



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Rui Sérgio Cunha Ferreira

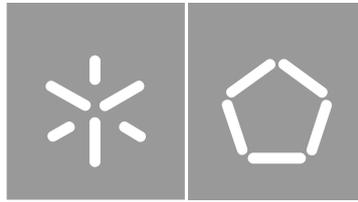
Apresentador sem fios

Rui Ferreira **Apresentador sem fios**

Rui Ferreira

UMinho | 2019

novembro de 2019



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Rui Sérgio Cunha Ferreira

Apresentador sem fios

Dissertação de Mestrado
Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)
Professor Doutor Jorge Cabral

novembro de 2019

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



**Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual
CC BY-NC-SA**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Agradecimentos

Em primeiro lugar queria agradecer aos meus pais, Agostinho e Natália e à minha irmã Inês, por tudo o que têm feito por mim ao longo da minha vida, em particular no meu percurso académico.

Uma palavra muito especial também aos restantes familiares por todo o apoio prestado, que de uma forma ou de outra contribuíram para o meu sucesso académico.

Ao Professor Doutor Jorge Cabral, pelo apoio e confiança depositados em mim para a realização desta dissertação.

Aos meus colegas de curso e laboratório, que tornaram o desenvolvimento deste projeto possível, por todo o tempo e paciência dispensados, ajudando-me e apoiando-me sempre.

Aos meus colegas de curso e amigos de sempre, por todos os bons momentos passados ao longo deste percurso, pelas horas passadas no “covil”, em trabalho e em lazer, um obrigado especial.

O meu obrigado a todos!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Com esta dissertação pretende-se desenvolver um sistema embebido que implemente um apresentador sem fios, recorrendo à tecnologia BLE (Bluetooth Low Energy). Este sistema embebido deverá ser integrado num MID (Molded Interconnect Device) recorrendo à tecnologia LDS (Laser Direct Structuring) para elaboração das pistas de cobre.

Um MID é uma peça criada através da moldagem por injeção de plástico, com um circuito eletrónico desenhado na mesma. Na produção de um MID usando LDS utiliza-se um termoplástico dopado com um composto inorgânico (não condutivo) que é ativado através de um laser. A versatilidade do layout MID permite a integração de superfícies de contacto para interruptores, sensores, componentes passivos ou até antenas no próprio termoplástico [1].

Nesta dissertação o layout do circuito do sistema embebido de apresentador sem fios será implementado recorrendo à tecnologia de layout MID.

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um protótipo de um apresentador sem fios, compatível com o *driver HID Compliant Mouse* para o Windows 10. Deste modo conseguimos ter um apresentador sem fios *Plug & Play* que não necessita de um *dongle* para o emparelhamento com o computador [2]. O computador em questão precisa de ter a tecnologia BLE.

O sistema também possuirá um módulo laser que será controlado pela função *Shake & Wake*. Esta função será implementada com recurso a um acelerómetro.

Palavras-chave: *Mechatronic Integrated Device, Laser Direct Structuring, Tecnologia Capacitiva, HID over GATT.*

Abstract

This dissertation aims to develop an embedded system that implements a wireless presenter using Bluetooth Low Energy (BLE) technology. This embedded system should be integrated into a Molded Interconnect Device (MID) using Laser Direct Structuring (LDS) technology to create the copper tracks.

A MID is a part created by plastic injection molding, with an electronic circuit designed in it. In the production of a MID using LDS, a thermoplastic doped with an inorganic (non-conductive) compound is activated using a laser. The versatility of the MID layout allows the integration of contact surfaces for switches, sensors, passive components or even antennas in the thermoplastic itself [1] .

In this dissertation the circuit layout of the wireless presenter embedded system will be implemented using MID layout technology.

The main objective of this dissertation is the development of a prototype of a wireless presenter, compatible with the *HID Compliant Mouse driver* for Windows 10. This way we have a wireless presenter *Plug & Play* that doesn't require a computer pairing dongle [2]. The computer in question needs to have BLE technology.

The system will also have a laser module that will be controlled by the *Shake & Wake* function. This function will be implemented using an accelerometer.

Keywords: *Mechatronic Integrated Device, Laser Direct Structuring, Capacitive Technology, HID over GATT.*

Tabela de conteúdos

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Estado da Arte	4
2.1 Tecnologias e protocolos de comunicação sem fios	4
2.1.1 <i>Bluetooth</i>	4
2.1.2 <i>Bluetooth Low Energy</i>	5
2.1.3 <i>Generic Attribute Profile (GATT)</i>	6
2.2 <i>Human Interface Device Windows OS Driver</i>	8
2.2.1 HID over GATT	8
2.2.2 USB HID class	9
2.3 <i>Mechatronic Integrated Devices</i>	10
2.3.1 Definição e princípios	10
2.3.2 Estruturação	11
2.4 Tecnologia capacitiva	18
2.4.1 Princípios de funcionamento	18
2.4.2 CapSense Sigma Delta	20
2.4.3 Diretrizes de desenho	21

3	Arquitetura do Sistema	24
3.1	Requisitos do sistema	25
3.2	Hardware	25
3.2.1	Módulo de comunicação sem fios in-chip	26
3.2.2	Acelerómetro	28
3.3	Plataforma de desenvolvimento	29
3.4	Aplicação do sistema	31
3.4.1	Módulo Principal da Aplicação	31
3.4.2	Módulo BLE	32
3.4.3	Módulo do Acelerómetro	33
3.4.4	Módulo do I2C	34
3.4.5	Módulo dos Sensores Capacitivos	35
3.5	Pacote de dados BLE	37
4	Desenvolvimento do sistema	39
4.1	Altium designer	39
4.1.1	Descrição da ferramenta	39
4.1.2	<i>Cypress touch controls</i>	39
4.2	Hardware	41
4.2.1	Esquemático	41
4.2.2	PCB FR4	42
4.2.3	PCB LDS	43
5	Testes e Resultados	45
5.1	Consumo Energético	45
5.1.1	Implementação Low Power	45
5.2	Medição da capacidade dos botões	47
5.3	Signal-to-Noise Ratio	48
6	Conclusões e Trabalho futuro	50
6.1	Conclusões	50
6.2	Trabalho Futuro	50

Lista de figuras

2.1	Topologias para a tecnologia Bluetooth (Adaptado de [2])	5
2.2	Hierarquia do perfil GATT [3]	7
2.3	Processos de produção de um MID (Adaptado de [1])	11
2.4	Processos de estruturação de um MID (Adaptado de [1])	12
2.5	Processos de estruturação laser (Adaptado de [1])	14
2.6	Processos de produção LPFK-LDS (Adaptado de [1])	15
2.7	Processo de produção MIPTEC (Adaptado de [1])	16
2.8	Processo de produção de um MID utilizando técnica de impressão (Adaptado de [1])	17
2.9	Processo de produção de um MID utilizando a técnica de injeção de disparo duplo (Adaptado de [1])	17
2.10	Stack de duas camadas para um sistema capacitivo (Adaptado de [4])	18
2.11	Campo elétrico de um sistema capacitivo (Adaptado de [4])	19
2.12	Diagrama de blocos do CSD (Adaptado de [4])	20
2.13	Circuito equivalente resistivo(Adaptado de [4])	20
2.14	Geometrias de botões recomendadas (Adaptado de [4])	21
2.15	Geometria recomendada para o slider (Adaptado de [4])	22
2.16	Relação entre a largura dos segmentos e o diâmetro do dedo (Adaptado de [4])	23
3.1	Diagrama de funcionamento do sistema	24
3.2	Microcontrolador escolhido	28
3.3	Acelerómetro escolhido	29
3.4	Kit de desenvolvimento utilizado	30
3.5	Módulo BLE utilizado	30
3.6	Diagrama de blocos da aplicação do sistema	32
3.7	Processo de conexão do BLE (adaptado de [2])	33

3.8	Processo de transação do BLE (adaptado de [2])	33
3.9	Transação de dados do processo de escrita do módulo I2C	34
3.10	Transação de dados do processo de leitura do módulo I2C	34
3.11	Módulo CapSense da biblioteca do PSoC Creator	35
3.12	Painel de configuração do módulo CapSense	35
3.13	Painel de configuração de gestos do módulo CapSense	36
3.14	Diagrama de blocos da leitura e processamento dos sensores capacitivos	37
3.15	Pacote de dados BLE (Adaptado de [2])	37
3.16	Advertising packet do módulo BLE	38
4.1	Painel de configuração do componente CircularButton	40
4.2	Painel de configuração do componente LinearSlider	41
4.3	Esquemático do circuito desenvolvido	42
4.4	PCB produzida utilizando técnica convencional	43
4.5	MID produzido utilizando a técnica LDS	44
5.1	Consumo de corrente quando o protótipo do apresentador está com o modo low power desativado	46
5.2	Consumo de corrente quando o protótipo do apresentador está no modo low power	47

Lista de tabelas

2.1	Comparação entre as tecnologias Bluetooth	6
2.2	APIs do HID over GATT Profile	9
2.3	Dimensões recomendadas para o slider	22
3.1	Comparação entre os diferentes microcontroladores (Adaptado de [5])	27
3.2	Características do LIS331DLH	29
5.1	Comparação entre as diferentes capacidades na PCB produzida utilizando o método convencional	47
5.2	Comparação entre as diferentes capacidades na PCB produzida utilizando LDS	48
5.3	Comparação entre os diferentes SNR	49

Lista de acrónimos e siglas

BLE Bluetooth Low Energy.

MID Mechatronic Integrated Device.

LDS Laser Direct Structuring.

HID Human Interface Device.

GATT Generic Attribute Profile.

I2C Inter-Integrated Circuit.

PCB Printed Circuit Board.

USB Universal Serial Bus.

FHSS Frequency-hopping Spread Spectrum.

GFSK Gaussian Frequency Shift Keying.

STK Short Term Key.

LTK Long Term Key.

ROM Read Only Memory.

IDAC | Digital to Analog Converter.

SMD Surface Mount Device.

ESRG Embedded Systems Research Group.

QFN Quad Flat No leads.

WLCSP Wafer Level Chip Scale Package.

CPU Central Processing Unit.

MEMS Microelectromechanical Systems.

SOC System On Chip.

MTU Maximum Transmission Unit.

WDT Watch Dog Timer.

SNR Signal to Noise Ratio.

Chapter 1

Introdução

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito de um projeto de investigação em cooperação com uma entidade privada sem fins lucrativos, que desenvolve atividades de Investigação e Desenvolvimento na área dos sistemas poliméricos, o PIEP, e tem como finalidade o desenvolvimento de um sistema embebido que terá de ser desenhado de modo a ser compatível com a tecnologia de fabrico LDS [1], que irá suportar a criação do demonstrador. Este capítulo apresenta o enquadramento e motivações, os objetivos e a estrutura da dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivação

Com o constante crescimento das funcionalidades e restrições que são necessários para desenhar um produto eletrónico, o seu custo de produção e tempo de desenvolvimento têm vindo a aumentar cada vez mais. O que conduziu a uma maior procura por parte dos fabricantes por soluções mecatrónicas [1]. Devido ao alto grau de liberdade de desenho e ao alto nível de integração no produto que os MID oferecem, a sua cadeia de produção torna-se menos dispendiosa e mais fiável.

Um MID é a abreviação para *Molded Interconnect Device*. Pode ser definido como um plástico moldado por injeção, em que duas ou mais peças incorporam funcionalidades mecânicas e elétricas. Existem vários processos que podem ser usados para a produção do corpo de um produto usando peças MID, assim como para a sua componente eletrónica [6].

O potencial da tecnologia MID deriva da liberdade de desenho em combinação com a estruturação e metalização. A versatilidade do *layout* MID possibilita a integração de superfícies de contacto, botões, sensores, condensadores, bobines resistências ou antenas para a transmissão e receção de ondas eletromagnéticas [1].

Um apresentador sem fio bem concebido melhora em muito a qualidade de uma apresentação. Se for necessário destacar um aspeto importante, o ponteiro do laser pode focar a atenção da audiência para o local desejado. Uma das maiores vantagens dos apresentadores sem fios é sua compatibilidade, a maioria dos apresentadores sem fios é compatível com praticamente qualquer sistema operativo. O Universal Serial Bus (USB) e o seu interface físico (porta USB) existem actualmente em todos os computadores portáteis, e permitem que dispositivos externos comuniquem com o computador. Os apresentadores sem fio são dispositivos *plug-and-play*, o que significa que basta colocar a parte do recetor do apresentador numa porta USB e o dispositivo está pronto para ser usado. Esta mobilidade permite interagir com o público diretamente, em vez de gastar a maior parte da apresentação escondido atrás de um computador utilizando um rato ou um teclado.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um protótipo de um apresentador sem fios, compatível com o driver *HID Compliant Mouse* para o *Windows 10*.

Deste modo conseguimos ter um apresentador sem fios *Plug & Play* que não necessita de um *dongle* para o emparelhamento com o computador. O computador em questão precisa de possuir a tecnologia BLE.

O sistema também possuirá um módulo laser que será controlado pela função *Shake & Wake*. Esta função será implementada com recurso a um acelerómetro MEMS de consumo energético reduzido.

Desenvolvimento de hardware

- Desenvolvimento de uma PCB para testar as várias geometrias possíveis dos botões capacitivos que implementem as funções de botão direito e botão esquerdo do apresentador sem fios.
- Desenvolvimento de uma PCB com todo o sistema embebido para posteriormente ser integrado na peça, incluindo o microcontrolador com módulo BLE integrado,.

Desenvolvimento do software

- Desenvolvimento do *firmware*, usando a tecnologia BLE, compatível com o driver *HID Compliant Mouse* para *Windows 10*.

Desenvolvimento e teste do novo sistema

- Integração do sistema embebido desenvolvido no MID utilizando a tecnologia LDS

1.3 Estrutura da dissertação

Neste capítulo foi feita uma pequena introdução onde são apresentadas as motivações e objetivos para elaboração desta dissertação.

No capítulo seguinte, será apresentado o estado da arte das tecnologias utilizadas no apresentador sem fios.

No capítulo 3 são apresentadas as especificações do hardware e do software, baseadas nos requisitos do sistema.

No capítulo 4 é apresentado o hardware do apresentador e como foi possível desenvolver o mesmo.

No capítulo 5 são apresentados os testes realizados e os resultados obtidos.

Por último, no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões de trabalho futuro a implementar no apresentador.

Chapter 2

Estado da Arte

O estado da arte inicia-se pelas tecnologias de comunicações sem fios a implementar no apresentador, onde é feito um breve resumo sobre as principais tecnologias. Em seguida são apresentados os *drivers* existentes que se podem ser usados neste projeto. Posteriormente, são expostas as características da tecnologia MID. E para finalizar, é exposta a tecnologia capacitiva utilizada neste projeto.

2.1 Tecnologias e protocolos de comunicação sem fios

2.1.1 *Bluetooth*

O Bluetooth é uma tecnologia especificada pelo Bluetooth Special Interest Group (SIG) baseada em transmissões por radiofrequência de curto alcance. O IEEE 802.15.1 foi um grupo de trabalho que se baseou nesta tecnologia e definiu os protocolos da camada física (PHY) e o de controlo de acesso ao meio (MAC) do modelo Open System Interconnection (OSI) nos primórdios desta tecnologia [7].

A tecnologia Bluetooth é adequada para aplicações com demanda de dispositivos de pequenas dimensões e com consumos energéticos reduzidos. Comparando com a tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE), esta é preferida para aplicações onde são necessárias maiores taxas de transferência de dados [7]. Esta tecnologia define dois tipos de topologias, piconet e scatternet, como pode ser visto na figura 2.1.

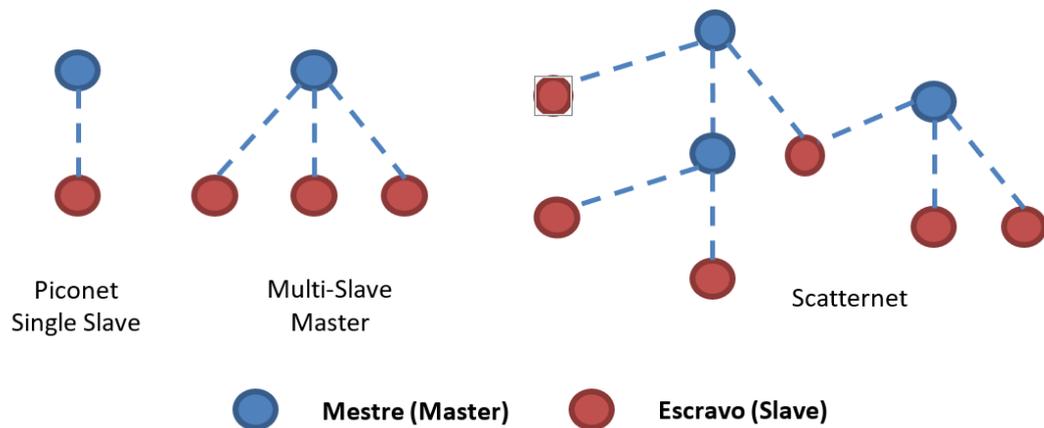


Figura 2.1: Topologias para a tecnologia Bluetooth (Adaptado de [2])

Numa topologia *piconet* podem-se ligar até 8 dispositivos ativos ou 255 em modo inativo (*parking*), onde um desses dispositivos será o mestre e os restantes serão os escravos. Podem existir no máximo dez *piconets* dentro de um raio de dez metros. As combinações de *piconets* interligadas originam uma rede *scatternet*. Principais características:

- Alcance – 10 a 100 metros;
- Frequência de operação – 2,4 GHz;
- Potência de Transmissão – 1 mW (min.), 100 mW (max.);
- Aplicação da técnica de espalhamento espectral (spread spectrum), tais como o Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS) para transmissões mais resistentes a interferências;
- Taxa de transferência – até 2 Mbps;

2.1.2 **Bluetooth Low Energy**

A tecnologia Bluetooth Low Energy apareceu com o intuito de ser utilizada em aplicações onde a transferência de dados pudesse ser periódica e com baixo consumo. É vulgar encontrar esta tecnologia aplicada a sensores, atuadores, ou qualquer outro tipo de dispositivo que requeiram consumos energéticos bastante reduzidos [7].

O BLE usa a mesma gama do espectro de frequências que a anterior tecnologia, porém aplicada a um diferente conjunto de canais. Neste caso são utilizados 40 canais com 2 MHz de largura de banda, enquanto o Bluetooth clássico utiliza 79 canais com 1 MHz de largura

Especificações técnicas	Bluetooth	Bluetooth Low Energy
Frequência de Rádio	2,4 GHz	2,4 GHz
Alcance	10-100 m	10-100 m
Taxa de transferência	0,7 – 2 Mbps	305 kbps
Escravos ativos	7	Ilimitados
Encriptação	56 até 128 bits	128-bits AES
Latência	> 100 ms	< 6 ms
Transmissão de Voz	Sim	Não
Topologias	Topologias piconet, scatternet	piconet

Tabela 2.1: Comparação entre as tecnologias Bluetooth

de banda. A transmissão dos dados nos canais é efetuada da mesma forma, ou seja, usando modulação GFSK.

A tecnologia Bluetooth foi inicialmente desenhada para comunicações de dados contínuas, como *streaming* e aplicações de voz; porém, o aparecimento de aplicações e dispositivos onde não seja possível incorporar este tipo de transmissão contínua de dados levou ao aparecimento do BLE para colmatar estas necessidades.

2.1.3 Generic Attribute Profile (GATT)

Os atributos genéricos (GATT) definem uma hierarquia de dados que é exposta aos dispositivos BLE. Os serviços são coleções de características e relações com outros serviços que fazem o encapsulamento do comportamento de um dispositivo.

Uma camada abaixo do GATT, corre um protocolo designado de ATT (Attribute Protocol), que usa os dados do GATT para definir a maneira como dois dispositivos BLE enviam e recebem mensagens. Estes dados são organizados hierarquicamente em serviços que por sua vez agrupam conjuntos de dados (características). Dois dispositivos que estão a comunicar podem ser cliente ou servidor.[3]

- O Cliente envia pedidos ao GATT servidor e recebe a resposta ao pedido. O cliente não sabe nada acerca dos tipos de atributos que dizem respeito ao servidor, portanto como primeiro passo este deverá saber o tipo de atributos que constituem o servidor devendo em primeiro iniciar uma descoberta do serviço. Após a identificação dos seus atributos, e conseqüente reconhecimento do dispositivo, o cliente pode começar a desempenhar ações nos atributos do servidor.

- O Servidor recebe pedidos por parte do cliente. É igualmente responsável por armazenar os dados e fazer com que os dados do utilizador estejam disponíveis para o cliente, organizando-os em atributos.

No topo da hierarquia está um perfil, que é composto por um ou mais serviços necessários para uma aplicação. Um serviço é composto por características ou referências a outros serviços. Uma característica consiste num tipo (representado por um ID), um valor, e um conjunto de propriedades indicando as operações e características suportadas, e também um grupo de permissões relativas à segurança [3].

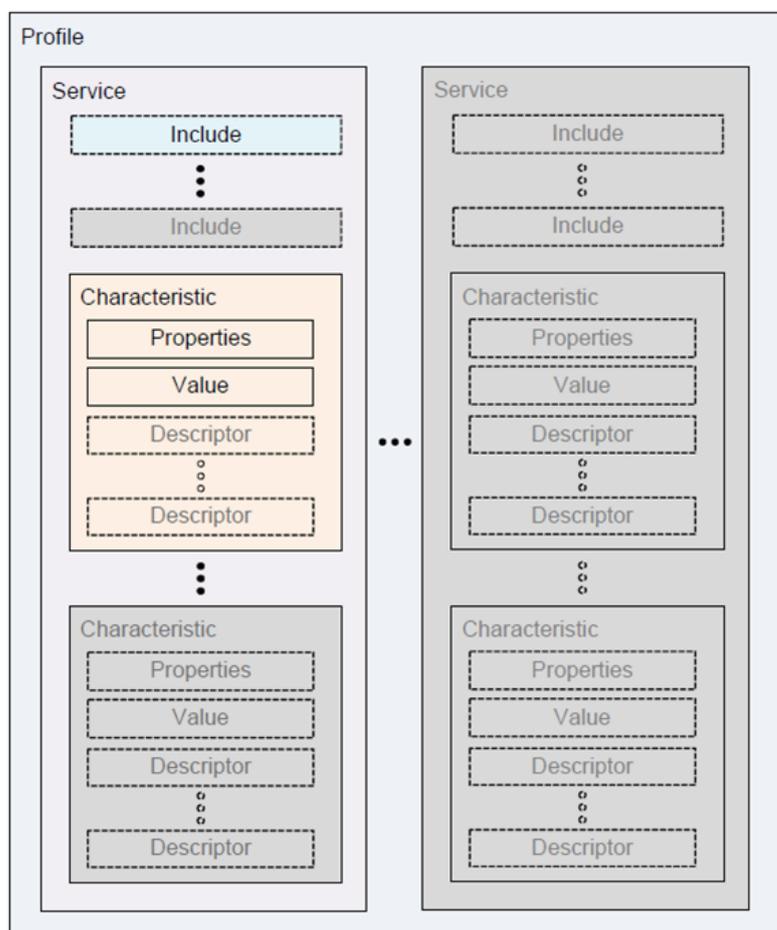


Figura 2.2: Hierarquia do perfil GATT [3]

O GATT agrupa estes serviços de modo a encapsular o comportamento de um dispositivo, e define comportamentos gerais baseados nas funcionalidades do GATT. Esta *framework* define procedimentos, formato dos serviços, características, leitura, escrita, notificação e a configuração

do *broadcast* das características. Os atributos são a entidade de dados mais pequena existente no protocolo GATT [3].

2.2 Human Interface Device Windows OS Driver

Em computação, os *drivers* são um programa que opera ou controla um dispositivo que está ligado a um computador. Um driver fornece o interface de *software* para os dispositivos de *hardware*, habilitando os sistemas operativos e outros programas que correm nesse computador a aceder a funções de *hardware* sem precisar de saber detalhadamente o que está a usar.

2.2.1 HID over GATT

Cada vez que precisamos de interagir com um computador usamos um HID (*Human Interface Device*). Os ratos e teclados são os tipos de HID mais comuns. A próxima geração de dispositivos HID usará o Bluetooth standard para enviar e receber dados [8].

O GATT descreve como o BLE transfere dados com outros dispositivos. O *HID over GATT Profile* (HOGP) define como criar dispositivos BLE para que sejam usados como um HID.

HOGP and BLEPeripheral

A biblioteca *BLEPeripheral* fornece uma API chamada de *BLEHIDPeripheral* que facilita a criação de dispositivos HOGP. Esta biblioteca têm as seguintes APIs pré configuradas:

- BLEKeyboard- Usada para enviar comandos de teclado.
- BLEMouse- Usada para enviar movimentos e cliques de rato.
- BLEMultimedia- Usada para enviar comandos de multimédia, como aumentar/diminuir o som.
- BLESystemControl- Usada para enviar comandos de controlo do sistema, como ligar e desligar.

Os utilizadores também podem implementar outros tipos de HID customizáveis, como por exemplo um *joystick*. Estes tipos de HID podem ser adicionados à *BLEPeripheral* [8].

Classe do dispositivo	Dispositivo exemplo
Display	Monitor
Communication	Modem
Audio	Speakers
Mass storage	Disco rígido
Human interface	Teclado

Tabela 2.2: APIs do HID over GATT Profile

O emparelhamento é necessário para que as comunicações entre o periférico e a central não sejam monitorizadas por terceiros. Durante o emparelhamento, a central e o periférico BLE trocam chaves de encriptação. A BLEPeripheral utiliza o *Just Works Pairing*. Em vez de usar um chave de encriptação específica para um dispositivo, o *Just Works* usa uma chave temporária (TK) que têm 16 bytes de tamanho, com todos os bits a zero. A chave temporária é usada para calcular a *Short-Term Key* (STK) para encriptar as comunicações, que é seguida por um processo de troca de dados de modo a obter a *Long-Term Key* (LTK). Tanto a central como o periférico guardam a LTK para que as comunicações possam continuar encriptadas no futuro [8].

2.2.2 USB HID class

O USB é uma arquitetura de comunicação que dá a um PC a capacidade de se conectar a uma variedade de dispositivos utilizando um cabo de 4 fios. O USB é protocolo de comunicação de 2 fios que corre a uma velocidade entre 1.5 ou 12 megabits por segunda. Os protocolos USB podem configurar dispositivos no startup do sistema ou já depois do mesmo, em runtime.

Estes dispositivos estão divididos em várias classes, cada classe define o comportamento comum e os protocolos para dispositivos que utilizam funções semelhantes. Alguns exemplos de classes de dispositivos USB são expostos na [9].

A informação sobre o dispositivo USB é guardada em segmentos da *ROM*. Estes segmentos são chamados de descriptors. A interface do *descriptor* pode identificar um dispositivo como parte de um número finito de classes. A class USB HID usa a correspondente HID classe driver para obter e mapear todos os dados.

O mapeamento e a obtenção dos dados é conseguida ao examinar os descriptors do dispositivo e os dados que ele fornece.

O descriptor do dispositivo da classe HID identifica outros descriptors da classe HID, indica os seus tamanhos e descreve os dados que cada dispositivo gera.

2.3 *Mechatronic Integrated Devices*

2.3.1 Definição e princípios

Devido à versatilidade do do processo de injeção de um molde em conjunto com a metalização estruturada, podem ser integradas funções elétricas ou mecânicas diretamente na peça moldada. Podem ser aplicados vários processos para a fabricação de um MID e para construir ou aplicar as estruturas [6].

O termo MID também inclui o termo Mechatronic Integrated Devices, isto quer dizer que não é necessário que um MID seja produzido por um processo de injeção, ou mesmo feito de plástico, podem ser utilizados materiais cerâmicos com o mesmo propósito. Estes dispositivos mecatrónicos estão a tornar-se cada vez mais importantes, porque à medida que são criados novos substratos de materiais também são criados novos processos de estruturação, que por sua vez abre a porta a novas funcionalidades e áreas de aplicação [10].

É essencial compreender que além da integração tridimensional, o vínculo entre o material e as partes integradas é crucial em termos de diversidade funcional. Por contraste, os sistemas mecatrónicos são frequentemente feitos ao juntar componentes individuais, que são fabricados através das técnicas convencionais [1].

Existem vários processos para a produção de um MID, os mais importantes são: injeção de disparo duplo, estruturação laser, gravação a quente e inserção de película. Outros processos não tanto usados podem ser consultados na figura 2.3.

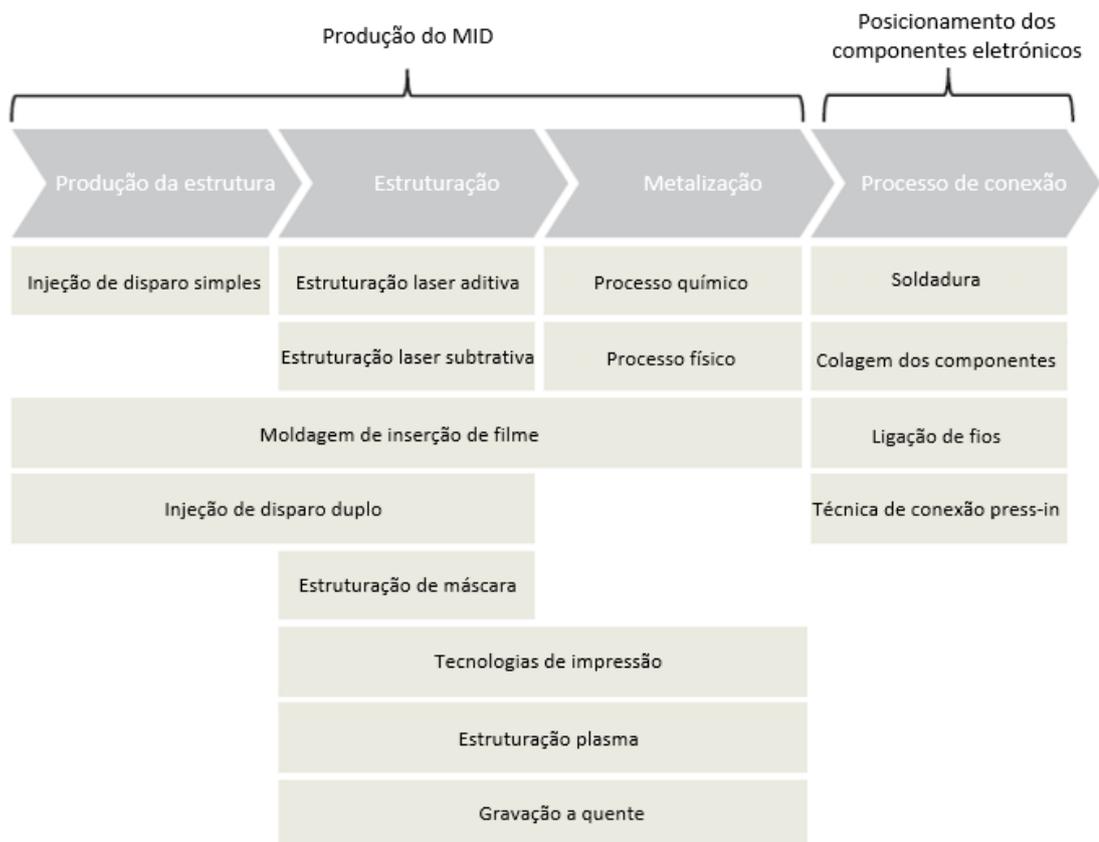


Figura 2.3: Processos de produção de um MID (Adaptado de [1])

2.3.2 Estruturação

Existem vários processos de modelagem de plástico que podem ser usados na produção de um MID [1]. Obrigatoriamente, um MID têm que ser modelado por um dos seguintes processos:

- Injeção de disparo simples
- Injeção de disparo duplo

Após a modelagem do plástico segue-se a estruturação e a metalização.

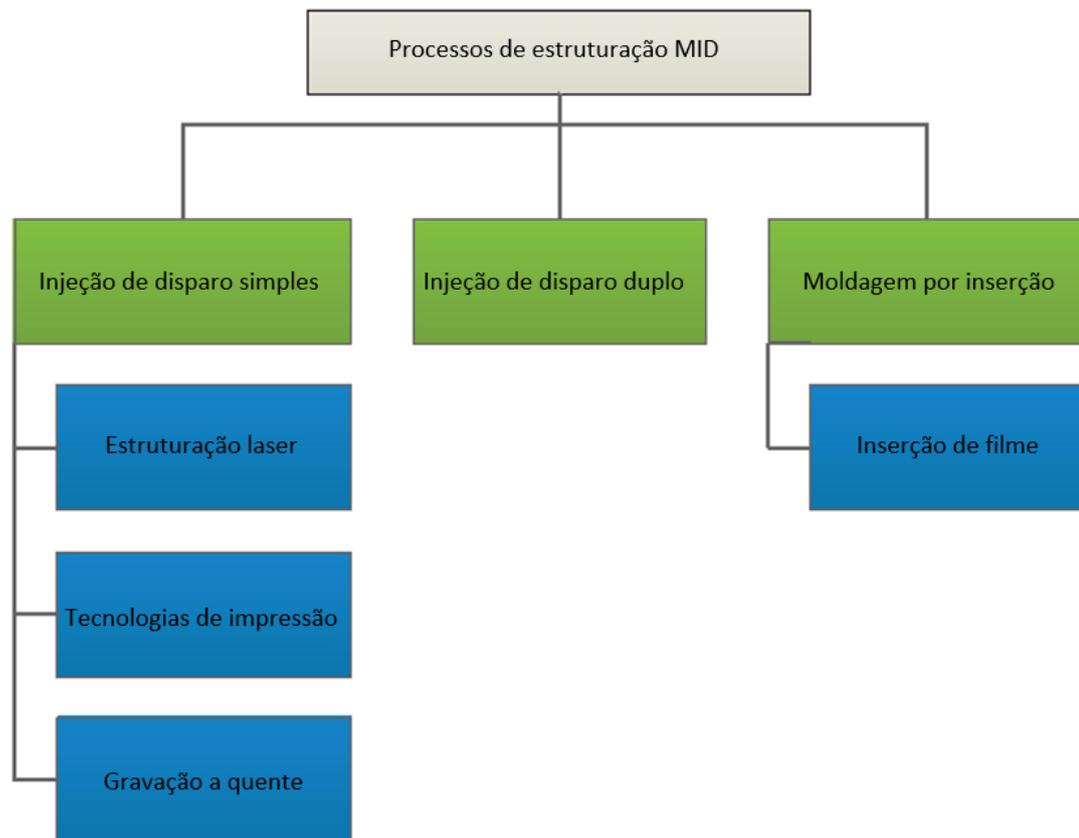


Figura 2.4: Processos de estruturação de um MID (Adaptado de [1])

2.3.2.1 Injeção de disparo simples

A injeção de disparo simples é caracterizada pelo alto volume de produção em conjunto com um preço moderado por unidade. O material termo-plástico é transportado por um alimentador de parafuso de uma tremonha para a máquina de injeção. A aplicação de calor enquanto o granulado de plástico ainda está no alimentador de parafuso faz com que o granulado se derreta e entre dentro do molde para assumir a sua forma final.

Posteriormente, depois do molde arrefecer, a ferramenta é aberta e a peça de plástico é removida.

A complexidade e o tamanho da peça determinam o custo de fabricação da mesma.

Estruturação Laser

As várias técnicas da estruturação laser são classificadas como:

- Aditivas

- Semi-aditivas
- Subtrativas

A técnica LDS é aditiva, e a sua manifestação mais importante é a LPFK-LDS e a ADDIMID. A Panasonic também desenvolveu um processo de estruturação laser semi-aditiva com o nome de MIPTEC. As técnicas de estruturação subtrativas são frequentemente usadas em materiais cerâmicos [1]. A figura mostra as diferentes técnicas de estruturação e os passos envolvidos

2.5.



Figura 2.5: Processos de estruturação laser (Adaptado de [1])

LPFK®-LDS

O LDS representa uma quota significativa (mais de 50%) do mercado de estruturação MID. Tornou-se num processo de referência na produção MID na passada década, isto deve-se ao alto grau de versatilidade, prototipagem rápida, baixo custo de ferramentas e alta liberdade de desenho 3D

que o LDS em conjunto com os MIDs oferecem. No que diz respeito à cor e ao tipo de plástico, a diversidade de materiais aumentou significativamente nos últimos anos.

A figura 2.5 representa a cadeia de produção de um MID.

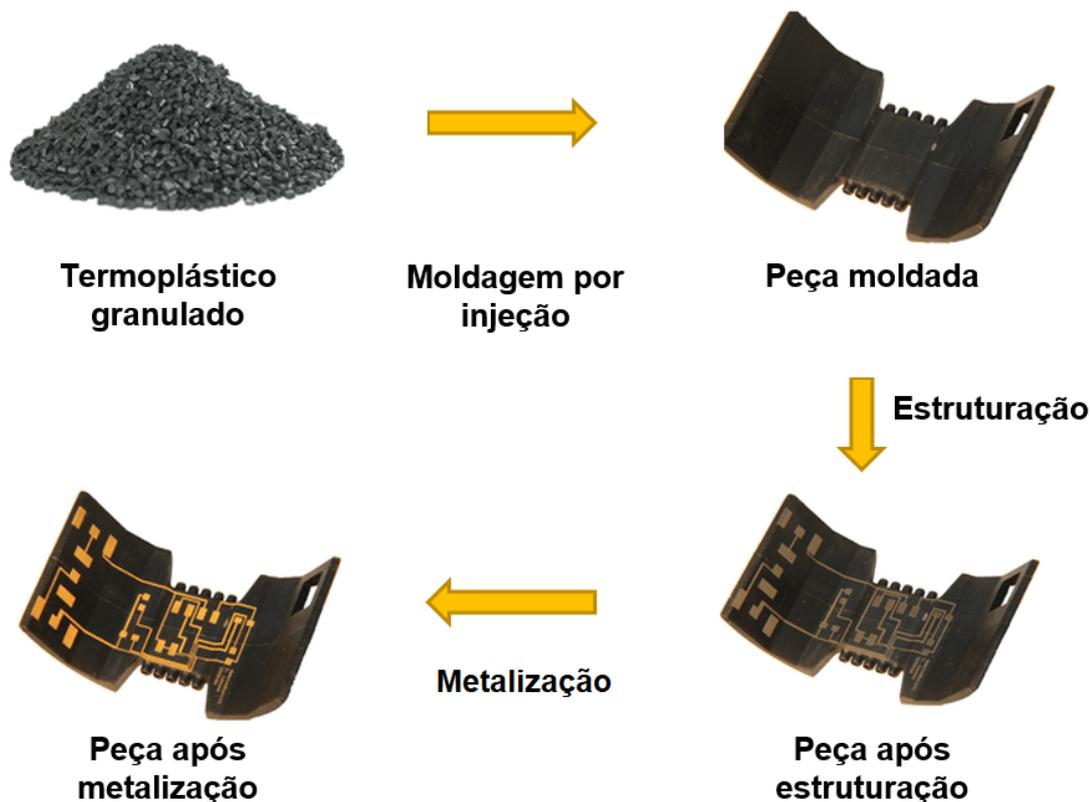


Figura 2.6: Processos de produção LPFK-LDS (Adaptado de [1])

A estruturação direta a laser baseia-se no princípio de ablação e nucleação por irradiação laser. O laser remove cerca de $1\ \mu\text{m}$ a $2\ \mu\text{m}$ de material de superfície e simultaneamente ativa o aditivo necessário para a metalização. Isto cria uma superfície micro-rugosa. Esta superfície consiste em núcleos ativos incorporados nas micro-cavidades produzidas pelo laser. A velocidade máxima de processamento é cerca $4000\ \text{mm/s}$, diminuindo com o aumento da complexidade da peça. Com a inclinação do ângulo de ataque a velocidade do laser diminui, por exemplo, quando o ângulo de ataque atinge os 45° , a velocidade do laser diminui para $1500\ \text{mm/s}$ [1]. A LPKF recomenda uma largura mínima de pista de $150\ \mu\text{m}$ com $200\ \mu\text{m}$ de espaçamento entre elas [1]. É possível desenhar condutores mais finos, por exemplo, pistas de $100\ \mu\text{m}$ com espaçamento ainda mais curto. No entanto, isto implica a otimização da cadeia de produção.

ADDIMID

A ADDIMID é uma técnica de estruturação laser aditiva. Este Processo foi desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação da Bayerisches Laserzentrum em cooperação com a Universidade Friedrich-Alexander. As principais semelhanças entre o LPKF-LDS® e o ADDIMID são a cadeia de produção e a modificação de plásticos pela adição de aditivos [1].

Esta tecnologia baseia-se no processo de revestimento da peça de plástico, com um pó de metal não condutor. Além da alta flexibilidade, apropriada à prototipagem rápida, produção em série e baixo custo das ferramentas.

MIPTEC

Esta técnica, semi-aditiva, varia bastante das técnicas anteriormente faladas, em termos da sua cadeia de processo.

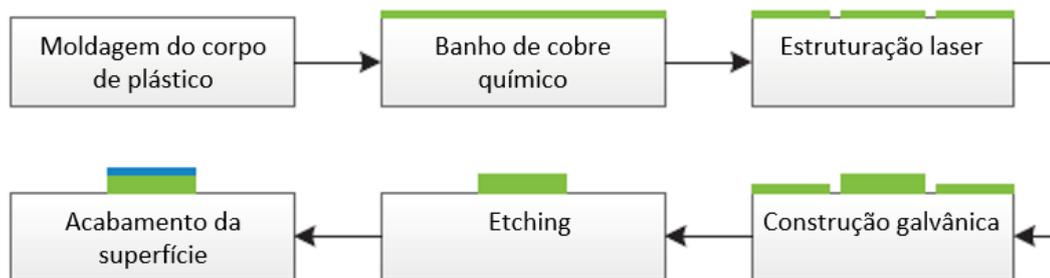


Figura 2.7: Processo de produção MIPTEC (Adaptado de [1])

Como a figura 2.7 mostra, após a injeção a peça de plástico é coberta de cobre através de um processo químico. O metal não desejado é depois removido por um laser UV ou IR. As camadas de cobre podem depois ser reforçadas através de um processo galvânico. Posteriormente, o cobre não desejado é removido através de um processo de *etching*.

Técnicas de impressão

As técnicas de impressão diferem radicalmente das técnicas de estruturação por laser. A cadeia de produção é bastante simples e compacta, e também oferecem novas possibilidades para a integração de contactos, cablagem e componentes eletrónicos. As tintas são aplicadas diretamente na superfície após a injeção da peça [1].

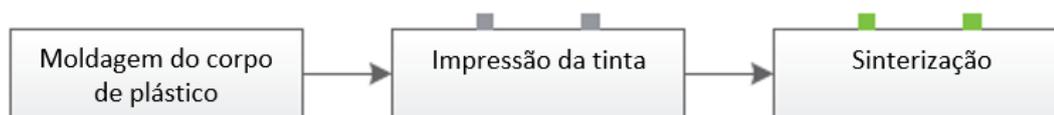


Figura 2.8: Processo de produção de um MID utilizando técnica de impressão (Adaptado de [1])

Aerosol-Jet® Printing

Existem vários métodos de impressão para esta técnica: tintas condutoras, materiais dielétricos ou isolantes. As partículas das tintas são de aproximadamente 50 nm, esta particularidade torna possível a produção de condutores super finos. A cobertura pode ser curada pelo método convencional (sinterização térmica num forno) ou através de sinterização seletiva através de luz ou sistemas laser [1].

Inkjet Printing

Esta técnica de impressão é frequentemente usada para identificação radio frequência, antenas, teclados, sensores. Esta técnica é muito vantajosa para grandes estruturas condutoras, alta precisão de medição de tinta, impressão sem máscaras complexas [1].

2.3.2.2 Injeção de disparo duplo

A cadeia de produção desta técnica de injeção é muito curta. Como a figura 2.9 mostra, a peça de plástico é produzida numa sequência de dois ciclos de moldagem, antes da metalização das estruturas condutoras. Os dois ciclos de moldagem diferem no tipo de plástico usado. O plástico para o primeiro disparo é simples, enquanto para o segundo disparo, é necessário um plástico metalizável.



Figura 2.9: Processo de produção de um MID utilizando a técnica de injeção de disparo duplo (Adaptado de [1])

2.4 Tecnologia capacitiva

Os controladores CapSense da Cypress leem as mudanças na capacidade para detectar a presença de um dedo. Os pads capacitivos de um sensor são formados por pistas de uma PCB. O formato de PCB mais comum para este tipo de aplicações é de duas layers, com pads de sensor e uma plano de massa axadrezado na layer de cima e os componentes e outro plano de massa axadrezado na layer de baixo. Os componentes elétricos incluem o controlador CapSense e outros para converter a capacidade do sensor em valores digitais. A figura 2.10 mostra uma vista transversal de uma PCB de duas layers. Uma PCB de quatro layers é uma opção quando a área da board têm que ser minimizada. Os layouts de uma PCB que incorporam sensores capacitivos têm um papel fundamental na performance.

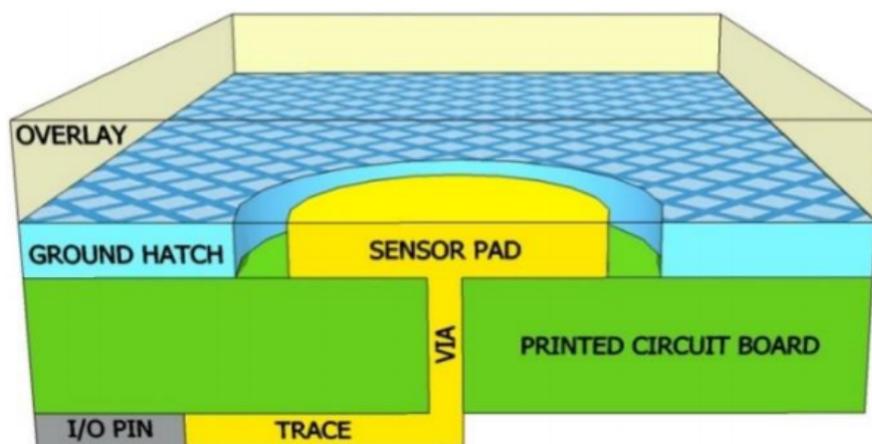


Figura 2.10: Stack de duas camadas para um sistema capacitivo (Adaptado de [4])

Geralmente, um plano de massa bem projetado reduz tanto as emissões RF como as interferências. No entanto, planos de massa sólidos próximos dos sensores capacitivos vão aumentar a corrente parasitica dos sensores. Esta corrente parasitica vai reduzir a sensibilidade dos sensores [4].

2.4.1 Princípios de funcionamento

A capacidade pode ser medida entre dois pontos usando a auto capacidade. É usado um único pino para medir a capacidade entre um eletrodo e a massa. Quando é colocado um dedo no sensor a capacidade medida vai aumentar. Este é o melhor método para botões e sliders capacitivos [11].

A capacidade medida pelo controlador é chamada de C_s . Quando não temos nenhum dedo a tocar no sensor, a C_s é igual à capacidade parasítica (C_p) do sistema. A corrente parasítica é a simplificação da distribuição da capacidade que inclui os efeitos do sensor, do overlay, das pistas entre o pino do controlador e o pad do sensor e das vias do circuito. A corrente parasítica também está relacionada com o campo elétrico à volta do pad do sensor. A 2.11 demonstra de uma maneira simplificada o campo elétrico que rodeia o sensor.

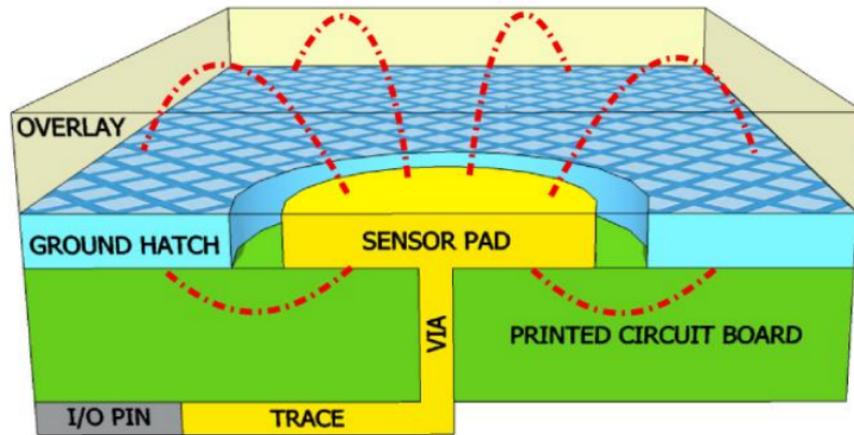


Figura 2.11: Campo elétrico de um sistema capacitivo (Adaptado de [4])

Quando um dedo toca na superfície do sensor, forma um paralelo entre a capacidade do dedo e a capacidade do sensor. O resultado é chamado de C_f que é definido pela equação 2.1. C_f é a simplificação da capacidade que inclui os efeitos do corpo humano e o caminho de retorno para a PCB [4].

$$C_f = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{D} \quad (2.1)$$

ϵ_0 = Permeabilidade do ar

ϵ_r = Constante dielétrica do overlay

A = Área de contacto entre o dedo e o sensor.

D = Altura do overlay

Quando um dedo toca na superfície do sensor, C_s é igual à soma de C_p e C_f .

Quando um dedo toca no sensor, a capacidade aumenta e a resistência equivalente diminui. Isto causa um aumento na corrente que passa pela resistência, que o modelador Sigma-Delta balanceia através do controlo do modelador IDAC, resultando num aumento do valor digital. O conversor Sigma-Delta mantém a tensão do AMUXBUS num valor constante (V_{REF}) com a ajuda do condensador CMOD. Ao acrescentar uma resistência em série (R_s) com o sensor ajuda a melhorar a imunidade ao ruído [4].

2.4.3 Diretrizes de desenho

2.4.3.1 Botões

A melhor forma para os botões é redonda. Formas rectangulares com cantos arredondados também são aceitáveis. Os cantos com menos de 90° concentram os campos elétricos, por isso é melhor evitá-los [12][13].

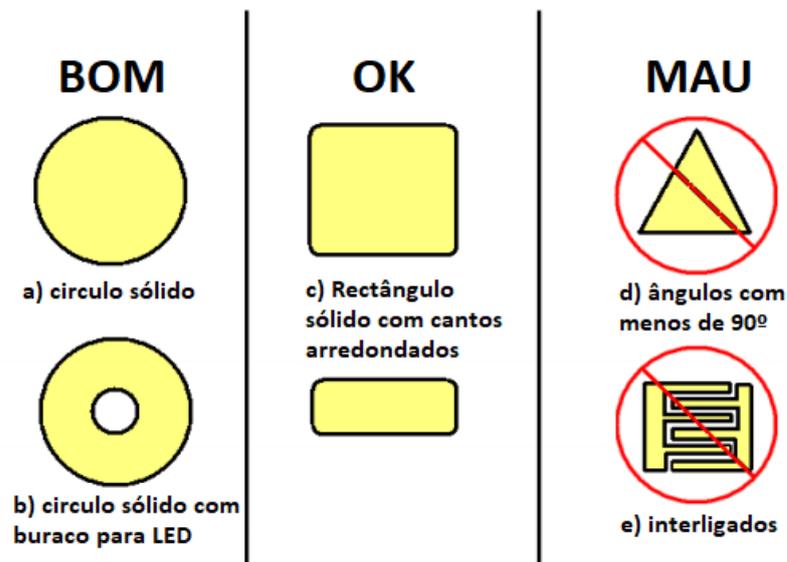


Figura 2.14: Geometrias de botões recomendadas (Adaptado de [4])

O diâmetro dos botões pode variar de 5 até 15mm, sendo os botões com 10 mm os mais adequados para a maior parte das aplicações. A distância entre o plano axadrezado e o botão deve ser igual à espessura do overlay, mas não deve ser menor do que 0.5mm e maior do que 2mm. Por exemplo, um layout para um PCB com um overlay de 1mm deve ter uma distância entre o plano e o botão de 1mm, enquanto um overlay de 3mm deverá ter uma distância de

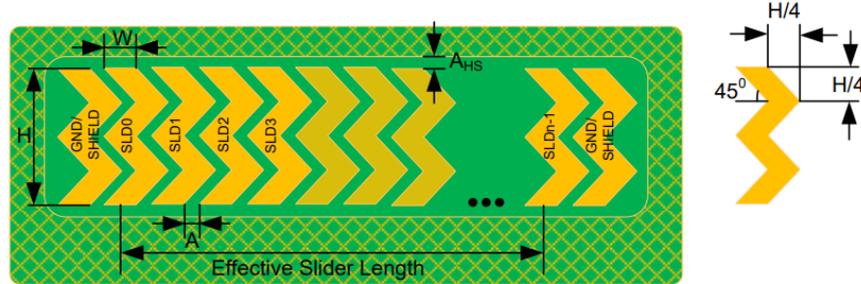


Figura 2.15: Geometria recomendada para o slider (Adaptado de [4])

Parâmetro	Espessura do overlay	Mínimo	Máximo	Recomendado
Largura do segmento (W)	1mm	2mm	-	8mm
	3mm	4mm	-	
	4mm	6mm	-	
Altura do segmento (H)	-	7mm	15mm	12mm
Distância entre segmentos (A)	-	0.5mm	2mm	0.5mm
Distância entre plano e slider (AHS)	-	0.5mm	2mm	Igual à espessura do overlay

Tabela 2.3: Dimensões recomendadas para o slider

2mm entre o plano e o botão. O espaçamento entre 2 botões deve ser largo o suficiente para que se um botão é pressionado, o dedo não deve tocar no outro botão [12][13].

2.4.3.2 Slider

A figura 2.15 e a tabela 2.3 representam os valores recomendados para o desenho do slider e dos seus segmentos.

Quando um dedo é colocado no slider entre dois segmentos, esses dois segmentos vão reportar um sinal válido (a diferença entre a contagem é maior ou igual ao valor do noise treshold). Tendo isto em conta a forma do slider é a demonstrada na figura 2.15. Tipicamente, a média do diâmetro do dedo humano é de 9mm. Com base nesta média a largura recomendada para cada um dos segmentos do slider é de 8mm e a distância para o plano de massa de 0.5mm.

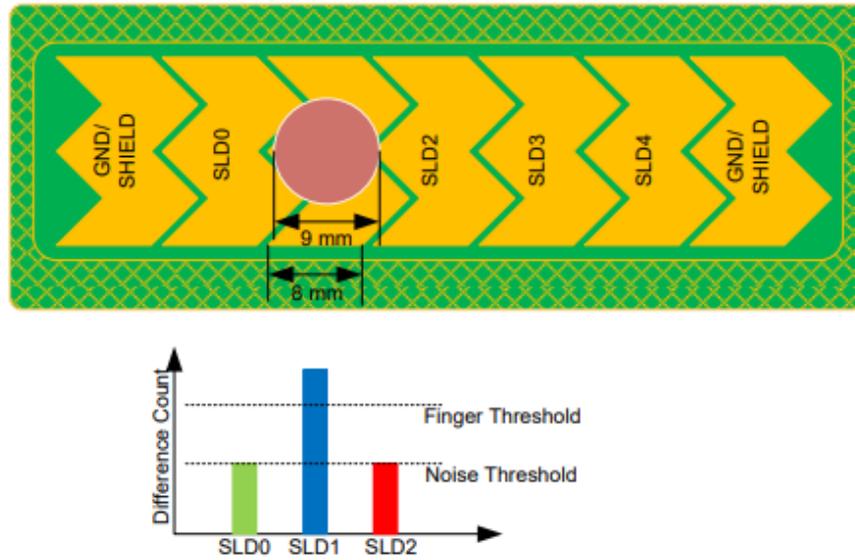


Figura 2.16: Relação entre a largura dos segmentos e o diâmetro do dedo (Adaptado de [4])

A equação 2.2 representa o algoritmo usado pelo módulo CapSense.

$$Centroid_{position} = \left(\frac{S_{x+1} - S_{x-1}}{S_{x+1} + S_{x0} + S_{x-1}} + maximum \right) * \frac{Resolution}{n - 1} \quad (2.2)$$

Chapter 3

Arquitetura do Sistema

Neste capítulo é abordada a arquitetura do sistema, onde inicialmente são apresentados os requisitos e restrições do sistema. De seguida é apresentada a plataforma de desenvolvimento que permitiu a integração do sistema. Posteriormente é exposto o diagrama de blocos do sistema. O capítulo termina com a apresentação da estrutura de dados definida pelo driver HID over GATT.

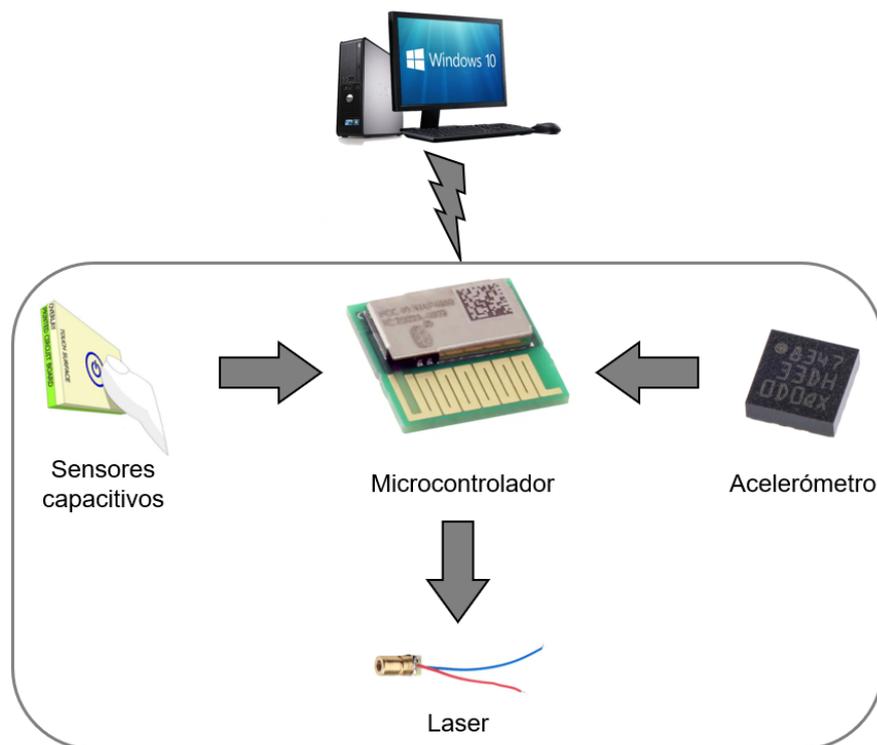


Figura 3.1: Diagrama de funcionamento do sistema

3.1 Requisitos do sistema

Para este sistema foram definidos requisitos funcionais e não funcionais com base no hardware a implementar, no software e nas funcionalidades a aplicar ao sistema. Os requisitos para o sistema a desenvolver nesta dissertação são:

- Comunicação bluetooth entre o dispositivo e um computador (com sistema operativo Windows 10).
- Integração de dois botões e um *slider* capacitivo com funções de botão esquerdo, botão direito e *scroll*.
- A função *shake & wake* deve implementada através da integração de um acelerómetro para deteção de movimento.
- Integração de um laser ativado pela função *shake & wake*.
- A alimentação do circuito deve ser feita através de uma pilha AAA.
- Desenho do sistema utilizando apenas componentes SMD.
- O hardware têm de que ser desenhado tendo em vista um baixo consumo energético.
- Facilidade no emparelhamento com o computador.
- Bom feedback de utilização.
- Permitir ao utilizador uma interação fácil com o computador.

3.2 Hardware

Os componentes de hardware que se utilizaram para o projeto no qual esta dissertação se insere, foram selecionados tendo em conta os requisitos e restrições enumerados na secção anterior. Sabendo que inicialmente se trate de um protótipo, a escolha do hardware teve de ser feita com algum cuidado, devido à quantidade de processamento e energia utilizada que os botões capacitivos e a comunicação BLE exigem. Assim, nesta secção, especifica-se o hardware a utilizar no desenvolvimento do sistema. A seleção do microcontrolador sem fios e do acelerómetro

são resultado das restrições impostas pelo requisitos funcionais do sistema. Todos os restantes componentes foram selecionados em virtude dos resultados obtidos pelo grupo de trabalho do Embedded Systems Research Group (ESRG) da Universidade do Minho (UM) em projetos anteriores e de todo *know-how adquirido*.

3.2.1 Módulo de comunicação sem fios in-chip

O consumo de energia é um fator crítico na escolha de um microcontrolador. Olhando para o pico de corrente do BLE na tabela 3.1 dá-nos alguma informação sobre quanto tempo útil de vida terá o nosso protótipo. Isto porque tendo altos picos de corrente reduz o tempo de vida da bateria. Após uma pesquisa foi verificado que a maior parte dos dispositivos estão disponíveis em dois encapsulamentos:

- QFN: São mais caros e maiores, mas são mais fáceis de usar e têm menos problemas de produção.
- WLCSP: São mais baratos, porque têm menos material que os QFN. Também são mais pequenos mas requerem um design mais elaborado que o anterior. Apesar de serem mais baratos o desenho da PCB deste encapsulamento requer tolerâncias muito mais apertadas e normalmente mais do que duas *layers*, conseqüentemente o *layout* é mais complexo e muito difícil de implementar recorrendo a LDS.

	Nordic Semi nRF51822	Texas I. CC2541	Dialog DA14580	Cypress PSoC 4 BLE
Mode	BLE v4.1	BLE v4.0	BLE v4.1	BLE v4.1
Processador	Cortex-M0	8051	Cortex-M0	Cortex-M0
Flash	128kB / 256kB	128kB / 256kB	32kB OTP + ROM	128kB / 256kB
RAM	16kB / 32kB	8kB	42kB + 8kB	16kB / 32kB
BLE Rx (A)	9.5mA	14.3mA	4.9mA	15.6mA
BLE Tx (A)	8.1mA	14.7mA	4.9mA	16.4mA
Timers	3	3	2	4
GPIO	max. 31	max. 21	max. 32	mas. 36
Interfaces	1x	2x	2x	2x
	I2C UART	USART/SPI/I2C	UARTS SPI I2C	Comm Blocks
Periféricos	RTC, Quadrature Decoder	PWM	Quadrature Decoder Keyboard Controller	CapSense

Tabela 3.1: Comparação entre os diferentes microcontroladores (Adaptado de [5])

Após uma análise às opções apresentadas, verificou-se que os microcontroladores da Cypress (Programmable System on Chip 4 BLE) são os dispositivos mais apropriados a este projeto, não apenas integram o BLE e um ARM Cortex-M0, mas também permitem o uso de hardware programável. Existem várias vantagens que o PSoC 4 BLE oferecem:

- **Flexibilidade:** fazer mudanças no hardware depois do desenho estar feito pode ficar muito dispendioso. A arquitetura do PSoC Permite fazer uma reconfiguração do sistema alterando apenas o software.
- **Velocidade do CPU de 48MHz:** Comparando com as restantes opções é a melhor escolha, especialmente porque o CPU vai ser partilhado com a *stack* BLE.
- **Consumo energético reduzido:** Os valores de pico da corrente consumida em receção e transmissão (RX/TX) são altos mas numa aplicação prática não são os picos que realmente importam. Ao ter periféricos configuráveis que não sobrecarregam o CPU podemos reduzir o consumo de energia.

- *CapSense*: Esta solução da Cypress é muito robusta e é considerada das melhores do mercado. Este periférico já vêm com API's predefinidas para facilitar a utilização de sensores de toque.
- Integrated Development Environment gratuito: toda a toolchain de desenvolvimento é fornecida gratuitamente pela Cypress. A Cypress usa a plataforma PSoC Creator para permitir aos clientes integrar periféricos nos seus projetos, mas também contém um ambiente de desenvolvimento para o processador ARM e para o sistema BLE.



Figura 3.2: Microcontrolador escolhido

3.2.2 Acelerómetro

O acelerómetro a utilizar neste trabalho é o LIS331DLH da STMicroelectronics. Este é um acelerómetro do tipo Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) capacitivo, de baixo consumo com 5 modos de configuração low power e que permite medir acelerações de 2, 4 ou 8 g em 3 eixos com uma resolução de 16 bit. Além disso, disponibiliza duas interfaces de comunicação série para o exterior, a SPI e a I2C. Este acelerómetro pode gerar uma interrupção sempre que for detetada uma aceleração superior ao *threshold* definido na configuração do acelerómetro. A tabela 3.2 e a figura 3.3 apresentam respetivamente as principais características e imagem do acelerómetro LIS331DLH.

Tensão de Alimentação	2.16 - 3.6 V
Escala de Aceleração	+2 g, +4 g e +8 g
Número de Eixos	3
Fontes de Interrupção	2
Resolução	16 bit
Frequência de Saída de Dados	0.5 Hz - 1 kHz
Modos Low Power	0.5 Hz - 1 Hz - 2 Hz - 5 Hz -
Interface com o Exterior	SPI - I2C
Frequência de Clock SPI	até 10 MHz
Frequência de Clock I2C	até 400 MHz

Tabela 3.2: Características do LIS331DLH



Figura 3.3: Acelerômetro escolhido

3.3 Plataforma de desenvolvimento

A plataforma de desenvolvimento escolhida para este projeto foi a CY8CKIT-042-BLE-A, que pode ser observada na figura 3.4.



Figura 3.4: Kit de desenvolvimento utilizado

Esta plataforma suporta software feito no PSoC Creator, que inclui vários projetos exemplos. A especificação Bluetooth Low Energy v4.2 foi abstraída no módulo BLE Component do PSoC Creator, permitindo uma fácil integração. Esta plataforma de desenvolvimento foi desenhada para facilitar o desenvolvimento a baixo custo [14].

Em conjunto com esta plataforma de desenvolvimento foi utilizado um módulo BLE (figura 3.5) que incorpora o PSoC 4 BLE.

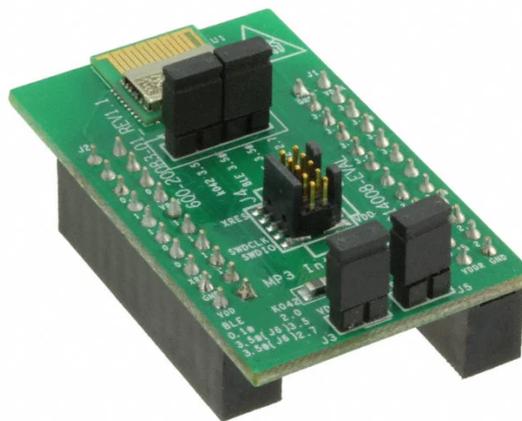


Figura 3.5: Módulo BLE utilizado

3.4 Aplicação do sistema

A aplicação de software do sistema foi desenvolvida no IDE PSoC Creator da Cypress. Esta é constituída por diversos módulos sendo o principal aquele que contém a definição e características do BLE e de processamento de eventos da aplicação, seguido da operação do acelerómetro e respetivo protocolo de comunicação, entre outros. Além disso, a aplicação deve contemplar módulos de configuração do dispositivo na geração de código que permitem, por exemplo, alterar o intervalo de conexão do BLE, intervalo de *advertising*, alterar o *baud-rate* do I2C. De uma forma sucinta a aplicação do sistema conterà os seguintes módulos:

- Módulo Principal da Aplicação;
- Módulo do BLE;
- Módulo do Acelerómetro;
- Módulo do I2C;
- Módulo dos Sensores Capacitivos;

3.4.1 Módulo Principal da Aplicação

O diagrama de blocos do módulo principal da aplicação está representado na figura 3.6. Após feita a inicialização o dispositivo vai fazer a configuração de todos os componentes da aplicação. São necessárias 4 funções callback para a operação BLE. Uma delas é a `AppCallBack()` que é usada para receber eventos genéricos da stack BLE, as outras (`HidsCallBack()`, `BasCallBack()`, `ScpsCallBack()`) são necessárias para receber eventos dos serviços BLE. O subsistema BLE e o CPU entram em modo low power entre intervalos de conexão e de advertising. Quando é necessário fazer advertising ou manter a conexão é dispositivo acorda do modo low power. Na figura 3.6 temos um diagrama de blocos que explica de uma maneira simplificada o funcionamento do sistema.

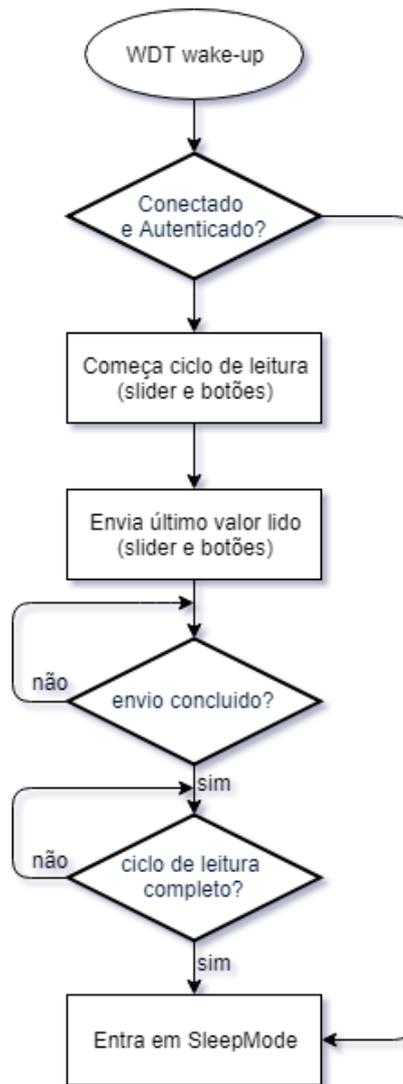


Figura 3.6: Diagrama de blocos da aplicação do sistema

3.4.2 Módulo BLE

3.4.2.1 Processo de conexão

A figura 3.7 explica o processo de conexão. O sistema vai especificar um intervalo de *advertising* e cada vez que esse intervalo passar, vai retransmitir o seu pacote de *advertising*. Um atraso maior vai poupar mais energia.

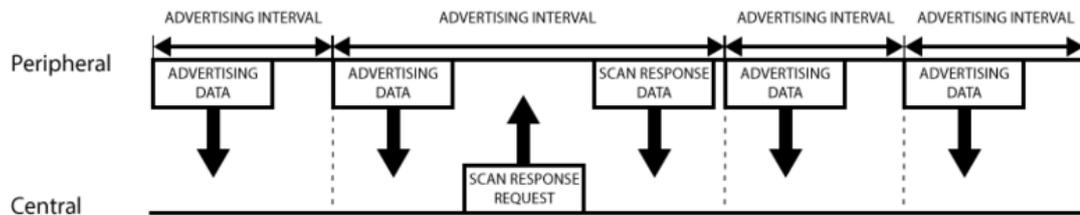


Figura 3.7: Processo de conexão do BLE (adaptado de [2])

3.4.2.2 Processo de transação

Estabelecida a conexão é necessário começar a transmitir informação sobre o estado do sistema. O nosso sistema foi definido como o servidor GATT, que contém o serviço e as definições características, e o cliente GATT que será o computador com *windows 10* instalado. Todas as transações são iniciadas pelo cliente GATT que recebe respostas do nosso sistema. No decorrer do processo conexão, o nosso sistema vai sugerir um intervalo de conexão, e o cliente GATT vai tentar conectar-se nesse intervalo para verificar se existe novos dados disponíveis. O cliente GATT pode não conseguir cumprir este intervalo porque pode estar ocupado a trocar informações com outros periféricos, ou os recursos do sistema podem não estar disponíveis. O diagrama que está representado na figura 3.8, ilustra o processo de troca de dados entre o cliente GATT e o servidor GATT, com o cliente a iniciar todas as transações.

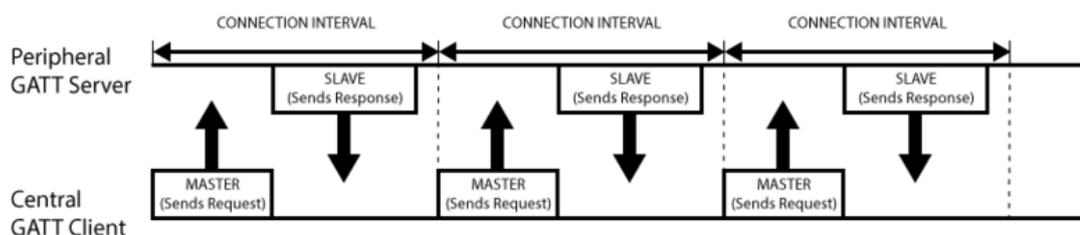


Figura 3.8: Processo de transação do BLE (adaptado de [2])

3.4.3 Módulo do Acelerómetro

O módulo do acelerómetro tem como objetivo permitir a deteção de movimento, para implementar a função *shake & wake*. Uma API em linguagem de programação C, para interface ao acelerómetro MEMS, foi previamente desenvolvida pelo ESRG. Foi realizado um porting para o PSoC 4. Esta API é constituída por funções de escrita e leitura de registos, de inicialização do acelerómetro como acelerómetro e como inclinómetro, de leitura de acelerações, de cálculo de

acelerações medidas em mG, de cálculo do módulo das acelerações medidas e de cálculo dos ângulos. A função de escrita de registos do acelerómetro informa qual o registo do acelerómetro a ser escrito e qual o conteúdo. A função de leitura de registos do acelerómetro informa qual o registo do acelerómetro a ser lido (através da função de escrita de registos do acelerómetro e após a indicação de leitura lê o valor nele existente). Estas duas funções recorrem a funções do módulo I2C. A função de inicialização do acelerómetro como acelerómetro indica que este é configurado para admitir acelerações no intervalo $-/+ 8$ g, detetar interrupções de acelerações em 6 direções, acordar o micro controlador quando forem sentidas acelerações iguais ou superiores a 1 g (threshold).

3.4.4 Módulo do I2C

A transação no BUS de I2C é iniciada através de um sinal START (ST). Este sinal é definido como a transação do nível lógico HIGH para LOW na linha de dados, enquanto a linha SCL é mantida em HIGH. Depois desta condição ser transmitida pelo Master, o BUS é considerado ocupado. O próximo byte de dados transmitido depois do sinal de START, contém o endereço do Slave nos primeiros 7 bits. O oitavo bit deste byte especifica se o Mestre quer receber ou transmitir dados para o acelerómetro. Quando o endereço é transmitido, o acelerómetro vai comparar os primeiros sete bits com o seu endereço, se estes coincidirem o acelerómetro considera-se endereçado pelo Master. Após a transmissão destes sinais, o acelerómetro vai retornar um SAK (Acknowledge), para o Mestre enviar o SUB (endereço que pretendemos ler ou escrever nos registos do acelerómetro). Posteriormente o acelerómetro vai retornar um SAK e vai enviar ou receber os dados conforme a indicação do mestre.

Master	ST	SAD + W		SUB		DATA		SP
Slave			SAK		SAK		SAK	

Figura 3.9: Transação de dados do processo de escrita do módulo I2C

Master	ST	SAD + W		SUB		SR	SAD + R			NMAK	SP
Slave			SAK		SAK			SAK	DATA		

Figura 3.10: Transação de dados do processo de leitura do módulo I2C

3.4.5 Módulo dos Sensores Capacitivos

O módulo CapSense (figura 3.11) da Cypress que incorpora o PSoC Creator, é uma solução que contém um wizard de configuração para criar e configurar widgets (figura 3.12) do componente CapSense.

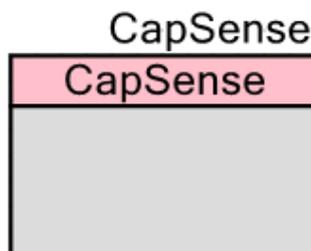


Figura 3.11: Módulo CapSense da biblioteca do PSoC Creator

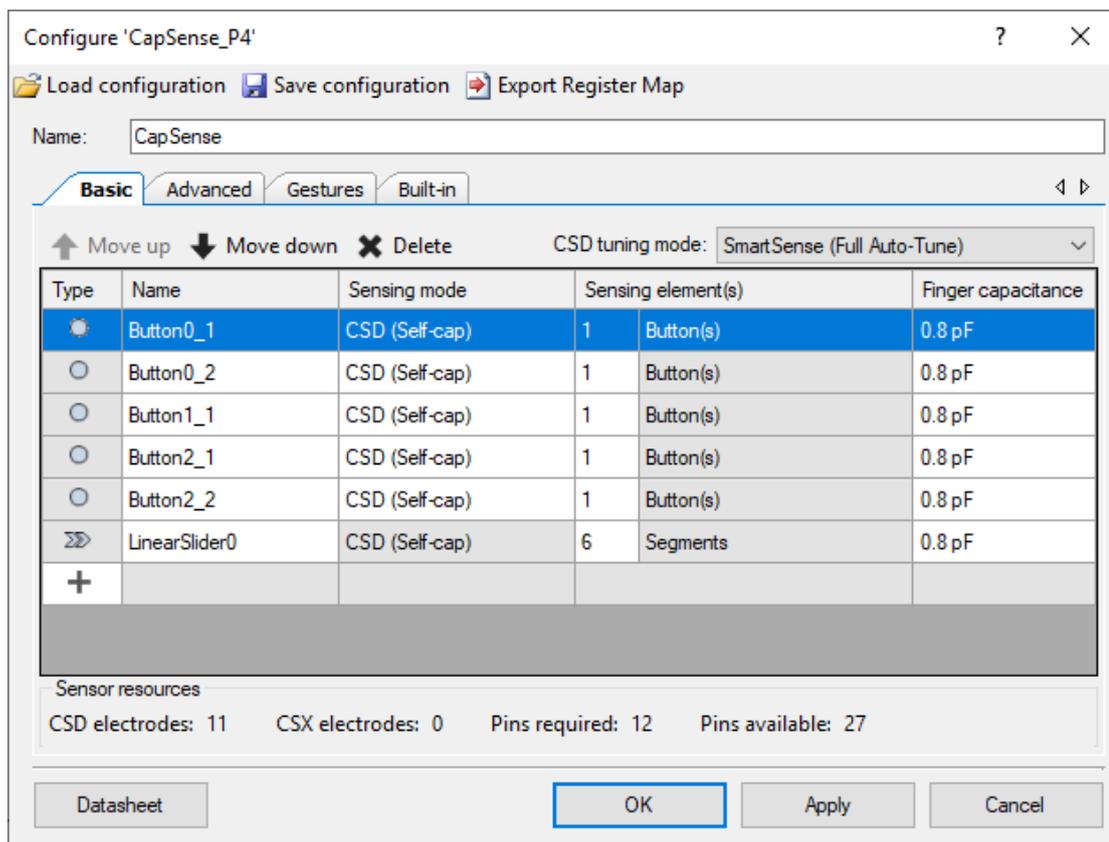


Figura 3.12: Painel de configuração do módulo CapSense

É também neste módulo que definimos os gestos habilitados ao slider (figura 3.13).

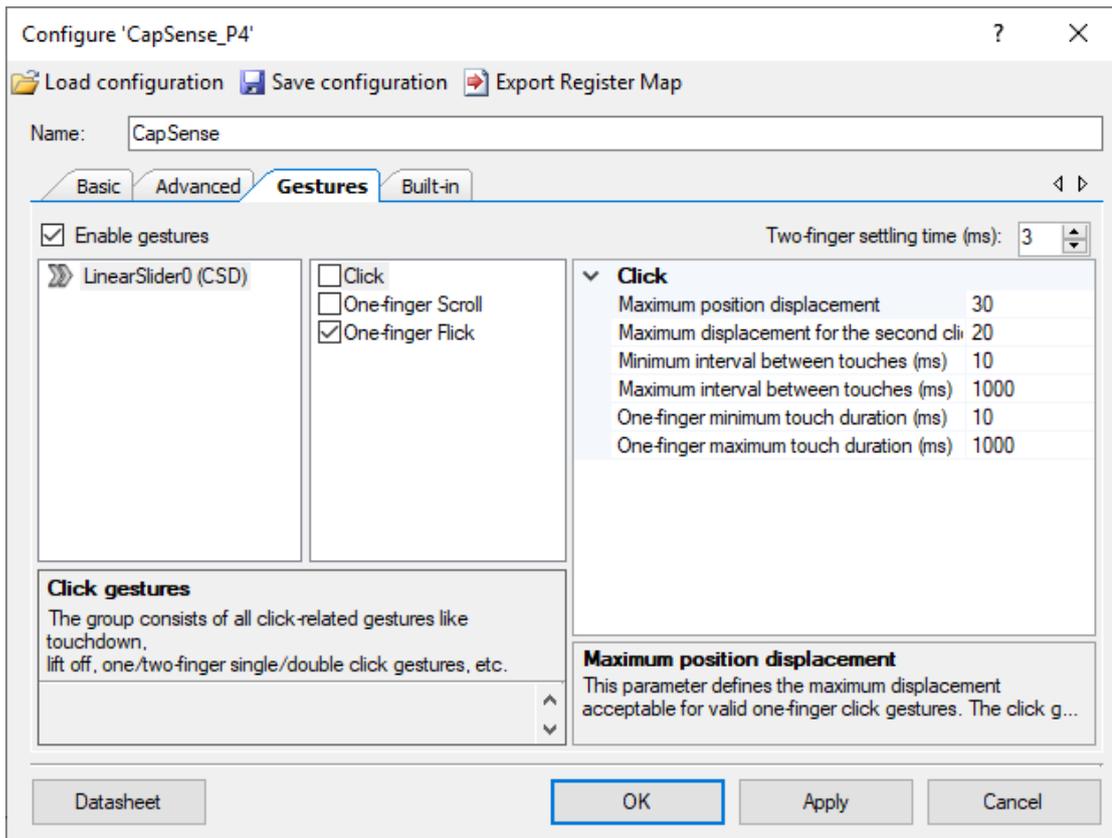


Figura 3.13: Painel de configuração de gestos do módulo CapSense

Após ser configurado e inicializado, o sistema vai começar um ciclo de leitura cada vez que existir um ciclo de advertising. Nesse ciclo de advertising o sistema vai enviar as leituras dos botões e do slider do ciclo iniciado anteriormente e não do actual. Enquanto o sistema está a espera de confirmar os dados enviados já está a correr um ciclo de leitura para enviar posteriormente. Quando o ciclo de leitura atual acabar dá a autorização para entrar em modo sleep. Ao utilizar este método iremos ter um atraso no feedback do tamanho do intervalo de advertising.



Figura 3.14: Diagrama de blocos da leitura e processamento dos sensores capacitivos

3.5 Pacote de dados BLE

Um pacote de dados BLE transmitido têm a estrutura definida na figura 3.15.

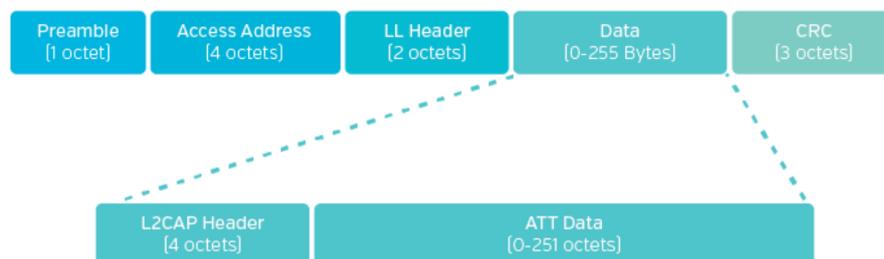


Figura 3.15: Pacote de dados BLE (Adaptado de [2])

O campo dos dados é variável dependendo da versão do Bluetooth utilizado. No Bluetooth v4.0 e v4.1, o tamanho máximo do campo de dados é de 27 bytes. No Bluetooth v4.2 foi

adicionada uma nova funcionalidade para dar a conhecer o tamanho do campo de dados, permitindo que este seja estendido até 256 bytes. O campo L2CAP é fixo em tamanho (4 bytes), e é colocado para reagrupar e fragmentar pacotes que são maiores que o tamanho permitido. No caso específico desta aplicação temos um MTU de 29 bytes mais 4 bytes pertencentes ao campo L2CAP, que está representado na figura 3.16

Advertisement packet:			
Description	Value	Index	
AD Data 1: <<Flags>>			
Length	0x02	[0]	
<<Flags>>			
BR/EDR not supported Limited discoverable mode	0x05	[2]	
AD Data 2: <<Local Name>>			
Length	0x0A	[3]	
<<Local Name>>			
'B'	0x42	[5]	
'L'	0x4C	[6]	
'E'	0x45	[7]	
' '	0x20	[8]	
'M'	0x4D	[9]	
'o'	0x6F	[10]	
'u'	0x75	[11]	
's'	0x73	[12]	
'e'	0x65	[13]	
AD Data 3: <<Slave Connection Interval Range>>			
Length	0x05	[14]	
<<Slave Connection Interval Range>>			
Minimum : 7.5 ms			
[0]	0x06	[16]	
[1]	0x00	[17]	
Maximum : 15 ms			
[0]	0x0C	[18]	
[1]	0x00	[19]	
AD Data 4: <<More 16-bit UUIDs available>>			
Length	0x05	[20]	
<<More 16-bit UUIDs available>>			
Service: Human Interface Device			
[0]	0x12	[22]	
[1]	0x18	[23]	
Service: Battery Service			
[0]	0x0F	[24]	
[1]	0x18	[25]	
AD Data 5: <<Appearance>>			
Length	0x03	[26]	
<<Appearance>>			
Value: HID: Mouse			
[0]	0xC2	[28]	
[1]	0x03	[29]	

Figura 3.16: Advertising packet do módulo BLE

Chapter 4

Desenvolvimento do sistema

Após definirmos as especificações do sistema e os seus componentes, foi possível desenvolver hardware capaz de integrar todos estes componentes. Este capítulo expõe os detalhes do sistema desenvolvido. Para isto, o capítulo é dividido em duas componentes, a primeira abordagem do protótipo produzida utilizando o método convencional de produção de PCB (FR4) e a segunda abordagem produzida utilizando a técnica LDS.

4.1 Altium designer

4.1.1 Descrição da ferramenta

O Altium Designer é uma das ferramentas mais populares para o design de circuitos impressos. Este software é desenvolvido e comercializado pela Altium Limited. Inclui ferramentas para todas as tarefas de design de circuitos: esquemático, simulação de circuitos, análise de integridade do sinal, design de PCB e desenvolvimento de sistemas embebidos baseados em FPGA. Além disso, o ambiente de trabalho do Altium Designer pode ser personalizado para atender a uma ampla variedade de requisitos dos utilizadores.

4.1.2 *Cypress touch controls*

De maneira a facilitar a utilização de sensores capacitivos, o Altium Designer suporta a integração de padrões de sensores capacitivos planares, para utilizar com a gama de microcontroladores Cypress CapSense e PSoC. Cada canal (eletrodo) desses sensores possui uma ligação direta e única ao microcontrolador. Embora possam ser usados com ou sem um painel sobreposto, as

implicações da descarga eletrostática (ESD) - para o controlador associado - são uma grande influência no momento de escolher um painel.

4.1.2.1 CircularButton

Este componente trata-se de um sensor de auto capacidade, com um único canal para ligação direta a um microcontrolador Cypress PSoC. O padrão que este componente passa para a PCB é um eletrodo simples com uma forma circular.

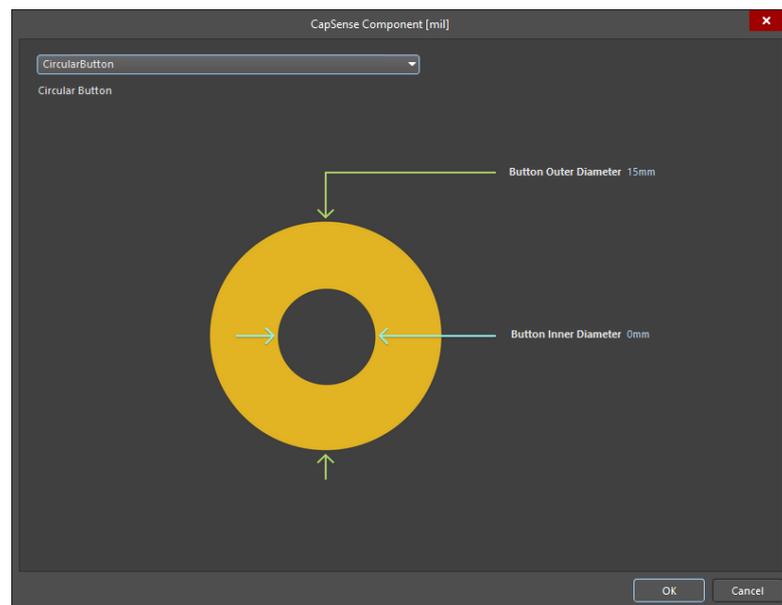


Figura 4.1: Painel de configuração do componente CircularButton

4.1.2.2 LinearSlider

O componente LinearSlider é utilizado para implementar um slider linear com n segmentos. Este é um sensor unidimensional de auto capacidade para ligação direta a um microcontrolador Cypress PSoC. O padrão que este componente passa para a PCB é composto por uma matriz $1 \times n$ de eletrodos, em que n é o número de segmentos especificados. Com a integração deste componente no nosso layout podemos controlar as várias formas do sensor.

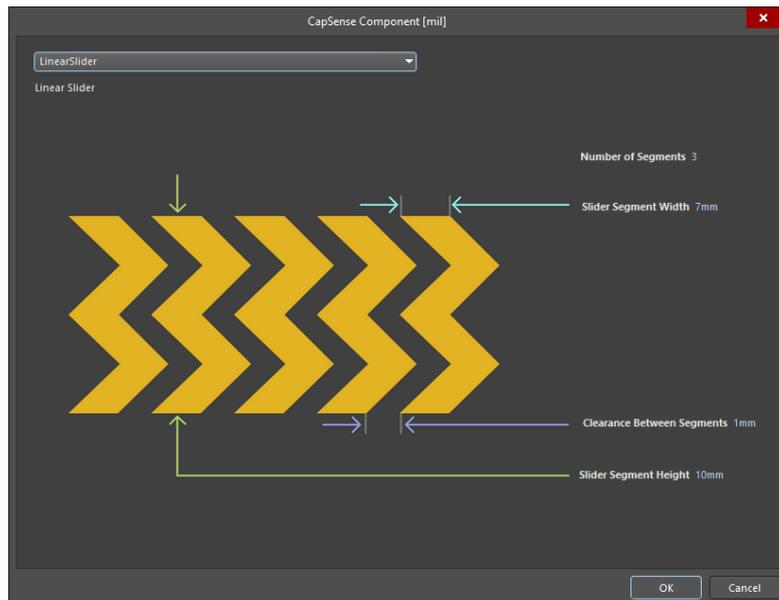


Figura 4.2: Painel de configuração do componente LinearSlider

4.2 Hardware

4.2.1 Esquemático

O esquemático do circuito a implementar é bastante simples, visto que o microcontrolador escolhido necessita de poucos componentes externos. Do lado esquerdo do esquemático (figura 4.3) temos a ficha USB e o circuito de proteção contra curto circuitos que fornece alimentação ao circuito para conseguir operar sem interrupções. Na parte central do esquemático temos os botões e slider capacitivo com várias medidas de modo a escolher a configuração com melhor resposta. Do lado direito da figura 4.3 temos os *headers* onde encaixa o módulo que integra o microcontrolador escolhido.

Nesta fase foi decidido não integrar a pilha AAA nem o acelerómetro, para nos podermos focar apenas na tecnologia capacitiva (tanto em FR4 como em LDS).

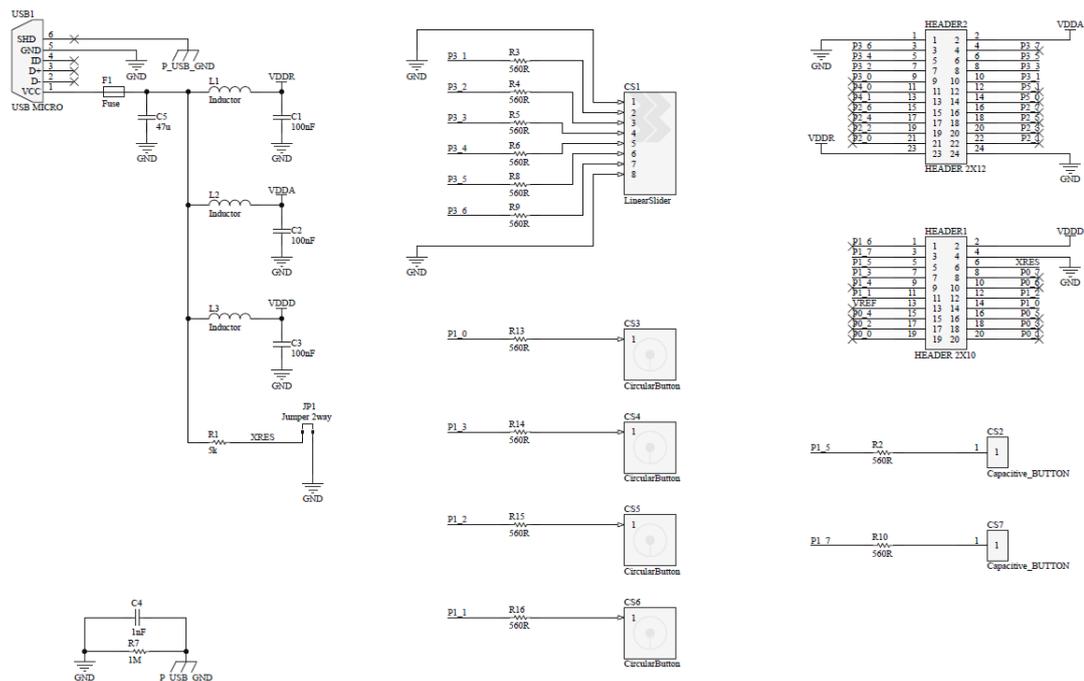


Figura 4.3: Esquemático do circuito desenvolvido

4.2.2 PCB FR4

Para conseguir provar o conceito dos botões capacitivos numa PCB, foi desenvolvido um layout tentando obedecer às diretrizes de desenho recomendadas pela Cypress. Para conseguirmos escolher qual o desenho de botão que mais se adequa à nossa aplicação foram escolhidos 2 tipos de botões:

- Botões circulares totalmente preenchidos: Foram escolhidos dois diâmetros desta topologia, 10mm e 15mm. Para nos aproximarmos o mais possível do desenho final, foram colocados 2 botões de cada tamanho variando a distância para o slider [15].
- Botões circulares parcialmente preenchidos: Esta topologia não é tão comum, mas é aconselhada para overlays mais espessos [15].

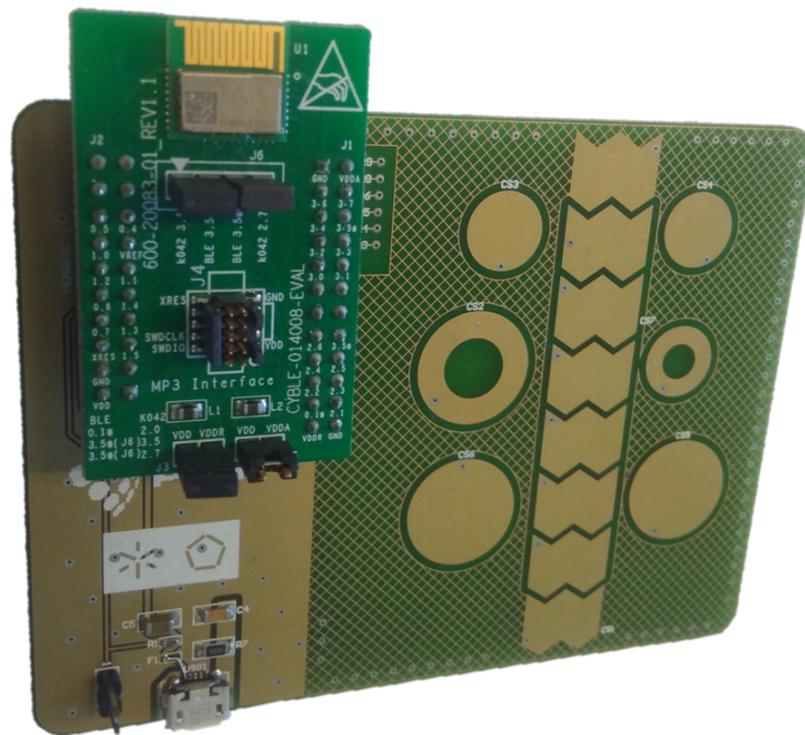


Figura 4.4: PCB produzida utilizando técnica convencional

4.2.3 PCB LDS

De modo a poder comparar os botões capacitivos desenhados utilizando o método convencional de produção de PCB, e os botões capacitivos de um MID produzidos utilizando a técnica LDS procedeu-se à alteração da PCB inicialmente desenhada.

De modo a poder comparar os dois protótipos tentamos fazer o mínimo de alterações possíveis. No entanto, as recomendações por parte do fabricante do MID sugerem que não utilizemos componentes through hole. Assim sendo, as únicas alterações feitas ao layout inicialmente desenhado foram os headers de encaixe do módulo que incorpora o microcontrolador escolhido.

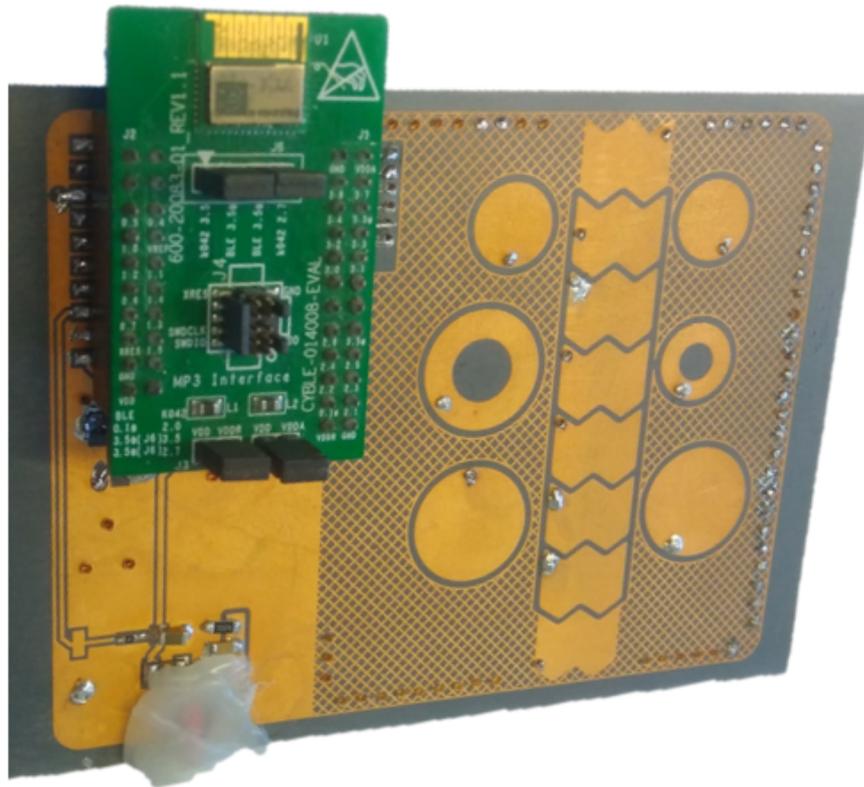


Figura 4.5: MID produzido utilizando a técnica LDS

Chapter 5

Testes e Resultados

5.1 Consumo Energético

De modo a validar o sistema desenvolvido foram realizados dois conjuntos de testes com diferentes propósitos. O primeiro conjunto visa em comprovar a implementação low power que se realizou no dispositivo. O segundo têm o objetivo de validar a eficácia dos botões capacitivos do protótipo produzido em LDS.

5.1.1 Implementação Low Power

O microcontrolador escolhido têm três modos de sleep:

- Deep Sleep
- Hibernate
- Stop

Para esta aplicação vamos utilizar apenas os dois primeiros modos listados, visto que o terceiro apenas poderá ser implementado quando o acelerómetro for integrado.

O modo hibernate entra em ação quando ainda existe dados a enviar na pilha BLE e enquanto o processamento dos botões capacitivos estiver a decorrer. Quando todos os dados são enviados e o processamento e leitura dos botões capacitivos acabam, o sistema entra em modo deep sleep.

Com o objetivo de medir o consumo médio da aplicação com a implementação low power ligada e desligada foram tiradas amostras da corrente durante um segundo utilizando um fento

amperímetro. A figura 5.1 representa a corrente consumida pelo sistema quando este está conectado, com a implementação low power desligada. A média do consumo de energia neste segundo foi de 85.8 mW.

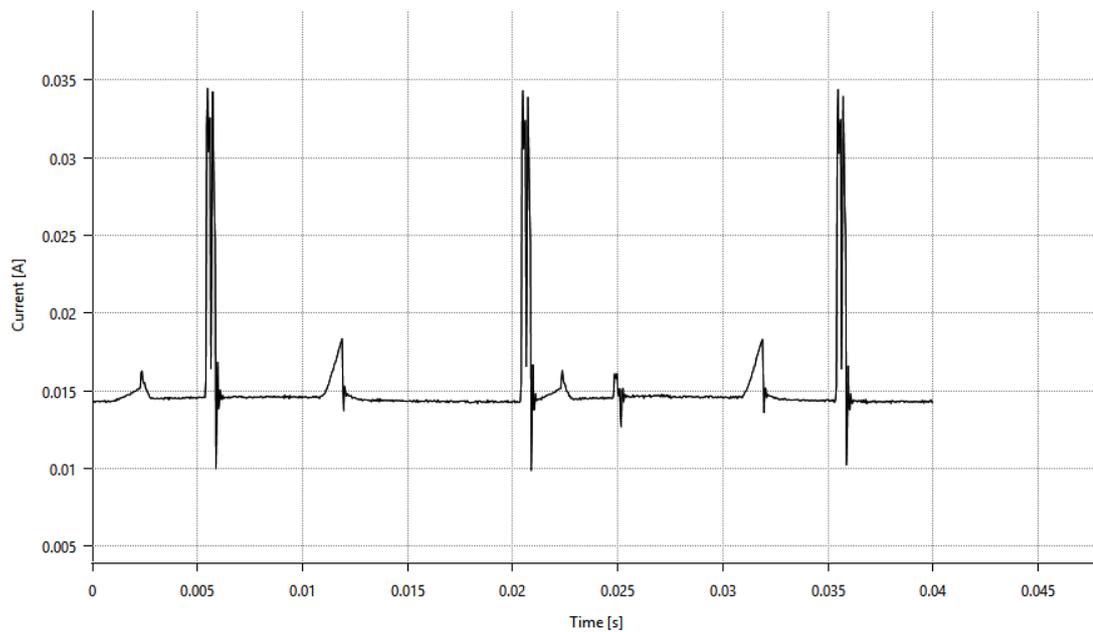


Figura 5.1: Consumo de corrente quando o protótipo do apresentador está com o modo low power desativado

Na figura 5.2 temos a representação da corrente consumida pelo sistema quando a implementação low power está ligada. Aqui temos um consumo de energia médio de 17.1 mW.

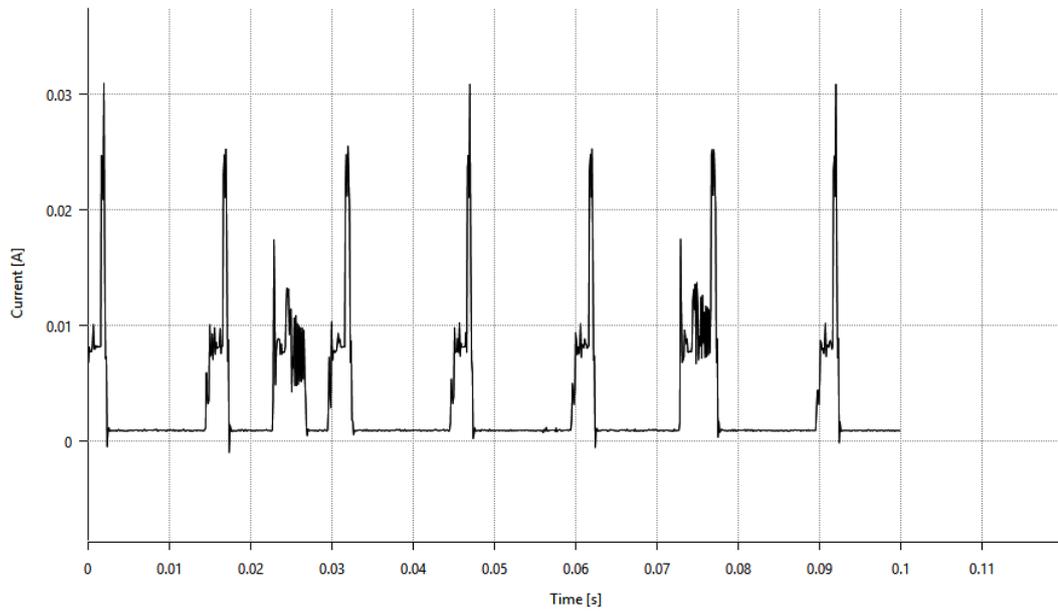


Figura 5.2: Consumo de corrente quando o protótipo do apresentador está no modo low power

5.2 Medição da capacidade dos botões

A geometria dos botões capacitivos é mais complexa do que uma aproximação a um condensador. Os condutores dos botões incluem o dedo e o cobre da PCB. A seguinte tabela apresenta os valores de capacidade obtidos para a PCB produzida em FR4.

Botão	Capacidade parasítica	Capacidade com dedo
Topo esquerdo	17 pF	45 pF
Topo direito	23 pF	57 pF
Meio esquerdo	19 pF	31 pF
Meio direito	23 pF	38 pF
Inferior esquerdo	21 pF	61 pF
Inferior direito	24 pF	65 pF

Tabela 5.1: Comparação entre as diferentes capacidades na PCB produzida utilizando o método convencional

Após os testes à PCB produzida em FR4 procederam-se os testes à PCB produzida utilizando a técnica LDS. Podemos verificar que os resultados obtidos foram muito satisfatórios porque os valores para a capacidade com o dedo encostado ao sensor foram muito maiores do que os obtidos na PCB produzida em FR4.

Botão	Capacidade parasítica	Capacidade com dedo
Topo esquerdo	16 pF	109 pF
Topo direito	22 pF	131 pF
Meio esquerdo	18 pF	108 pF
Meio direito	11 pF	–
Inferior esquerdo	19 pF	144 pF
Inferior direito	22 pF	142 pF

Tabela 5.2: Comparação entre as diferentes capacidades na PCB produzida utilizando LDS

5.3 Signal-to-Noise Ratio

SignaltoNoiseRatio é um termo genérico na engenharia que pode ter vários significados, nas aplicações utilizando botões capacitivos, o SignaltoNoiseRatio é definido como uma mudança na contagem bruta entre os estados OFF e ON.

O Signal to Noise Ratio deve ser medido num ambiente onde o sistema é suposto ser usado. Noutras palavras, deve ser medido no pior cenário possível.

O primeiro passo para medir o SNR é monitorizar a contagem bruta de cada sensor. Isto foi feito através da ferramenta disponibilizada pela Cypress (PSoC Tuner). O segundo passo é medir a contagem bruta com um toque leve sobre o sensor. Após realizar este teste para todos os sensores obtivemos os seguintes resultados:

Botão	FR4	LDS	Comprimento da pista
Topo esquerdo	724	1278	43.9mm
Topo direito	233	173	141.5mm
Meio esquerdo	178	120	42.4mm
Meio direito	444	—	103.8mm
Inferior esquerdo	548	1110	74mm
Inferior direito	362	846	115.7mm
Segmento 1	945	878	29.6mm
Segmento 2	828	718	39.8mm
Segmento 3	824	742	52.7mm
Segmento 4	766	516	65.2mm
Segmento 5	457	421	78.2mm
Segmento 6	—	—	91.1mm

Tabela 5.3: Comparação entre os diferentes SNR

Chapter 6

Conclusões e Trabalho futuro

Este capítulo final apresenta as conclusões retiradas do desenvolvimento efetuado durante esta dissertação. São ainda apontadas algumas propostas de trabalho futuro para a melhoria dos sistemas aqui abordados.

6.1 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento de um apontador sem fios capaz de fazer a interação entre o utilizador e um computador. Como apresentado no capítulo anterior, o dispositivo foi desenvolvido e é capaz de se ligar a um computador com *Windows 10* e cumprir as funções básicas de um apontador sem fios.

Os resultados obtidos permitem constatar que o sistema foi desenvolvido com sucesso. De acordo com o resultados apresentados no capítulo anterior podemos verificar que os botões capacitivos produzidos em LDS apresentam melhores resultados comparativamente aos produzidos em FR4. A capacidade medida com um toque leve do dedo no protótipo produzido utilizando a técnica LDS é superior ao protótipo produzido em FR4, isto quer dizer que conseguimos ter uma maior sensibilidade. Isto deve-se ao material em que o protótipo foi produzido. A constante dielétrica do material em que o protótipo foi produzido é maior, consequentemente, o SNR do protótipo produzido em LDS apresenta melhores resultados.

6.2 Trabalho Futuro

Várias são as melhorias possíveis de efetuar tendo em conta a fase em que o projeto com o PIEP se encontra. A implementação e validação final dos botões capacitivos no molde final será das

tarefas futuras com maior relevância.

Para a construção do protótipo final faltam implementar os seguintes componentes:

- Integração do acelerómetro descrito nesta dissertação.
- Validação dos botões capacitivos numa camada
- Integração de um componente para fazer a gestão da bateria
- Integração de um laser ativado por movimento

References

- [1] J. Franke, “Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID),” *Hanser Gardner Publications*, vol. 1, pp. 1–106, 2014.
- [2] “Introduction to Bluetooth Low Energy.” [Online]. Available: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introduction-to-bluetooth-low-energy.pdf>
- [3] “Bluetooth GATT: How to Design Custom Services and Characteristics.” [Online]. Available: <https://www.novelbits.io/bluetooth-gatt-services-characteristics/>
- [4] “AN64846- Getting Started with CapSense® .” [Online]. Available: <https://www.cypress.com/file/41076/download>
- [5] “A GUIDE TO SELECTING A BLUETOOTH CHIPSET .” [Online]. Available: <https://www.argenox.com/library/bluetooth-low-energy/a-guide-to-selecting-a-bluetooth-chipset/>
- [6] “3D MIDs through laser direct structuring (LDS).” [Online]. Available: <https://www.lpkf.com/en/industries-technologies/electronics-manufacturing/3d-mids-with-laser-direct-structuring-lds/>
- [7] “Maximizing BLE Throughput Part 2: Use Larger ATT MTU.” [Online]. Available: <https://punchthrough.com/pt-blog-post/maximizing-ble-throughput-part-2-use-larger-att-mtu/>
- [8] “HID OVER GATT PROFILE SPECIFICATION.” [Online]. Available: https://www.bluetooth.org/docman/handlers/downloaddoc.ashx?doc_id=245141
- [9] “Device Class Definition for Human Interface Devices (HID).” [Online]. Available: https://www.usb.org/sites/default/files/documents/hid1_11.pdf
- [10] “MID / LDS Technolog.” [Online]. Available: https://www.molex.com/molex/capabilities/capabilities.jsp?key=mid__lds_technology

-
- [11] "CAPACITIVE SENSING MADE EASY, Part 1: An Introduction to Different Capacitive Sensing Technologies." [Online]. Available: <https://www.cypress.com/file/114081/download>
- [12] "AN85951 - PSoC® 4 and PSoC 6 MCU CapSense® Design Guide ." [Online]. Available: <https://www.cypress.com/file/46081/download>
- [13] "QTAN0079 Buttons, Sliders and Wheels - Sensor Design guide ." [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/doc10752.pdf>
- [14] "CY8CKIT-042-BLE-A Bluetooth® Low Energy 4.2 Compliant Pioneer Kit ." [Online]. Available: <https://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/cy8ckit-042-ble-bluetooth-low-energy-42-compliant-pioneer-kit>
- [15] "Layout Guidelines for PSoC CapSense – Best practices - Quick Reference ." [Online]. Available: <https://www.cypress.com/file/142626/download>