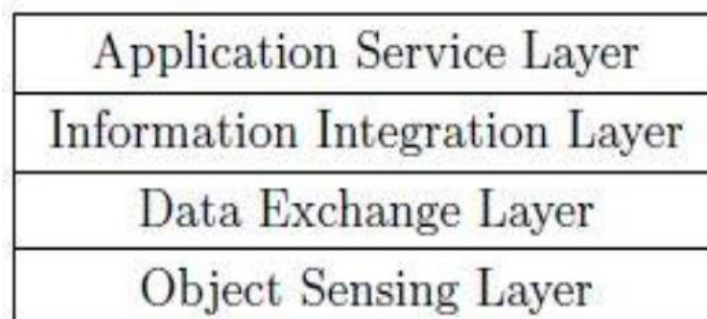


Figura 4: Arquitetura de um dispositivo IoT [11]

- Camada de detecção de objetos;
- Camada de troca de dados e comunicação;
- Camada de integração da informação;
- Camada de aplicação;

A camada de detecção de objetos é, sobretudo, constituída por sensores e é através deles que são obtidos todos os dados e informações, seja sobre um objeto, um ser humano ou o ambiente.

A camada de troca de dados, também designada por camada de comunicação, é constituída por protocolos de comunicação e tecnologias como RFID, Wi-Fi, *Bluetooth*, entre outras, e é utilizada para a transmissão de dados.

A camada de integração da informação é responsável por fazer a seleção e junção dos dados, sendo capaz de processar esses dados e torná-los em informação útil.

A camada da aplicação representa a *interface* que será apresentada ao utilizador, devendo ser apelativa, intuitiva e de fácil utilização.

2.1.4. Áreas de Aplicação

A IoT é uma realidade complexa e transversal que pode ser implementada em diferentes áreas. No mundo atual, já se pode encontrar um considerável número de casos de uso, como, por exemplo: na área da saúde, com dispositivos que permitem monitorizar remotamente os batimentos cardíacos, no setor industrial, com ambientes inteligentes capazes de produzirem autonomamente e no setor dos serviços, com aplicações que permitem efetuar pagamentos de uma forma prática.

Num panorama geral, quase todos os domínios da sociedade estão já equipados com objetos e serviços inteligentes. Seguidamente, serão apresentadas algumas das áreas onde a IoT está presente, tais como:

- Indústria dos transportes e logística;
- HealthCare*;
- Ambientes inteligentes (casas, escritórios, etc.);
- Âmbito pessoal e social;

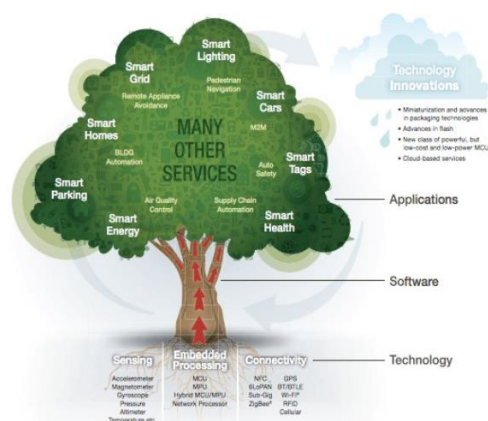


Figura 5: A IoT: diferentes serviços, tecnologias e propósitos [10]

a) Indústria dos transportes e logística

Na indústria dos transportes os objetos/produtos são equipados com etiquetas e sensores que enviam informações para *clouds*, permitindo, em tempo real, por exemplo, localizar o produto, saber quem o está a transportar, o tempo que irá demorar a ser feita a entrega, entre muitas outras informações. A utilização destas informações ajuda a fazer uma melhor gestão dos pedidos e a construir uma melhor relação com os clientes, fornecendo-lhes informações adequadas e atualizadas.

Na indústria da logística, a IoT tem para oferecer muitas vantagens, tanto no setor dos retalhos como na gestão da cadeia de fornecedores. Na gestão da cadeia, se os fabricantes e fornecedores receberem dados de *stock* e das vendas dos revendedores têm a possibilidade de produzirem e fornecerem as quantidades certas dos produtos evitando desperdícios e carências. No setor do retalho, recorrendo à utilização de etiquetas RFID, os retalhistas podem otimizar muitas operações, como por exemplo, reduzir a perda de vendas, uma vez que se provou num estudo realizado em 2007, que 4% das perdas de vendas que ocorrem no mundo são provocadas por as prateleiras não terem o produto que o cliente queria comprar, acabando este por ir embora sem o obter [12].

Nas lojas, a utilização da IoT pode proporcionar uma melhor experiência aos clientes, dando-lhes informações e sugestões de produtos, bem como oferecer a possibilidade de efetuarem os pagamentos de forma rápida utilizando a verificação automática por biometria.

b) HealthCare

No contexto dos cuidados de saúde, podem existir variadíssimos dispositivos e aplicações que permitam monitorizar em tempo real a saúde de um ser humano. Recorrendo à utilização de sensores pode-se medir diferentes parâmetros médicos, como a temperatura, a pressão arterial, os batimentos cardíacos, a atividade respiratória, os diabetes, entre muitos outros parâmetros que são importantes monitorizar na saúde de qualquer pessoa.

No setor da saúde os dispositivos IoT podem ser utilizados por pessoas com determinadas doenças que precisam de controlar constantemente certos indicadores, permitindo, em simultâneo, que o médico responsável possa monitorizar o paciente à distância. Em situações de agravamento da doença, podem estar preparados para solicitar automaticamente pedidos de emergência permitindo uma mais rápida intervenção médica.

Contudo, os dispositivos IoT no setor dos cuidados de saúde, não se restringem às pessoas com doenças. Podem existir dispositivos que armazenem registos de saúde de qualquer pessoa ao longo da sua vida, quando estão a dormir, a trabalhar, a fazer desporto ou outras atividades, proporcionando que o utilizador tenha um melhor e mais alargado conhecimento do seu corpo e da sua saúde. Ainda, com base nos dados que estão armazenados, pode ser possível detetar registos anormais e, com isso gerar alertas e até pedir automaticamente ajuda médica, permitindo uma resposta rápida em casos de, por exemplo, um enfarte agudo do miocárdio, prevenindo doenças e salvando vidas.

c) Ambientes Inteligentes

Construir um ambiente inteligente é tornar agradável e confortável um espaço, seja, uma cidade, uma indústria, uma casa, um ginásio, ou qualquer outro cenário.

A IoT no contexto das *Smart Cities* refere-se a automatizar uma cidade inteira e gerir tudo através da *internet*. Desde o controlo de sinais de trânsito, até à monitorização dos níveis de poluição de uma cidade, vários serviços e aplicações podem ser implementados de forma a automatizar a estrutura e organização de uma cidade. Alguns exemplos são: a gestão de parques de estacionamento de veículos, a monitorização de vibrações sísmicas em edifícios, o controlo de níveis de poluição e de radiação e, a gestão de tráfego. Uma cidade inteligente com alguns dos seus principais serviços automatizados pode servir de espinha dorsal à sua economia.

No contexto das *Smart Homes*, recorrendo à utilização de sensores e atuadores distribuídos pode-se automatizar muitos aspetos do quotidiano, tornando a vida das pessoas mais confortável. Alguns exemplos são: o controlo da temperatura ambiente que pode ser ajustado automaticamente de acordo com a experiência adquirida, a intensidade da iluminação pode ser ajustada automaticamente de acordo com o horário do dia ou da luminosidade ambiente e até o consumo de energia podia ser reduzido, ligando e desligando automaticamente diferentes equipamentos de acordo com a sua utilização.

No setor industrial, um ambiente inteligente pode ser implementado, por exemplo, através da instalação de etiquetas RFID em diferentes partes da produção. Com um ambiente inteligente é possível monitorizar os diferentes setores, automatizar alguns processos/atividades e com essas medidas obter melhores tempos de produção, maiores taxas de produção e reduzir desperdícios.

Num ginásio, o *personal trainer* pode, para cada atleta, ter acesso ao seu perfil e fazer o *upload* para a máquina de treino, que automaticamente identifica o atleta e ajusta determinados parâmetros em função do seu plano. Em paralelo, durante a sessão de treinos, os parâmetros de saúde, poderão estar a ser monitorizados e registados, fornecendo ao *personal trainer* dados concretos que lhe permitam avaliar a *performance* real do atleta e o benefício que poderá extrair dessa prática.

d) Âmbito pessoal e social

No âmbito pessoal e social, a IoT pretende alterar a forma como as pessoas interagem entre si e com o mundo que as rodeia. Neste setor, a evolução da IoT faz-se sobretudo através da computação móvel dos *smartphones* e dispositivos *wearable* que tornam prática a utilização de serviços *online*, podendo ser utilizados em casa ou no exterior.

A tecnologia *wearable* é considerada como sendo uma das maiores áreas de aplicação da IoT. Focando-se no ser humano e nas suas atividades, os dispositivos *wearable* implementam formas criativas de melhorar a experiência diária das pessoas.

Uma das necessidades intrínsecas do ser humano é a de se auto quantificar e de obter dados sobre si que lhe permita contar uma história. A IoT começa a dar resposta a esta necessidade com o desenvolvimento de dispositivos como, por exemplo, através de pulseiras com sensores incorporados e *software* que permitem monitorizar padrões nas mais diversas atividades e apresentar uma análise dos resultados através de uma interface simples que permita a compreensão de qualquer utilizador.

Num estudo recente levado a cabo pela Gartner em que considerou dispositivos *wearable* como *smartwatches*, *head-mounted displays*, *body-worn cameras*, *bluetooth headsets*, *smart wristbands*, relógios de desporto e outros monitores de *fitness* é possível perceber o potencial de crescimento da IoT no contexto das atividades pessoais e sociais, perspetivando-se para 2021 a existência de, aproximadamente, 500 milhões de unidades vendidas, apenas do tipo de dispositivos considerados no estudo [13]. Os resultados é apresentada na Tabela 1.

Table 1: Forecast for Wearable Devices Worldwide 2016-2018 and 2021 (Millions of Units)

Device	2016	2017	2018	2021
Smartwatch	34.80	41.50	48.20	80.96
Head-mounted display	16.09	22.01	28.28	67.17
Body-worn camera	0.17	1.05	1.59	5.62
Bluetooth headset	128.50	150.00	168.00	206.00
Wristband	34.97	44.10	48.84	63.86
Sports watch	21.23	21.43	21.65	22.31
Other fitness monitor	55.46	55.7	56.23	58.73
Total	265.88	310.37	347.53	504.65

Source: Gartner (August 2017)

Tabela 1: Previsão de dispositivos *wearable* no mundo [13]

No contexto das atividades pessoais e sociais do ser humano, a IoT possui um conjunto alargado de desafios, podendo-se focar em dispositivos de monitorização de parâmetros, em dispositivos que promovem a segurança e o bem-estar das pessoas, em dispositivos que melhoram os momentos de lazer, entre muitas outras ideias que podem surgir e ser exploradas. O mote é desenvolver produtos com *design*, características e preços que permitam cativar utilizadores.

2.1.5. Protocolos de Comunicação

Para implementação da IoT em objetos é necessário recorrer a protocolos de rede para estabelecer a comunicação, sendo o meio *Wireless* a alternativa eficaz, de baixo custo e com a vantagem de não limitar o funcionamento ao comprimento do cabo.

Seguidamente, serão apresentadas algumas das tecnologias *standard* do meio *wireless* que podem ser usadas no contexto da IoT.

a) RFID

A tecnologia RFID caracteriza-se por utilizar etiquetas RFID para identificação e roteamento e podem ser incorporadas em produtos, objetos, pessoas e animais. Operam com frequências de rádio na largura de banda entre os 135 KHz e os 5.875 GHz, sendo a transmissão de dados feita através de leitores RFID bidirecionais que enviam um sinal para a etiqueta e, posteriormente, leem e processam a resposta. Este processo de comunicação é realizado em menos de 100ms, pelos leitores RFID convencionais.

As etiquetas RFID têm por base um circuito integrado capaz de armazenar e processar informação, bem como modular e desmodular sinais de RF. Além disso, possuem uma antena para transmitir e receber sinais. As etiquetas podem ser de 2 tipos: ativas, que são as etiquetas que possuem fonte de alimentação interna e transmitem o seu ID (identificador) periodicamente, e as passivas que, por outro lado, não possuem fonte de alimentação interna e utilizam a potência do sinal enviado pelo leitor para responder com o seu ID [14].

As vantagens que as etiquetas RFID têm para oferecer ao universo da IoT são: as suas dimensões reduzidas, a capacidade de armazenamento de dados e a rapidez e facilidade com que estas podem ser lidas.

A tecnologia, atualmente, já se encontra implementada em larga escala, sendo as indústrias dos transportes e da logística as áreas que mais cresceram e inovaram. Alguns exemplos de aplicação são: controlo de acesso; acompanhamento do percurso de encomendas;

cobrança de pedidos; pagamentos e, controlo de *stock* em lojas. Na Figura 6 é possível ver exemplos de etiquetas RFID.

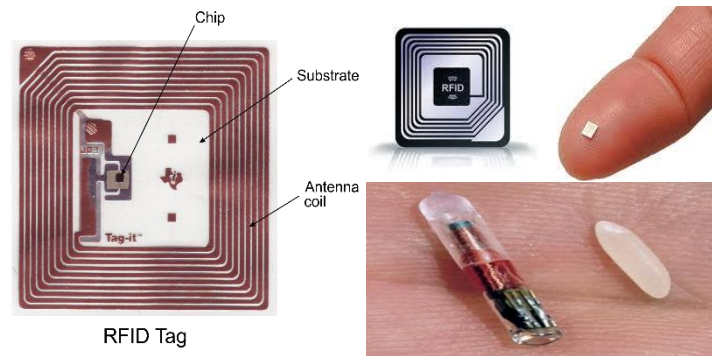


Figura 6: Alguns exemplos de etiquetas RFID [14]

b) IEEE 802.11

O protocolo IEEE 802.11, amplamente conhecido como Wi-Fi, é a tecnologia *wireless* mais conhecida globalmente para enviar/receber dados. Utilizando a largura de banda na gama entre 2.4GHz e 60GHz, possui um alcance de, aproximadamente, 50m e uma, taxa de transferência de dados máxima de 600Mbps, sendo que a taxa típica está entre os 150Mbps e 200Mbps, dependendo da frequência do canal utilizada e do número de antenas existentes.

A tecnologia Wi-Fi encontra-se atualmente disseminada em todo o mundo, sendo comum existirem redes Wi-Fi em locais públicos; escolas; faculdades e, hospitais, podendo ser utilizada livremente através de *smartphones*, *tablets*, *laptops*, *smartwatches*, entre outros *gadgets*.

Em termos de instalação, é bastante simples e de baixo custo, requerendo apenas um transmissor de sinal, que pode ser um *router* ou uma antena, para cobrir uma determinada área.

As vantagens da tecnologia no mundo da IoT é o alcance do sinal, o baixo custo das infraestruturas e dispositivos, a facilidade de desenvolver novos dispositivos e a cobertura mundial já existente.

c) ZigBee IEEE 802.15.4

A tecnologia *ZigBee* é uma especificação desenhada para um conjunto de protocolos de comunicação na norma IEEE 802.15.4, com ênfase em baixos consumos de potência, pequenas taxas de transmissão de dados e baixos custos de implementação. Opera nas bandas de frequência, não licenciadas, de 868MHz, 900MHz e 2.4GHz e apresentando uma capacidade de alcance entre os 10m e os 100m.

As redes *ZigBee* são comparáveis às redes Wi-Fi e *Bluetooth*, diferenciando-se por apresentarem um menor consumo e por, apesar de possuírem um reduzido alcance, conseguirem transmitir dados para longas distâncias através de dispositivos intermédios. Numa rede *ZigBee* todos os dispositivos funcionam como retransmissores de informação, formando uma rede *mesh*.

Atualmente, a tecnologia *ZigBee* apresenta um tremendo crescimento em indústrias como automação, domótica, cuidados de saúde, telecomunicações e lojas de retalho.

As principais vantagens da tecnologia *ZigBee* no mundo da IoT são: ser uma tecnologia mais barata do que, por exemplo, o Wi-Fi e o *Bluetooth* e apresentar um baixo consumo de energia.

d) *Bluetooth*

O *Bluetooth* é uma tecnologia *standard* no meio *wireless* para troca de dados a curtas distâncias. Utiliza a banda de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*) de 2.4GHz, possuindo uma taxa de transferência de dados de, aproximadamente, 1Mbps com alcance entre os 10m e os 50m na versão 4.0 da tecnologia BLE.

A tecnologia BLE, em comparação com o *Bluetooth* clássico, apresenta baixo consumo de energia e custos reduzidos. A tecnologia foi desenhada para aplicações que enviam pouca quantidade de informação e de forma esporádica, permanecendo no estado “*sleep*” (modo de baixa energia que permite economizar significativamente o consumo da bateria) na maior parte do tempo.

No universo IoT, a tecnologia BLE permite conectar diferentes tipos de aparelhos como, por exemplo, *wearables*, sensores e atuadores, permitindo que comuniquem entre si. A eficiência de energia, permite que seja uma ótima solução para dispositivos que são alimentados com baterias de tamanho reduzido e que precisam de prolongar a autonomia de utilização.

Atualmente, a tecnologia *Bluetooth BLE* é muito popular entre os utilizados de *smartphones*, estando presente em *smartwatches*, *headphones*, pulseiras e, até em sapatilhas.

A crescente ascensão da IoT deve-se em grande parte à utilização da tecnologia BLE, levando os investigadores a acreditar que o *Bluetooth* irá desempenhar um papel fundamental no crescimento da IoT nos próximos anos [14].

Na Figura 7, estão representados alguns dispositivos IoT que utilizam a tecnologia.



Figura 7: Alguns exemplos de dispositivos *wearable Bluetooth* [14]

2.1.6. Desafios

Aparentemente, as condições ideais para uma rápida ascensão da IoT encontram-se reunidas, mas alguns desafios ainda se impõem:

a) Gestão de Energia

A maioria dos dispositivos IoT são móveis e não possuem uma fonte de alimentação ilimitada, o que faz do consumo de energia um aspeto crítico na fase de concepção de um novo dispositivo.

A abordagem comum, atualmente, é utilizar uma rede de sensores e tecnologias de baixa potência, ficando a alimentação a cargo de baterias recarregáveis, tentando-se responder às exigências. Apesar de ser uma solução, está longe de ser uma situação ótima e existe a necessidade de criar uma alternativa que possa oferecer um tempo de vida útil longo aos dispositivos IoT.

Seguidamente, são apresentadas algumas soluções para economizar as baterias:

1. Colocar automaticamente o dispositivo no estado *idle* (estado no qual módulos do microcontrolador suspendem as suas atividades, permitindo desta forma um menor consumo de energia por parte desses componentes, ficando o oscilador interno em operação para permitir que atividades de tempo real sejam mantidas), quando não estiver a ser usado;

2. Colocar automaticamente o dispositivo no estado *halt* (este é um estado similar ao estado *idle*, somando a particularidade de, também o oscilador interno do microcontrolador suspender as suas atividades, permitindo que o consumo de energia reduza significativamente. O estado corrente é congelado e o microcontrolador pode ser forçado a sair desse modo a qualquer momento e reiniciar as suas atividades normalmente), se este se encontrar num local ou área onde o seu funcionamento não é útil ou necessário;

No caso de dispositivos *wearable*, uma alternativa passa por utilizar um dispositivo conectado ao corpo para obter energia através do calor corporal. A ideia passa por produzir energia elétrica, por exemplo, através da colocação de um sensor no peito do utilizador, como demonstrado na Figura 8. A criação de sensores capazes de executar esta tarefa possibilitará, no futuro, a criação de dispositivos com uma autonomia ilimitada [15].

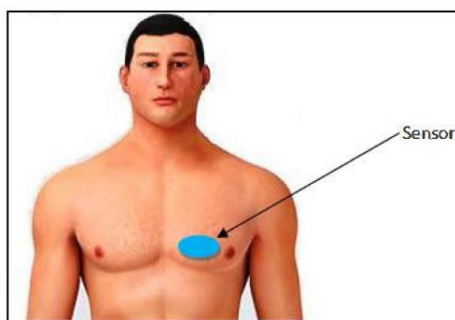


Figura 8: Possível sensor de movimento gerador de energia elétrica [15]

b) Segurança e privacidade

A segurança é um aspeto essencial quando se fala de IoT e tem uma ampla gama de cobertura, indo desde a segurança elétrica dos dispositivos e da rede até à segurança dos consumidores e dos seus dados.

No que diz respeito à segurança elétrica dos dispositivos, as empresas que se dedicam ao desenvolvimento de dispositivos IoT devem seguir as melhores práticas e implementar

segurança desde a fase de especificação do projeto, tornando os dispositivos seguros desde o início.

Do ponto de vista do consumidor, a falta de segurança dos dispositivos pode acarretar múltiplos riscos, como por exemplo, permitir o acesso não autorizado de terceiros ao dispositivo, permitir o uso indevido de informações pessoais do cliente e facilitar ataques a outros sistemas. Para colmatar défices de segurança, urge a necessidade de se desenvolver e implementar algoritmos de criptografia e protocolos que sejam impenetráveis e amplamente adotáveis.

A quantidade crescente de dispositivos que surge e dos dados por estes gerados aumentarão significativamente a complexidade da segurança.

c) Capacidade de armazenar e processar dados

Tendo em vista o crescimento que a IoT irá ter num futuro próximo, a capacidade de armazenar e processar grandes quantidades de dados é um aspeto crítico, e é neste contexto que a IoT se relaciona com o *Big Data*.

O conceito de *Big Data* pode-se definir por 4 V's, que são: volume, velocidade, variedade e veracidade [11].

O volume representa a quantidade de dados, que podem ser armazenados em 3 tipos de centros de dados. Os grandes centros de dados, também designados por “*motherships*”, que atuam como grandes repositórios de dados. Os centros de dados distribuídos que são grandes centros regionais e que são utilizados para fazer a ponte entre os grandes centros de dados e os utilizadores. E por fim, existem os microcentros de dados localizados perto de grandes centros populacionais e que possibilitam a receção e transmissão de dados instantaneamente [15].

A velocidade relaciona-se com a necessidade de uma rápida transmissão e processamento dos dados em tempo real.

A variedade significa dados heterógenos, como dados de diferentes fontes de dados ou diferentes modelos de dados.

E, por fim, a veracidade está relacionada com a incerteza dos dados devido a, possivelmente, estes estarem incompletos, serem ambíguos ou, inconsistentes.

Dos 4 pilares apresentados, a velocidade de transmissão e de processamento é o que apresenta o maior desafio para a tecnologia IoT. Tendo em contra a veracidade e variedade dos dados, a velocidade de processamento e de transmissão de informação tem o desafio de permitir que em tempo útil os dados sejam analisados e sejam tomadas as decisões apropriadas.

2.1.7. Resumo

O conceito *Internet of Things* foi pronunciado pela primeira vez em 1999 e desde essa altura tem permitido alterar a forma como as pessoas se relacionam e interagem com os objetos.

Através da IoT, as empresas e indústrias podem explorar todo o potencial dos objetos e da sua interligação em rede, desenvolvendo aplicações, produtos e serviços inovadores que proporcionam transformações e melhorias em diferentes áreas, tais como, a automação de casas e edifícios, cidades inteligentes, cuidados de saúde, automação automóvel e a vida pessoal e social do ser humano.

A arquitetura da IoT é representada através de 4 camadas: detecção de dados através de sensores, troca de dados, integração da informação e a aplicação que é a *interface* de contacto com o utilizador. Para troca de dados, existem os protocolos de comunicação.

Os protocolos de comunicação utilizados na maioria dos dispositivos IoT são *wireless*, dos quais se destacam, o RFID, o Wi-Fi, o *ZigBee* e o *Bluetooth*.

Em suma, a IoT tem potencial para responder de maneira intrínseca a vários desafios da tecnologia, sociedade, economia e política, necessitando, primeiramente, de ultrapassar alguns desafios como a gestão da energia elétrica dos dispositivos, a segurança e privacidade dos dados e dos seus utilizadores e a capacidade de armazenar e processar os dados.

2.2. Bluetooth

O *Bluetooth* é uma tecnologia que começou a ser pensada no ano de 1994 pela marca *Ericsson*. O plano da *Ericsson* era desenvolver uma solução que permitisse estabelecer comunicações entre dispositivos sem utilizar cabos. Em 1998, a empresa estabeleceu uma parceria com 4 empresas, a IBM, a Toshiba, a Nokia e a Intel e, juntas, formaram o consórcio *Bluetooth SIG (Special Interest Group)*.

Ao longo desse ano, foram muitas as empresas de tecnologia que se juntaram ao consórcio, possibilitando que fossem desenvolvidos padrões para unificar o uso da tecnologia nos mais variados dispositivos. No final do ano, o consórcio contava já com 400 membros [16].

A diversidade de empresas do ramo da tecnologia pertencentes ao consórcio, levou a que fosse adotado, para a tecnologia, o nome *Bluetooth* em homenagem ao rei *Harald Blåtand*. O rei *Blåtand*, que tinha a alcunha de *Bluetooth*, ficou conhecido por, durante a sua monarquia ter unificado os territórios da Dinamarca, Noruega e Suécia. Neste sentido, os responsáveis do consórcio *Bluetooth SIG* acreditavam que, da mesma forma que o rei *Blåtand* teve a capacidade de unir tribos em guerra, a tecnologia *Bluetooth* seria capaz de unir dispositivos sem fios, tais como, telemóveis, computadores e, *headphones*. O logotipo da tecnologia, apresentado na Figura 9, resulta da junção das letras “H” e “B”, iniciais do nome do rei homenageado, escritas em runas nórdicas (letras características, usadas para escrever nas línguas germânicas da Europa do Norte até ao século XI) [17].

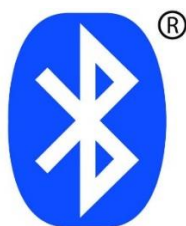


Figura 9: Logotipo da tecnologia *Bluetooth* [16]

Em 1999, a primeira versão do *Bluetooth*, a versão 1.0, é lançada e a tecnologia é distinguida com o prémio “*Best of Show Technology Award*” na COMDEX [16].

Em 2004, o consórcio *Bluetooth SIG* apresenta a versão 2.0 com a especificação EDR, que permitiu aumentar a velocidade de transmissão de dados até 3Mb/s, 3 vezes mais rápida que a versão anterior, para além de diminuir o consumo de energia e otimizar a conexão. Nesse ano, a tecnologia já estava instalada em 250 milhões de dispositivos.

No ano de 2007, o *Bluetooth SIG* adquire o grupo *Wibree Alliance*, através de uma iniciativa liderada pela *Nokia*, grupo que incluía a *Nordic Semiconductor*. Após a fusão, a *Nordic Semiconductor* juntamente com outras empresas, que trouxeram para o SIG a sua experiência em conectividade sem fios ULP, propuseram-se a desenvolver uma forma de conectividade sem fios de baixo consumo de energia, que foi designada por BLE [17].

No ano em que a tecnologia celebrou os 10 anos, ou seja, em 2008, existiam cerca de 2 mil milhões de dispositivos, em todo o mundo, habilitados com *Bluetooth* e foi lançada a versão 3.0 que incluía atualizações de *software* automáticas e permitia atingir velocidades de transferências de dados de 24Mb/s.

Em 2010, a versão 4.0 é formalmente apresentada com a tecnologia BLE. A tecnologia BLE veio permitir que dispositivos mais compactos, como relógios e *headphones*, que trocam pouca quantidade de dados e de forma esporádica, consumam pouca energia quando não estão a comunicar. Desta forma, a tecnologia BLE veio permitir que dispositivos possam ter autonomia durante anos, alimentados com baterias do tipo *coin cell*. Em 2013 e 2014, com o lançamento da versão 4.1 e 4.2, respetivamente, o SIG procurou abrir caminho para a utilização da tecnologia no universo IoT, nomeadamente, com a adição de recursos para conectividade IP.

Em 2016, é apresentada a versão mais recente do *Bluetooth*, o *Bluetooth 5.0*. Apresentado como possuindo 2 vezes mais velocidade, 8 vezes mais capacidade de transmissão de dados e um alcance 4 vezes superior, o *Bluetooth 5.0* atinge 2Mbps de velocidade de transferência de dados, 255 bytes de capacidade de transmissão e um alcance de 200m, em ambientes onde existe linha de visão entre os dispositivos, e 40m em ambientes onde essa linha de visão é inexistente [18]. Na Tabela 2 é apresentada a comparação entre as especificações do *Bluetooth 5.0* e o *Bluetooth 4.2*.

Especificações e Características	Bluetooth 5.0	Bluetooth 4.2
Velocidade	2 Mbps	1 Mbps
Alcance	200m em linha de vista em ambientes ao ar livre; 40m em ambientes interiores;	50m em ambientes ao ar livre; 10m em ambientes interiores;
Potência Consumida	Baixa	Alta
Capacidade de Mensagens	Cerca de 255 bytes	Cerca de 31 bytes
Robustez para operar em ambientes congestionados	Maior	Menor
Vida da Bateria	Longa	Pequena
Controlo de Segurança	Melhor, comparativamente ao Bluetooth 4.2	Menor, comparativamente ao Bluetooth 5.0
Confiabilidade	Alta	Baixa
Suporte para dispositivos IoT	Sim	Não

Tabela 2: Comparação entre as especificações do Bluetooth 5.0 vs Bluetooth 4.2 [18]

O desenvolvimento do *Bluetooth 5.0* tem como foco promover uma melhor experiência da IoT, permitindo interações simples e rápidas entre uma vasta gama de dispositivos conectados, como fica patente nas declarações de *Mark Powell*, diretor executivo da *Bluetooth SIG*: “*Bluetooth is revolutionizing how people experience the IoT. Bluetooth 5 continues to drive this revolution by delivering reliable IoT connections and mobilizing the adoption of beacons, which in turn will decrease connection barriers and enable a seamless IoT experience.*” [19].

O maior alcance, permitido pela tecnologia, possibilita a cobertura total de casas e edifícios para conexões mais robustas e seguras. A maior velocidade permite a existência de dispositivos mais eficientes e de maior desempenho. O aumento da capacidade de transmissão de dados permite trocar mais quantidade de dados, possibilitando melhores e mais relevantes soluções nos diferentes contextos. Para além disso, o *Bluetooth* 5 inclui também atualizações que ajudam a reduzir as possíveis interferências com outras tecnologias sem fios, para garantir que os dispositivos *Bluetooth* possam coexistir dentro do ambiente IoT global, cada vez mais complexo.

Em suma, a introdução do *Bluetooth* 5 permitirá criar novas oportunidades em várias áreas do universo IoT, como por exemplo, no contexto das *smart home*, no contexto das aplicações industriais e no contexto das aplicações comerciais, mantendo baixos consumos de energia, como fica patente, num estudo da *ABI Reseach* que prevê, em 2021, a existência de 48 mil milhões de dispositivos conectados à internet, dos quais quase um terço incluirão a tecnologia *Bluetooth* [19].

2.3. Sistemas de iluminação inteligentes - Análise de mercado

O dispositivo que se pretende desenvolver com a realização desta dissertação, visa permitir controlar um sistema de iluminação remotamente através de um *app*, com o intuito de dar resposta a vários desafios nas áreas da segurança, lazer, moda e desporto, através da iluminação. Nesse sentido, procurou-se adquirir uma visão geral das características de outros produtos, com propostas de valor semelhantes aquela que pretendemos obter, realizando-se um estudo de mercado. Alguns dos produtos não atendem aos critérios de dispositivos IoT, mas são mencionados devido às suas características.

Os produtos encontrados cobrem áreas de aplicações distintas, como a segurança de pessoas que usam frequentemente as estradas e estão expostas a diversas vulnerabilidades e perigos, e produtos que implementam tecnologias *wearable* na área da moda.

Na área da segurança os produtos mencionados são: [2.3.1](#) “Tracer 360”; [2.3.2](#) “Lumos Helmet” e, [2.3.3](#) “Cosmo Connected”.

Na área da moda, os produtos encontrados que permitem introduzir aspetos tecnológicos são: [2.3.4](#) “Van Der Waals”; [2.3.5](#) “Volvorri Shoes” e, [2.3.6](#) “Shiftwear”.

Por fim, o subcapítulo [2.3.7](#) “Resumo” apresenta uma síntese das principais conclusões retiradas do estudo de mercado realizado.

2.3.1 Tracer 360 [20]

Um dos produtos já existentes no mercado é o *Tracer 360*. O *Tracer 360* é um dispositivo *wearable*, que embora não cumpra os requisitos de um dispositivo IoT, porque não gera informação e não a comunica, foi desenvolvido especialmente para *runners* que gostam de correr à noite e que correm riscos de segurança, devido à dificuldade de serem visíveis para os automobilistas.

O dispositivo é equipado com material de qualidade, sendo uma proposta perfeita e leve para substituir o colete de segurança que é volumoso e desconfortável. O dispositivo é composto por 2 LEDs de 40 lumens e canaliza a luz para o corpo do utilizador através de fibra

ótica flexível, tornando o utilizador visível a mais de 2km de distância em qualquer das direções.

O dispositivo é *multicolor* e possui o modo de iluminação intermitente e de cor sólida, mantendo sempre o brilho máximo. A alimentação do dispositivo é proporcionada por uma bateria incorporada com uma vida útil de, aproximadamente, 40 horas no brilho máximo e com notificações do estado da bateria.

O produto é leve e flexível, permitindo que seja facilmente ajustável a uma camisola ou um casaco e, é ainda, resistente à água e ao suor, tornando-o num dispositivo utilizável em qualquer clima ou estação do ano.



Figura 10: Produto Tracer 360 [20]

2.3.2 Lumos Helmet [21]

O produto *Lumos Helmet* é um capacete desenvolvido para pensar na segurança dos ciclistas. Com o lema “Be Seen. Be Safe.”, a marca vê no capacete o ponto chave na segurança dos ciclistas e desenvolveu um capacete que aposta em tornar o ciclista visível em todos os momentos, seja de dia ou de noite.

O capacete está equipado com 48 LEDs brilhantes, estando 10, de cor branca, integrados na parte da frente e os restantes 38, de cor vermelha e laranja, integrados na parte de trás para garantir que o sentido do ciclista é corretamente compreendido pelos demais utilizadores da via rodoviária. A forma triangular das luzes traseiras permite, ainda, uma melhor perceção da distância.

O capacete é acompanhado por um conjunto de botões, que pode ser colocado no guiador da bicicleta e que permitem controlar o capacete remotamente. Uma das funcionalidades do controlo remoto é sinalizar de forma clara as mudanças de direção do ciclista. Outras das funcionalidades do controlo remoto, uma vez que este é equipado internamente com um acelerómetro, é detetar quando o ciclista reduz a velocidade e, consequentemente, acionar todas as luzes na parte de trás do capacete com uma cor vermelha sólida.

O capacete e os botões do controlo remoto são alimentados através de baterias recarregáveis. O tempo necessário para recarregar cada uma das baterias é de, aproximadamente, 2 horas e o tempo de operação é de 3 horas, quando opera no modo de iluminação sólido, e de 6 horas no modo *flash*.

O produto vem também munido com uma aplicação chamada *Lumos Helmet App* que permite ao utilizador tirar o máximo partido do capacete, podendo monitorizar a utilização da bateria, ajustar as configurações e atualizar o *firmware*.

O *Lumos Helmet* é uma proposta que contribui para a IoT, no contexto das *Smart Cities*, no sentido em que tira partido de sensores para interagir com os demais utilizadores da via pública e rodoviária. Mas, como as capacidades da *app* restringem-se à gestão da utilização e não permitem criar informação, que possa ser transformada em conhecimento, o produto não é considerado um dispositivo IoT.

O produto possui o certificado internacional de segurança, e é um dispositivo à prova de água, destacável, recarregável, intuitivo e conveniente.



Figura 11: Produto Lumos Helmet [21]

2.3.3 Cosmo Connected [22]

O produto *Cosmo Connected* é um dispositivo de iluminação de travagem que pode ser conectado e removido em capacetes. Desenvolvido a pensar na segurança dos motociclistas, o *Cosmo Connected* é ultraleve, pesando menos de 150 gramas, e é adaptável à maior parte dos capacetes existentes no mercado.

A incorporação deste dispositivo no capacete, possibilita que o motociclista tenha na retaguarda do seu capacete uma luz colocada ao nível dos olhos dos condutores que o precedem. A utilização desta luz torna o motociclista visível independentemente das condições atmosféricas.

O produto possui 4 funcionalidades: a luz de desaceleração que permite sinalizar os restantes utilizadores da via rodoviária que se está a abrandar, a luz de emergência que permite avisar / sinalizar uma situação de emergência, a luz de posição que possui uma luminosidade constante e intensifica em fases de desaceleração e a função de deteção de quedas. A alimentação é realizada através de uma bateria que possui uma autonomia de, aproximadamente, 8 horas.

O que torna este produto um dispositivo IoT, é a existência de uma aplicação que está conectada com o dispositivo e que permite gerar alertas em caso de acidente e até, recorrendo ao GPS (Sistema de Posicionamento Global), solicitar emergência médica indicando a respetiva localização geográfica, proporcionando uma utilização segura da via rodoviária e preservando a segurança do utilizador.



Figura 12: Produto *Cosmo Connected* [22]

Recentemente, na CES 2018, a maior feira de tecnologia do mundo, a marca *Cosmo* apresentou o seu mais recente produto o *Cosmo Bike* [23], na linhagem do *Cosmo Connected* mas desta vez destinado a ciclistas. O *Cosmo Bike* adiciona a funcionalidade de permitir que o utilizador insira o trajeto que pretende fazer na aplicação, sendo o dispositivo apto para ao longo do trajeto, através do GPS, sinalizar autonomamente as mudanças de direção do utilizador. Permite, ainda, pelo facto de estar equipado com um acelerómetro e um giroscópio, em caso de queda enviar automaticamente uma mensagem para 3 contactos que tenham sido registados previamente na aplicação.



Figura 13: Produto *Cosmo Bike* [23]

2.3.4 *Van Der Waals* [24]

O produto *Van Der Waals* é uma bolsa para senhoras desenhada a pensar no desejo humano de autoexpressão e representa uma aplicação do conceito IoT na área da moda.

A bolsa é acompanhada por uma aplicação *mobile* de configuração que permite que o utilizador possa, em qualquer lugar, modificar a cor da bolsa de acordo com o padrão da sua roupa, estado de espírito ou gosto pessoal.

O utilizador quando pretender configurar /modificar a cor da bolsa, apenas tem de abrir a aplicação, seleccionar a cor ou padrão que pretende utilizar e emparelhar a bolsa com a aplicação. A comunicação entre a bolsa e a *app* é conseguida através do protocolo de comunicação *Bluetooth*.

A aplicação permite ainda a possibilidade de serem feitas configurações, como por exemplo, atribuir cores específicas a determinados contactos, para que, ao receber uma chamada desse contacto o utilizador possa facilmente identificar a pessoa através da cor da

bolsa. Outras das configurações é personalizar a intensidade da luz de acordo, por exemplo, com as batidas de uma música.

A bolsa é suportada por uma bateria que é recarregável via *wireless*, tendo ainda a capacidade de, em utilização, carregar até duas vezes a bateria de um *smartphone* convencional.

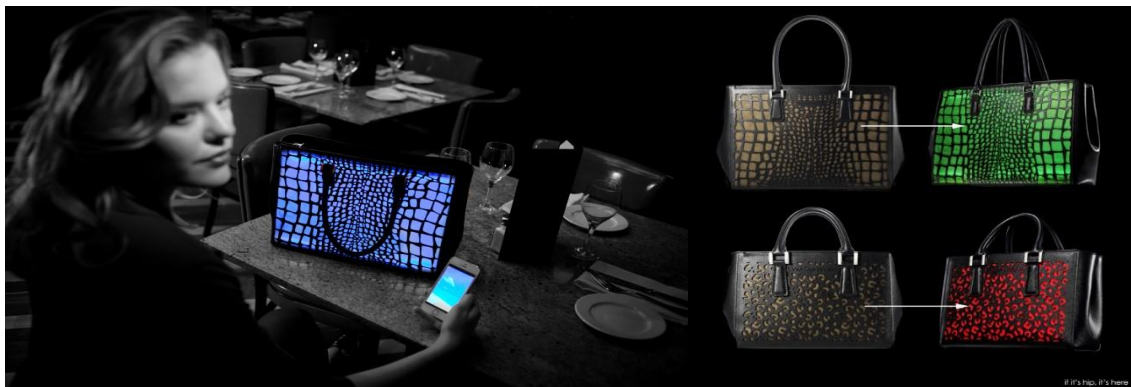


Figura 14: Produto Van Der Waals [24]

2.3.5 Volvorri Shoes [25]

O produto *Volvorri* consiste num par de sapatos de salto alto inteligentes que pretende revolucionar o mundo da moda através da tecnologia.

O par de sapatos está equipado com uma tela de papel eletrónico flexível e um módulo BLE que comunica com uma aplicação instalada no *smartphone* do utilizador. O dispositivo é alimentado através de uma bateria que é recarregável com o modo de carregamento *wireless*.

A aplicação permite que o utilizador possa de forma simples alterar as cores e os padrões de *design* dos seus sapatos, possibilitando que estes fiquem a combinar com a roupa ou outros acessórios. Os padrões de *design* podem ser obtidos através da plataforma *online* da marca ou desenvolvidos pelo próprio utilizador.

O produto alia conforto, estilo, elegância, formalidade e versatilidade, possuindo o *Dragon Innovation Certified* [25]. O *Dragon Innovation Certified* permite certificar um conjunto de fatores antes de se avançar para a fase de fabricação de um produto, tais como, otimizar os custos de fabricação, garantir a qualidade dos materiais, verificar a funcionalidade e a *performance* do *design* e estimar tempos de produção. O certificado permite inspirar confiança nos patrocinadores e investidores e credibiliza o produto. O produto é apresentado na Figura 15.



Figura 15: Produto Volvorri Shoes [25]

2.3.6 Shiftwear [26]

O *Shiftwear* é um produto desenhado em Nova Iorque, que se encontra ainda numa fase de pré-venda. O produto consiste num par de sapatilhas inteligentes cujo *design* é personalizado através de uma aplicação instalada no *smartphone* do utilizador. O *design* das sapatilhas pode ser alterado instantaneamente, com cores personalizadas que tornam único cada par.

A aplicação possui 6 *designs* padrão para escolha, mas o produto é aberto à imaginação do utilizador, tendo este a possibilidade de criar os seus próprios *designs*. O utilizador pode criar *designs* a partir de vídeos ou imagens do seu *smartphone*, pode criar *playlists* com vários *designs* que vão alterando periodicamente de acordo com um temporizador que, também, é definido pelo utilizador e ainda, aceder ao modo de descoberta que permite baixar, comprar, vender e partilhar *designs* com outros utilizadores.

A conectividade com o produto é conseguida através de dois protocolos de comunicação, *Wi-Fi* e *Bluetooth* e a bateria do dispositivo utiliza o modo de carregamento *wireless*. O produto permite ainda, que a bateria possa ser carregada por intermédio da energia gerada pelos movimentos do utilizador.

O *Shiftwear* é um dispositivo com solas resistentes, à prova de água e pouco propício a manchas e nódoas. O ecrã de exibição dos *designs* é Full HD e é também, equipado com acelerómetro e giroscópio possibilitando que os *designs* sejam alterados através de passos, inclinações, saltos e outro tipo de movimentos. O produto é mostrado na Figura 16.

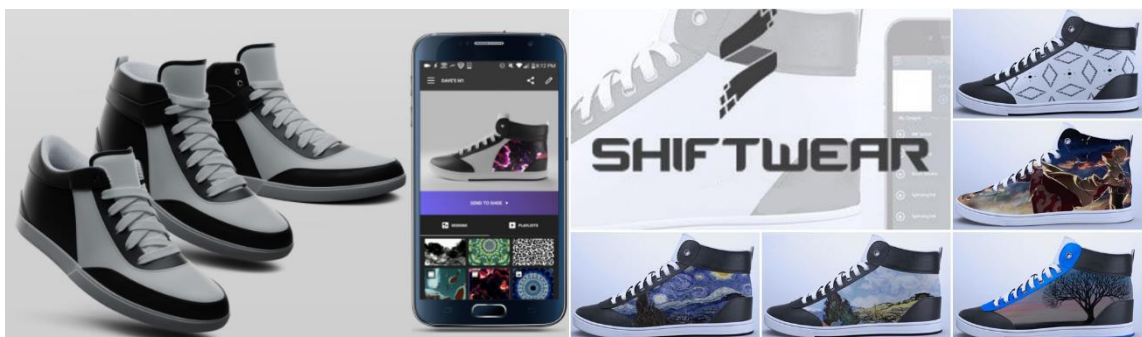


Figura 16: Produto Shiftwear [26]

2.3.7 Resumo

No âmbito da segurança, existe um lote de produtos baseados em iluminação que visam reforçar a proteção dos utilizados mais vulneráveis da via rodoviária, ou seja, dos *runners*, ciclistas e motociclistas, mas poucos são dispositivos IoT. Existem dispositivos em que a única funcionalidade é aumentar a visibilidade do utilizado através da iluminação, sendo uma alternativa aos tradicionais coletes refletivos, como é o caso do produto *Tracer 360*. Existem produtos como, o *Lumos Helmet*, que já oferece mais funcionalidades do que reforçar a iluminação, possuindo um controlador remoto que pode ser instalado no guidão da bicicleta e uma *app* que apenas permite gerir a autonomia da bateria e ajustar funcionalidades do capacete. O produto que se destaca nesta área é o *Cosmo Connected* e o mais recente *Cosmo Bike*, que são dispositivos pequenos e leves facilmente adaptáveis à maior parte dos capacetes existentes no mercado, sendo o *Cosmo Connected* para capacetes de motociclistas e o *Cosmo Bike* para capacetes de bicicleta, e que permitem através de uma aplicação sinalizar movimentos do utilizador e gerar alertas em caso de acidente, podendo até solicitar emergência médica e notificar os familiares.

Na área da moda, a implementação da IoT encontra-se numa fase primária, existindo produtos que ainda estão em fase de protótipo, existindo produtos em fase de pré-venda, e os produtos que já estão a ser comercializados são vendidos, maioritariamente, através de *websites*. As funcionalidades que estes produtos têm para oferecer aos utilizados, é permitir que através de uma *app* se possa alterar a cor de acessórios de vestuário, dando-lhes uma nova roupagem, como é o caso do produto *Van Der Waals* que é uma mala à qual o utilizador pode personalizar a cor, tendo a limitação de não permitir que sejam atribuídos padrões. Outros produtos existentes são o *Volvorri Shoes*, que são sapatos de salto alto inteligentes, e o produto *Shiftwear*, que são sapatilhas inteligentes, com um conceito similar. Ambos os produtos permitem, através da aplicação não apenas atribuir uma cor, mas também atribuir *designs*. No caso do produto *Shiftwear*, que ainda se encontra em fase de pré-venda, incorpora sensores que permitem, por exemplo, carregar a bateria através da energia gerada pelos movimentos do utilizador.

Capítulo 3

Especificação do Circuito Eletrónico

O presente capítulo pretende apresentar a especificação e projeto do circuito eletrónico, expondo a análise de requisitos e a procura de componentes que foi realizada. Esta etapa do projeto agrega o cumprimento de dois dos objetivos determinantes para o sucesso deste projeto, que são a redução dos custos e a diminuição das dimensões do protótipo face ao protótipo existente, sendo que este tem um custo de, aproximadamente, 42,78€ e tem de dimensões 5cm x 4cm x 1cm.

Neste capítulo será apresentada na secção [3.1](#). Análise de Requisitos / Procura de Componentes a pesquisa realizada e os principais componentes que foram selecionados para definir o sistema a desenvolver. Na secção [3.2](#). Esquema do Circuito é especificado o esquema do circuito desenvolvido e os restantes componentes que definem o sistema. Na secção [3.3](#). Princípio de Funcionamento do Circuito é descrito o funcionamento pormenorizado do circuito. Na secção [3.4](#). Lista de Componentes e Conclusões é apresentada a lista dos componentes do sistema e as principais conclusões retiradas deste capítulo.

3.1. Análise de Requisitos / Procura de Componentes

O projeto proposto pretende dar continuação ao trabalho já iniciado por parte da instituição proponente e nesse sentido, existe um conjunto de requisitos definidos que foram importantes para orientar a tarefa de procura de componentes. Seguidamente serão enumerados esses requisitos:

- A utilização de LEDs endereçáveis individualmente, com vista a enriquecer a possibilidade de efeitos luminosos derivados da sua utilização.
- A procura de um dispositivo único capaz de combinar as funções do circuito de comunicação *Bluetooth* e do microcontrolador com o objetivo de reduzir dimensões.
- A análise da relação custo-benefício das diversas opções tecnológicas de baterias disponíveis, visto que a autonomia e a flexibilidade da bateria são aspetos críticos do projeto.
- Especificação do *driver* de alimentação, necessário para fornecer a alimentação ao circuito e carregar a bateria.

Partido destes requisitos, realizou-se a tarefa de procura de componentes. Para realizar essa tarefa, utilizou-se uma metodologia baseada na procura em distribuidores/revendedores de componentes eletrónicos e na análise das respetivas fichas técnicas dos componentes.

Na subsecção [3.1.1](#) LEDs Endereçáveis são apresentadas as várias soluções de LEDs endereçáveis que foram analisadas. Na subsecção [3.1.2](#) Microcontroladores são apresentados os módulos *Bluetooth*. Na subsecção [3.1.3](#) Baterias são apresentados os tipos de baterias mais utilizados em dispositivos portáteis e a sua relação custo-benefício. Na subsecção [3.1.4](#) Regulador de Tensão são especificadas as características, impostas pelos restantes componentes do sistema, que definem o regulador de tensão usado. A subsecção [3.1.5](#) Gestão da carga da bateria especifica o dispositivo usado para a gestão da carga da bateria.

3.1.1 LEDs Endereçáveis

Os LEDs que se pretende utilizar devem ser endereçáveis individualmente, e nesse campo a empresa *Adafruit Industries* apresenta um conjunto de soluções com os seus produtos da marca *Neopixel*, que possui os modelos: WS2812, WS2813 e WS2812B. A marca *Neopixel* caracteriza-se por apresentar uma solução de LED RGB facilmente acessível, de tamanho reduzido e com uma excelente reprodução de cor. O LED pode ser utilizado individualmente ou inserido numa cascata de LEDs. A sigla RGB é uma abreviatura para descrever um espaço de cores, onde a cor vermelha (*Red*), a cor verde (*Green*) e a cor azul (*Blue*) são combinadas de modo a reproduzir amplamente o espectro cromático visível pelo sistema de visão humano.

WS2812 [\[27\]](#)

O modelo WS2812 é uma fonte de luz LED de controlo inteligente que tem integrado num *package* de dimensões de 5 mm x 5 mm, um circuito de controlo, um *chip* RGB, uma porta digital inteligente para transferência de dados e um circuito de recomposição de sinal, responsável por assegurar que a distorção da forma de onda não se acumula.

O WS2812 possui 6 pinos, o pino D0 para controlo do sinal de saída de dados, o pino DI para o controlo do sinal de entrada de dados, o pino VCC para alimentação do circuito de controlo, o pino VDD para alimentação do LED, o pino VSS que corresponde à massa (0 V) e possui um pino NC que não é utilizado (ver Figura 17).

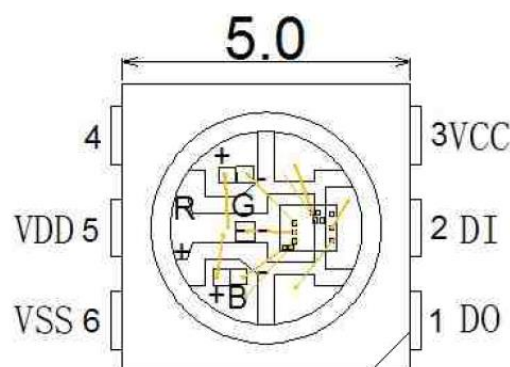


Figura 17: Pinout do módulo LED WS2812 [\[27\]](#)

Estes módulos podem ser utilizados individualmente ou no método cascata (ver Figura 18). No método cascata, a transferência de dados é feita com um único fio. O protocolo de transferência de dados utiliza o modo de comunicação *single* NZR, que consiste em, após existir um *power-on reset*, a porta DIN recebe dados do controlador, sendo que o primeiro LED recolhe os primeiros 24 bits de dados, enviando de seguida, o resto da trama para o LED seguinte através da porta D0. A cada LED da cascata, a trama é reduzida em 24 bits, tendo o LED de utilizar a tecnologia de transmissão de recomposição automática para permitir que o número de elementos na cascata fique apenas limitada à velocidade de transmissão do sinal e não ao número de bits total da trama. A velocidade de transferência de dados é de 800Kbps.

Cascade method:

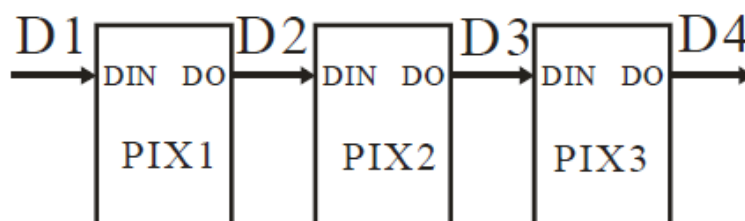


Figura 18: Método cascata dos LED endereçáveis [27]

Cada LED consome, aproximadamente, 50mA quando alimentado a 5V, com todas as cores no brilho máximo. Cada *pixel* de cada uma das 3 cores primárias do LED, pode alcançar 256 níveis de brilho, o que perfaz, aproximadamente, 16.8 milhões de cores possíveis por LED, com frequência de exibição superior a 400Hz. Na Tabela 3 são apresentados os indicadores de comprimento de onda, de intensidade luminosa, corrente e tensão que caracterizam o módulo WS2812.

Cor Emitida	Comprimento de onda (nm)	Intensidade Luminosa (mcd)	Corrente (mA)	Tensão (V)
Vermelho	620 - 630	550 - 700	20	1.8 - 2.2
Verde	515 - 530	1100 - 1400	20	3.0 - 3.2
Azul	465 - 475	200 - 400	20	3.2 - 3.4

Tabela 3: Caracterização dos parâmetros de iluminação do modelo LED WS2812 [27]

As vantagens que este módulo apresenta, são [27]:

- Simplicidade;
- Dimensões reduzidas;
- Fácil instalação;
- Elevado brilho;
- Economia de energia;
- Baixa tensão de condução;
- Boa consistência luminosa;

WS2813 [28]

O módulo WS2813 é uma versão mais recente do módulo WS2812. As dimensões do módulo continuam a ser de 5mm x 5mm e possui também 6 pinos, mas que apresentam mais funcionalidades. O pino D0 é utilizado para controlo do sinal de saída de dados, o pino DIN para

o controlo do sinal de entrada de dados, o pino VCC para alimentação do circuito de controlo, o pino VDD para alimentação do LED, o pino GND que corresponde à massa e um pino BIN, que é onde assenta a principal diferença. O pino BIN é utilizado para gerar um sinal de *backup* de controlo dos dados de entrada. Na Figura 19, é apresentado o *pinout* do módulo.

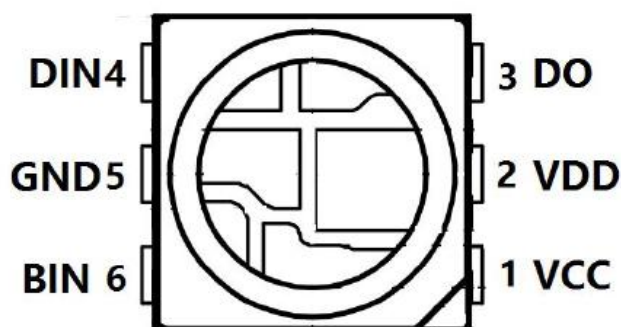


Figura 19: Pinout do módulo LED WS2813 [28]

A funcionalidade do pino BIN é receber o sinal de dados e, em seguida comparar esses dados com os do sinal do pino DIN, por forma a perceber se o pino DIN recebeu corretamente a trama, se utilizou os 24 bits correspondentes e se os retirou da trama. Na eventualidade do pino DIN não estar a receber os dados, o pino BIN irá detetar esse problema e alterar a configuração, passando a ser o responsável por receber e encaminhar a trama de dados. Esta nova forma de operar garante que qualquer dano que ocorra no circuito não irá afetar a transmissão em cascata do sinal.

Neste sentido, a diferença entre o módulo WS2812 e o WS2813 é que, enquanto o WS2812 tem apenas um sinal de dados, apresentando o problema de quando um LED deixa de funcionar a falha afeta todos os LEDs consequentes, o WS2813 possui dois sinais de dados permitindo que a falha não afete a transferência do sinal, a menos que existam falhas em 2 LEDs adjacentes consecutivos. A contrapartida, é o WS2813 utilizar o dobro da cablagem do WS2812. A Figura 20 permite ter uma perspetiva da diferença entre uma avaria num LED do módulo WS2812 e num LED do módulo WS2813.

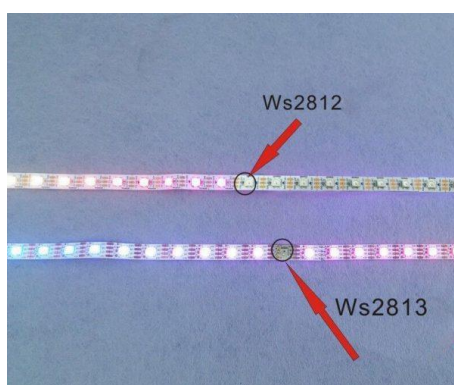


Figura 20: Diferença entre uma avaria num LED do módulo WS2812 e uma avaria num LED do módulo WS2813 [29]

WS2812B [30]

O módulo WS2812B apresenta um modo de operação semelhante ao módulo WS2812. O WS2812B tem dimensões 5 mm x 5 mm, mas ao contrário do WS2812, possui apenas 4 pinos. O pino VSS que corresponde ao sinal de massa (0V), o pino DIN que permite o controlo do sinal de entrada de dados, o pino VDD que fornece o sinal de alimentação do módulo e o pino DOUT que é utilizado para controlo do sinal de saída de dados. O *pinout* é apresentado na Figura 21.

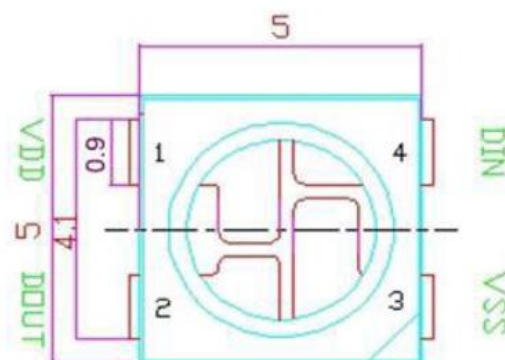


Figura 21: Pinout do módulo WS2812B [30]

Em termos de alimentação, a ficha técnica do módulo WS2812B [30] indica que deve ser aplicado um valor de tensão entre os +3.5V e os +5.3V. Alargando a pesquisa ao *site da Adafruit* é possível concluir que, se o módulo LED estiver a ser alimentado a 5V é necessário um sinal de dados de 5V, o que implica, no caso de estar a ser utilizado um microcontrolador que apresenta 3.3V nas suas saídas, a inclusão de um *logic level shifter* na saída do microcontrolador, para elevar o valor de tensão dos 3.3V para 5.0V. Uma alternativa é utilizar uma fonte de alimentação de 3.7V e nessas circunstâncias a saída do microcontrolador de 3.3V é suficiente para garantir as condições de operação [31].

Comparando os valores de intensidade luminosa das 3 cores primárias, medidas em mcd, do módulo WS2812B com as do módulo WS2812 é possível concluir que o módulo WS2812B apresenta menor intensidade luminosa. Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de intensidade luminosa de ambos os módulos, permitindo a comparação dos parâmetros de intensidade luminosa.

	Intensidade Luminosa (mcd)	
	WS2812B	WS2812
Vermelho	390 - 420	550 - 700
Verde	660 - 720	1100 - 1400
Azul	180 - 200	200 - 400

Tabela 4: Comparação dos parâmetros de intensidade luminosa entre o WS2812B [30] e o WS2812 [27]

Em suma, os 3 módulos LEDs aqui apresentados e analisados são elegíveis para o desenvolvimento do projeto em causa, contudo por questões de disponibilidade de *stock* dos distribuidores e tendo a vantagem de poderem ser alimentados com tensão de alimentação de 3.7V sem necessitarem de componentes intermédios na ligação à saída do microcontrolador, optou-se por seleccionar o módulo LED WS2812B para a realização do projeto.

3.1.2 Microcontroladores

O microcontrolador utilizado para o controlo dos LEDs e o circuito de comunicação *Bluetooth* são componentes chave, que poderão permitir reduzir as dimensões finais do circuito. Neste sentido, procurou-se encontrar um dispositivo único que permita combinar as funções do microcontrolador com as do módulo de comunicação *Bluetooth*. Esta combinação possibilitará estabelecer a comunicação *Bluetooth* entre o dispositivo eletrónico e o *smartphone*, suportar a camada de *firmware* e enviar dados para os LEDs.

A mais recente versão da tecnologia *Bluetooth* é o *Bluetooth* 5.0 desenhado com, cerca de, 2Mbps de velocidade de transferência de dados, capacidade de transmissão de dados de 255 bytes e com alcance de 200m, em ambientes onde existe linha de visão entre os dispositivos, e 40m em ambientes onde essa linha de visão é inexistente [18]. Comparativamente com a versão anterior, a versão 4.2, o *Bluetooth* 5.0 possui 2 vezes mais velocidade, 8 vezes mais capacidade de transmissão de dados e um alcance 4 vezes superior. Estes desenvolvimentos, aliados com melhor coexistência com outras tecnologias sem fios e maior robustez para operar em ambientes congestionados, permitem aprimorar as características e alargar o lote de funcionalidades do universo IoT [32].

Pelo facto de na tecnologia *Bluetooth* as várias versões serem compatíveis, ficando a comunicação restringida às características da versão mais antiga, procurou-se um microcontrolador *Bluetooth* compatível com a versão 5.0, visto ser a versão mais recente e melhor preparada para o universo IoT. Com estes requisitos estabelecidos a pesquisa sugeriu as seguintes soluções propostas pela *Nordic Semiconductor*.

A *Nordic Semiconductor*, empresa de desenvolvimento de semicondutores e que concentra o seu trabalho no desenvolvimento de *chips* sem fios de ULP capazes de operar por longos períodos de tempo a partir de pequenas fontes de energia, comercializa 3 módulos que suportam o protocolo de comunicação *Bluetooth* 5.0, que são: o nRF52840 [33], o nRF52832 [17] e o nRF52810 [34]. Na Tabela 5 são apresentadas as suas principais características e diferenças.

	nRF52840	nRF52832	nRF52810
Alcance (200m)	X		
Velocidade (2Mbps)	X	X	X
Transferência de dados (255 Bytes)	X	X	X
Flash (KBytes)	1024	512	192
RAM (KBytes)	256	64	24
IEEE 802.15.4	X		
SPI, TWI, UART, PWM	X	X	X
Tensão de Alimentação (V)	1.7 - 5.5	1.7 - 3.6	1.7 - 3.6

Tabela 5: Características dos módulos nRF52840, nRF52832 e nRF52810

A partir da análise da tabela, é possível concluir que a principal diferença entre os módulos é a capacidade das memórias, *Flash* e RAM.

O facto destes módulos não possuírem uma antena integrada que possibilite a comunicação impõe uma dificuldade, uma vez que requer esforços no projeto e teste da antena, que perante os tempos disponíveis, para o desenvolvimento deste projeto, seria uma situação impactante. Nesse sentido, procurou-se encontrar uma solução que aliasse à utilização de um destes módulos uma antena integrada, tornando o módulo apto a comunicar. Através da pesquisa, foram encontrados os seguintes módulos, o Insight SiP ISP1507, o Rigado BMD-300 e o Rigado BMD-330.

O Insight SiP ISP1507 [35] é um módulo de dimensões 8mm x 8mm x 1mm baseado no módulo nRF52832. Possui um CPU Cortex™ M4, 512KBytes de memória *Flash* e 256KBytes de memória RAM combinados com uma antena otimizada para oferecer a solução perfeita para conectividade *Bluetooth*. O módulo foi desenvolvido para servir diversas aplicações, nomeadamente: conectar sensores de dispositivos médicos, *healthcare*, *fitness* e conectar objetos *wearable*, daí as suas dimensões reduzidas. Uma imagem do encapsulamento do módulo é apresentada na Figura 22.

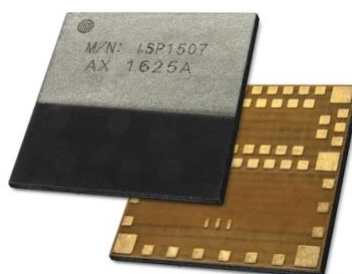


Figura 22: Módulo Insight SiP ISP1507 [35]

A Rigado, por sua vez, apresenta uma proposta mais alargada, possuindo o módulo BMD-300 [36] baseado no módulo nRF52832 e o módulo BMD-330 [37] baseado no módulo nRF52810. Ambos os módulos apresentam como dimensões 14 mm x 9.8 mm x 1.9 mm.

O módulo BMD-300 está equipado com um processador ARM® Cortex™ M4F, possuindo 512KBytes de memória *Flash* e 64KBytes de memória RAM. Por sua vez, o módulo BMD-330 está equipado com um processador ARM® Cortex™ M4 e possui 192KBytes de memória *Flash* e 24KBytes de memória RAM. Ambos possuem um transmissor embutido de 2,4 GHz e uma antena integrada, fornecendo uma solução de RF completa.

Os módulos Rigado permitem um pleno uso das capacidades e periféricos dos módulos usados, sendo capazes de alimentar aplicações exigentes ao mesmo tempo que, simplificam os projetos. A Rigado desenvolveu estes módulos com o objetivo de servirem aplicações como, sistemas de controlo climático, produtos de iluminação, dispositivos IoT, e, conectar objetos *wearable*. Uma imagem com encapsulamento do módulo BMD-300 e do BMD-330 é apresentada na Figura 23.



Figura 23: Módulos Rigado: BMD-300 [36] e BMD-330 [38]

Os 3 módulos apresentados são soluções legítimas para o sistema que se pretende desenvolver, contudo a primeira escolha recai sobre o módulo Rigado BMD-300. Esta opção foi tomada com base em vários fatores, desde logo a existência de um *kit* de desenvolvimento chamado *BMD-300 Evaluation Kit* [39], equipado com o módulo BMD-300, que permite um acesso total a todos os recursos do módulo e está equipado com uma série de outros componentes, tais como, botões e LEDs que irão auxiliar, numa primeira fase, o desenvolvimento do *firmware*. A Figura 24 [39] apresenta o *BMD-300 Evaluation Kit*.



Figura 24: BMD-300 Evaluation Kit [39]

Outra das características deste módulo é poder ser programado de forma prática e simples, ou através da *interface External SEGGER J-Link Debug* do *Kit* de desenvolvimento, à qual se pode ligar um cabo SWD de 10 pinos e programar um módulo externo, ou utilizando um *SEGGER Debug Probes - J-Link* que pode ser diretamente ligado a um computador. A Figura 25 mostra um *SEGGER Debug Probes - J-Link* e os cabos necessários para a programação.



Figura 25: SEGGER Debug Probes - J-Link [40]

Outra das vantagens da utilização do módulo BMD-300 é a possibilidade de após validação do *firmware* e do circuito poder-se mudar para o BMD-330, se a memória *Flash* e RAM deste último for suficiente, permitindo reduzir custos.

Relativamente a preços, concluímos também que ambos os módulos Rigado têm preços unitários mais baixos do que o módulo *Insight SiP ISP1507*, tendo o módulo BMD-300 o custo de 9,81€ [41], o módulo BMD-330 o custo de 8,56€ [37] e o módulo *Insight SiP ISP1507* o custo de 11,49€ [42], segundo consulta no *site* do distribuidor Mouser.

3.1.3 Baterias

Na especificação do projeto de um dispositivo *wearable* a escolha da bateria a utilizar assume particular relevância no *design*. O tamanho e a necessidade de portabilidade aliados à necessidade de satisfazer os requisitos de energia do dispositivo restringem as opções de escolha.

As baterias mais utilizadas em dispositivos portáteis dividem-se em duas categorias, as baterias recarregáveis e as baterias não recarregáveis, também designadas por pilhas.

Na categoria das baterias recarregáveis existem vários tipos de tecnologias, tais como, as baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH), as baterias de íões de lítio (Li-Ion) e as baterias de polímero de lítio (LiPo) [43].

As baterias de níquel-hidreto metálico (Ni-MH) são populares por apresentarem alta densidade de energia, podendo atingir 70-80Wh/Kg, e por não utilizarem metais tóxicos. Este tipo de bateria é apresentado em tamanhos *standard* e possui 1.25V por célula. Para se obter uma alta capacidade de carga recorre-se à combinação de múltiplas células. As baterias Ni-MH são usadas em dispositivos quando o tamanho e a forma não são uma restrição. A Figura 26 mostra um exemplo de baterias Ni-MH.



Figura 26: Exemplo de baterias Ni-MH [43]

As baterias de íões de lítio (Li-Ion) são a fonte de energia que apresenta o maior potencial de desenvolvimento, visto ser o lítio o elemento metálico mais leve que existe. As baterias Li-Ion têm uma densidade de energia de, aproximadamente, 126Wh/Kg e permitem armazenar energia por longos períodos de tempo [44]. As baterias de íões de lítio apresentam uma voltagem em torno dos 3.6V. Em termos de formato, as baterias de íões de lítio estão disponíveis em diferentes modelos, tais como, *cylindrical cell* e *pouch cell*. As baterias *cylindrical cell* são um formato mais rígido e que permite agrupar várias baterias para obter maiores capacidades de carga. Em contraponto, as baterias de formato *pouch cell* são ultra finas e leves e oferecem maior portabilidade e flexibilidade. A Figura 27 representa, na imagem da esquerda, o exemplo de uma bateria *cylindrical cell* e, na imagem da direita, um exemplo de uma bateria *pouch cell*. A desvantagem das baterias Li-Ion é serem muito delicadas e necessitarem de circuitos especiais de proteção para garantir a segurança e evitar que explodam.



Figura 27: Exemplos de baterias Li-Ion [45]

As baterias de polímero de lítio (LiPo) são a opção escolhida na generalidade dos dispositivos portáteis existentes, tais como, *smartphones* e *robots*, onde as reduzidas dimensões da bateria é um requisito. Desenvolvidas com o mesmo princípio químico das baterias Li-Ion, as baterias LiPo são apresentadas no formato *pouch cell* e possuem uma densidade de energia de 185Wh/Kg [44]. As baterias LiPo oferecem flexibilidade no desenho de dispositivos portáteis por serem leves, finas e existirem no mercado com grande variedade de tamanhos, facilitando a adaptabilidade destas ao *desing* do dispositivo. A contrapartida deste tipo de baterias é que, tal como as baterias Li-Ion, são bastante delicadas e necessitam de circuitos especiais de proteção para garantir segurança e evitar explosões. A Figura 28 mostra exemplos de baterias LiPo.

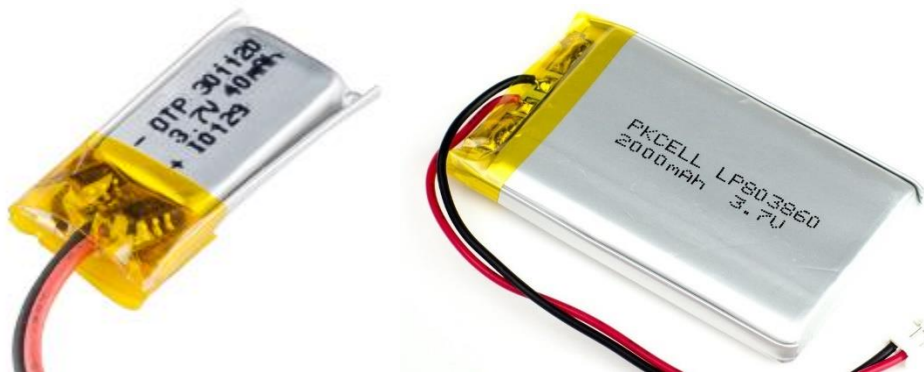


Figura 28:Exemplo de baterias LiPo [44]

Na categoria de baterias não recarregáveis destacam-se as baterias *coin cell* por serem bastante compactas. Estas baterias são pequenos discos que podem ser constituídos por células de lítio de 3V ou por células de outros metais como o zinco e o manganês de 1.5V [46]. As baterias *coin cell* são adequadas para dispositivos que requerem pouca potência, são bastante seguras e facilmente substituídas pelo utilizador. A Figura 29 mostra exemplos de baterias *coin cell*.



Figura 29: Exemplo de baterias *Coin Cell* [46]

Em suma, após realizar um estudo de mercado é possível concluir que as baterias com o formato *pouch cell* são as baterias adequadas para dispositivos portáteis que requerem baterias recarregáveis, flexíveis e de dimensões reduzidas. As alternativas que irão ser consideradas no projeto são as baterias de formato *pouch cell* da tecnologia Li-Ion e LiPo.

3.1.4 Regulador de Tensão

Após selecionar o módulo e o tipo de bateria a utilizar verificou-se que a tensão de alimentação que deve ser aplicada ao módulo é inferior ao valor de 3.7V fornecidos pela bateria. A tensão de alimentação do módulo deve ter um valor entre os 1.7V e os 3.6V, sendo o valor típico, sugerido pelo fornecedor, na ordem dos 3.3V. Esta diferença de valores de tensão requer a utilização de um regulador de tensão para fixar a tensão de 3.3V a aplicar ao módulo.

Na escolha de um regulador de tensão existem características que devem ser tidas em conta, tais como, o valor de *dropout*, que corresponde à menor diferença entre a tensão de entrada do regulador e a tensão de saída necessária para garantir que o regulador seja capaz de fornecer a tensão e corrente nominal. O valor de corrente, que o regulador é capaz de fornecer tendo em conta o valor de *dropout* existente no circuito, e a tensão fixa de saída do regulador são também valores que devem ser tidos em consideração.

Partindo das restrições do circuito já apresentadas e tendo sido realizados testes práticos para medição de alguns valores, conclui-se que é necessário que o regulador tenha tensão fixa de saída de 3.3V. O valor de *dropout* do regulador não pode ser superior a 0.4V, resultante de existir na entrada do regulador uma tensão de 3.7V e na saída uma tensão de 3.3V. Conhecido o valor de *dropout* do circuito, o módulo necessita, em termos de corrente, de 7.4mA quando está em funcionamento normal, entenda-se por funcionamento normal estar a executar o algoritmo da camada de *firmware* desenvolvido, 50μA quando está no estado *sleep* (estado onde o módulo entra em modo de poupança de energia) e 5.6mA quando o módulo está a ser programado.

Tendo por base estas especificações e o custo do componente foi realizada uma pesquisa que permitiu concluir que o LDO (*Low-Dropout*) TLV70033DDCT [47] é o regulador ideal para o circuito que se pretendia desenvolver.

O LDO TLV70033DDCT possui ainda uma proteção térmica e um limitador de corrente para segurança do dispositivo. Apresenta reduzido ruído de saída e um elevado valor de PSRR (*Power Supply Rejection Ratio*), característica que representa a capacidade de um dispositivo

suprimir variações na tensão de saída provocadas por variações na tensão da fonte de alimentação, tornando este LDO uma excelente solução para equipamentos portáteis alimentados por uma bateria. O valor de *dropout* mínimo deste LDO é de 175mV sendo capaz de fornecer 200mA nestas condições de operação. A Figura 30 é genérica para os LDOs da série TLV700 mas permite ter uma perceção da evolução da curva da tensão de *dropout* face à tensão de entrada.

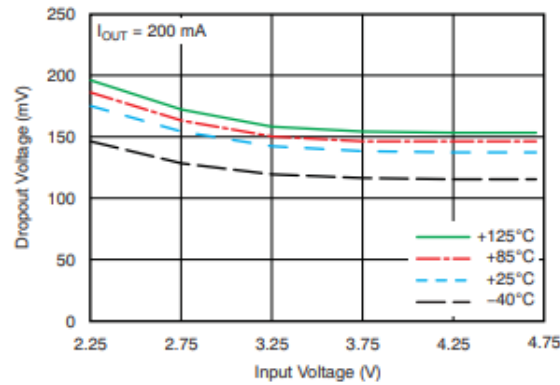


Figura 30: Tensão de *Dropout* vs Tensão de Entrada do LDO TLV700 [47]

A utilização do LDO TLV70033DDCT requer a utilização de um condensador na saída do regulador para melhorar a estabilidade da tensão de saída, sendo recomendado que seja um condensador cerâmico de 1µF X5R ou X7R, uma vez que estas séries apresentam variações mínimas do valor da capacitância e da resistência equivalente em série (ESR) face às variações de temperatura. O valor ESR do condensador deve ser inferior a 200mΩ. Na entrada do regulador, apesar de não ser necessário para garantir estabilidade, é boa prática de projeto analógico utilizar um condensador com baixo valor ESR e capacitância na ordem dos µF, entre o pino IN e GND do regulador, para melhorar a resposta transitória e a rejeição de ondulação (*ripple*) do sinal. Na Figura 31 é mostrado um circuito típico de aplicação do LDO TLV70033DDCT.

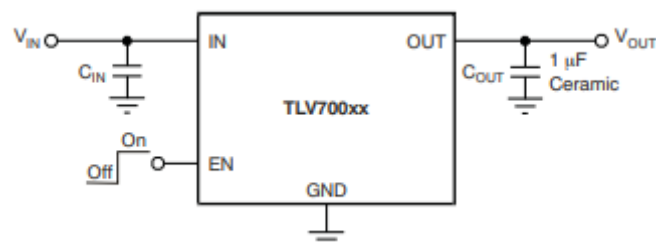


Figura 31: Circuito típico de aplicação do LDO TLV70033DDCT [47]

O LDO TLV70033DDCT tem um custo unitário de 0,44€.

3.1.5 Gestão da carga da bateria

O circuito que se pretendia projetar, tal como já foi indicado em secções anteriores, será alimentado por uma bateria LiPo de 3.7V, o que requer a existência no circuito de um dispositivo responsável por controlar e gerir a carga da bateria. Para desempenhar essa tarefa e visto já ter sido testado no protótipo anteriormente desenvolvido pela empresa, a solução encontrada é utilizar o *Battery Charge Management Controller* MCP73837 [48] da Microchip.

O MCP73837 é um dispositivo desenvolvido para gerir o processo de carregamento de baterias *Li-Ion / Li-Polymer*, que se apresenta com dimensões físicas reduzidas (3mm × 3mm) e que requer um reduzido número de componentes externos.

O dispositivo MCP73837 possui seleção de fonte de alimentação autónoma, podendo ser alimentado por um adaptador AC ou por uma porta USB. Se ambas as fontes de alimentação estiverem presentes é o adaptador AC o responsável por alimentar o sistema, fornecendo um valor máximo de corrente de 1A. No caso em que é a porta USB a fornecer a alimentação ao sistema, o MCP73837 obedece especificamente aos limites regidos pela especificação USB, podendo ser selecionado o modo de baixa potência ou o modo de alta potência. No modo de porta USB de baixa potência é fornecida uma corrente de carga máxima de 100mA e no modo de porta USB de alta potência é fornecida uma corrente de carga máxima de 500mA.

O dispositivo MCP73837 é constituído por um controlador de fim de carga automática que desliga o dispositivo quando a bateria está carregada e um monitorizador de temperatura da bateria que limita a corrente de carga durante altas temperaturas, permitindo otimizar o tempo de ciclo de carga e mantendo a confiabilidade do dispositivo. O MCP73837 possui internamente um LDO e apresenta 4 opções para a tensão constante de saída que são: 4.20V, 4.35V, 4.40V ou 4.50V, permitindo acomodar os requisitos de carregamento das baterias. A Figura 32 representa o *pinout* do dispositivo MCP73837.

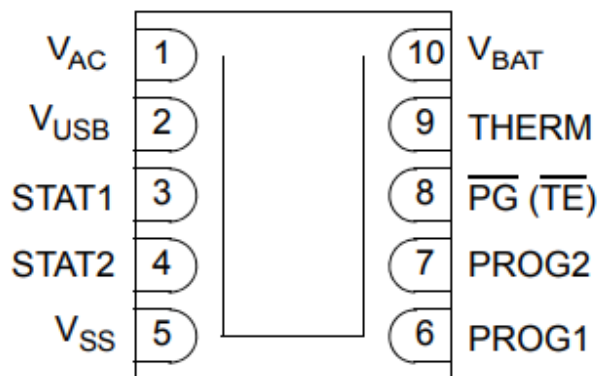


Figura 32: *Pinout* do dispositivo MCP73837 [48]

O MCP73837 é constituído por 10 pinos. O pino V_{AC} é a entrada para o adaptador AC e é recomendado que possua um condensador de *bypass* para V_{SS} com uma capacidade mínima de 4.7µF. O pino V_{USB} é a entrada para a porta USB e é recomendado que possua um condensador de *bypass* para V_{SS} com capacidade mínima de 1µF. Os pinos STAT1, STAT2 e $\overline{PG}$ são saídas lógicas de dreno aberto, podendo ser utilizadas para conectar a um LED ou através de uma resistência de *pull-up* a um microcontrolador, com a funcionalidade de sinalizar as diferentes fases de carga da bateria. O pino V_{BAT} é a saída que deve ser conectada ao terminal positivo de uma bateria Li-Ion / Li-Polymer sendo recomendado a existência de um condensador de

bypass para V_{ss} com uma capacidade mínima de $1\mu\text{F}$, para garantir a estabilidade do *loop* de carga quando uma bateria não estiver conectada. O pino THERM é responsável por permitir a monitorização constante da temperatura da bateria durante um ciclo de carga, medindo constantemente a tensão entre o pino THERM e V_{ss} . Este pino possui uma fonte de corrente interna de $50\mu\text{A}$ que polariza uma resistência com o valor recomendado de $10\text{K}\Omega$, que deverá ser colocada entre o pino THERM e V_{ss} . O pino V_{ss} é a massa do dispositivo. Por fim, existem os pinos PROG1 e PROG2 que permitem regular os limites de corrente que o adaptador AC e a porta USB, respetivamente, fornecem. O pino PROG2 é uma entrada digital que quando é colocada no nível lógico “0” seleciona o modo de potência baixa (máximo de 100mA) e quando é colocado a “1” seleciona o modo de potência alta (máximo de 500mA).

Uma aplicação típica é apresentada na Figura 33.

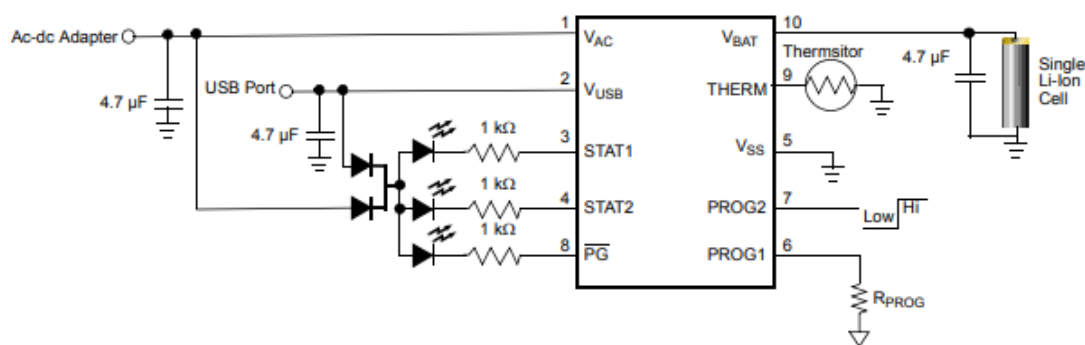


Figura 33: Aplicação típica do dispositivo MCP73837 [48]

O componente MCP73837, dedicado à gestão da carga da bateria, tem um custo unitário de 1,11€.

3.2. Esquema do Circuito

Finalizada a tarefa de definir os principais componentes que irão constituir o circuito, esta secção irá focar-se em especificar a interligação entre esses componentes, bem como definir os restantes componentes necessários para completar o circuito a desenvolver. O circuito é composto por 3 blocos principais, o bloco que alberga o circuito de alimentação, o bloco constituído pelo circuito de controlo do sistema, composto pelo módulo BMD-300, e o bloco que define o circuito dos LEDs endereçáveis. Nesta secção, será especificado cada um destes circuitos individualmente e, por fim, apresentada a visão global do circuito total.

Na subsecção [3.2.1](#) Circuito de Alimentação são especificados os componentes e suas interligações que constituem o circuito responsável por fornecer a alimentação do sistema. Na subsecção [3.2.2](#) Circuito de Comunicação e Controlo são apresentados os componentes e as interligações que formam o circuito responsável por gerir as comunicações e o controlo do sistema. Na subsecção [3.2.3](#) Circuito de controlo e alimentação dos LEDs é especificado os componentes que constituem o circuito de operação dos LEDs endereçáveis. Por fim, a subsecção [3.2.4](#) Visão global do circuito apresenta a junção dos circuitos apresentados nas secções anteriores e mostra o esquema completo do sistema desenvolvido.

$$R1 = R2 = \frac{V_{USB} - V_F}{I_F} = \frac{5V - 2.2V}{20mA} = 140\Omega \approx 150\Omega \quad (3.1)$$

A resistência R4 tem o valor de 10kΩ visto ser este o valor recomendado na ficha técnica do dispositivo MCP73837 para que seja realizada a monitorização correta da temperatura da bateria durante um ciclo de carga.

O pino PROG1 do dispositivo MCP73837 para além de permitir regular os limites de corrente, funciona também como controlador de carga do dispositivo. Neste sentido e tendo em conta que a especificação USB Rev. 2.0 [48] define que a corrente máxima absoluta por cada unidade de carga é de 100mA, utilizou-se a fórmula (3.2), fornecida na ficha técnica do componente, para se calcular o valor de R3.

$$I_{REG} = \frac{1000V}{R_3} \Leftrightarrow R_3 = \frac{1000V}{100mA} = 10K\Omega \quad (3.2)$$

O pino PROG2 do dispositivo MCP73837 permite regular os limites de corrente da porta USB e é ligado ao pino V_{USB} para adquirir, durante o processo de carga da bateria, nível lógico “1”. O pino PROG2 possui 2 modos de operar, o modo de baixa potência, definido pelo nível lógico “0”, que seleciona a opção de uma unidade de carga, permitindo fornecer uma corrente máxima de 100mA. O modo de alta potência, definido pelo nível lógico “1”, define cinco unidades de carga e permite fornecer uma corrente máxima de 500mA. Assim, colocando o pino PROG2 com nível lógico “1” obtêm-se um carregamento da bateria mais rápido.

O BAT_CON é um conector JST-PH de 2 pinos para conectar a bateria ao sistema.

O condensador C1 tem a capacidade de 4.7μF e é requerido pela saída V_{BAT} do dispositivo MCP73837 para garantir a estabilidade do *loop* quando uma bateria não estiver conectada e pelo pino IN e EN do LDO TLV70033DDCT para assegurar a estabilidade do sinal de entrada.

O pino NC (*no connection*) do LDO TLV70033DDCT é recomendado que seja ligado à massa para melhorar a dissipação térmica.

O condensador C3 tem o valor de 1μF e é necessário para garantir a estabilidade do sinal de saída do LDO TLV70033DDCT e que terá o valor de 3.3V.

3.2.2 Circuito de Comunicação e Controlo

O circuito de comunicação e controlo do sistema é definido com base no módulo BMD-300, que é responsável por receber e interpretar os comandos *Bluetooth*, enviados pela aplicação, e por enviar os comandos de controlo para os LEDs WS2812B. A Figura 36 apresenta, então, o esquema deste circuito.

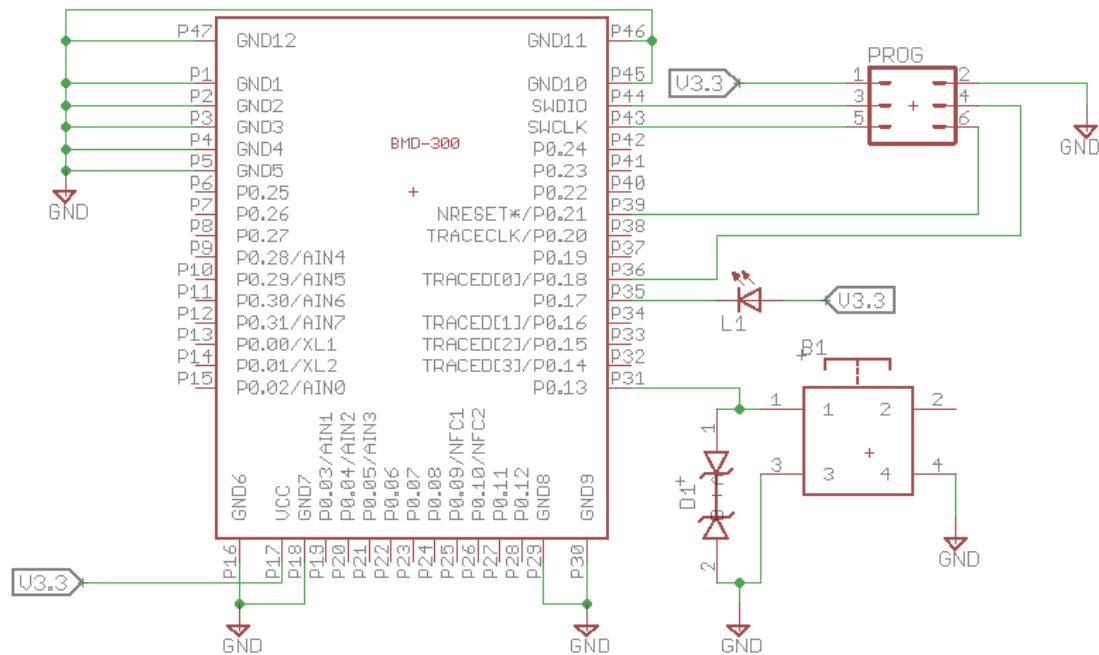


Figura 36: Esquemático do circuito de comunicação e controle

O módulo BMD-300 é alimentado com um sinal de tensão de 3.3V ligado ao pino P17 com um sinal de massa ligado aos pinos P1, P2, P3, P4, P5, P16, P18, P29, P30, P45, P46 e P47.

Para programar o módulo são necessários 6 sinais, SWDIO (P44), SWCLK (P43), NRESET (P39), SW0 (P36), VDD e GND do módulo. Para permitir o acesso a estes sinais foi colocado o conector PROG mostrado na Figura 36.

O LED L1 é um LED de cor azul usado para sinalizar o estado da conexão *Bluetooth* e está conectado ao pino P35.

O circuito possui um botão B1 que tem dupla funcionalidade. O *firmware* terá um conjunto de efeitos pré-definidos para serem aplicados aos LEDs e uma das funções do botão é permitir alternar entre esses diferentes efeitos. A outra funcionalidade do botão é colocar o módulo BMD-300 no modo *sleep*, quando pressionado durante um período de tempo pré-definido, “desligando” o sistema.

O D1 é um diodo TVS utilizado para proteger o pino do módulo de picos de tensão provocados pelas transições de estado do botão. O botão está conectado ao pino P31 do módulo.

3.2.3 Circuito de controlo e alimentação dos LEDs

O circuito dos LEDs Endereçáveis é definido pelas características dos LEDs WS2812B. A Figura 37 apresenta o circuito de controlo dos LEDs endereçáveis.

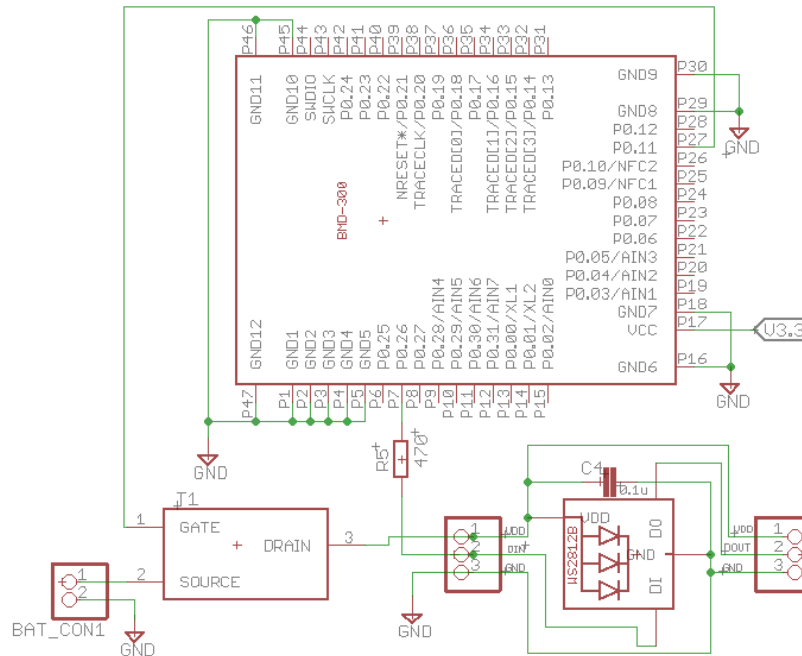


Figura 37: Esquemático do circuito de controlo e alimentação dos LEDs

Os LEDs endereçáveis WS2812B possuem 4 pinos, VDD, GND, DIN E DOUT e são alimentados a 3.7V.

O condensador C1 possui o valor de 0.1µF e é um condensador de desacoplamento, ligado entre os pinos de alimentação do LEDs, para garantir que os LEDs não apresentam um funcionamento errático provocado por eventuais picos de tensão.

A resistência R5 de 470Ω é colocada entre a saída de dados do módulo, pino P7, e a entrada DIN do primeiro LED WS2812B para prevenir eventuais picos na linha de dados que possam danificar o LED.

Após realizar algumas medições ao circuito concluiu-se que ao colocar o módulo no estado *sleep* e apagar os LEDs, estes continuam a consumir um valor de corrente significativo. Considerando 8 LEDs o consumo é de, aproximadamente, 5mA. Por esta razão, é necessário que quando se pretende desligar o sistema, colocando o módulo no estado *sleep*, os LEDs deixem de ser alimentados. Neste sentido, definiu-se o transistor NTE4151P, correspondente ao transistor T1 na Figura 37 que sendo um *mosfet* de canal P permite interromper a alimentação aos LEDs quando se encontra a funcionar na região de corte, funcionando como um interruptor no estado desligado. A região de corte do transistor é determinada pela equação (3.3).

$$V_{SG} < |V_{TH}| \Leftrightarrow V_S - V_G < |V_{TH}| \Leftrightarrow 3.7V - 3.3V = 0.4V < 0.45V \quad (3.3)$$

Na região de triodo o transistor opera como um interruptor no estado ligado e fornece alimentação aos LEDs, com uma resistência dreno/fonte $R_{DS} = 300\text{ m}\Omega$ e uma corrente de dreno máxima $I_D = -760\text{ mA}$, segundo os valores apresentados na ficha técnica do

componente [49]. A região de triodo do transistor é determinada por $V_{SG} > |V_{TH}|$ e $V_{SD} < V_{SG} - V_{TH}$. Os cálculos são apresentados a seguir:

$$V_{SG} > |V_{TH}| \Leftrightarrow V_S - V_G > |V_{TH}| \Leftrightarrow 3.7V - 0V = 3.7V > 0.45V \quad (3.4)$$

Para calcular o valor de V_{DS} , assume-se $R_{DS} = 300\text{ m}\Omega$ e $I_D = -760\text{ mA}$:

$$-I_D = \frac{V_{SD}}{R_{DS}} \Leftrightarrow V_{SD} = -I_D \times R_{DS} = 760\text{mA} \times 300\text{m}\Omega = 0.2V \quad (3.5)$$

$$V_{SD} < V_{SG} - V_{TH} \Leftrightarrow 0.2V < 3.7V - 0.45V \Leftrightarrow 0.2V < 3.25V \quad (3.6)$$

A queda de tensão V_{SD} na ordem dos 0.2V permite que seja aplicada aos LEDs uma tensão de alimentação de, aproximadamente, 3.5V. As curvas características do transistor NTE4151P são mostradas na Figura 38. No gráfico da esquerda da Figura 38 é mostrada a curva da corrente de dreno $-I_D$ face à tensão dreno/fonte ($-V_{DS}$). No gráfico da direita da Figura 38 visualiza-se a curva do valor da resistência dreno/fonte (R_{DS}) face à corrente de dreno ($-I_D$) do transistor.

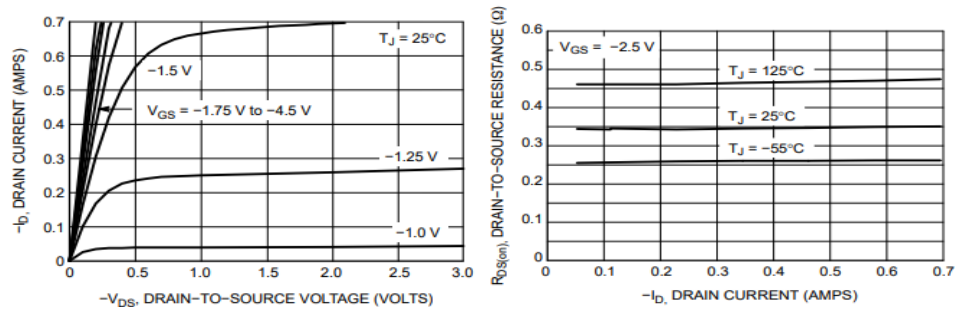


Figura 38: Curvas características do transistor NTE4151P [49]

3.2.4 Visão global do circuito

Após especificar os diferentes blocos que constituem o sistema, o esquema global do circuito é apresentado na Figura 39.

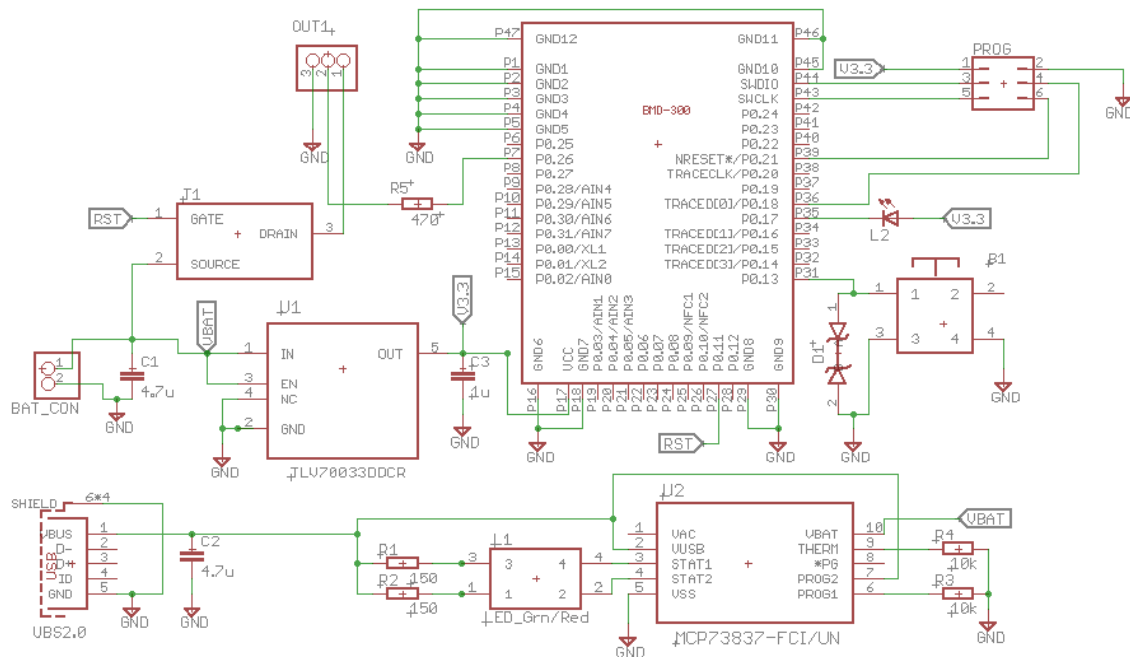


Figura 39: Esquema do Circuito

A ligação entre o circuito de alimentação e o circuito de comunicação e controlo é conseguida, conectando-se o pino de saída do LDO ao pino P17 (VCC) do módulo BMD-300, fornecendo desta forma a alimentação ao sistema.

A ligação aos LEDs WS2812B é realizado através do conector OUT1 da Figura 39. O pino 1 do conector corresponde ao sinal de alimentação V_{DD} , o pino 2 corresponde ao pino de dados DIN e o pino 3 corresponde ao sinal de massa V_{SS} .

A secção seguinte apresenta o princípio de funcionamento do circuito.

3.3. Princípio de Funcionamento do Circuito

Apresentado o circuito é importante perceber o seu princípio de funcionamento. A explicação será apoiada pelo esquema do circuito representado na Figura 39.

O sistema é um dispositivo portátil que irá operar com uma bateria LiPo de 3.7V como fonte de alimentação. Por esta razão, começa-se por descrever a situação em que a porta micro USB 2.0 está desconectada e a única fonte de alimentação do sistema é a bateria. Nestas circunstâncias, o gestor de carga da bateria, o componente MCP73837, estará no modo desligado, modo em que o valor de V_{DD} , definido como sendo igual à tensão de alimentação do pino V_{USB} , é inferior a V_{BAT} em, pelo menos, 100mV. O LED L1, nesta situação, estará apagado. O valor de tensão da bateria será aplicado à entrada IN do LDO TV70033DDCR e à fonte do transistor T1.

Na situação em que a porta micro USB está alimentada e não existe uma bateria ligada ao sistema, o dispositivo MCP73837 entra no modo de teste e opera como um regulador de tensão linear. O valor de tensão V_{BAT} é definido pelo regulador interno e assumirá o valor de 4.2V, que será aplicado ao pino IN do LDO e à *source* de T1. Neste caso, a corrente I_{BAT} fornecida ao sistema é limitada à corrente de carga programada (500mA).

Quando a porta USB e a bateria são conectadas simultaneamente, o gestor de carga da bateria MCP73837 define o modo de operar em função da carga da bateria. Se o valor de tensão no pino V_{DD} for superior à tensão de V_{BAT} menos 100mV, assume que a bateria está totalmente carregada e o gestor da carga da bateria permanece no modo desligado, continuando a bateria a ser a fonte de alimentação do sistema. No caso em que a bateria não está carregada e o valor de tensão no pino V_{BAT} é inferior ao valor de V_{REG} (tensão do regulador interno), o dispositivo MCP73837 entra no modo de carga rápida e é iniciado o processo de carga. Durante este modo, a porta USB é capaz de fornecer ao sistema uma corrente máxima de 500mA, permitindo carregar a bateria e alimentar o sistema. Neste modo, o LED L1 acenderá com a cor vermelha, simbolizando que a bateria está a ser carregada. Quando o valor de tensão em V_{BAT} atingir o valor de V_{REG} , o dispositivo MCP73837 passa ao modo de tensão constante, no qual mantém $V_{BAT} = V_{REG}$ e a corrente fornecida tende para zero. No instante, em que a corrente I_{BAT} fornecida for inferior à corrente de terminação de carga (I_{TERM}), o dispositivo MCP73837 entra no modo de carga completa. Neste modo, deixa de circular corrente da porta USB para o circuito e passa a bateria a ser novamente a fonte de alimentação do sistema e o LED L1 acende com cor verde sinalizando que a bateria está carregada. A corrente de terminação de carga (I_{TERM}) é definida através da fórmula (3.7).

$$\frac{I_{TERM}}{I_{REG}} = 0.05 \Leftrightarrow I_{TERM} = 100 \times 0.05 \Leftrightarrow I_{TERM} = 1mA \quad (3.7)$$

No modo de carga completa, o dispositivo MCP73837 faz a comparação periódica entre o valor de V_{BAT} e o valor definido como tensão de recarga (V_{RTH}). Quando o valor de V_{BAT} for inferior ao valor de V_{RTH} é iniciado um novo ciclo de recarga da bateria. O valor de V_{RTH} é definido através da fórmula (3.8).

$$\frac{V_{RTH}}{V_{REG}} = 0.94 \Leftrightarrow V_{RTH} = 0.94 \times 4.20 = 3.9V \quad (3.8)$$

Em simultâneo com o carregamento, o gestor da carga da bateria controla a temperatura da bateria e se for detetado um sobreaquecimento entra automaticamente no modo de falha de temperatura, deixando de fornecer corrente ao sistema até que a temperatura diminua para um valor aceitável.

O LDO TV70033DDRC garante o valor de tensão fixo de 3.3V na saída desde que esteja garantindo o valor de tensão de *dropout* superior a 175mV. A tensão de saída do LDO é utilizada para alimentar o módulo BMD-300.

A região de operação do transistor T1 será definida pela saída P27 do módulo BMD-300 que, estando configurada com resistência interna de *pull-up*, está ligada à *gate* do transistor. A função deste transistor é ser um interruptor ON/OFF para a alimentação dos LEDs WS2812B, representados na Figura 39 pelo conector OUT1. Quando o sistema está em funcionamento, o pino P27 é definido com nível lógico “0”, e T1 entra em condução na região de triodo permitindo que a corrente flua para os LEDs. Quando o sistema é colocado no modo *sleep*, o pino P27 é definido com nível lógico “1”, entrando T1 na região de corte e impedindo que a corrente flua para os LEDs.

O botão B1 está ligado à saída P31 do módulo, configurada internamente com resistência de *pull-up*, e apresenta dupla funcionalidade. Uma das funcionalidades de B1 é permitir ligar e desligar o dispositivo. Quando pressionado durante um período superior a 5 segundos coloca o módulo no estado *sleep*, bastando posteriormente um novo clique para que o sistema seja reiniciado e entre em funcionamento. A outra funcionalidade de B1 é permitir, com cliques de duração inferior a 5 segundos, selecionar e enviar para os LEDs um dos efeitos de iluminação pré-definidos.

L2 é um LED de cor azul que sinaliza o estado da comunicação *Bluetooth*. Quando o dispositivo está em funcionamento e não existe uma conexão *Bluetooth* estabelecida, o LED está a piscar. Quando é estabelecida uma conexão, o LED fica permanentemente aceso. Com o dispositivo no estado *sleep*, o LED L2 fica apagado.

O módulo BMD-300 é um módulo com antena *Bluetooth* integrada que controla as operações do sistema. Sempre que é invocada uma ação de controlo dos LEDs endereçáveis, o módulo processa os dados e constrói as tramas que são enviadas através do pino P7. As ações de controlo dos LEDs podem ser geradas pelo botão B1 ou através de uma aplicação instalada num *smartphone*, com a qual o módulo comunica através do protocolo *Bluetooth*.

Resumidamente, o dispositivo pode ser alimentado por uma bateria ou por uma porta USB, sendo que quando existe as duas fontes em simultâneo a bateria entra em modo de carregamento e é a porta USB que alimenta o circuito. O envio de comandos de controlo para os LEDs pode ser feito de duas maneiras, uma é estabelecendo uma comunicação *Bluetooth*, a partir de um *smartphone*, e enviar comando e a outra é enviando os comandos pré-definidos através da utilização do botão. O botão tem também a funcionalidade de ligar e desligar o dispositivo, bastando para isso pressionar o botão durante 5 segundos. Para completar o dispositivo, existem 2 LEDs de sinalização, L1 responsável por sinalizar o estado de carga da bateria, acendendo com cor vermelha quando está a carregar e com cor verde quando está carregada, e L2 de cor azul que sinaliza o estado da comunicação *Bluetooth*.

3.4. Lista de Componentes e Conclusões

A Tabela 6 apresenta a lista final dos componentes que constituem o sistema desenvolvido. A tabela apresenta a quantidade, nome, descrição, designação do componente no esquema apresentado na Figura 39, o custo unitário e o custo total dos componentes.

Quantidade	Nome	Descrição	Designação	Custo Unitário	Custo Total
1	BMD-300	Módulo Bluetooth	BMD-300	9,61€	9,61€
1	Botão	Botão	B1	0,13€	0,13€
1	ESD9B3.3ST5G	Díodo TVS	D1	0,16€	0,16€
1	TLV70033DDCT	Regulador de tensão	U1	0,44€	0,44€
1	MCP73837 - FCI/UN	Battery Management	U2	1,11€	1,11€
1	NTE4151PT1G	Transístor de canal P	T1	0,39€	0,39€

1	JST-PH 2 Pinos	Conector da Bateria	BAT_CON	0,62€	0,62€
1	USB 2.0	Conector USB tipo B	USB 2.0	1,11€	1,11€
1	LED BLUE	LED de cor Azul	L2	0,33€	0,33€
1	LED RED/GREEN	LED de duas cores	L1	0,28€	0,28€
2	Condensador 4.7 μ F	Condensador 4.7 μ F	C1, C2	0,24€	0,48€
1	Condensador 1 μ F	Condensador 1 μ F	C3	0,15€	0,15€
1	Resistência 470 Ω	Resistência 470 Ω	R5	0,08€	0,08€
2	Resistência 10 K Ω	Resistência 10 K Ω	R3, R4	0,08€	0,16€
2	Resistência 150 Ω	Resistência 150 Ω	R1, R2	0,08€	0,16€
				Total:	15,21€

Tabela 6: Lista de componentes constituintes do sistema

Nota: Na apresentação da lista de matérias que compõem o sistema não é mencionado o custo da bateria para facilitar a comparação de custos com o protótipo anterior. Contudo, uma bateria LiPo de 3.7V e com carga de 1100mAh, como a que será utilizada na validação do circuito, tem um custo de 6,37€ [50].

Em suma, neste capítulo começou-se por apresentar a procura e a análise de componentes que constituem o dispositivo desenvolvido. Relativamente aos LEDs endereçáveis, foram analisados 3 módulos, o WS2812, o WS2813 e o WS2812B, tendo-se optado por utilizar este último. No que diz respeito ao módulo *Bluetooth*, procurou-se encontrar um módulo que tivesse já uma antena integrada, uma vez que o tempo disponível para o desenvolvimento deste projeto era insuficiente para se fazer o projeto e validação de uma antena BLE, sendo que foram encontrados 3 módulos: o Insight SiP ISP1507, o BMD-330 e o BMD-300. A opção recaiu sobre o módulo BMD-300, tendo em conta o custo do componente e a existência de um *Kit* de desenvolvimento, que auxilia o desenvolvimento do *firmware*. Foi também apresentado o regulador de tensão TLV70033DDCT e o gestor de carga da bateria MCP73837.

O dispositivo é constituído por 3 blocos, o bloco da alimentação, o bloco de comunicação e controlo e o bloco de controlo e alimentação dos LEDs, nesse sentido, foram especificados os circuitos que constituem cada um dos blocos. Seguidamente foi apresentada a visão global do circuito total e apresentado o seu princípio de funcionamento.

Por fim, foi apresentada a lista final de componentes do circuito, permitindo concluir que este tem um custo de 15.21€, cumprindo-se assim um dos objetivos deste projeto, que consistia em diminuir o custo do protótipo em relação ao protótipo anterior, que tinha um custo de 42.78€.

Capítulo 4

Firmware

O presente capítulo apresenta as características do *firmware* desenvolvido, que tem como objetivo possibilitar a comunicação entre a aplicação *mobile* e os LEDs endereçáveis, tomando ações de controlo em função dos dados recebidos. Neste sentido, o *firmware* consiste na implementação de duas *interfaces* de comunicação, a *interface* entre a aplicação, que poderá ser instalada num *smartphone* convencional, e o módulo *Bluetooth*, descrita na secção [4.1](#). Interface *Aplicação Mobile - Firmware*, e a interface entre o módulo *Bluetooth* e os LED WS2812B, apresentado na secção [4.2](#). Interface *Firmware - LEDs Endereçáveis*. A secção [4.3](#). Visão Geral do *Firmware Desenvolvido* irá apresentar um resumo das ideias focadas nas secções anteriores, permitindo obter uma visão geral do funcionamento do *firmware* desenvolvido.

Para desenvolver o *software*, a ferramenta utilizada foi o IDE *SEGGER Embedded Studio*, porque oferece uma solução completa para programação em C de aplicações embarcadas. O IDE é constituído por um editor de texto, um compilador C/C++, um *debugger* e suporte direto para programação J-Link, que auxilia a programação dos módulos.

O desenvolvimento do *software* foi baseado no nRF5 SDK, facultado pela *Nordic Semiconductor*. O nRF5 SDK é um ambiente de desenvolvimento de *software* testado, que inclui *drivers*, bibliotecas, exemplos de utilização de periféricos, *softdevices* e protocolos de rádio proprietários que auxiliam o desenvolvimento de aplicação para os dispositivos das séries nRF51 e nRF52. A versão utilizada foi a 14.2.0.

4.1. Interface Aplicação Mobile - Firmware

O produto que se pretende desenvolver é completado com uma aplicação, passível de ser instalada em qualquer *smartphone* convencional, através da qual se poderá controlar a cor, luminosidade e padrão a aplicar individualmente a cada LED. Para construir a *interface* de comunicação entre a aplicação e o módulo utilizou-se um protocolo de comunicação *wireless*.

A implementação de um protocolo de comunicação *wireless* num módulo da série nRF possui um conjunto de particularidades que necessitam de ser configuradas, sendo que existe diferenças entre os vários dispositivos existentes. Neste projeto em concreto, utiliza-se o módulo BMD-300 que tem integrado o módulo nRF52832 e o protocolo de comunicação que se

pretende implementar é a comunicação *Bluetooth*. A Figura 40 retrata a *interface* entre a aplicação instalada num *smartphone* e o *firmware* desenvolvido no módulo.



Figura 40: Interface aplicação Mobile- Módulo BMD-300

Seguidamente, na secção [4.1.1](#) Configuração do protocolo Bluetooth serão apresentadas as fases de configuração necessárias para implementar o protocolo de comunicação *Bluetooth*. Na secção [4.1.2](#) Processamento das tramas BLE para controlo dos LEDs é especificada a forma como são processados os pacotes de dados.

4.1.1 Configuração do protocolo *Bluetooth*

Para implementar o protocolo de comunicação *Bluetooth* no módulo nRF52832 foi necessário especificar previamente algumas configurações. A primeira configuração baseou-se na escolha da versão do *softdevice* que satisfazia as características do projeto. A segunda configuração consistiu em caracterizar a topologia BLE através da configuração do *Generic Access Profile* (GAP). A terceira configuração consistiu em caracterizar o serviço BLE através da configuração dos *Generic Attributes* (GATT). Por fim, foi necessário configurar o módulo *advertising*, definindo os modos usados pelo dispositivo para se anunciar aos restantes dispositivos que se encontrem no seu raio de alcance. A Figura 41 mostra um diagrama com as fases da configuração da comunicação BLE.

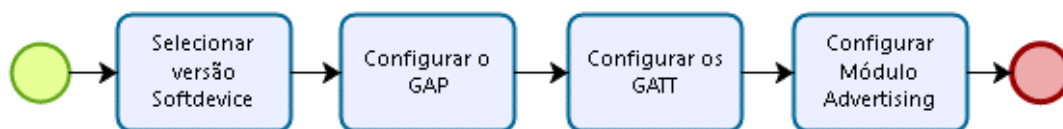


Figura 41: Configuração da comunicação *Bluetooth*

a) *Softdevice*

O *softdevice* é uma biblioteca que implementa uma pilha de protocolos *wireless* para apoiar a construção de aplicações SoC. A biblioteca é pré-compilada numa imagem binária e é utilizada para verificação funcional das especificações dos protocolos *wireless*. O *softdevice*, apesar de ser uma camada de *software*, pode ser entendido como um “dispositivo” extra do SoC, porque ocupa uma área de memória exclusiva, totalmente isolada da área de memória ocupada pelo código da camada de aplicação, garantindo a proteção da memória em tempo

de execução, *thread safety* e comportamento determinístico em tempo real. A *interface* entre as duas camadas é baseada numa API orientada a eventos que é configurada e inicializada na camada da aplicação. A Figura 42 representa a arquitetura das camadas de *software* dos módulos da série nRF52.

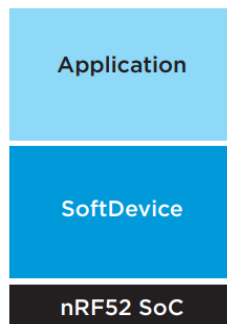


Figura 42: Arquitetura do *software* da série nRF52 [49]

Existe uma gama de *softdevices* capazes de satisfazerem diferentes necessidades. Ao planear o desenvolvimento de uma aplicação SoC, deve-se começar por definir o *softdevice* que atende aos requisitos pretendidos e descarregá-lo para o módulo, antes de descarregar o código da camada de aplicação. A Tabela 7 apresenta a gama de *softdevices* disponíveis.

Softdevice	Descrição
S112	O <i>softdevice</i> S112 é uma solução de pilha de protocolos BLE periférico. Suporta até 4 conexões com uma função <i>broadcaster</i> adicional em execução concorrente. Fornece uma API completa e flexível para a construção de soluções BLE utilizando SoC nRF52.
S132	O <i>softdevice</i> S132 é uma solução de pilha de protocolos BLE que suporta as funções central e periférico. Suporta até 20 conexões com a função de observador e <i>broadcaster</i> em execução concorrente. Fornece uma API completa e flexível para a construção de solução BLE para SoC nRF52.
S212	O <i>softdevice</i> S212 é uma solução de pilha de protocolos ANT™ que fornece uma API completa e flexível para a construções de soluções ANT™ com o módulo nRF52832.
S332	O <i>softdevice</i> S332 é uma solução combinada de pilha de protocolos ANT™ e BLE. Suporta as quatro configurações BLE (central, periférico, observador e <i>broadcaster</i>) e ANT.

Tabela 7: Gama de *softdevices* Bluetooth existentes [51]

O *softdevice* que será utilizado neste projeto é o S132 por ser o *softdevice* de pilha de protocolos BLE mais completo e ser suportado pelo módulo que está a ser usado.

A utilização do *softdevice* traz inúmeros benefícios porque permite que ao longo do desenvolvimento do código da camada de aplicação se possa recompilar, *linkar* e testar novos recursos permanecendo o *softdevice* inalterado.

Para garantir o desempenho correto do protocolo de comunicação e das funções da aplicação, o *softdevice* utiliza um esquema de interrupções priorizadas. A prioridade é estabelecida de acordo com a seguinte ordem:

Prioridade 1: Tarefas críticas do protocolo de baixo nível

Prioridade 2: Tarefas críticas da aplicação

Prioridade 3: Tarefas secundárias do protocolo

Prioridade 4: Tarefas secundárias da aplicação

Desta forma, as dependências críticas para a operação eficiente e confiável do protocolo estão sempre garantidas.

b) Configuração do GAP

O *Generic Access Profile* (GAP) é a camada que permite caracterizar a topologia do sistema BLE, existindo 4 configurações que podem ser definidas pelo GAP, que são: central, periférico, observador e *broadcaster*.

Um dispositivo com a configuração de BLE periférico, como o nome sugere, é um dispositivo que ocupa as camadas externas da topologia. Nesta configuração, o dispositivo não toma decisões sobre a conexão, limita-se a gerar eventos de *advertising* periodicamente e permite que qualquer dispositivo dentro do seu raio de alcance se possa conectar e obter a informação. Possui um comportamento passivo na topologia.

Um dispositivo com a configuração de BLE central é um dispositivo que está no centro da topologia, ou seja, possui ao seu redor dispositivos periféricos, com os quais se pode conectar e é o responsável pelo controlo da conexão. A configuração BLE central permite tomar decisões sobre a conexão e escolher o periférico com o qual o dispositivo se pretende conectar. Um dispositivo com esta configuração possui um papel ativo na topologia.

Um dispositivo com a configuração de BLE observador é um dispositivo que escuta, de forma passiva, os outros dispositivos que estão dentro da sua área de alcance, recebendo e processando os pacotes de dados gerados pelos eventos *advertising* desses dispositivos. Esta configuração não requer a existência de um transmissor porque não envia dados e não estabelece qualquer tipo de conexões.

A configuração BLE *broadcaster* é o oposto da configuração observador. O dispositivo nesta configuração transmite dados de forma periódica através de eventos *advertising*. Geralmente, os dados enviados possuem informações úteis sobre o dispositivo e são destinados a todos os outros dispositivos que se encontram dentro do seu raio de alcance. Esta configuração não requer a existência de um recetor uma vez que não se destina a receber dados nem a estabelecer conexões.

Das 4 configurações apresentadas, a central e a periféricas são as mais importantes para definir o papel do dispositivo na topologia. A configuração observador e a configuração *broadcaster* permitem apenas especificar o tipo de interação que o dispositivo tem com os restantes dispositivos da topologia.

Neste projeto, o dispositivo foi configurado como BLE periférico para permitir que um qualquer *smartphone* se possa conectar a ele. Nesta fase, o dispositivo está configurado para permitir apenas uma conexão em cada instante de tempo. A configuração BLE central não foi utilizada.

Em termos de interação com os restantes dispositivos da topologia, a configuração *broadcaster* é usada para permitir que a cada evento *advertising* o dispositivo envie para os restantes dispositivos ao seu redor algumas características que o identificam, tais como o nome do dispositivo, o nome do fabricante e o modelo do dispositivo. A configuração BLE observador

está especificada para permitir que o dispositivo possa receber e processar dados. Esses dados recebidos podem indicar, por exemplo, que foi estabelecida uma nova conexão, que a conexão atual foi desligada ou que foi recebida uma nova trama com comandos para alterar o efeito luminoso dos LEDs endereçáveis.

c) Configuração do GATT

Os *Generic Attributes* (GATT) são utilizados para definir a hierarquia da estrutura de dados, que é usada na comunicação BLE e permitem definir o modo como dois dispositivos BLE enviam e recebem mensagem.

O topo da hierarquia é formado por um perfil que é composto por um ou mais serviços capazes de satisfazer um determinado caso de uso e garantir a interoperabilidade da comunicação. Por sua vez, cada serviço agrega as características e as especificações de *interfaces* com os restantes serviços, que estruturam parte do comportamento do dispositivo. As características de um serviço definem-se pelo tipo (representado por um UUID), um valor, um conjunto de propriedades que indicam as operações que o serviço é capaz de suportar e um conjunto de regras para garantirem a segurança das informações. A Figura 43 representa a hierarquia de um perfil do GATT.

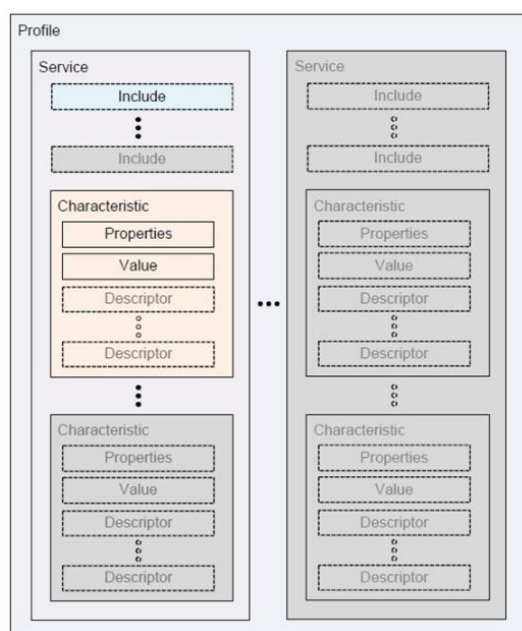


Figura 43: Hierarquia de um perfil do GATT [52]

Para a troca de mensagens entre dois dispositivos, o GATT usa o protocolo de transporte de dados *Attribute Protocol* (ATT) e define as funções de cliente e de servidor. As ações do GATT podem-se classificar em 3 tipos: ações de descoberta, ações iniciadas pelo cliente e ações iniciadas pelo servidor.

Um cliente GATT segue as especificações do cliente ATT e caracteriza-se por enviar pedidos de informação ao servidor e receber as respetivas respostas. No início da comunicação o cliente GATT não conhece as características da comunicação e, portanto, desencadeia uma ação de descoberta de serviços. Após concluir a ação de descoberta, o cliente está apto para ler a informação armazenada pelo servidor e receber atualizações resultantes de ações iniciadas pelo servidor.

Um servidor GATT segue as especificações do servidor ATT e caracteriza-se por receber pedidos de informação de um cliente e enviar as respostas consequentes. O servidor GATT é responsável por armazenar e disponibilizar as características da comunicação ao cliente e pode ainda ser configurado para ter a iniciativa de enviar ações de atualização.

No projeto que está a ser desenvolvido foram utilizados 2 serviços primários GATT, o serviço de informação do dispositivo e o serviço de sensorização ambiente.

O serviço de informação do dispositivo é um serviço primário identificado pelo UUID 0X180A, que como o nome indica, fornece informações sobre o dispositivo, tais como o nome do dispositivo e o nome do fabricante. A Tabela 8 mostra a configuração deste serviço.

Designação	UUID	Valor	Propriedades
Nome do Dispositivo	0x2A00	BT-00	Leitura / Escrita
Nome do Fabricante	0X2A29	Vime, Lda	Leitura

Tabela 8: Dados de configuração do serviço de Informação do Dispositivo

O sensor ambiente, identificado pelo UUID 0x181A, é o serviço primário que serve de base à criação do serviço personalizado usado para o controlo dos LEDs endereçáveis. Para criar um serviço personalizado é necessário ter um *base UUID* de 128 bits que pode ser gerado *online* de forma segura, sem necessidade de registo e com a garantia de que é altamente improvável que esse UUID já tenha sido utilizado. O UUID que foi gerado para o serviço personalizado é 3a00f599-d9a9-4a2a-8f99-18f09eaae41c. O serviço tem configuradas as propriedades de leitura e de escrita. A propriedade de escrita é utilizada para receção do valor de controlo dos LEDs e a propriedade de leitura é utilizada para devolver o valor que definiu o padrão da cor atual.

d) Módulo Advertising

O módulo *advertising* é configurado na inicialização do dispositivo, devendo-se definir o modo que o dispositivo usa para se fazer anunciar aos restantes dispositivos, o intervalo e o *timeout* de *advertising*. Na configuração do módulo *advertising* deve-se criar ainda um manipulador de eventos para permitir adicionar funcionalidades. A Tabela 9 apresenta os diferentes modos *advertising* existentes.

Modo	Descrição
<i>Idle</i>	No modo <i>Idle</i> nenhum evento <i>advertising</i> é gerado.
<i>Direct</i>	No modo <i>Direct</i> , o dispositivo, após a desconexão, tenta imediatamente voltar a estabelecer a ligação que acabou de ser terminada. Este modo é útil quando se pretende que um dispositivo esteja conectado a um ponto e recupere rapidamente de desconexões acidentais. A desvantagem deste modo é a possibilidade de bloquear outras conexões por estar a tentar restabelecer a ligação anterior.
<i>Direct Slow</i>	O modo <i>Direct Slow</i> pode ser utilizado depois de ser esgotado o <i>timeout</i> do modo <i>Direct</i> . O dispositivo continua a tentar restabelecer a ligação com o último ponto com o qual esteve conectado, mas utilizando periodicidade de <i>advertising</i> inferior ao do modo <i>Direct</i> .
<i>Fast</i>	No modo <i>Fast</i> , o dispositivo anuncia-se aos dispositivos circundantes utilizando um intervalo de <i>advertising</i> de curta duração até ser atingido o <i>timeout</i> .
<i>Slow</i>	No modo <i>Slow</i> , o dispositivo anuncia-se aos dispositivos circundantes utilizando um intervalo de <i>advertising</i> com maior duração, comparativamente com o modo <i>Fast</i> . Este modo permite economizar energia e reduzir o tráfego de dados enviado. Contudo, o estabelecimento de uma conexão é mais demorado do que no modo <i>Fast</i> .

Tabela 9: Modos *advertising* existentes [53]

Na configuração do módulo *advertising* é possível ativar os 5 modos, passando o dispositivo por cada um deles até que uma conexão seja estabelecida ou o *timeout*, especificado para cada modo, seja alcançado. Quando o *timeout* de um modo *advertising* é atingido, o dispositivo passa para o modo seguinte, sendo que o fluxo dos modos de *advertising* é: *Direct* → *Direct Slow* → *Fast* → *Slow* → *Idle*.

Neste projeto, optou-se por configurar apenas o modo *Fast* e o modo *Idle*. Quando o dispositivo é ligado, começa a anunciar-se no modo *Fast*, permitindo estabelecer uma conexão com qualquer um dos dispositivos *Bluetooth* circundantes num curto período de tempo, tendo sido especificado um intervalo de *advertising* de 40ms (valor sugerido nos exemplos do SDK para este modo). O *timeout* deste modo foi definido como ilimitado para que o dispositivo, enquanto estiver ligado, permaneça a anunciar-se neste modo, estando sempre disponível para a qualquer momento estabelecer uma nova conexão. O modo *Idle* é usado quando o estado *sleep* do dispositivo é ativado, para que não sejam gerados eventos *advertising*.

Seguidamente, na Figura 44 é apresentado um diagrama com a sequência de mensagens de uma configuração típica, usando apenas o modo *Fast* e o modo *Idle*. No diagrama, visualiza-se que, inicialmente, o modo *Fast* é configurado e é estabelecida uma conexão. Posteriormente, a conexão é perdida e, perante essas circunstâncias, o modo *Fast* é novamente acionado, sendo que nenhuma conexão é estabelecida antes do *timeout*. Após ser atingido o *timeout*, é ativado o modo *Idle* e a aplicação é colocada no estado *sleep*.

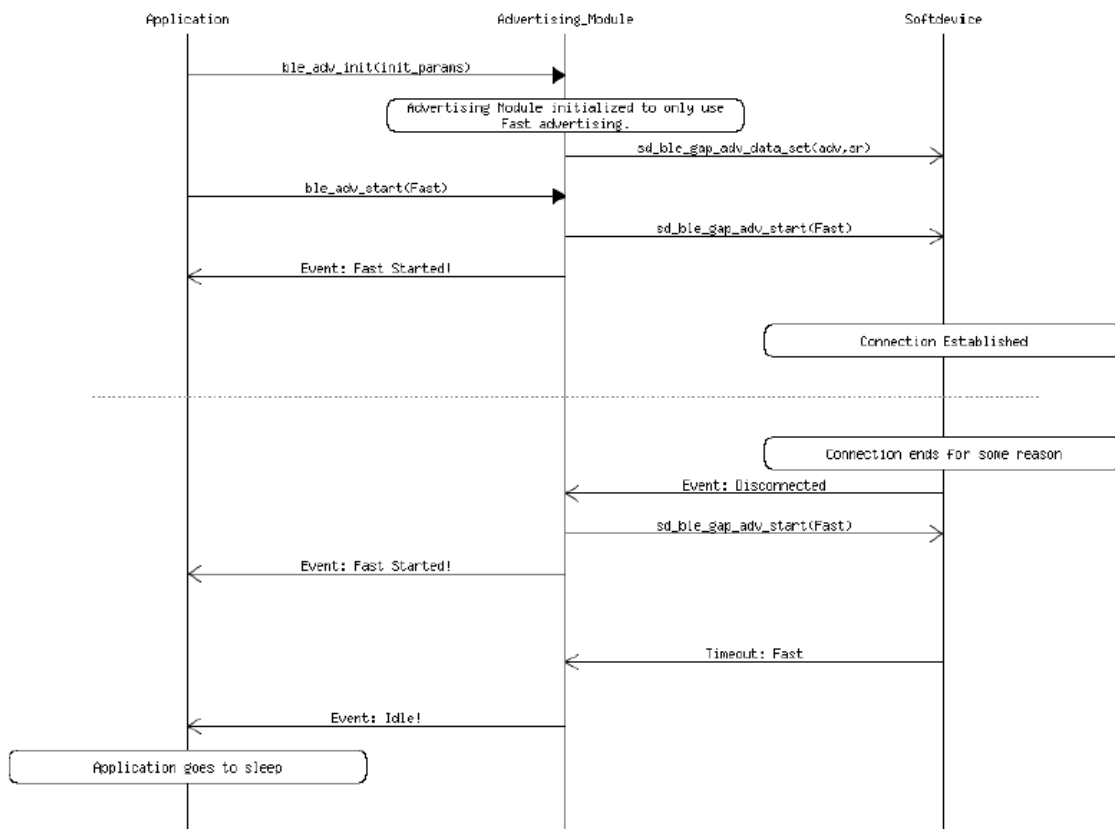


Figura 44: Sequência de mensagens de uma configuração típica do módulo *advertising* [53]

O projeto desenvolvido é semelhante a este exemplo, com a particularidade de em vez de ser o modo *Idle*, resultante do *timeout* do modo *Fast*, a ativar o estado *sleep*, é a aplicação que ao detetar que o botão foi pressionado por um período superior a 5 segundos, coloca o módulo *advertising* no estado *Idle*.

4.1.2 Processamento das tramas BLE para controlo dos LEDs

A comunicação BLE entre a aplicação e o *firmware* é gerida por uma pilha de eventos BLE. Quando é enviada uma trama BLE, a partir da aplicação, a pilha de eventos BLE recebe um pedido de escrita GATT e gera uma interrupção, que por sua vez invoca a função desenvolvida para processar a trama.

Os LEDs que estão a ser usados neste projeto são LEDs endereçáveis individualmente e por isso é necessário atribuir a cada LED uma cor, uma intensidade luminosa, um padrão e a frequência de repetição desse padrão. Sendo o sistema constituído por um número N de LEDs é imperativo estabelecer um mecanismo de formação de tramas BLE capaz de agregar toda a informação.

A padronização da trama BLE é conseguida estipulando que as tramas são escritas em hexadecimal e que têm de dimensão mínima 6 *bytes*. O primeiro *byte* define a que conjunto de LEDs se destina o comando, ou seja, o *byte* é dividido em 2 conjuntos de 4 bits em que o primeiro conjunto indica o número do primeiro LED e o segundo conjunto indica o número do último LED. Os 3 *bytes* que se seguem na trama definem a cor RGB e a intensidade luminosa a aplicar a esses LEDs, sendo que o segundo *byte* corresponde à cor vermelha (R), o terceiro *byte* à cor verde (G) e o quarto *byte* à cor azul (B). Todas as cores derivam da combinação destas 3 cores primárias e são definidas juntamente com a intensidade luminosa numa escala de 0x00 a 0xFF. O quinto *byte* define o padrão a aplicar aos LEDs permitindo, por exemplo, piscar os LEDs a uma determinada frequência, ter dois LEDs a alternarem a cor entre si. O sexto *byte* define a frequência de repetição do padrão escolhido. A Figura 45 representa a padronização definida para a trama BLE.



Figura 45: Padronização definida para a trama BLE

Através desta padronização consegue-se simplificar a construção e reduzir, na maioria dos casos de uso, o tamanho da trama BLE. Por exemplo, quando se pretende acender todos os LEDs com cor branca, basta definir que o LED de início é o LED com o número 1, que o LED de fim é o LED número N do sistema e definir o código hexadecimal corresponde à cor branca (0xFFFFFF). A definição dos últimos dois *bytes* será explicada mais à frente, assumindo-se para já que possuem o valor, por omissão, de 0x00. Este exemplo corresponde ao caso de uso mais simples em que a trama tem o comprimento de 6 *bytes*. A Figura 46 mostra a aplicação prática deste exemplo num sistema de 8 LEDs.

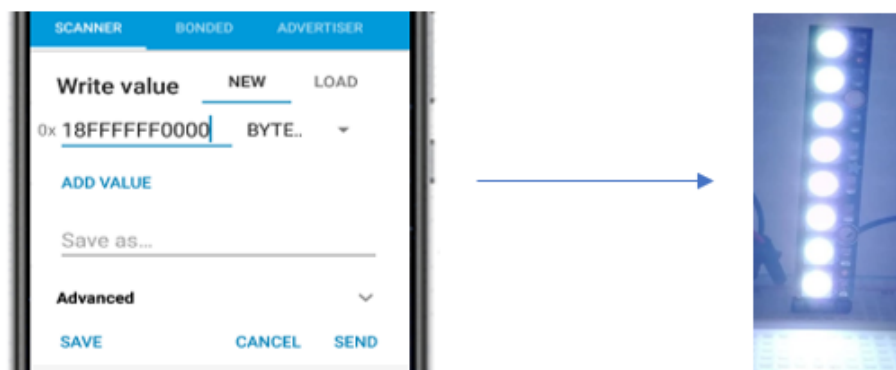


Figura 46: Resultado do envio de uma trama BLE que define a mesma cor (branco = 0xFFFFFF) para todos os LEDs

O mecanismo para definir diferentes cores para diferentes conjuntos de LEDs é obtido estendendo-se o tamanho da trama, isto é, a trama BLE enviada passa a ser constituída por várias subtramas de 6 bytes. Para cada subtrama define-se o LED inicial, o LED final, o padrão e a frequência correspondente a cada conjunto. O número de *bytes* total da trama é sempre múltiplo de 6 e o pior caso ocorre quando se define uma cor diferente para cada um dos LEDs. Nesse caso o comprimento da trama, em *bytes*, é igual a 6 vezes o número de LEDs. A Figura 47 mostra o envio de uma trama BLE onde se define uma cor diferente para cada um dos 5 LED, utilizando assim 30 *bytes*.

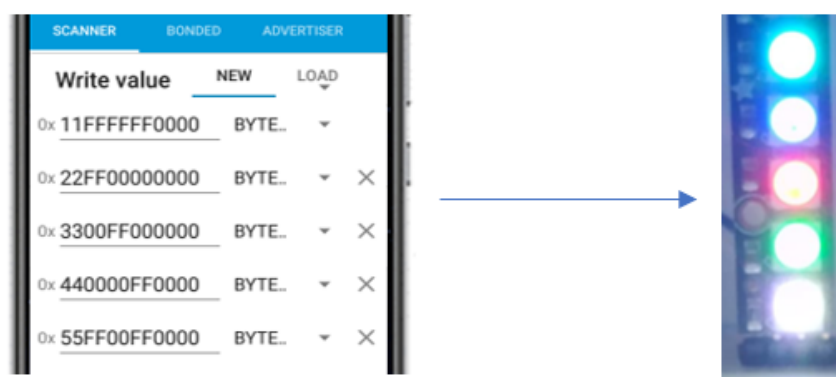


Figura 47: Resultado do envio de uma trama BLE que define uma cor diferente para 5 LEDs

Os códigos hexadecimais dos padrões implementados são apresentados na Tabela 10.

Código	Padrão
0x00	Os LEDs ficam acessos permanentemente com a cor especificada. O valor especificado no sexto <i>byte</i> não é utilizado.
0x01	Os LEDs piscam à frequência especificada.
0x02	A cor roda à direita, isto é, a cor do LED na posição $i+1$ passa a ser a cor do LED na posição i . A cor do primeiro LED será igual à cor que estava anteriormente no LED da última posição.
0x03	A cor roda à esquerda, isto é, a cor do LED na posição $i-1$ passa a ser a cor do LED na posição i . A cor do último LED será igual à cor que estava anteriormente no primeiro LED.

0x04	Os LEDs de número par trocam de cor com o LED de número ímpar à sua direita. Se existir um número ímpar de LEDs no sistema, o último LED permanece com a cor inalterada.
0x05	Os LEDs de número ímpar trocam de cor com o LED de número par à sua esquerda. Se existir um número ímpar de LEDs no sistema, o primeiro LED permanece com a cor inalterada.
0x06	Este padrão oferece uma alternativa para controlar a intensidade luminosa dos LEDs. Se este padrão for selecionado o sexto <i>byte</i> da trama é utilizado para indicar o nível de intensidade numa escala de 0x00 a 0xFF. O nível de intensidade indicado é aplicado às 3 componentes RGB.
0x07 - 0xFF	Não foi implementado nenhum padrão para estes códigos. Por defeito, executam a mesma função que o código 0x00.

Tabela 10: Códigos hexadecimais dos padrões implementados

Relativamente à frequência de repetição dos padrões foram definidos valores entre 2.08mHz e 20Hz. As repetições periódicas foram implementadas com recurso a *timers* que, quando atingido o valor de tempo especificado, geram interrupções. Ao todo foram definidos 218 valores de *timers*, portanto por uma questão de simplificação na Tabela 11, os códigos hexadecimais são apresentados em grupos fazendo-se corresponder o timer inicial ao primeiro código, o timer final ao último código e especificando o incremento temporal.

Código	Timer Inicial	Timer Final	Incremento
0x00 - 0x60	50 milissegundos	1 segundo	10 milissegundos
0x61 - 0x72	1.5 segundos	10 segundos	0.5 segundos
0x77 - 0xCC	11 segundos	100 segundos	1 segundo
0xCD - 0xD9	120 segundos	480 segundos	30 segundos

Tabela 11: Códigos hexadecimais que definem a frequência de repetição dos padrões

No *firmware*, quando é recebida uma nova trama BLE é gerada uma interrupção e a função *on_write()* é invocada. A função *on_write()* é responsável por processar a trama BLE e organizar a informação em comandos, que posteriormente serão enviados para os LEDs. O tamanho em *bytes* da trama BLE é conhecido, portanto o que a função faz é separar a trama em subtramas de 6 *bytes* e, dessa forma extrair o número do LED inicial, o número do LED final, a cor a aplicar aos LEDs, o padrão e a frequência de alternância do padrão. Estas são as informações necessárias para definir o comando.

Após definir o comando, compara-se o padrão desse comando com o padrão do comando anterior, e se forem iguais os comandos são agregados. Esta ação é necessária porque um padrão pode ser aplicado a LEDs consequentes com cores diferentes, mas para se especificar cores diferentes tem de ser especificadas subtramas diferentes. Desta forma, agregando as subtramas consequentes com o mesmo padrão, num mesmo comando, é possível definir casos de uso em que, por exemplo, temos um LED com cor vermelha e um LED com cor verde a alternar a cor entre si.

Por fim, verifica-se se o padrão é o que permite controlar a intensidade luminosa. No caso de resposta afirmativa, converte-se o sexto *byte* da trama em percentagem. A Figura 48 representa a sequência de instruções da função *on_write()*.

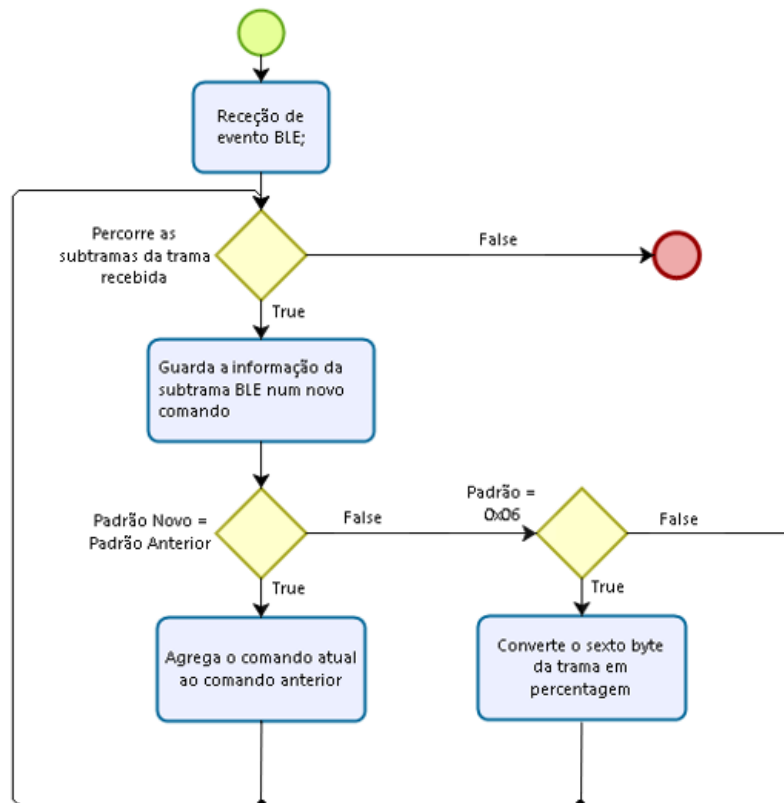


Figura 48: Diagrama explicativo do algoritmo da função *on_write()*

4.2. Interface Firmware - LEDs Endereçáveis

O controlo dos LEDs endereçáveis WS2812B é realizado através de um único sinal, sendo que o LED recebe o sinal de dados através do pino DIN e envia o sinal para o LED seguinte através do pino DOUT. A transferência de dados utiliza o princípio da comunicação *single* NZR, que consiste em, após um *power-on reset*, o primeiro LED do sistema recebe a trama de dados e retém os primeiros 24 bits de dados, enviando a trama restante para o LED seguinte. O processo repete-se para todos os LED do sistema, ficando a trama de dados reduzida em 24 bits a cada LED.

O facto de os LEDs serem controlados por um único sinal de dados implica que a definição dos níveis lógicos, na construção do sinal de dados, cumpra rigorosamente a duração estipulada na ficha técnica. O tempo de transferência de dados é definido por $T_{HIGH} + T_{LOW} = 1.25\mu s \pm 600ns$. A Tabela 12 apresenta os tempos de transferência de dados especificados para os LEDs WS2812B.

Designação	Descrição	Duração	Tolerância
T0L	Código 0: Tempo de tensão baixa	0.85 μs	$\pm 150 ns$
T0H	Código 0: Tempo de tensão alta	0.4 μs	$\pm 150 ns$
T1L	Código 1: Tempo de tensão baixa	0.45 μs	$\pm 150 ns$
T1H	Código 1: Tempo de tensão alta	0.8 μs	$\pm 150 ns$
RES	<i>Reset</i> : Tempo de tensão baixa	>50 μs	

Tabela 12: Tempos de transferência de dados nos LEDs WS2812B [30]

A Figura 49 apresenta a sequência gráfica dos tempos de transferência de dados dos LEDs WS2812B.

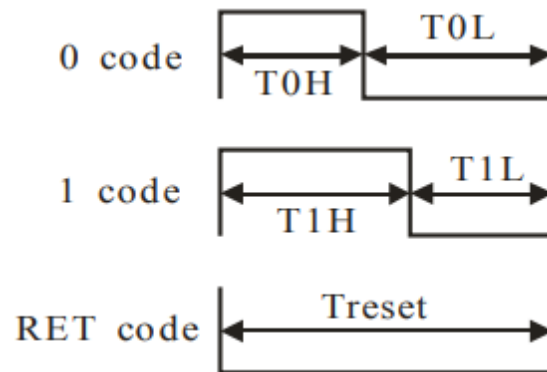


Figura 49: Sequência gráfica dos tempos de transferência de dados [30]

A transferência de dados entre o *firmware* e os LEDs é implementada utilizando o protocolo de transporte de dados *Inter-IC Sound* (I2S). O I2S é um protocolo de transferência de dados série tipicamente usado para estabelecer a *interface* entre dispositivos de áudio digital.

A seção 4.2.1 Especificações do protocolo I2S apresenta as principais características que definem a implementação de uma comunicação I2S. A seção 4.2.2 Implementação da interface *Firmware - LEDs* Endereçáveis apresenta a forma como o protocolo foi implementado no projeto e a estratégia utilizada para construir as tramas de dados que serão enviadas para os LEDs.

4.2.1 Especificações do protocolo I2S

O I2S é um protocolo de transferência de dados série desenvolvido em 1986 pela Philips Semiconductor, atualmente, NXP Semiconductor. O protocolo foi desenhado para transferência de dados de áudio digital e caracteriza-se por utilizar um barramento de 3 sinais: o sinal de relógio (SCK), o sinal de seleção de palavra (WS), também designado por *Left Right Clock* (LRCK) e o sinal de dados série (SD) [54].

O módulo BMD-300 está equipado com a interface I2S, que possui as seguintes características [55]:

- Modos *Master* e *Slave*;
- Transmissão de áudio bidirecional simultâneo (Tx e Rx);
- Formatos: Original de dois canais I2S e os formatos alinhado à esquerda e alinhado à direita;
- Largura de amostra de 8, 16 e 24 bits;
- Várias taxas de amostragem;

A especificação do protocolo I2S define 2 modos de operação, o modo *Master* e o modo *Slave*. O sinal de relógio (SCK) e o sinal de seleção de palavra (LRCK) são fornecidos pelo *Master* ao *Slave*.

O módulo suporta a transmissão (Tx) e a recepção (Rx) de dados série simultaneamente. Em ambos os casos os dados são transmitidos de forma síncrona com os sinais SCK e LRCK. Os dados Tx são escritos no pino STDOUT na transição descendente do SCK e os dados RX são lidos no pino SDIN na transição ascendente do SCK. O *bit* mais significativo (MSB) é sempre transmitido em primeiro lugar. Os sinais Tx e Rx estão disponíveis em ambos os modos e podem ser habilitados/desabilitados independentemente.

Ao usar o formato original de 2 canais I2S, cada trama contém um par de amostras esquerda e direita, sendo a amostra esquerda transmitida quando o sinal LRCK tem nível lógico 0 e a amostra direita transmitida quando o sinal LRCK tem nível lógico 1. A trama começa a ser amostrada a partir da segunda transição descendente do sinal SCK, após a transição do sinal LRCK. A Figura 50 exemplifica a utilização do formato original de 2 canais I2S.

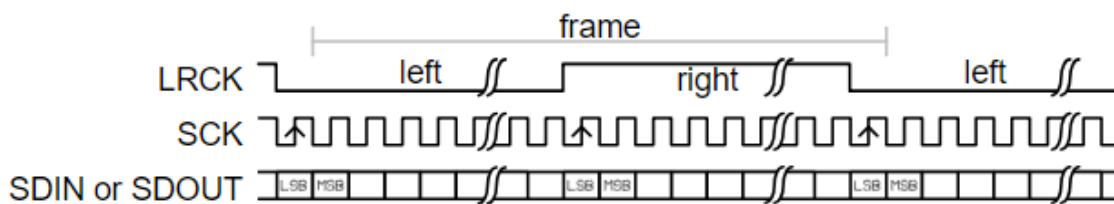


Figura 50: Formato original de dois canais I2S [55]

Nos modos alinhados (à esquerda ou à direita), cada trama contém um par de amostras esquerda e direita, com a amostra esquerda a ser transmitida quando o sinal LRCK tem nível lógico 1 e a amostra direita a ser transmitida quando o sinal LRCK tem nível lógico 0. A trama começa a ser amostrada a partir da primeira transição ascendente do sinal SCK após a transição do sinal LRCK. A Figura 51 exemplifica a utilização do formato I2S alinhado à esquerda ou alinhado à direita.

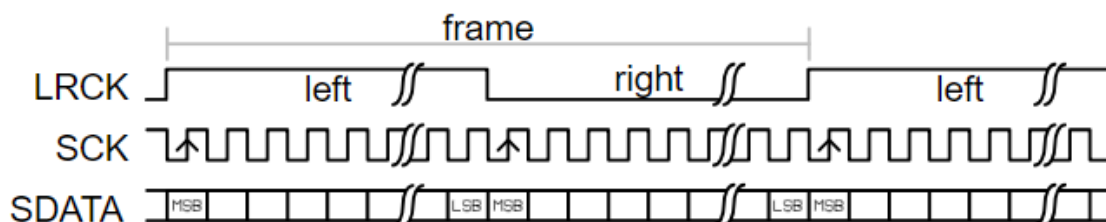


Figura 51: Formato I2S alinhado (à esquerda ou à direita) [55]

No modo *Master*, o tamanho de meia trama, em número de períodos de SCK, é igual à largura da amostra, em número de bits, portanto a configuração de alinhamento não importa uma vez que cada meia trama começa pelo bit mais significativo (MSB) da amostra e termina com o bit menos significativo (LSB) da amostra.

No modo *Slave*, a largura da amostra não precisa obrigatoriamente de ser igual ao tamanho de meia trama, podendo existir mais ou menos períodos de SCK do que números de bits na amostra. Neste caso, sendo o MSB transmitido em primeiro lugar mantém uma posição fixa na trama, enquanto que a posição do LSB depende do tamanho da trama, podendo existir 4 casos possíveis.

No caso de alinhamento à esquerda em que o número de períodos de SCK é maior que a largura da amostra, assume-se, para os dados recebidos em SDIN e para os dados enviados em SDOUT que todos os bits após o LSB do valor da amostra serão descartados.

No caso de alinhamento à esquerda em que o número de períodos de SCK é menor que a largura da amostra, assume-se que os dados enviados e recebidos em SDOUT e SDIN são truncados com os LSBs a serem removidos em primeiro lugar.

No caso de alinhamento à direita em que o número de períodos de SCK é maior que a largura da amostra, assume-se que para os dados recebidos em SDIN todos os bits anteriores ao MSB da amostra devem ser descartados e que para os dados enviados através de SDOUT todos os bits depois do LSB da amostra terão valor zero.

No caso de alinhamento à direita em que o número de períodos de SCK é menos que a largura da amostra, assume-se que os dados recebidos em SDIN serão estendidos em sinal para o número de bits da largura da amostra, antes de serem gravados na memória, e os dados enviados em SDOUT serão truncados, com os LSBs a serem removidos em primeiro lugar.

O protocolo I2S utiliza *EasyDMA* para aceder à memória RAM, onde estão guardados os dados, sem intervenção do CPU. O *EasyDMA* é um barramento mestre semelhante ao CPU que está conectado ao barramento AMB (*Advanced High-Performance Bus*), possibilitando o acesso direto à memória RAM para, por exemplo, ler e escrever dados. O *EasyDMA* não consegue aceder à memória *flash*.

4.2.2 Implementação da *interface Firmware* - LEDs Endereçáveis

A transferência de dados do *firmware* para os LEDs endereçáveis acontece sempre que existe um novo comando com informação para alterar o estado atual dos LEDs, podendo o comando ser gerado de 3 formas distintas: pela chegada de um novo evento BLE, pressionando o botão ou tendo sido cumprido um *timer* que implique que o padrão atual seja atualizado. Para realizar a transferência de dados entre o *firmware* e os LEDs endereçáveis implementou-se uma *interface* com base no protocolo I2S.

A implementação da *interface* foi desenvolvida tendo por base as funções dos *drivers* da comunicação I2S, disponibilizados no nRF5 SDK. Os *drivers* definem que a comunicação é desencadeada em 4 fases distintas. A primeira fase é a de configuração dos parâmetros da comunicação, necessária sempre que se pretende fazer uma transferência de dados. A segunda fase é a de transferência dos dados, que requer que as informações sobre o novo padrão sejam convertidas em tramas constituídas por padrões de bits. A terceira fase é de parar a transferência de dados e a quarta fase consiste em terminar a comunicação I2S estabelecida. O diagrama da Figura 52 representa a sequência de fases da comunicação I2S.

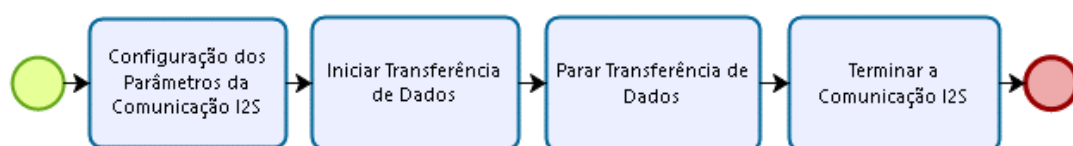


Figura 52: Diagrama sequência das fases da comunicação I2S

Na fase de configuração dos parâmetros da comunicação I2S é necessário definir: o modo de operação, o formato I2S, o tipo de alinhamento, a largura da amostra, o tipo de canal, os pinos utilizados na *interface* e a frequência do relógio do *Master*.

O modo de operação é definido como *Master*, uma vez que é o *firmware* o responsável por gerar os sinais SCK, LRCK e construir a trama de dados que será enviada para os LEDs endereçáveis através do pino SDOUT. Em termos de formato, optou-se por utilizar o formato original de dois canais I2S com alinhamento à esquerda. A largura da amostra foi definida com o valor padrão de 16 bits. Em termos de configuração de pinos a usar na *interface*, foi apenas definido o pino P0.26 como sinal SDOUT, uma vez que a comunicação com os LEDs requer apenas o envio do sinal de dados.

O sinal de relógio do *Master* (MSC) é sintetizado a partir do cristal interno do módulo BMD-300, de frequência 32 MHz, e possui a frequência de 3.2 MHz. Os sinais LRCK e SCK derivam da frequência MSC e definem-se por.

$$LRCK = \frac{MCK}{32} = \frac{3.2 \text{ MHz}}{32} = 100 \text{ KHz} \quad (4.1)$$

$$SCK = 2 \times LRCK \times CONFIG.SWIDTH = 2 \times 100 \text{ KHz} \times 16 = 3.2 \text{ MHz} \quad (4.2)$$

A constante CONFIG.SWIDTH define-se como sendo a largura da amostra.

Após configurar os parâmetros da comunicação, segue-se a fase de transferência de dados. Nesta fase é necessário converter os comandos de controlo dos LEDs em bits, por forma a construir a trama que será transferida para os LEDs. Por esta razão, definiu-se que o nível lógico “0” é representado pelo padrão de bits “HLLL” que corresponde em hexadecimal a 0x08 e o nível lógico “1” é representado pelo padrão de bits “HHHL” que corresponde em hexadecimal a 0x0E. A Figura 53 apresenta a forma de onda obtida no osciloscópio, representativa do nível lógico “0”.

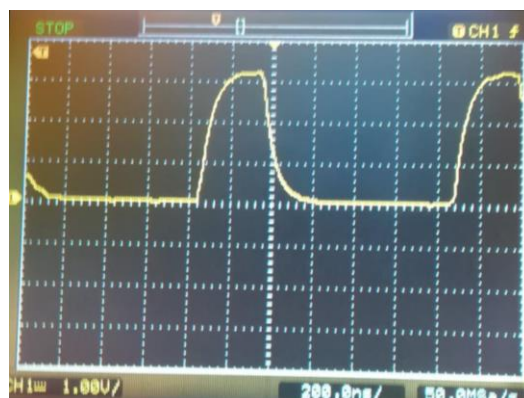


Figura 53: Forma de onda corresponde ao nível lógico “0”

A partir da análise da Figura 53 é possível concluir que o valor T0H é de 0.4μs e que o valor de T0L é de 0.85μs, como especificado na ficha técnica dos LEDs WS2812B. A Figura 54 apresenta a forma de onda obtida no osciloscópio, representativa do nível lógico “1”.

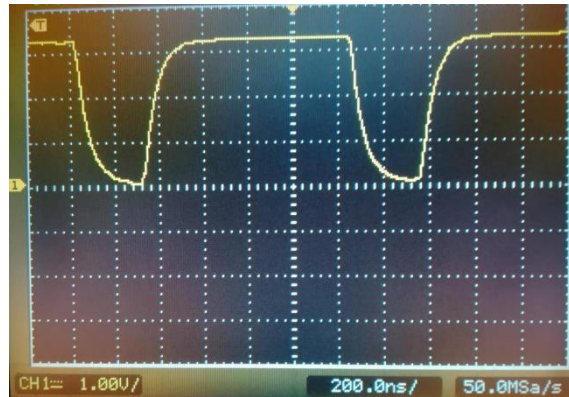


Figura 54: Forma de onda corresponde ao nível lógico “1”

A partir da análise da Figura 54 é possível concluir que o valor T_{1L} é de $0.45\mu s$ e que o valor de T_{1H} é de $0.8\mu s$, como especificado na ficha técnica dos LEDs WS2812B.

A trama de controlo transferida é composta por 24 bits para cada LED, sendo a ordem definida, do bit mais significativo para o bit menos significativo, por 8 bits referentes à cor verde, 8 bits referentes à cor vermelha e, por fim, 8 bits referentes à cor azul.

Para construir a trama de controlo foi desenvolvida uma função em que, para cada LED, começa por definir uma variável do tipo inteiro com 32 bits na qual é guardada a informação das 3 cores. Os bits correspondentes à componente verde ocupam as primeiras 8 posições mais significativas, seguindo-se os 8 bits referentes à componente vermelha, ficando, assim, os restantes 8 bits associados à cor verde nas 8 posições seguintes menos significativas.

Seguidamente, para converter a informação nos padrões de bits definidos é realizado um AND lógico bit a bit entre essa variável e $0x00C00000$, permitindo converter 2 bits a cada iteração. O resultado da operação será um de 4 valores possíveis: $0x00400000$ que corresponde ao padrão HLLL HHHL, $0x00800000$ que corresponde ao padrão HHHL HLLL, $0x00c00000$ que corresponde ao padrão HHHL HHHL e $0x00000000$ que corresponde ao padrão HLLL HLLL. No total são realizadas 12 operações por cada LED.

Por fim, após serem transmitidas todas as tramas é necessário parar a transmissão de dados e terminar a comunicação, libertando-se, assim, a memória dinâmica alocada durante a transmissão dos dados. A Figura 55 representa a sequência de instrução da função implementada para construir as tramas de controlo dos LEDs endereçáveis.

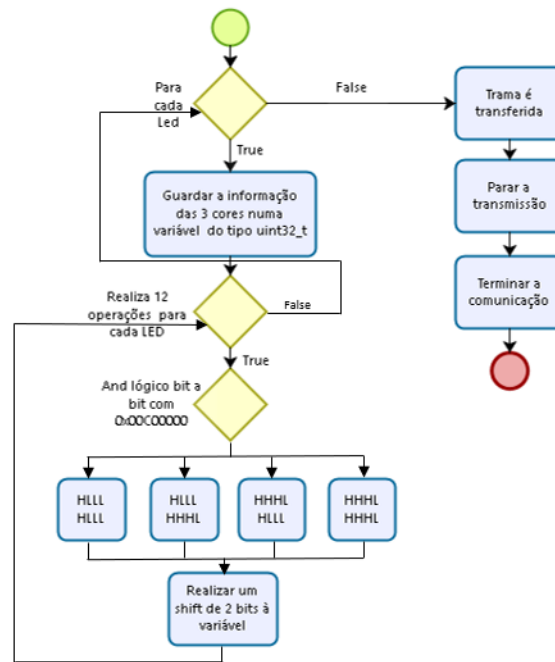


Figura 55: Algoritmo da função que constrói as tramas de controlo dos LEDs

4.3. Visão Geral do *Firmware* Desenvolvido

Em suma, a camada de *firmware* desenvolvida no módulo BMD-300 tem como objetivo estabelecer a comunicação entre a aplicação *mobile* e os LEDs endereçáveis WS2812B. Para estabelecer a comunicação foram implementadas duas *interfaces*, a *interface* aplicação *mobile* - *firmware* na qual a transferência de dados é realizada através do protocolo BLE e a *interface* *firmware* - LEDs endereçáveis na qual a transferência de dados ocorre com base no protocolo I2S.

Na *interface* aplicação - *firmware* foi implementado um mecanismo que permite construir e interpretar as tramas BLE, permitindo especificar a cor, intensidade luminosa, padrão, frequência de repetição do padrão e indicar os LEDs a que o comando se destina, possuindo a trama um tamanho definido pelo número de LEDs presente.

Na *interface* *firmware* - LEDs endereçáveis foi implementada uma função apta a converter os comandos de controlo dos LEDs em padrões de bits, capazes de satisfazer as especificações temporais de transferência de dados dos LEDs WS2812B.

A Figura 56 representa as duas *interfaces* que caracterizam o sistema.

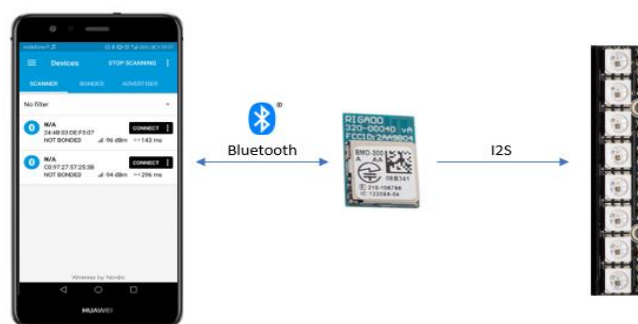


Figura 56: *Interfaces* que caracterizam o sistema

Capítulo 5

Prototipagem das PCBs

O presente capítulo irá apresentar a abordagem que foi seguida no projeto do *layout* das PCBs. O projeto do *layout* foi desenvolvido com recurso ao programa de *software Eagle* [56]. O *Eagle* é um editor de *layout* gráfico de simples utilização que permite realizar tarefas como, captura esquemática, desenho de PCB e *auto-routing* de sistemas eletrónicos.

Tendo em conta a finalidade do projeto, foram desenvolvidas duas PCBs. A PCB do sistema retratada na secção, 5.1. PCB do Sistema, que inclui o circuito de alimentação e o circuito de comunicação e controlo do sistema. Na secção 5.2. PCB do LED é retratada a PCB que serve de suporte ao circuito de controlo e alimentação para um LED, podendo ser replicada para o número de LEDs que se pretenda.

5.1. PCB do Sistema

No desenho da PCB do sistema foi necessário ter em consideração as recomendações de *layout* sugeridas nas fichas técnicas dos componentes.

Para garantir as condições ideais de funcionamento do componente responsável pela gestão da carga da bateria (MCP73837) garantiu-se que os pinos V_{BAT} e V_{SS} estavam o mais próximos possível dos terminais de alimentação da bateria. Desta forma foi prevenida a ocorrência de quedas de tensão geradas por longas pistas de cobre.

No regulador de tensão LDO TLV70033DDCT é recomendado que os condensadores de *bypass* tanto do pino IN como do pino OUT sejam colocados o mais próximo possível desses pinos, para melhorar a resposta transitória do dispositivo e reduzir o ruído de saída. Esta recomendação permite obter uma melhor estabilidade da tensão obtida na saída do regulador.

O módulo BMD-300 é o componente que apresenta maiores limitações de *layout* devido à antena integrada. A antena integrada deverá ser mantida livre de cobre ou outro qualquer metal e é necessário existir um plano de, no mínimo, 30mm × 11mm para garantir que a potência efetiva que a antena é capaz de irradiar não seja reduzida. O módulo deve ainda ser colocado na borda da PCB com a antena virada para o lado de fora. A Figura 57 representa o desenho de *layout* recomendado para o módulo BMD-300.

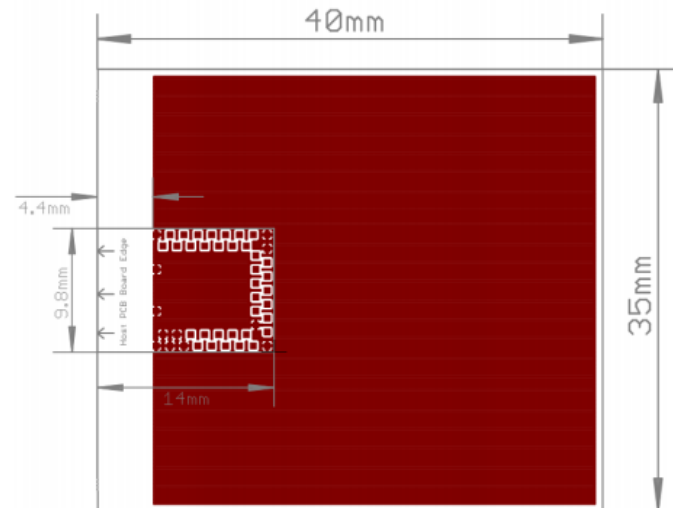


Figura 57: *Layout* RF recomendado para o módulo BMD-300 [36]

O *layout* da PCB iniciou-se pela distribuição dos componentes de forma a seguir as recomendações dos fabricantes, facilitar as ligações entre os componentes e de forma a ocupar a menor área possível. A Figura 58 mostra a distribuição dos componentes no *layout*.

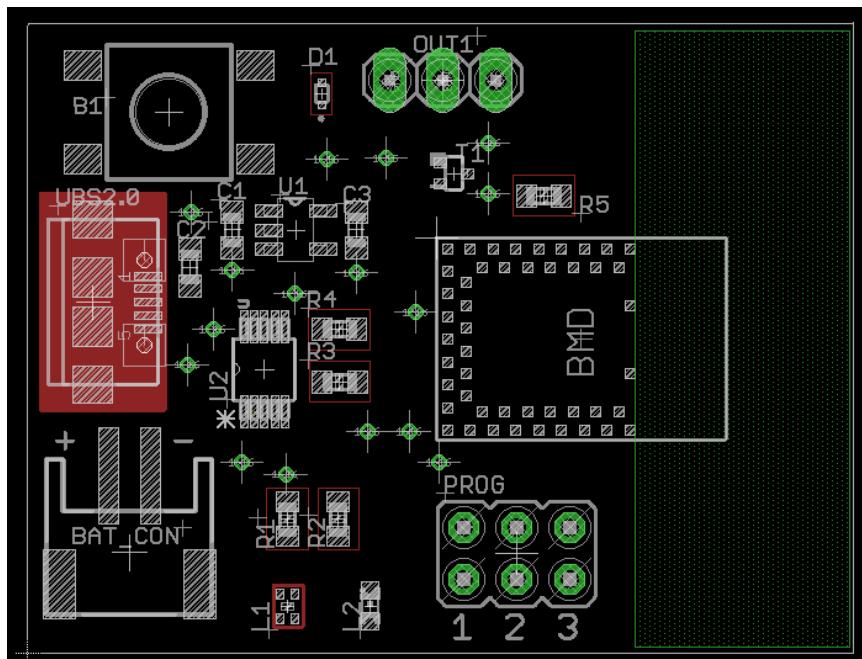


Figura 58: Distribuição dos componentes no *layout* da PCB do Sistema

O *layout* da PCB do sistema é constituído por duas camadas, a camada *Top* e a camada *Bottom*. A Figura 59 representa a camada *Top* e a Figura 60 representa a camada *Bottom*.

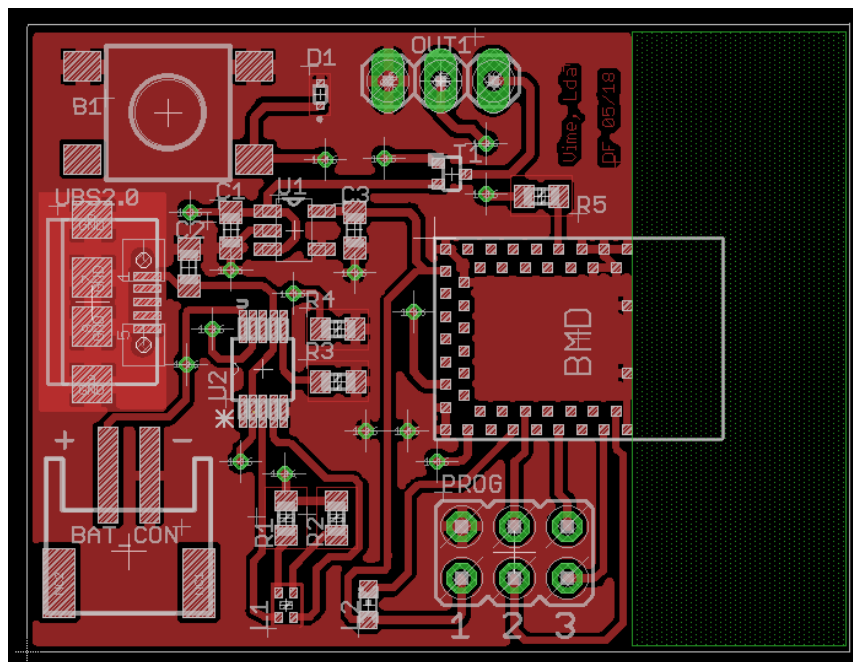


Figura 59: Camada *Top* da PCB do Sistema

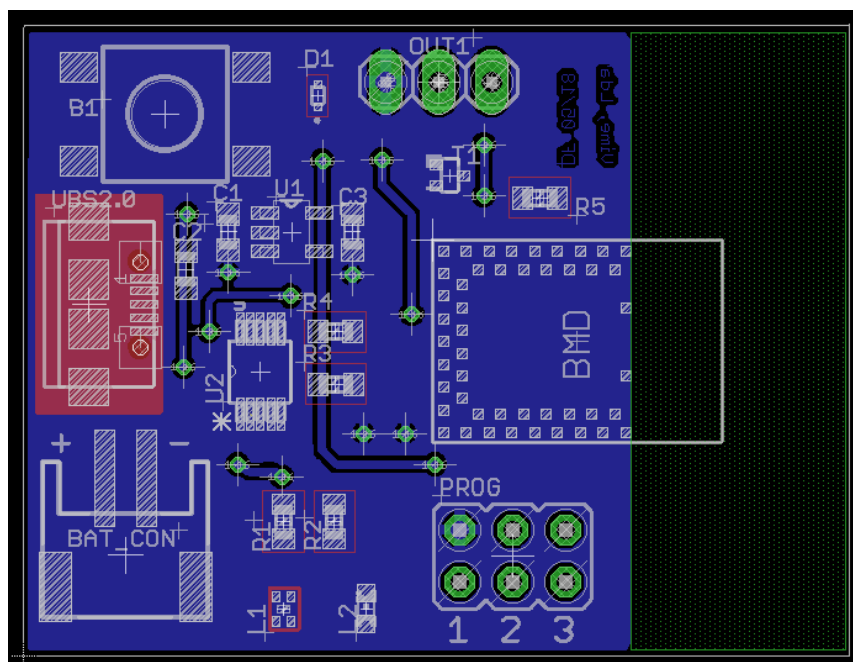


Figura 60: Camada *Bottom* da PCB do Sistema

O *layout* final da PCB do sistema ocupa uma área $4 \times 3 \text{ cm}^2$. A Figura 61 representa o *layout* final da PCB do sistema.

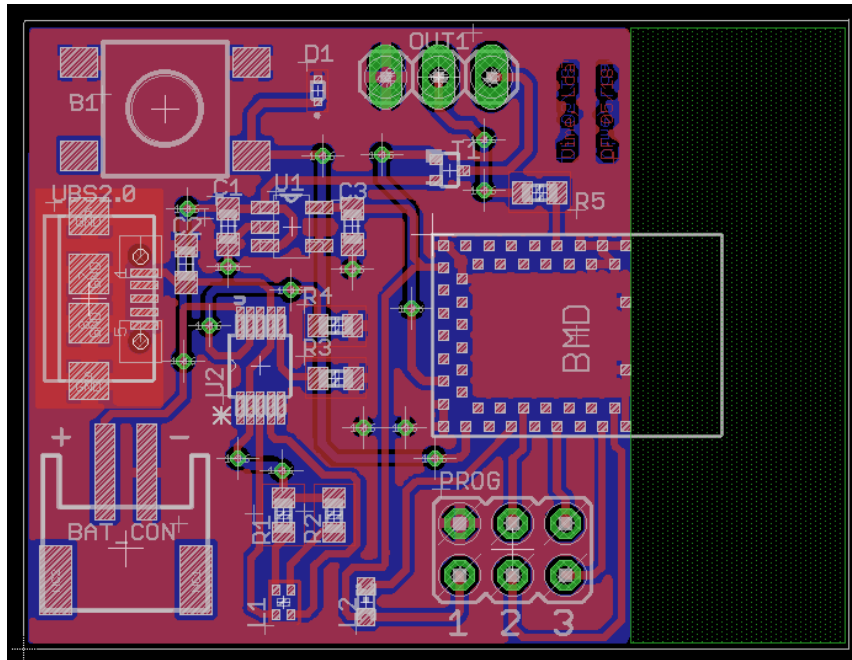


Figura 61: Layout da PCB do Sistema

5.2. PCB do LED

Na prototipagem da PCB do LED foram tidos em consideração os seguintes requisitos funcionais. O objetivo é desenhar uma PCB que possa albergar um LED WS2812B e cuja *interface* para os sinais de entrada e de saída seja prática para uma utilização em que se tem várias PCBs interligadas, podendo estar contíguas ou afastadas espacialmente. Para satisfazer este requisito optou-se por utilizar *pin header* com espaçamento de 2,54mm tanto para os sinais de entrada como para os sinais de saída do LED.

Um segundo requisito prendia-se com a existência de espaço suficiente em redor do LED para ser encaixado no mesmo uma peça mecânica. Esta peça permitirá dotar o produto de funcionalidades estendidas, quer sejam pela fixação de guias de luz, quer seja pela sua combinação com outros produtos. A Figura 62 mostra um exemplo de uma das peças que se pretende encaixar no LED. Na disposição dos componentes no *layout* da PCB teve-se em consideração que a espessura dessa peça é de 1.6mm e reservou-se essa distância entre o LED e os pinos.



Figura 62: Representação 3D da peça mecânica que poderá ser encaixada no LED

A Figura 63 mostra a colocação dos componentes no desenho do *layout* da PCB do LED.

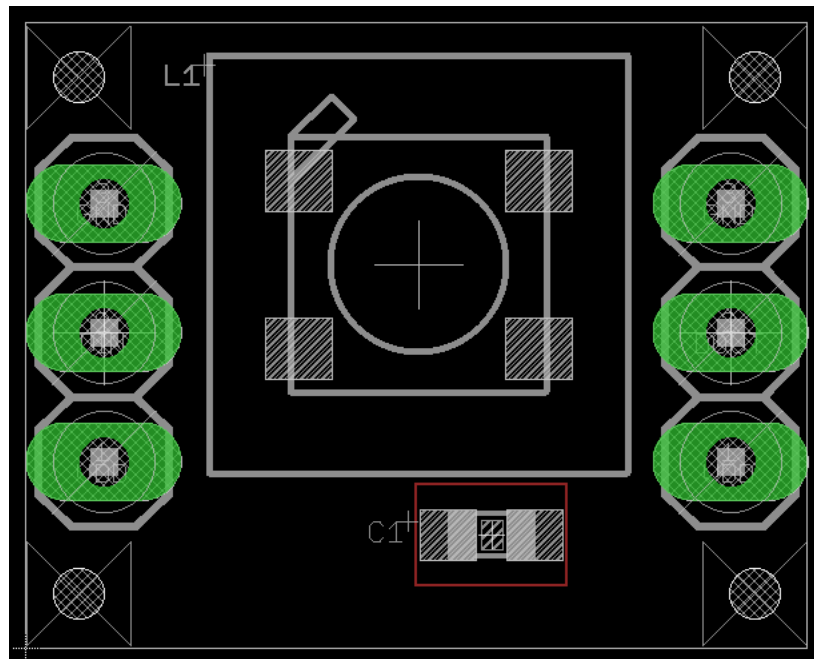


Figura 63: Distribuição dos componentes no *layout* da PCB do LED

O *layout* final da PCB do LED possui apenas uma camada e ocupa uma área de $1.6 \times 1.3 \text{ cm}^2$. O *layout* desta PCB é representado na Figura 64.

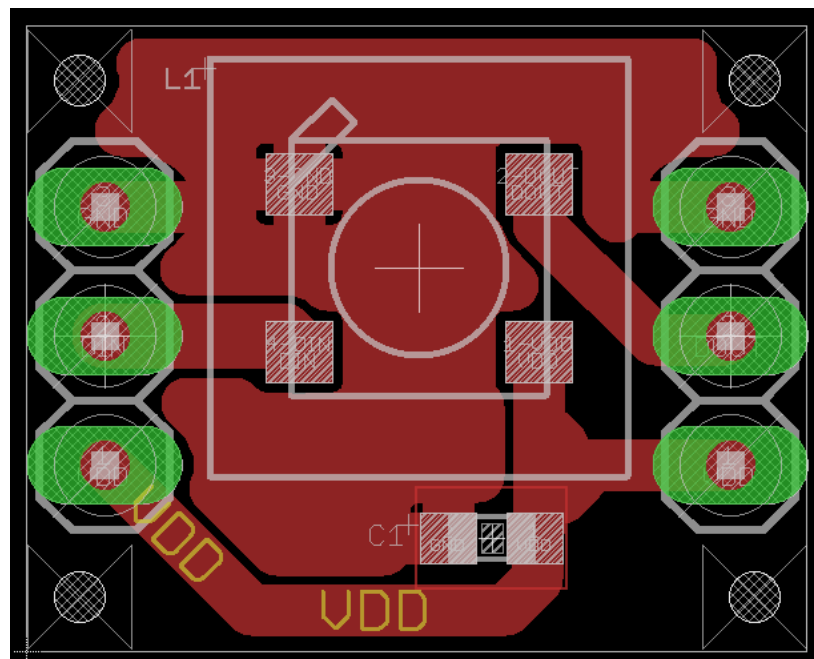


Figura 64: *Layout* da PCB do LED

Em suma, o principal objetivo que guiou a prototipagem do *layout* foi a minimização das dimensões das PCBs.

No que diz respeito à PCB do sistema pode existir uma comparação direta com as dimensões do protótipo anteriormente desenvolvido pela empresa, que tem de dimensões 5cm x 4cm. A PCB agora desenvolvida possui dimensões 4cm x 3cm, permitindo concluir que em termos de área de PCB existiu uma redução de, aproximadamente, 40%, cumprindo-se desta forma o objetivo inicialmente traçado.

A PCB do LED foi desenvolvida com dimensões de 1.6cm x 1.3cm e foi pensada para operar em diferentes casos de utilização. A *interface* dos sinais de entrada e saída da alimentação e de dados é suportada por *pin header* com 2.54mm de espaçamento entre pinos, permitindo, assim, que possam existir casos de uso em que várias PCBs são colocadas lado a lado e casos de uso em que existem várias PCBs espalhadas espacialmente. Esta PCB permite, ainda, o encaixe de uma peça mecânica que poderá estender as funcionalidades da mesma.

Capítulo 6

Teste e Validação dos Circuitos

O presente capítulo incide em descrever os principais resultados obtidos e apresentar os testes realizados ao dispositivo desenvolvido, no sentido de validar a solução apresentada.

A secção [6.1](#). Dispositivo Desenvolvido descreve o dispositivo desenvolvido, o seu modo de operação típico e apresenta um caso de utilização.

A secção [6.2](#). Teste e Consumo de Energia apresenta o consumo de energia do dispositivo tendo em consideração diferentes casos de uso.

A secção [6.3](#). Alimentação através da Porta USB especifica um caso de uso particular, no qual não existe uma bateria ligada e pretende-se que o dispositivo seja alimentado pela porta USB.

6.1. Dispositivo Desenvolvido

O desígnio deste projeto de dissertação foi desenvolver um dispositivo portátil, facilmente instalável em objetos do quotidiano e que fosse capaz de, através da utilização de iluminação ou de efeitos luminosos, lhes conferir novas funcionalidades.

No sentido de tornar o dispositivo facilmente instalável, optou-se por colocar os componentes todos na mesma camada, de forma a minimizar a espessura do dispositivo. O dispositivo desenvolvido possui 7 mm de espessura, sendo o conector da bateria, com 5.5 mm, o componente com maior espessura. Por sua vez, a placa com o circuito do LED endereçável desenvolvida possui de espessura 3 mm. A Figura 65 apresenta o dispositivo desenvolvido.



Figura 65: Fotografia dos circuitos implementados, estando representado, à esquerda o circuito principal e à direita o circuito do LED endereçável

A utilização dos LEDs endereçáveis é adaptável à finalidade pretendida, podendo estes ser utilizados numa configuração em cascata, em que estão próximos uns dos outros, podendo-se inclusivamente encadear PCBs, ou optar por uma solução em que os LEDs são distribuídos espacialmente em redor do dispositivo.

O modo de operação típico do dispositivo é ter uma bateria LiPo sempre conectada, servindo de fonte de alimentação do sistema. Quando está ligado, o dispositivo possui um LED azul que sinaliza o estado da conexão *Bluetooth*, ficando continuamente ligado quando existe uma conexão estabelecida e a piscar em caso contrário. À medida que a bateria começa a ficar descarregada, a luminosidade dos LEDs começa a diminuir, até chegar ao caso limite em que o sistema desliga completamente. No teste realizado conclui-se ainda que, antes do dispositivo desligar por completo, passa por uma fase em que reinicia algumas vezes, isto deve-se ao facto de a bateria apesar de não estar totalmente descarregada já não possuir energia suficiente para manter o dispositivo em funcionamento. Estando a bateria descarregada, deve-se conectar o dispositivo a uma porta USB para carregar a bateria. Durante o processo de carga da bateria, o dispositivo terá um LED aceso com cor vermelha, LED esse que acenderá com cor verde quando a bateria estiver totalmente carregada. A Figura 66 mostra um exemplo de utilização com 8 LEDs.

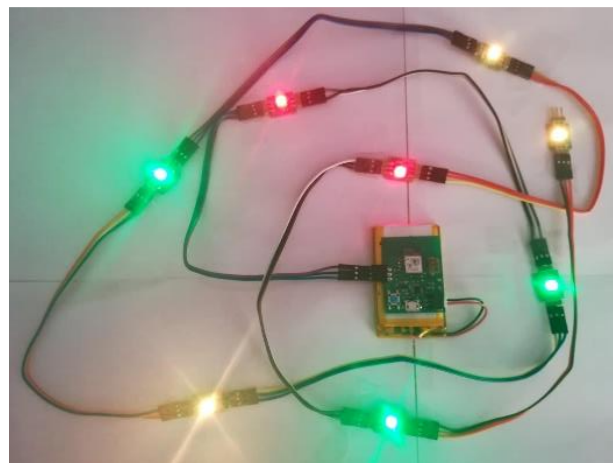


Figura 66: Exemplo de utilização do Dispositivo Desenvolvido

6.2. Teste e Consumo de Energia

O consumo de energia é um dos fatores determinantes na caracterização do dispositivo, uma vez que será alimentado por uma bateria. Nesse sentido, foram realizadas medições para se conhecer os consumos de energia do módulo BMD-300 e dos LEDs endereçáveis WS2812B.

No que diz respeito ao módulo BMD-300, destacam-se 3 modos de operação que requerem consumos de energia diferentes, nomeadamente, o modo de funcionamento normal, o modo de programação e o modo de *sleep*. A Tabela 13 apresenta os valores de consumo de corrente para cada um dos modos de operação medidos experimentalmente.

Modos	Consumo de Corrente
Funcionamento Normal	7.4mA
Programação	5.6mA
<i>Sleep</i>	50.0µA

Tabela 13: Consumo de corrente do módulo BMD-300

Relativamente ao consumo de energia dos LEDs, foram realizadas medições para as três componentes RGB e para a cor branca, que é a cor que possui o maior consumo de corrente, uma vez que é obtida através da combinação das 3 componentes RGB. Considerou-se ainda o facto de aumentar gradualmente a cascata de LEDs no sistema, de forma a conhecer o consumo de energia face ao número de LEDs. A Tabela 14 apresenta os valores de consumo de corrente dos LEDs endereçáveis medidos experimentalmente.

Cor	1 LED	8 LEDs	12 LEDs	16 LEDs
Branco	34.4mA	273.1mA	419.6mA	431.1mA
Vermelho	12.5mA	98.4mA	150.1mA	196.4mA
Verde	11.8mA	98.4mA	149.2mA	196.8mA
Azul	12.4mA	97.9mA	150.6mA	196.7mA
Apagado	0.6mA	4.2mA	6.2mA	8.3mA

Tabela 14: Consumo de corrente dos LEDs Endereçáveis

À medida que se vai aumentando o número de LEDs no sistema o consumo de corrente vai aumentando, sendo o limite imposto pelo transistor NTE4151P, cuja corrente contínua de dreno máxima é de -760mA. Considerando que um LED consome no máximo 34.4mA, pode-se concluir que o número máximo de LEDs que o dispositivo é capaz de controlar é obtido pela equação (6.1).

$$N^{\circ} \text{ de LEDs} = \frac{760 \text{ mA}}{34.4 \text{ mA}} \approx 22 \text{ LEDs} \quad (6.1)$$

Para testar o dispositivo num cenário real, utilizou-se uma bateria LiPo de 3.7V e 1100mAh e ligou-se 8 LEDs ao sistema. O teste consistiu em medir a duração de uma carga completa da bateria e a autonomia do dispositivo. A carga completa da bateria, partido de uma situação em que a bateria estava totalmente descarregada, demorou aproximadamente 2.5 horas. Relativamente à autonomia da bateria, colocou-se o dispositivo a funcionar no caso de uso de

maior consumo de energia, isto é, o caso correspondente a acender os 8 LEDs com cor branca permanentemente, concluindo-se que a autonomia da bateria foi de, aproximadamente, 4 horas, indo ao encontro do valor esperado. O valor esperado é obtido pela equação (6.2).

$$\text{autonomia} = \frac{\text{capacidade da bateria}}{\text{Corrente consumida}} = \frac{1100 \text{ mAh}}{273.1 \text{ mA}} = 4.03 \text{ horas}$$

6.3. Alimentação através da Porta USB

O dispositivo foi projetado para ser alimentado por uma bateria, partindo-se do princípio que existe sempre uma bateria conectada. A porta USB tem a função de, quando conectada, carregar a bateria, alimentando simultaneamente o circuito enquanto a bateria não estiver totalmente carregada. Não sendo obrigatório, é recomendado que quando a bateria está a ser carregada, o dispositivo seja colocado no modo *sleep*, possibilitando desta forma que a carga ocorra no menor tempo possível.

Apesar de não ser um requisito do sistema, foi realizado o teste de desconectar a bateria, deixando o sistema a ser alimentado pela porta USB e chegou-se à conclusão que o dispositivo não funciona corretamente nestas circunstâncias. Isto deve-se ao facto de o componente MCP73837 ter um comportamento indefinido, quando não existe uma bateria no sistema.

O dispositivo possui um modo de teste no qual opera como um regulador de tensão linear, colocando na saída V_{BAT} o valor de tensão, definido de fábrica, do seu regulador interno, podendo ter um valor de 4.20V, 4.35V, 4.4V ou 4.5V. Este modo é definido pela condição $V_{THERM} > VDD - 100mV$ e pode ser acionado não existindo uma bateria ligada ao pino V_{BAT} . Esta condição pode ser obtida ligando-se diretamente o pino V_{THERM} ao pino V_{USB} . Contudo, esta condição não está a ser respeitada, por se desconhecer o comportamento do dispositivo MCP73837 quando a condição $V_{THERM} > VDD - 100mV$ está a ser cumprida e existe uma bateria ligada ao pino V_{BAT} . Por chegada tardia do componente, não existiu a oportunidade de testar esse caso de uso, optando-se por implementar uma solução que cumpre apenas os requisitos.

Uma alternativa a esta implementação seria desenvolver uma solução na qual se separe o processo de carregar a bateria do processo de alimentar o sistema. Isto é, a porta USB em vez de ser apenas ligada ao pino V_{USB} do dispositivo MCP73837, estaria ligada simultaneamente, ao pino V_{USB} e à entrada do regulador de tensão LDO TLV70033DDCT. Esta solução requereria que quando a porta USB estivesse ligada ao sistema, a ligação da bateria à entrada do LDO TLV70033DDCT tivesse de ser interrompida, ficando a bateria apenas ligada ao pino V_{BAT} do gestor de carga da bateria, iniciando o processo de carga. Nestas circunstâncias, a porta USB é responsável por fornecer a alimentação ao sistema e carregar a bateria.

Para implementar esta nova solução seria necessário adicionar um componente ao circuito. Este componente teria de ser capaz de permitir que, quando a porta USB não está conectada, a bateria esteja ligada à entrada do LDO TLV70033DDCT, alimentando o circuito. Quando a porta USB estiver conectada, o componente teria de permitir que a porta USB fosse simultaneamente ligada à entrada do LDO e do gestor de carga da bateria, sendo a bateria desligada da entrada do LDO. A solução encontrada passaria por utilizar um transistor, como por exemplo, o FDFS2P106, que integra no seu *package* um *mosfet Power Trench* de canal-P juntamente com um diodo *schottky*. A Figura 67 representa o símbolo do *mosfet* FDFS2P106.

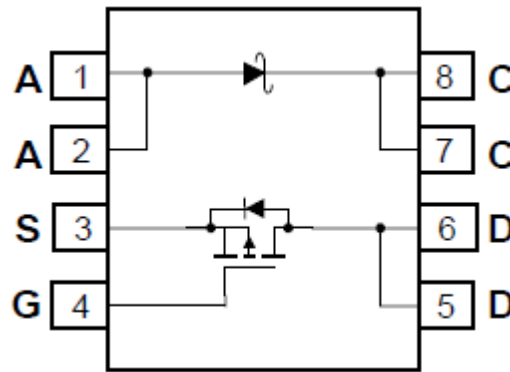


Figura 67: Símbolo do *mosfet Power Trench* de canal-P FDFS2P106 [57]

A Figura 68 representa as ligações do *mosfet* FDFS2P106 ao restante circuito. Quando a porta USB não está conectada, o valor aplicado à *gate* do *mosfet* é zero, fazendo com que o transístor conduza e a bateria esteja a alimentar o sistema, uma vez que está ligada à entrada do LDO. Nesta circunstância, o diodo *schottky* está polarizado inversamente e não está a conduzir. Quando a porta USB é conectada, o valor aplicado à *gate* do *mosfet* corresponde ao nível lógico “1”, deixando o *mosfet* de conduzir e consequentemente sendo interrompida a ligação da bateria à entrada do entrada do LDO. O diodo *schottky* fica polarizado diretamente e entra em condução, fazendo com que a porta USB passe a alimentar o circuito. Nesta circunstância, a bateria fica apenas ligada ao pino V_{BAT} do dispositivo MCP73837, iniciando-se o ciclo de carga.

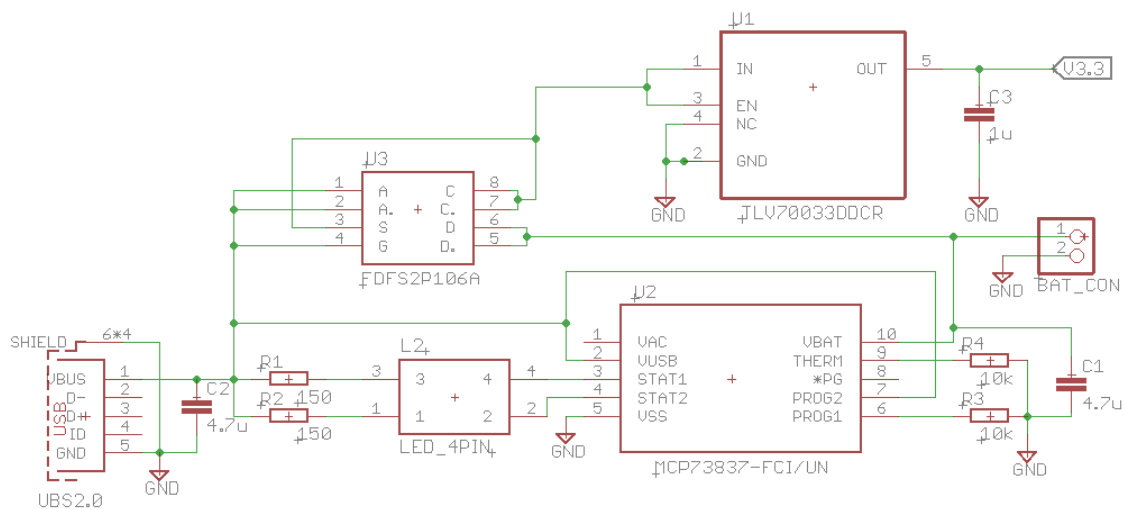


Figura 68: Esquema do circuito de alimentação alternativo que permitiria solucionar o condicionamento imposto atualmente pela ausência da bateria

A vantagem desta implementação é permitir que quando a porta USB está conectada e não existe uma bateria conectada ao sistema, o circuito é alimentado pela porta USB.

Concluindo, este capítulo apresenta os testes realizados ao sistema desenvolvido, especificando o modo de operação típico do circuito e apresentando o consumo de energia do sistema obtido, em diferentes casos de utilização. Ao longo dos testes, o dispositivo apresentou o comportamento esperado, nomeadamente a autonomia da bateria, apresentou o valor previsto.

Capítulo 7

Trabalho Futuro

Este capítulo destina-se a sugerir trabalho futuro que poderá ser desenvolvido de forma a capacitar o dispositivo de um maior leque de funcionalidades e de aplicações.

Na secção [7.1](#), Alternativas ao desenho da PCB do Sistema, são apresentadas novas formas de obter o *layout*, procurando adaptar as dimensões do dispositivo a diferentes cenários de utilização.

Na secção [7.2](#), Uso do módulo nRF52832 são indicadas as alterações necessárias para permitir a utilização do módulo nRF52832 no lugar do módulo BMD-300. Esta alteração implica que se tenha de projetar a antena BLE, contudo seria uma mais valia para o projeto uma vez que permite reduzir significativamente o custo final do dispositivo.

Na secção [7.3](#), Criação de uma rede Mesh é sugerido a criação de uma rede na qual os dispositivos trocam dados entre si, alargando desta forma o leque de aplicações do dispositivo e inserindo-o no universo IoT.

7.1. Alternativas ao desenho da PCB do Sistema

A abordagem seguida no desenho do *layout* da PCB do dispositivo foi colocar os componentes todos na mesma camada, ficando este com dimensões finais de 4cm × 3cm × 0.7cm. Contudo, esta abordagem pode ser adaptada em função do cenário de utilização pretendido.

Num cenário de utilização em que seja necessário reduzir a espessura do dispositivo, pode-se optar por retirar o conector da bateria JST-PH 2-pin, soldando-se diretamente os cabos da bateria na PCB. Retirando o conector da bateria, o segundo componente com maior altura é o botão, podendo também este ser substituído por um botão de menor espessura. Modificando estes dois componentes, consegue-se obter um dispositivo com 4.6 mm de espessura, resultantes da soma dos 1.6 mm de espessura da PCB mais os 3 mm de altura da porta USB.

Num cenário em que a espessura do dispositivo não seja especialmente relevante e se pretenda reduzir o comprimento do dispositivo, pode-se optar por colocar os componentes em ambos os lados da PCB. Por exemplo, optando-se por colocar a porta USB, o conector da bateria e o botão num dos lados da PCB e os restantes componentes no lado oposto, poderá

permitir reduzir as dimensões da placa para, aproximadamente, 3 cm × 3 cm, aumentando a espessura do dispositivo para aproximadamente, 1.0 cm.

Em suma, o dispositivo desenvolvido procura ser um protótipo capacitado para satisfazer um caso de uso genérico, havendo margem para, no futuro, poder ser otimizado de forma a melhor se adaptar a um caso de uso específico.

7.2. Uso do módulo nRF52832

Na fase de especificação do circuito, a pesquisa desenvolvida permitiu descobrir que a empresa *Nordic Semiconductor* comercializa 3 módulos que suportam o protocolo de comunicação *Bluetooth* 5.0, sendo um deles o módulo nRF52832.

Nessa fase, para ultrapassar a dificuldade de se ter de desenhar a antena *Bluetooth*, optou-se por utilizar o módulo Rigado BMD-300, que integra o módulo nRF52832 e uma antena BLE. A utilização deste módulo permitiu desenvolver o *firmware* e implementar a comunicação BLE, sem a necessidade de se projetar uma antena BLE.

Desenvolvido o *firmware*, um passo futuro poderá passar por, em vez de utilizar o módulo BMD-300, utilizar somente o módulo nRF52832 e projetar a antena *Bluetooth* na própria PCB. Esta melhoria irá contribuir significativamente para o cumprimento do objetivo de minimizar os custos do dispositivo, uma vez que o módulo BMD-300 tem o custo unitário de 9.61€ [41] e o módulo nRF52832 tem o custo de 4.48€ [58].

Ao utilizar o módulo nRF52832 existem uma série de diretrizes sugeridas pela *Nordic Semiconductor*, fabricante do *chip*, no sentido de garantir que o dispositivo possua um bom desempenho de RF. Essas diretrizes são no sentido de se manter a parte de RF do dispositivo igual à do projeto de referência que fornecem, mantendo-se o valor dos componentes, a geometria, o posicionamento relativo entre os componentes e o comprimento das linhas de transmissão. O projeto de referência da *Nordic Semiconductor* para a utilização do módulo nRF52832 é exibido na Figura 69.

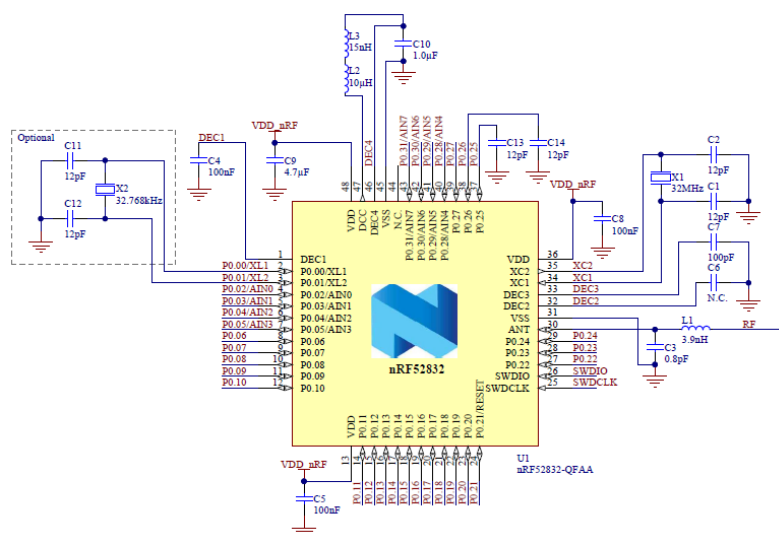


Figura 69: Projeto de referência para a utilização do módulo nRF52832 [59]

Ao se trabalhar com altas frequências o comportamento do circuito eletrônico pode sofrer oscilações, isto porque o comprimento de onda do sinal é da ordem de grandeza do tamanho dos componentes. Para contornar essas oscilações comportamentais, deve-se projetar o circuito de forma a que a impedância em cada ponto do circuito possibilite a máxima transferência de potência. Na utilização do módulo nRF52832 sugere-se realizar a adaptação de impedâncias tanto do pino de saída do módulo como da antena para 50 Ω . A adaptação de impedâncias é conseguida através do condensador C3 e da bobine L1.

O módulo nRF52832 possibilita que sejam usados dois tipos de antena, uma antena chip ou uma antena PCB. Neste projeto, o interesse seria projetar, na própria PCB do dispositivo, uma antena PCB de 2.45GHz adaptada à interface do módulo. A recomendação da *Nordic Semiconductor* é projetar uma antena monopolo planar de quarto comprimento de onda.

7.3. Criação de uma rede *Mesh*

O dispositivo desenvolvido cumpre as especificações do projeto, permitindo receber pacotes de dados de um *app mobile* e controlar o aspeto luminoso de LEDs endereçáveis. Contudo, a topologia suportada é apenas de um-para-um, limitando o tipo de aplicações e não permitindo considerar que o dispositivo cumpre os requisitos para ser um dispositivo IoT.

O universo IoT define-se pela existência de uma rede de objetos que interagem e comunicam entre si. Nesse sentido, propõe-se para trabalho futuro melhorar o *firmware* desenvolvido de forma a suportar a implementação de uma rede *mesh*. A existência de uma rede *mesh*, na qual vários dispositivos, após receber um comando da aplicação, trocariam informações entre si, iria permitir interagir de forma rápida e simultânea com vários dispositivos que, por exemplo, podem estar integrados em diferentes objetos. Uma rede *mesh* onde os dispositivos comunicam através do protocolo de transferência de dados *Bluetooth* pode ser implementada utilizando o *Bluetooth Mesh*.

O *Bluetooth Mesh* é uma especificação desenvolvida e publicada pela *Bluetooth SIG* [60] que permite estender os recursos BLE de forma a incluir a topologia muitos-para-muitos. Na prática, o *Bluetooth Mesh* é um protocolo de rede baseado em *broadcast*, no qual todos os dispositivos da rede enviam e recebem todas as mensagens de e para todos os dispositivos dentro do alcance de rádio. Neste protocolo, não existe o conceito de conexão, permitindo que um dispositivo possa enviar uma mensagem para um dispositivo que se encontre fora do alcance da rádio, fazendo a mensagem ser retransmitida por um ou mais dispositivos até chegar ao dispositivo de destino, conseguindo-se desta forma aumentar o alcance da comunicação *Bluetooth*. Esta característica, permite ainda que os dispositivos se movimentem, podendo entrar e sair da rede a qualquer momento.

O *Bluetooth Mesh* é direcionado para aplicações simples de controlo e monitorização, como por exemplo, controlo de luz e agregação de dados de sensores, estando o formato de transferência de dados otimizado para emitir apenas pequenos pacotes de controlo.

Em termos de consumo de energia, o uso do *Bluetooth Mesh* causa um maior consumo de energia, uma vez que para permitir a comunicação baseada em *broadcast* é necessário que os dispositivos mantenham o rádio permanentemente em modo de escuta.

A implementação do protocolo *Bluetooth Mesh* no microcontrolador nRF52832 é apoiada pelo nRF5 SDK que fornece uma arquitetura de pilha de eventos *mesh* que auxilia a implementação da rede. A Figura 70 representa a arquitetura da pilha de eventos da rede *mesh* implementada pelo nRF5 SDK.

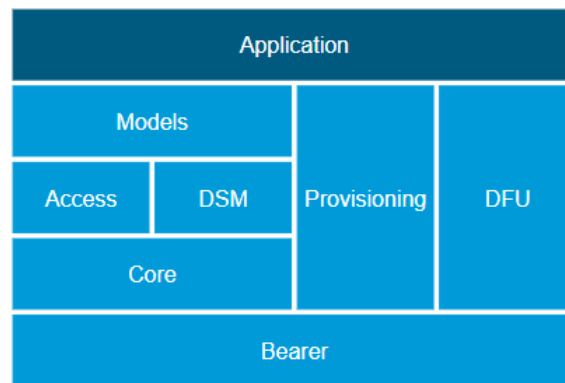


Figura 70: Arquitetura da pilha de eventos da rede *mesh* no nRF5 SDK [60]

A Figura 70 mostra que a pilha de eventos *mesh* é segmentada em módulos API que estão interligados. Estes módulos são descritos seguidamente:

Models: Os modelos de uma rede *mesh* descrevem e implementam o comportamento do dispositivo;

Access: A camada de acesso é responsável por organizar os modelos e as comunicações;

DSM: *Device State Manager* é responsável por armazenar os endereços e as chaves de criptografia que permitem o uso dos modelos;

Core: A camada *core* da rede *mesh* é responsável por gerir a criptografia dos dados e a retransmissão de mensagens;

Provisioning: O protocolo de provisionamento da rede é usado para adicionar um novo dispositivo à rede;

DFU: *Device Firmware Upgrade* é utilizado para permitir a atualização do *firmware* através da rede *mesh*;

Em suma, dotar o dispositivo que foi desenvolvido da capacidade de se agregar numa rede *Bluetooth Mesh*, através da qual trocava dados com outros dispositivos, iria potenciar e alargar o leque de funcionalidades e aplicações do dispositivo.

Capítulo 8

Conclusão

Hoje em dia, a *Internet of Things* é um conceito onnipresente na vida do ser humano. Consistindo numa rede onde vários objetos são equipados com um conjunto de sensores, *software* e recursos capazes de guardar e partilhar dados, permite que os objetos possam interagir, trocar informação e cooperar na execução de uma tarefa. Esta nova realidade gera o potencial para que sejam desenvolvidas aplicações, produtos e serviços inovadores que proporcionem transformações e melhorias em diferentes áreas, tais como, nos cuidados de saúde, no desporto, na moda, na segurança e até mesmo nas atividades de lazer.

Uma visão geral dos produtos existentes no mercado, permitiu concluir que, por exemplo, no âmbito da segurança dos utilizadores mais vulneráveis da via rodoviária, ou seja, os corredores, ciclistas e peões, os produtos existentes, na sua maioria, não tiram proveito da IoT, servindo apenas para iluminar e tornar os utilizadores mais visíveis. Também na área da moda, foi possível concluir que estão a ser desenvolvidos produtos que tiram partido da IoT, mas estando ainda numa fase primária, sendo que a maior parte desses produtos ainda estão na fase de protótipo. Neste sentido, esta dissertação teve o intuito de desenvolver um dispositivo com um carácter inovador e diferenciador dos dispositivos já existentes, e que podendo tirar partido da tecnologia IoT seja capaz de suprimir questões que abrangem diferentes áreas do quotidiano, utilizando a iluminação.

A perceção da cor é algo natural no ser humano, que o ajuda a caracterizar os objetos, a interpretar o ambiente e a gerar estímulos. Por essa razão, esta dissertação propôs o desenvolvimento de um pequeno dispositivo de iluminação inteligente que é facilmente instalável num objeto do quotidiano, tal como, uma peça de vestuário, uma bicicleta ou um capacete. O dispositivo é controlado remotamente por uma aplicação *mobile*, que tira partido da capacidade de processamento e dos sensores de um *smartphone* comum e que permite controlar a cor ou o padrão de cores a ser atribuído à iluminação do objeto.

O desenvolvimento deste dispositivo exigiu o cumprimento de várias etapas, tais como: análise de requisitos e procura de componentes, especificação do circuito eletrónico, desenvolvimento do *firmware*, prototipagem do circuito eletrónico e por fim, teste e validação de todo o sistema. O desenvolvimento deste dispositivo surge no seguimento de um anterior protótipo, já desenvolvido pela empresa que promove esta dissertação, e tem como principais objetos a minimização do tamanho do dispositivo, a redução do custo e a utilização de LEDs endereçáveis.

O dispositivo foi especificado para ser alimentado por uma bateria LiPo de 3.7V e possui um módulo responsável pelo processamento dos dados e pelas comunicações com a aplicação *mobile* e os LEDs endereçáveis. O dispositivo possui também um circuito de alimentação, responsável por recarregar a bateria através de uma porta USB e 2 LEDs de sinalização de estado, um que sinaliza o estado da conexão *Bluetooth* e o outro que sinaliza o estado de carga da bateria. Neste sentido, definiu-se que o dispositivo seria constituído por 3 circuitos: o circuito de alimentação, no qual se destaca o gestor de carga da bateria MCP73837 e o LDO TLV70033DDCT; o circuito de controlo do sistema, no qual se destaca o módulo BMD-300; e o circuito dos LEDs endereçáveis no qual se destacam os LEDs WS2812B. Esta etapa do projeto definiu que o custo final do dispositivo desenvolvido é de aproximadamente 15€, conseguindo-se desta forma cumprir o objeto de reduzir os custos face ao protótipo anterior. A redução de custo obtida foi de, aproximadamente, 65%.

A camada de *firmware* possibilita a comunicação entre a aplicação *mobile* e os LEDs endereçáveis, tendo sido implementadas duas *interfaces*, a *interface* entre a aplicação *mobile* e o módulo BMD-300 e a interface entre o módulo BMD-300 e os LEDs endereçáveis. A *interface app mobile* - módulo utiliza para troca de dados a tecnologia *Bluetooth*, e a *interface* módulo - LEDs utiliza para transmissão dos dados o protocolo I2S.

Na etapa de prototipagem do circuito eletrónico, tendo em conta a finalidade do sistema, optou-se por desenvolver o *layout* de duas PCBs. A primeira PCB, designada por PCB do dispositivo é constituída pelo circuito de alimentação e pelo circuito de controlo do sistema. Esta PCB tem de dimensões 4cm × 3cm × 0.7cm, alcançando-se o objetivo de diminuir as dimensões do dispositivo face ao protótipo anterior, uma vez que este tinha de dimensões 5cm × 4 cm × 1cm. A segunda PCB foi pensada de forma a albergar o circuito para um único LED endereçável e uma *interface* de sinais que a tornasse adaptável a diferentes casos de uso. Desta forma, pode existir casos de uso em que existem várias PCBs colocadas de forma contígua, próximas umas das outras, e casos de uso em que as PCBs são distribuídas espacialmente, relativamente afastadas umas das outras. O número de LEDs no sistema também pode ser adaptado. Esta PCB tem de dimensões 1.6cm × 1.3cm × 0.3cm.

A fase de teste do dispositivo consistiu em verificar a correta operação das funcionalidades do *firmware*, calcular a autonomia da bateria e certificar o seu processo de carga. O dispositivo funcionou como esperado e a autonomia da bateria foi de 4 horas, validando-se desta forma o circuito.

Por fim, concluiu-se que o dispositivo desenvolvido possui grande potencial de adaptação, podendo-se no futuro desenvolver alternativas de *layout* da PCB, de forma a adaptar as dimensões do dispositivo a diferentes cenários de utilização. No sentido de reduzir ainda mais os custos, uma opção poderá ser a adaptação do circuito de forma a utilizar o módulo nRF52832 no lugar do módulo BMD-300. Esta adaptação embora necessite do projeto de uma antena BLE, não irá requerer alterações no *firmware* e permitirá reduzir significativamente os custos. Em termos de *firmware*, poderá criar-se uma rede *Bluetooth Mesh* permitindo implementar uma topologia de muitos-para-muitos, na qual vários dispositivos trocam dados entre si. Desta forma, seria alargado o leque de aplicações do dispositivo e seriam exploradas as funcionalidades do conceito IoT.

Referências

- [1] Lusa/SOL. (2014). *Mais de cem mortos em acidentes de bicicletas em Portugal*. Disponível em: <https://sol.sapo.pt/artigo/117142/mais-de-cem-mortos-em-acidentes-de-bicicletas-em-portugal>, [último acesso a 30-01-2018].
- [2] R. v. d. Meulen. (2017). *Gartner Says Demand for 4G Smartphones in Emerging Markets Spurred Growth in Second Quarter of 2017*. Disponível em: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3788963>, [último acesso a 30-01-2018].
- [3] D. Evans, "The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything," p. 11, April, 2011.
- [4] S. Nadella, "Satya Nadella: Convergence 2015," apresentado na Microsoft Convergence 2015, Atlanta, March 16, 2015. Disponível em: <https://news.microsoft.com/speeches/satya-nadella-convergence-2015/>
- [5] K. Ashton, "That 'Internet of Things' Thing," *RFID Journal*, June 22, 2009.
- [6] S. Dodson, "The internet of things," *The Guardian*, October 9, 2003.
- [7] R. Weisman, "The Internet of things - Start-ups jump into next big thing: tiny networked chips," *boston.com*, October 25, 2004.
- [8] ITU, "ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things," International Telecommunication Union, 2005.
- [9] P. Zencke, G. Wolfram, H. Kauppinen, and H. Ichikawa, na *Internet of Things 2008*, Zurich, 2008.
- [10] S. Bhardwaj and A. Kole, "Review and study of Internet of Things: It's the future," na *2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI)*, 21-23 Oct. 2016, Piscataway, NJ, USA, 2016, pp. 47-50: IEEE.
- [11] N. Shahid and S. Aneja, "Internet of Things: Vision, application areas and research challenges," na *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 10-11 Feb. 2017, Piscataway, NJ, USA, 2017, pp. 583-7: IEEE.
- [12] T. W. Gruen and D. Corsten, "A Comprehensive Guide To Retail Out-of-Stock Reduction In the Fast-Moving Consumer Goods Industry," p. 71, 2008.
- [13] N. Lomas. (2017). *Global wearables market to grow 17% in 2017, 310M devices sold, \$30.5BN revenue: Gartner*. Disponível em: <https://techcrunch.com/2017/08/24/global-wearables-market-to-grow-17-in-2017-310m-devices-sold-30-5bn-revenue-gartner/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [14] P. Suresh, J. V. Daniel, V. Parthasarathy, and R. H. Aswathy, "A state of the art review on the Internet of Things (IoT): history, technology and fields of deployment," na *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, 27-29 Nov. 2014, Piscataway, NJ, USA, 2014, p. 8 pp.: IEEE.
- [15] M. Dixit, J. Kumar, and R. Kumar, "Internet of things and its challenges," na *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCloT)*, 8-10 Oct. 2015, Piscataway, NJ, USA, 2015, pp. 810-14: IEEE.
- [16] Bluetooth. *Our History*. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/about-us/our-history>, [último acesso a 04-02-2018].
- [17] N. Semiconductor. (2014). *A short history of Bluetooth*. Disponível em: <https://www.nordicsemi.com/eng/News/ULP-Wireless-Update/A-short-history-of-Bluetooth>, [último acesso a 04-02-2018].

- [18] M. Bin Yaakop, I. A. Abd Malik, Z. Bin Suboh, A. F. Ramli, and M. A. Abu, "Bluetooth 5.0 throughput comparison for internet of thing usability a survey," na *2017 International Conference on Engineering Technology and Technopreneurship (ICE2T)*, 18-20 Sept. 2017, Piscataway, NJ, USA, 2017, p. 6 pp.: IEEE.
- [19] Bluetooth. (2016). *Bluetooth 5 Now Available*. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/news/pressreleases/2016/12/07/bluetooth-5-now-available>, [último acesso a 04-02-2018].
- [20] NOXGEAR. *Tracer 360*. Disponível em: <https://www.noxgear.com/tracer360>, [último acesso a 31-01-2018].
- [21] Lumos. *Lumos Helmet*. Disponível em: <https://lumoshelmet.co/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [22] Cosmo. *Cosmo Connected*. Disponível em: <https://cosmoconnected.com/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [23] A. Grondin. (2018). *CES 2018 : Cosmo Connected présente des clignotants connectés pour les cyclistes*. Disponível em: <https://www.lesechos.fr/tech-medias/hightech/0301126849063-ces-2018-cosmo-connected-presente-des-clignotants-connectes-pour-les-cyclistes-2143723.php>, [último acesso a 31-01-2018].
- [24] V. d. Waals. *Van der Waals*. Disponível em: <https://van-der-waals.com/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [25] Indiegogo. *Volvorri Shoes*. Disponível em: <https://www.indiegogo.com/projects/volvorri-timeless#/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [26] Shiftwear. *Shiftwear*. Disponível em: <https://store.shiftwear.com/>, [último acesso a 31-01-2018].
- [27] Worldsemi, "WS2812. Intelligent control LED. Integrated light source." Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>
- [28] Worldsemi, "WS2813. Intelligent control LED. Integrated light source," p. 9. Disponível em: www.world-semi.com/DownloadFile/136
- [29] Jarvan. (2017). *What's the difference? WS2812 vs WS2813*. Disponível em: <https://www.elecrow.com/blog/ws2813-vs-ws2812/>, [último acesso a 01-02-2018].
- [30] Worldsemi, "WS2812B - Intelligent control LED integrated light source," p. 5. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>
- [31] P. Burgess. *The Magic of NeoPixels*. Disponível em: view-source:<https://learn.adafruit.com/adafruit-neopixel-uberguide?view=all#>, [último acesso a 28-05-2018].
- [32] Bluetooth. *Bluetooth 5: What it's all about*. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/bluetooth5>, [último acesso a 02-02-2018].
- [33] N. Semiconductor. *nRF52840*. Disponível em: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/nRF52840>, [último acesso a 02-02-2018].
- [34] N. Semiconductor. *nRF52810*. Disponível em: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/nRF52810>, [último acesso a 02-02-2018].
- [35] I. SIP, "BLE Module ISP 1507," p. 24. Disponível em: https://www.mouser.com/ds/2/889/isp_ble_DS1507-1221980.pdf
- [36] I. Rigado, "BMD-300 Series Module for Bluetooth 5 LE," p. 36. Disponível em: <https://www.rigado.com/?wpdmdl=1441>
- [37] M. Electronics. *BMD-330-A-R*. Disponível em: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Rigado/BMD-330-A-R/?qs=%2Fha2pyFadujsB8SPtdc7BUwSSHn8g%2FL%252bb311PUZTNw%3D>, [último acesso a 02-02-2018].
- [38] I. Rigado, "BMD-330 Module for Bluetooth 5 LE," p. 25. Disponível em: https://www.mouser.com/ds/2/883/BMD-330-DS_v1.0-1221655.pdf
- [39] I. Rigado, "BMD-300 Series Evaluation Kit User Guide," p. 16. Disponível em: <https://www.rigado.com/download/bmd-300-eval-kit-user-guide/>
- [40] S. M. GmbH. (2018). *J-Link BASE / J-Link BASE Compact*. Disponível em: <https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/models/j-link-base/>, [último acesso a 29-05-2018].
- [41] M. Electronics. (2018). *BMD-300-A-R*. Disponível em: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Rigado/BMD-300-A-R/?qs=1mbolxNpo8fCk32PZ6GqYA%3D%3D>, [último acesso a 29-05-2018].

- [42] M. Electronics. *IPS 1507-AX-RS*. Disponível em: <https://pt.mouser.com/productdetail/insight-sip/isp1507-ax-rs?qs=sGAEpiMZZMsGelYiB%252bjhZoug4L%2FWODSMLhA5XlVJwMp4yrebY%252b9Gjg%3D%3D>, [último acesso a 02-02-2018].
- [43] J. Haase *et al.*, "Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications," na *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 29 Oct.-1 Nov. 2017, Piscataway, NJ, USA, 2017, pp. 8113-18: IEEE.
- [44] L. Ada. (2013). *Li-Ion (Lithium-Ion) and LiPoly (Lithium Polymer)*. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/all-about-batteries/liion-lithium-ion-and-li-poly-lithium-polymer>, [último acesso a 09-06-2018].
- [45] CIRCUITSTUDIO. (2017). *Lithium Iron Phosphate Battery vs Lithium Ion For Embedded Systems* *Lithium Iron Phosphate Battery vs Lithium Ion For Embedded Systems*. Disponível em: <https://resources.altium.com/pcb-design-blog/lithium-iron-phosphate-battery-vs-lithium-ion-for-embedded-systems>, [último acesso a 20-06-2018].
- [46] L. Ada. (2013). *Lithium Batteries & Coin Cells*. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/all-about-batteries/lithium-batteries-and-coin-cells>, [último acesso a 09-06-2018].
- [47] T. Instruments, "TLV700 200-mA, Low-IQ, Low-Dropout Regulator for Portable Device," p. 37. Accessed on: 29-05-2018. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv700.pdf>
- [48] M. T. Inc., "MCP73837/8 - Advanced Stand-Alone Li-Ion / Li-Polymer Battery Charge Management Controller with Autonomous AC-Adapter or USB-Port Source Selection," p. 31. Disponível em: <https://pt.mouser.com/datasheet/2/268/22071a-71072.pdf>
- [49] O. Semiconductor, "NTA4151P, NTE4151P - Small Signal MOSFET," p. 7.
- [50] M. Electronics. (2018). *ASR00008*. Disponível em: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/TinyCircuits/ASR00008?qs=55YtniHzbhBpf4%2fGjN1RwA>, [último acesso a 29-05-2018].
- [51] N. Semiconductor. (2018). *nRF52 Series > SoftDevices*. Disponível em: <http://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.softdevices52%2Fdita%2Fnrf52%2Fsoftdevices.html>, [último acesso a 13/06/2018].
- [52] Bluetooth. (2018). *GATT Overview*. Disponível em: <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/generic-attributes-overview>, [último acesso a 15-06-2018].
- [53] N. Semiconductor, "Advertising Module," p. 4. Disponível em: http://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.sdk51.v9.0.0%2Flib_ble_advertising.html&cp=4_1_0_3_1_1
- [54] P. Semiconductors, "I2S bus specification," p. 7. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>
- [55] N. Semiconductor, "I2S — Inter-IC sound interface," p. 23. Disponível em: <http://infocenter.nordicsemi.com/index.jsp?topic=%2Fcom.nordic.infocenter.nrf52832.ps.v1.1%2Fi2s.html>
- [56] AUTODESK. *EAGLE - PCB design made easy*. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>, [último acesso a 01-02-2018].
- [57] F.-O. Semiconductor, "FDF52P106A - Integrated 60V P-Channel PowerTrench MOSFET and Schottky Diode," p. 8. Disponível em: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDF52P106A.pdf>
- [58] M. Eletronics. (2018). *nRF52832-QFAA-R*. Disponível em: <https://pt.mouser.com/ProductDetail/Nordic-Semiconductor/nRF52832-QFAA-R?qs=sGAEpiMZZMuReUCzg6bFTGgcXD9SPoqVwnNJix8uUfC%2fdb7VZRdvAw%3d%3d>, [último acesso a 20-06-2018].
- [59] N. Semiconductor, "Reference circuitry," p. 10.
- [60] N. Semiconductor, "The nRF5 SDK for Mesh architecture," p. 4.