



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Carlos Eduardo Fernandes Matos

Teclado touch capacitivo reconfigurável  
baseado em tecnologias impressas





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Carlos Eduardo Fernandes Matos

Teclado touch capacitivo reconfigurável  
baseado em tecnologias impressas

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de  
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Gerardo Vieira da Rocha

e coorientação do  
Professor Doutor Senentxu Lanceros-Méndez

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, por tornarem possível todo o meu trajeto académico. Obrigado pelo apoio ao longo destes anos e por me incentivarem a não desistir e a aprender sempre mais.

Também gostava de agradecer aos docentes e técnicos do DEI por todo o conhecimento partilhado e pelo apoio ao longo do curso.

Gostava também de agradecer aos meus orientadores, o Professor Senentxu Lanceros-Méndez e o Professor José Gerardo Vieira da Rocha. Um agradecimento especial ao grupo ESM, pelo acolhimento, e a todas as pessoas do laboratório, que me acompanharam e ajudaram de perto na realização desta dissertação.

Esta dissertação também teve uma colaboração muito importante do CeNTI a que gostava de agradecer a disponibilização de equipamentos, materiais e ainda pelo tempo e experiência cedidos por todas as pessoas que estiveram em contacto durante a impressão dos sensores.

E, por último, mas não menos importante, gostava de agradecer a todas as pessoas que encontrei e conheci durante o meu percurso académico. Aos amigos para a vida, um agradecimento especial.



## RESUMO

A área da sensorização tem vindo a ser alvo de uma constante evolução nas últimas décadas. Esta evolução é devida à descoberta de novos materiais e também da inovação e do aperfeiçoamento de novas técnicas de fabrico em conjunto com o avanço da eletrónica, que levam ao aparecimento de novos tipos de sensores. Atualmente, grande parte da investigação na área consiste na exploração do potencial destes novos sensores, aplicando-os assim em diversos meios, de modo a medir variadas grandezas. Um exemplo dos novos tipos de sensores são os baseados em tecnologias impressas. Estes sensores ganham relevância quando são consideradas as suas vantagens, como por exemplo, o seu baixo custo de produção e facilidade do seu desenvolvimento.

No contexto desta dissertação é pretendido o desenvolvimento de um teclado *touch* capacitivo reconfigurável baseado em tecnologias impressas. Quando se fala em superfícies multitoque, podemos considerar muitas alternativas em relação ao tipo de sensores utilizados, como por exemplo, sensores capacitivos, resistivos, infravermelhos, entre outros. Nesta dissertação, serão utilizados os sensores capacitivos, visto serem os mais promissores e apresentarem várias vantagens em relação às suas alternativas. O teclado será baseado em tecnologias impressas, uma vez que estas são indicadas como alternativa viável ao ITO (*Indium Tin Oxide*) [1], que é o material mais utilizado na indústria neste tipo de sensores. Dentro dos diversos métodos de impressão, podem ser considerados diferentes tipos de tintas utilizadas bem como diferentes métodos de impressão. Nesta dissertação, será utilizado o método de *screen printing* dado ser um método rápido e eficaz na deposição de tintas baseadas em prata, que se tornam ideais para este tipo de sistemas devido às suas características de condutividade elétrica.

Para além do desenvolvimento da matriz capacitiva, será também feita a respetiva eletrónica de instrumentação da matriz. Através da adição de um microcontrolador, será possível comunicar com uma aplicação gráfica de modo a que seja possível visualizar as áreas de toque bem como definir o *layout* do teclado. A aplicação gráfica permitirá que o utilizador reconfigure a matriz, de maneira a definir o teclado da melhor maneira que lhe convém. Este requisito é um dos objetivos fundamentais desta dissertação.

Os objetivos desta dissertação foram cumpridos. Foi possível, após o desenvolvimento do todo o sistema do teclado, visualizar a informação dos toques para diferentes *layouts* de forma satisfatória.

Palavras-Chave: Sensorização, Sensores impressos, *Screen printing*, teclado *touch* capacitivo, C#, controlador capacitivo



## ABSTRACT

The area of sensing has been the target of a constant evolution over the past decades. This evolution is due to the discovery of new materials and also innovation and development of new manufacturing techniques together with the advancement of electronics, leading to the forthcoming of new types of sensors. Currently, much of the research in the area is on exploring the potential of these new sensors, employing them in several ways in order to measure various physical quantities. An example of new types of sensors are sensors based on printed technologies. These sensors become more important when considered its advantages such as its low cost of production and ease of development.

In the context of this work it is intended the development of a reconfigurable capacitive touch keypad based on printed technologies. We can consider many alternatives in the type of sensors used, such as capacitive sensors, resistive, IR and others. Capacitive sensors are used in this dissertation because they are the most promising and have several advantages compared to its alternatives, such as, the possibility of recognizing multiple touches simultaneously and excellent optical characteristics. The keypad will be based on printed technologies since these technologies are shown as viable alternative to ITO (Indium Tin Oxide) [1], which is the material most used in the industry in this type of sensors. Within the various printing methods, different types of inks can be considered, as well as, many printing methods. In this dissertation, will be used screen printing method as it is a quick and efficient method for depositing silver-based inks, which make them ideal for this type of systems due to its characteristics of electrical conductivity.

In addition to the development of the capacitive array, the array of respective electronic instrumentation is also made. Through the aid of a micro-controller to handle the communication with the graphical interface, it is possible such that it is possible to display the touch areas and to define areas of interest for our keypad. The application is developed in C # and allow the user to reconfigure the layout in order to set the keyboard in the best way that suits him. This requirement is one of the fundamental objectives of this dissertation.

The objectives of this work have been met. It was possible, after the development of the entire keypad system, view the information of touches for the different layouts satisfactorily.

KEYWORDS: SENSORIZATION, PRINTED SENSORS, SCREEN PRINTING, CAPACITIVE TOUCH KEYBOARD, C#, CAPACITIVE CONTROLLER





## ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
1. Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização e estrutura da dissertação.....	3
2. Estado de Arte.....	5
2.1 Tipos de sensores.....	6
2.1.1 Sensores resistivos.....	6
2.1.2 Sensores Infravermelhos.....	9
2.1.3 Sensores Surface Acoustic Wave.....	10
2.1.4 Sensores capacitivos.....	11
2.2 Métodos de impressão.....	18
2.2.1 Screen Printing.....	18
2.2.2 Inkjet printing.....	19
3. Dimensionamento do sistema.....	21
3.1 Matriz.....	21
3.1.1 Geometrias.....	22
3.1.2 Especificações.....	23
3.1.3 Método de impressão.....	24
3.2 Sistema de leitura.....	24
3.2.1 Controlador capacitivo.....	25
3.2.2 Conectores.....	26
3.2.3 Microcontrolador.....	27
3.2.4 Design PCB de leitura.....	28
3.2.5 Processamento dos dados.....	30

4.	Desenvolvimento do sistema do teclado .....	33
4.1	Matriz .....	33
4.1.1	Impressão da matriz.....	33
4.1.2	Encapsulamento da matriz .....	40
4.1.3	Tratamento dos conectores.....	41
4.2	PCB de leitura.....	42
4.3	Programação do microcontrolador .....	44
4.4	Aplicação gráfica .....	45
4.4.1	Interface gráfica.....	45
4.4.2	Requisito funcional: Reconfiguração do teclado .....	46
5.	Testes ao sistema .....	49
5.1	Testes das diferentes geometrias com encapsulamento sem vidro .....	49
5.2	Testes das diferentes geometrias com encapsulamento de vidro .....	51
5.3	Teste da deteção dos botões num layout .....	54
6.	Conclusões.....	57
7.	Trabalho futuro .....	59
	Bibliografia .....	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Construção de um sensor de toque resistivo [1] .....	6
Figura 2 - Sensor resistivo, configuração 4-fios [2].....	7
Figura 3 - Método de deteção do toque numa configuração 4-fios [1].....	7
Figura 4 - Método de deteção do toque na configuração 5-fios [1].....	8
Figura 5 - Construção de um sensor IR .....	9
Figura 6 - Construção de um sensor SAW [1] .....	11
Figura 7 - Construção de um sensor Surface Capacitive [1].....	12
Figura 8 - Comportamento do sensor self-capacitance [1].....	14
Figura 9 - Pontos fantasmas na tecnologia sel-capacitance [3].....	15
Figura 10 - Capacidade em repouso e capacidade quando um dedo está próximo [1].....	16
Figura 11 - Exemplo de um projected capacitive senso visto de cima [5] .....	17
Figura 12 - Vista em secção de um sensor p-cap.....	17
Figura 13 – Ilustração de uma impressão em screen printing [7] .....	18
Figura 14 - Inkjet printing - Modo contínuo [12] .....	20
Figura 15 - Inkjet printing - Modo drop-on-demand [12] .....	20
Figura 16 - Layout da matriz com área semipreenchida.....	22
Figura 17 -Layout da matriz com área preenchida .....	22
Figura 18 - Tamanho dos elérodos semipreenchidos .....	23
Figura 19 - Tamanho dos elérodos preenchidos .....	23
Figura 20 - Exemplo de um conector FFC/FPC[13].....	26
Figura 21 - Placa de desenvolvimento Arduino Due [14] .....	27
Figura 22 - Exemplo de uma aplicação do controlador capacitivo [15] .....	28
Figura 23 - Esquemático do circuito de leitura .....	29
Figura 24 - Layout da PCB de leitura.....	29
Figura 25 - Fluxograma da rotina do microcontrolador .....	30
Figura 26 - Fluxograma da rotina da aplicação gráfica .....	31
Figura 27 - Fluxograma para a rotina de deteção dos botões .....	32
Figura 28 - Exemplo do quadro utilizado no processo de screen printing.....	34

Figura 29 - Quadro inserido na máquina de screen printing.....	34
Figura 30 - Substrato posicionado na máquina de screen printing .....	35
Figura 31 - Tinta utilizada no processo de screen printing.....	35
Figura 32 - Tinta espalhada no quadro.....	36
Figura 33 – Quadro após a impressão .....	36
Figura 34 – Matrizes impressas após o processo de cura.....	37
Figura 35 - Matriz impressa de elétrodos preenchidos .....	38
Figura 36 - Gráfico da resistência medida nas pistas horizontais de uma amostra de matrizes de elétrodos preenchidos .....	38
Figura 37 -Gráfico da resistência medida nas pistas horizontais de uma amostra de matrizes de elétrodos semipreenchidos .....	39
Figura 38 - Encapsulamento da matriz com substrato autocolante.....	40
Figura 39 - Encapsulamento da matriz utilizando vidro .....	40
Figura 40 - Tratamento dos conectores com várias camadas de kapton.....	41
Figura 41 - Tratamento dos terminais da matriz com uma placa de reforço .....	42
Figura 42 - PCB obtida através do design dimensionado.....	42
Figura 43 - PCB final .....	43
Figura 44 - Design dos terminais da matriz para ligar a dois conetores .....	43
Figura 45 - Posição dos conetores na PCB.....	44
Figura 46 - Função de conversão dos dados.....	44
Figura 47 - Código para gerar a trama "X[0-4096] Y[0-4096]" .....	45
Figura 48 - Interface da aplicação gráfica.....	45
Figura 49 - Código de correspondência de cores aos botões.....	46
Figura 50 - Exemplo de um layout carregado pelo utilizador .....	47
Figura 51 - Sistema completo com uma matriz de elétrodos preenchidos .....	49
Figura 52 - Sistema completo com matriz de elétrodos semipreenchidos.....	50
Figura 53 - Toque na matriz de elétrodos preenchidos.....	50
Figura 54 -Toque na matriz de elétrodos semipreenchidos .....	51
Figura 55 - Sistema completo com matriz de elétrodos preenchidos revestidos com vidro.....	52
Figura 56 - Sistema completo com matriz de elétrodos semipreenchidos revestido a vidro .....	52
Figura 57 - Toque numa matriz de elétrodos semipreenchidos revestida a vidro .....	53
Figura 58 - Toque numa matriz de elétrodos preenchidos revestidos a vidro .....	53

Figura 59 - Toque fora da área dos botões .....	54
Figura 60 - Toque detetado na área do botão 1 .....	55



# 1. INTRODUÇÃO

Este documento foi concebido para documentar todos os passos e decisões tomadas nas principais etapas no desenvolvimento de um teclado *touch* capacitivo reconfigurável baseado em tecnologias impressas.

Esta dissertação surgiu numa parceria entre o Departamento de Eletrónica Industrial e o Departamento de Física da Universidade do Minho, inserida na unidade curricular dissertação do último ano de mestrado do curso Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e de Computadores.

O processo de desenvolvimento do sistema foi estruturado e dividido em fases distintas, entre elas, o estudo teórico do estado de arte, todas as decisões de dimensionamento, métodos de desenvolvimento e testes realizados no sistema. No estado de arte, é feita uma análise às tecnologias mais relevantes no contexto deste projeto, são revistas as principais tecnologias de sensores *touch screen* bem como alguns métodos de impressão mais relevantes. No dimensionamento do sistema são explicadas as principais decisões dos requisitos para a matriz capacitiva, principais decisões no dimensionamento do sistema de leitura e requisitos funcionais para o tratamento e processamento dos dados obtidos. Na fase do desenvolvimento, é descrito o trabalho desenvolvido, desde todas as etapas de impressão e tratamento da matriz, a PCB do circuito de leitura e à interface da aplicação gráfica desenvolvida e as suas principais funcionalidades. Após todos os componentes do sistema terem sido desenvolvidos foram feitos testes ao sistema, para avaliar as diferentes geometrias, circuito de leitura e interface gráfica.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema viável de um teclado reconfigurável baseado em tecnologias impressas que fosse capaz de ser inserido num ambiente comercial/industrial. Para tal, é necessário garantir que este consiga competir com as soluções já disponíveis no mercado. De maneira a tornar este requisito possível, é necessário ter em atenção todas as fases de desenvolvimento do sistema, de modo a que este apresente um conjunto de características que sejam competitivas: preço de produção, escalabilidade da produção e fácil integração noutros sistemas eletrónicos.



## 1.1 Motivação

A área das superfícies multitoque tem vindo a crescer exponencialmente nos últimos anos devido à sua maior integração em dispositivos de eletrónica de consumo como os *tablets* e *smartphones*. Dentro dessa área é possível identificar uma tecnologia que se destaca em relação às outras: -a tecnologia das superfícies multitoque baseadas em sensores capacitivos. As vantagens desta tecnologia em relação aos seus concorrentes, como, por exemplo, as superfícies resistivas, tornam esta tecnologia mais viável para integração em larga escala. Entre as vantagens principais, é possível identificar a capacidade para a implementação de superfícies que permitam: um maior número de toques simultâneos; uma resposta a toques sem qualquer pressão significativa; bem como ótimas capacidades óticas. Hoje em dia as superfícies capacitivas utilizam na sua construção um material chamado ITO (Indium Tin Oxide), devido às suas características de transparência e alta condutividade elétrica. Contudo, graças ao uso quase exclusivo do ITO em aplicações multitoque, torna toda a indústria dependente da sua obtenção. Como se trata de um material relativamente escasso e de elevado custo, estão a ser procuradas soluções alternativas à sua utilização. Entre elas estão a utilização de malhas metálicas e a utilização de tecnologias impressas cujos materiais são baseados em tintas de prata, entre outros [1].

Sendo assim, esta dissertação tem como uma das principais motivações desenvolver um teclado multitoque capacitivo utilizando tecnologias impressas de modo a provar, assim, as capacidades deste tipo de tecnologia que poderá ser considerada como uma alternativa viável à utilização do ITO.

## 1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretende-se o desenvolvimento de um teclado *touch* capacitivo baseado em tecnologias impressas. Entre os principais objetivos é possível identificar o estudo e desenvolvimento de uma matriz capacitiva impressa orientada às características de um teclado e o desenvolvimento da sua eletrónica de instrumentação bem como o software de interface entre o teclado e um computador.

Um dos objetivos mais importante é permitir que este teclado seja reconfigurável, ou seja, que através do software de interface seja possível reconfigurar o teclado através da escolha de diferentes layouts ou mesmo adicionar e remover botões do teclado de acordo com as especificações do utilizador.

Após desenvolvido o sistema inicial é necessário assegurar também que este seja um protótipo que se aproxime de um sistema comercializável, ser um dos objetivos fulcrais desta dissertação. Posto isto, é fundamental ter em conta vários fatores de construção das diferentes partes do sistema e otimizar, assim, a construção do teclado capacitivo de maneira a que este seja eficiente na utilização dos materiais, garantindo um baixo custo. Através de uma análise de engenharia de produção será possível garantir que este sistema será industrializável e escalável para um ambiente comercial.

### 1.3 Organização e estrutura da dissertação

A estrutura deste documento procura seguir a ordem pelo qual o trabalho prático foi concebido, dimensionado e desenvolvido.

No capítulo 2, é feita uma revisão ao estado de arte onde são explorados alguns dos sensores para superfícies multitoque mais relevantes e também alguns métodos de impressão.

No capítulo 3, é explicado o processo de dimensionamento do sistema. É feita uma abordagem a todos os parâmetros de dimensionamento, desde as diferentes geometrias às especificações do sistema e ao método de impressão escolhido. Também são abordadas as principais decisões no dimensionamento do sistema de leitura, desde a escolha do controlador, do design da PCB do circuito de leitura e as principais decisões referentes ao processamento dos dados.

No capítulo 4, está incluído tudo referente ao desenvolvimento do teclado. São abordados e explicados todos os passos da impressão da matriz, bem como o circuito de leitura desenvolvido e a interface e os seus principais requisitos.

No capítulo 5, são realizados testes ao sistema, onde serão avaliadas as diferentes geometrias com ou sem adição de vidro com extra camada de encapsulamento. Também será testado o teclado para diferentes layouts inseridos na aplicação gráfica.

Os capítulos 6 e 7 estão reservados às conclusões e ao trabalho futuro a desenvolver, respetivamente.



## 2. ESTADO DE ARTE

Um painel de toque ou *touch screen* é um dispositivo eletrônico que funciona como um ecrã e que permite detetar a presença e a localização de um toque dentro da sua área. Um toque é geralmente definido por tocar na superfície do ecrã com um dedo ou uma mão, mas os painéis podem também detetar objetos passivos, como, por exemplo, uma caneta com superfície condutora. Estes sistemas necessitam de ser complementados por componentes externos, como, por exemplo, um a caneta ótica e por componentes internos, como por exemplo, uma camada sensível ao toque e um controlador, permitindo, assim, detetar as coordenadas X, Y do toque [2].

Um *touch screen* possui dois atributos básicos. O primeiro é permitir uma interação direta com o que é apresentado no ecrã, eliminando, deste modo, a necessidade de outros periféricos como o rato ou o teclado. O segundo aspeto é permitir que na sua utilização não seja necessário um dispositivo intermédio que o utilizador precisaria de segurar com a mão [2].

As tecnologias *touch screen*, na última década, têm vindo a ganhar importância e estão cada vez mais incorporadas em aplicações do dia a dia. Facilitando a interface entre homem e máquina, estas têm vindo a ser cada vez mais implementadas por todos os ramos da eletrónica, desde a eletrónica de consumo a aplicações comerciais e industriais [2].

Existem, atualmente, vários tipos de tecnologias *touch screen*. A escolha sobre qual das tecnologias é mais viável para uma certa aplicação requer a análise de muitos fatores, entre eles: o número de toques suportados, a resistência ao meio onde vão operar, o custo de produção, a complexidade e o consumo de energia. Estes são alguns exemplos a ter em conta no dimensionamento de uma aplicação que utilize tecnologias multitoque.

Neste capítulo, serão analisadas algumas das tecnologias mais relevantes, será descrito o seu funcionamento e quais as suas principais vantagens e desvantagens.

## 2.1 Tipos de sensores

Como foi referido anteriormente, será feita uma análise aos principais tipos de sensores utilizados em aplicações multitoque.

### 2.1.1 Sensores resistivos

Os sensores resistivos apresentam um princípio de funcionamento semelhante a um simples interruptor mecânico, usado para localizar um toque [1]. Estes sensores são construídos por várias camadas. A camada superior é flexível (geralmente PET) e é separada de uma camada rígida por pontos isoladores, que por sua vez estão ligados a um controlador *touch screen*. O interior de ambas as camadas revestidas por ITO (*Indium Tin Oxide*), que é um óxido metálico transparente condutor de energia elétrica, é possível ver na figura 1. Em ambas as camadas é aplicada uma tensão. Quando a camada superior é pressionada, a distância entre as camadas diminui, criando assim um contacto elétrico entre as camadas. A resistência do ITO cria um divisor de tensão no sítio de contacto. O circuito de controlo deteta essa variação e obtém as coordenadas X e Y. Essa informação é enviada para o sistema terminal para ser processada [2] [1].

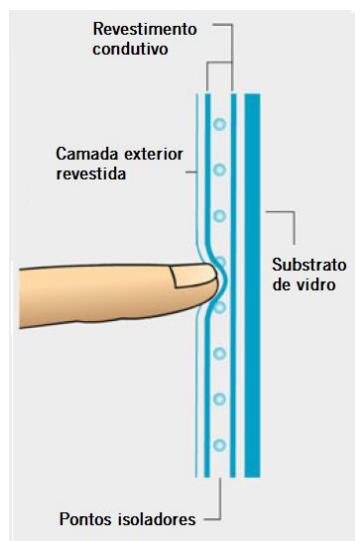


Figura 1 - Construção de um sensor de toque resistivo [1]

A tecnologia resistiva analógica possui diversas variações, desde o número de fios, à construção das camadas e as diferentes opções. O número de fios refere-se ao número de conexões ao sensor. Em relação ao número de fios, é possível identificar três tipos comuns de configurações: 4-fios, 5-fios [1].

A configuração 4-fios, como é possível observar na figura 2, é a mais simples de fabricar. Esta usa a camada superior e a camada inferior para determinar as coordenadas X e Y [2].

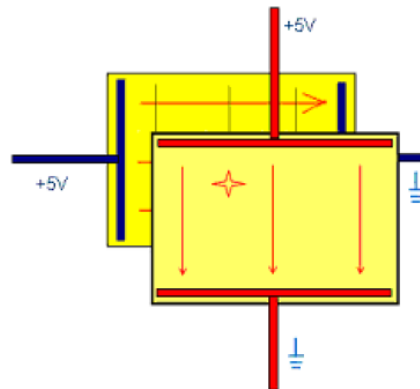


Figura 2 - Sensor resistivo, configuração 4-fios [2]

Nesta configuração, as conexões são feitas para barramentos colocados nos extremos esquerdo e direito da camada condutora e também nos barramentos colocados no extremo superior e inferior da outra camada. Para determinar a posição X do toque, o controlador aplica uma tensão através das conexões posicionadas em X e calcula a tensão de uma posição em Y. Para calcular a posição em Y, o controlador faz o processo reverso, ou seja, aplica tensão aos barramentos em Y e mede uma conexão em X [1]. Este processo é ilustrado na figura 3.

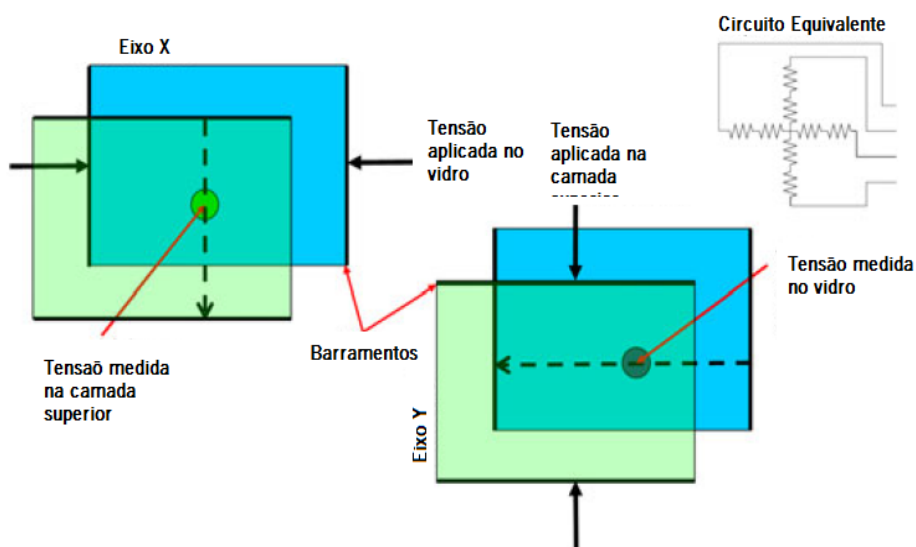


Figura 3 - Método de detecção do toque numa configuração 4-fios [1]

Numa configuração 5-fios a tensão de X e de Y é aplicada nos quatro quantos na camada menos condutiva e a camada superior é usada apenas como ponto de contacto. Para determinar a posição X, o controlador aplica voltagem aos quantos do eixo dos X no extremo direito e a terra aos quantos do outro extremo também em X. A camada superior, que vai funcionar como quinto fio, é usada como sensor para medir a posição em X. Depois o controlador faz o mesmo processo, mas neste caso aplica tensão aos quantos superiores em Y e a terra aos quantos inferiores. E a camada superior é usada para medir a tensão em Y. Esta configuração está sempre à espera de um toque. Quando está à espera de um toque, é aplicada a mesma tensão aos quatro toques e a camada superior está ligada à terra através de um valor de resistência alto. Quando não é detetado um toque, a tensão da camada superior é zero. Na situação de toque, o controlador deteta um aumento na corrente na camada superior que leva o controlador a iniciar o processo de deteção do ponto [1]. Na figura 4, está ilustrado este processo.

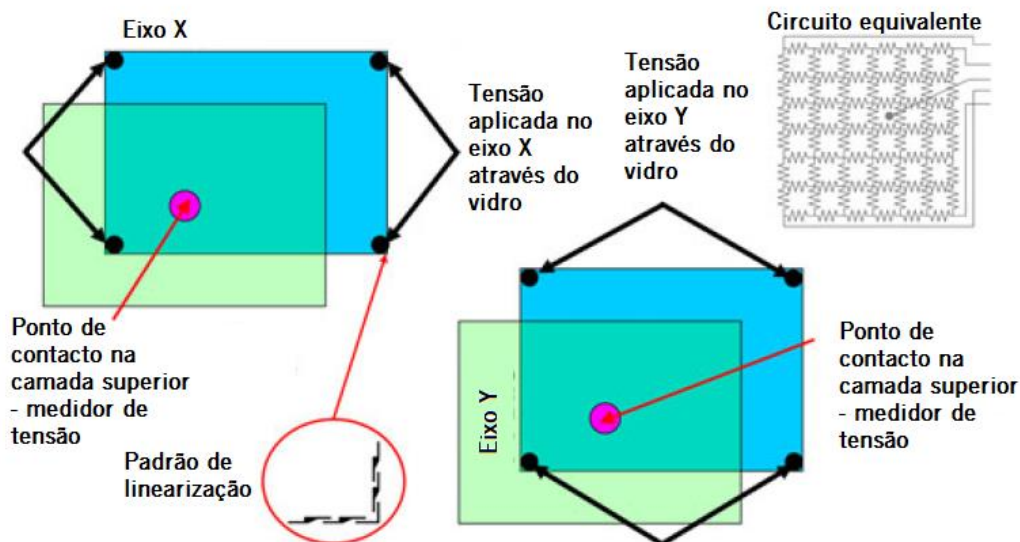


Figura 4 - Método de deteção do toque na configuração 5-fios [1]

A principal diferença entre as configurações 4-fios e 5-fios é a sua durabilidade, enquanto que a topologia 4-fios tem tipicamente um tempo de vida para um milhão de toques com o dedo, a topologia 5-fios apresenta uma resistência para trinta milhões de toques. Esta diferença pode ser explicada pela maneira de como a camada superior é usada, se apenas usada com ponto de contacto e não como uma camada resistiva, em que esta funciona como divisor de tensão, não ocorre tanta deterioração do revestimento condutor, permitindo, assim, um tempo de serviço maior [1].

A tecnologia resistiva apresenta várias vantagens, entre elas [1]:

- Funcionar com o dedo, caneta de toque ou outro objeto não afiado;
- Baixo custo de produção;
- Resistentes a contaminantes depositados na superfície;
- Baixo consumo.

Mas também apresentam algumas desvantagens significativas, como por exemplo [1]:

- Baixa durabilidade devido ao desgaste da camada superior;
- Baixa qualidade ótica;
- Alta pressão de toque.

### 2.1.2 Sensores Infravermelhos

O princípio de funcionamento dos sensores tradicionais de infravermelhos consiste na aplicação de dois segmentos de IR LEDs em duas faces e paralelamente a esses dois segmentos de foto detetores de IR. Cada LED transmite um sinal pulsado, que é recebido pelo respetivo segmento paralelo. É, assim, formada uma grelha de raios infravermelhos, com raios nas direções X e Y, sobre a superfície do ecrã. Quando um dedo ou um objeto opaco a IR interrompem os feixes, o controlador calcula a posição do toque [1]. A figura 5 ilustra a construção deste tipo de sensores:

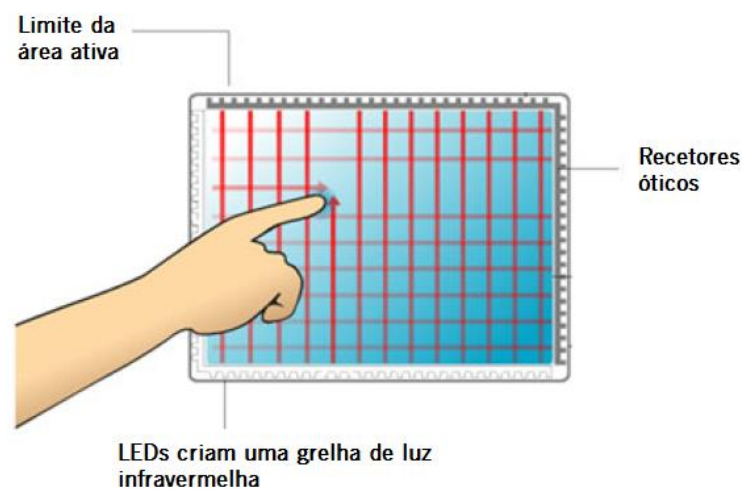


Figura 5 - Construção de um sensor IR



Mais tarde foram feitas melhorias a este sistema. Para o mesmo transmissor, foram adicionados até cinco recetores. Isto permitiu uma maior robustez no sistema, porque, no caso de um recetor se desativar, este não cria um ponto morto na superfície. Outro melhoramento: a inclusão da possibilidade de ignorar obstáculos que estejam em contacto por períodos de tempo superiores ao desejado. Assim, o sistema ganhou a possibilidade de ignorar qualquer tipo de material contaminante que possa estar em contacto com a superfície [1].

Inicialmente esta tecnologia só permitia um toque, mas com a evolução da tecnologia e com a crescente necessidade de superfícies que permitissem multitoque. A tecnologia evoluiu assim e permitiu dois toques simultâneos, mas com a limitação de precisar de mais informação para detetar os toques reais dos toques falsos. Em resposta a esse problema foi adicionado em terceiro eixo, permitindo, deste modo, ao controlador distinguir os toques verdadeiros [1].

A tecnologia de infravermelhos tem como vantagens apresentar uma grande robustez, ser capaz de suportar ambientes com condições adversas, não necessitar de substrato, ou seja, os feixes de IR podem ser colocados diretamente sobre o ecrã sem necessitar de encapsulamento [1].

### 2.1.3 Sensores *Surface Acoustic Wave*

Os sensores *surface acoustic wave* ou SAW, são caracterizados por serem uma das tecnologias *touch screen* mais avançadas. O seu princípio de funcionamento é baseado em quatro transdutores, um usado para transmitir e o outro usado para receber. Os pares recetor/emissor são colocados no eixo do X e do Y no painel *touch screen*. No vidro são colocados refletores. Estes representam um componente importante na tecnologia SAW [2]. A imagem 6 ilustra a construção deste tipo de sensores:

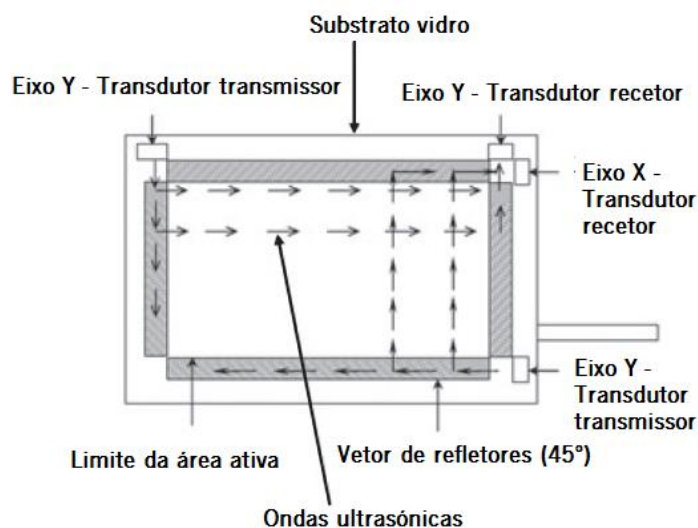


Figura 6 - Construção de um sensor SAW [1]

O controlador envia um sinal elétrico ao transdutor transmissor e este converte o sinal elétrico em ondas ultrasónicas e transmite para os refletores colocados ao longo do limite do painel *touch*. Depois, os refletores refratam as ondas para os transdutores recetores, que convertem as ondas ultrasónicas num sinal elétrico e enviam de novo para o controlador. Quando um dedo toca na superfície, as ondas são absorvidas, permitindo ao controlador identificar aquela localização como um toque [2].

Estas tecnologias apresentam múltiplas vantagens em relação às outras tecnologias *touch*, como, por exemplo, baixo custo, melhor performance ótica, alta durabilidade e fácil integração [1].

#### 2.1.4 Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos podem ser descritos por uma superfície sensível ao toque que é revestida por um material que armazena cargas elétricas. Quando ocorre um toque, uma pequena quantidade dessa energia é alterada no ponto de contacto. O controlador deteta a variação de carga e processa e envia os dados para o sistema terminal. Os painéis touch screen capacitivos devem ser tocados com um dedo, ao contrário do que ocorre nos resistivos e nos SAW, que podem ser tocados pelo dedo e por uma caneta de toque. Os sensores capacitivos não são afetados por contaminantes, como pó e/ ou gordura.

A tecnologia capacitiva é dividida em duas categorias, os *surface capacitive* e os *projected capacitive* (P-CAP) [2].

### *Surface capacitive*

As superfícies touch screen baseadas na tecnologia *surface capacitive*, são construídas por uma camada uniforme transparente e condutora sobre uma camada de vidro. O revestimento condutivo é rodeado e ligado a um padrão de elétrodos usados para garantir uma linearização do sistema. Ao revestimento condutivo e ao padrão de elétrodos é sobreposta uma camada transparente dielétrica tipicamente feita de dióxido de silício. Esta camada também é incluída para funcionar como camada para diminuir a reflexão da luz na superfície [1]. Na figura 7, é possível verificar um exemplo da construção deste tipo de sensores.

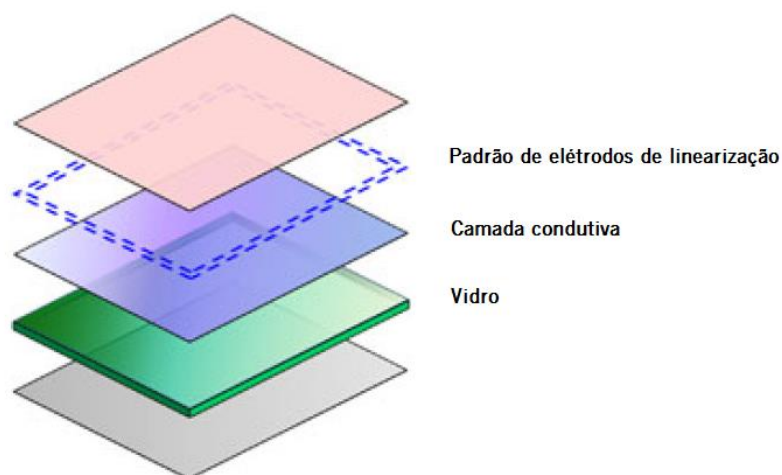


Figura 7 - Construção de um sensor Surface Capacitive [1]

O princípio de funcionamento é baseado num campo eletrostático uniforme na camada condutora. Para criar esse campo, é aplicado um sinal AC aos cantos da camada condutora. Em todos os cantos é aplicado a mesma tensão, fase e frequência. Quando um dedo toca na camada superior, é criado um condensador entre o revestimento condutivo e o utilizador que leva a que uma pequena corrente passe pelas conexões posicionadas nos cantos. Através dessa informação, o controlador compara com uma linha de base já conhecida quando não ocorre nenhum toque com a variação da corrente quando o utilizador toca na superfície. A localização do toque é identificada através da medição da quantidade corrente que chega a cada canto, sendo que essas correntes são proporcionais à proximidade com os cantos. O controlador eletrônico mede, assim, as correntes e converte para DC.

Recorrendo a filtros é reduzido o ruído, o sinal depois é amplificado e convertido de analógico para digital, através de um conversor analógico-digital (ADC). Depois é determinada a posição de toque e a sua informação é enviada para o sistema terminal de processamento [1].

Esta tecnologia apresenta algumas desvantagens em relação à tecnologia P-CAP, visto não ter tanta durabilidade, porque o revestimento condutor está depositado na camada superior e é apenas protegido por um revestimento. Outra desvantagem é ser uma tecnologia de apenas um toque simultâneo [1].

### *Projected Capacitive*

*Projected capacitive* ou p-cap é uma variação dos sensores capacitivos que ao longo da última década tem vindo a ganhar muita relevância no mercado das superfícies multitoque. Esta apresenta um conjunto de vantagens que levam à sua escolha quando se pretende desenvolver uma aplicação *touch screen*. Entre elas é possível identificar a sua alta durabilidade, o excelente desempenho ótico e a possibilidade para um número ilimitado de toques simultâneos (depende apenas do controlador). Este tipo de sensores pode ser construído em vários tipos de materiais. Quando construídos com vidro, ficam resistentes à maior parte dos químicos, podem operar a temperaturas relativamente altas. Estes também podem ser construídos apenas em plástico, o que lhes permite flexibilidade [3].

Foram apresentadas as tecnologias *touchscreen* mais relevantes. A tabela 1 resume todas as suas principais características.

Tabela 1 - Comparação das diferentes tecnologias touch apresentadas anteriormente [4]

Tecnologia	Linearidade	Precisão	Escalabilidade	Performance óptica	Resistência ao meio	Multitoque
IR	5	3	5	5	3	Sim (caro)
SAW	4	4	2	3	5	Não
Surface capacitive	2	2	2	5	5	Não
Resistive	4	4	4	2	1	Sim (caro)
P-cap	5	4	3	5	5	Sim

Como é possível observar na tabela, chegamos à conclusão que a tecnologia *projected capacitance* é a mais indicada para aplicações em que seja necessário processar vários toques em simultâneo; é possível também constatar que, embora a sua escalabilidade não seja a melhor comparada com outras tecnologias, no caso do sistema essa desvantagem não é significativa, visto que o teclado a desenvolver não é de grandes dimensões. Portanto como a tecnologia *projected capacitance* é a mais indicada, ao longo deste capítulo, esta vai ser explorada mais a fundo. Dentro da tecnologia *projected capacitive* é possível identificar duas topologias distintas: *self-capacitance* e *mutual-capacitance*. Abaixo serão exploradas as suas principais características e vantagens.

A variação self-cap funciona através da medição das capacidades num eléctrodo apenas em relação à terra. Quando um dedo se aproxima do eléctrodo, ocorre uma alteração na *self-capacitance* do sensor graças à capacidade do corpo humano. A figura 8 exemplifica o método de funcionamento na presença de um dedo.

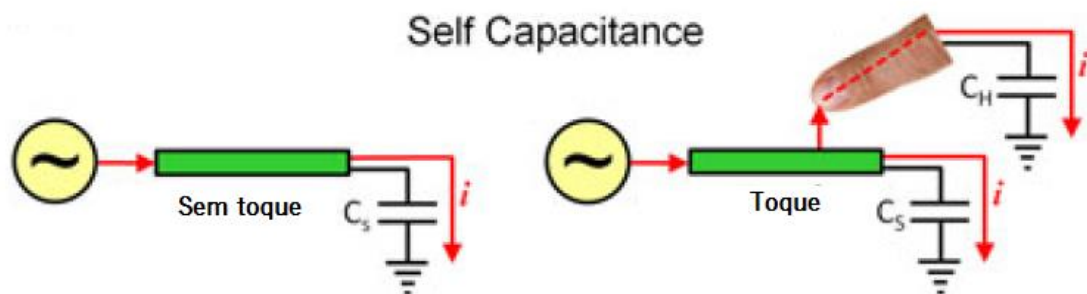


Figura 8 - Comportamento do sensor self-capacitance [1]

Num painel *touch screen* são mapeados condutores transparentes espaçados num padrão em uma ou duas camadas. Quando os elétrodos estão apenas numa camada, cada elétrodo representa o par de coordenadas de um toque, e é conectado individualmente com o controlador. Se forem usadas duas camadas, os elétrodos estão arranjados por linhas e colunas. As interseções de cada linha e coluna representam as coordenadas de um único toque. Contudo, os controladores de *self-capacitance* não medem todas as interseções, eles apenas medem cada linha e coluna, isto é, apenas um elétrodo individual. Este processo funciona bem quando apenas um dedo está a tocar na superfície. A medição de elétrodos individuais em vez da medição da interseção de elétrodos cria a maior desvantagem desta variação da tecnologia p-cap quando usadas duas camadas. Essa desvantagem é a inability de distinguir mais de um toque [3]. Na figura 9, está exemplificada esta desvantagem.

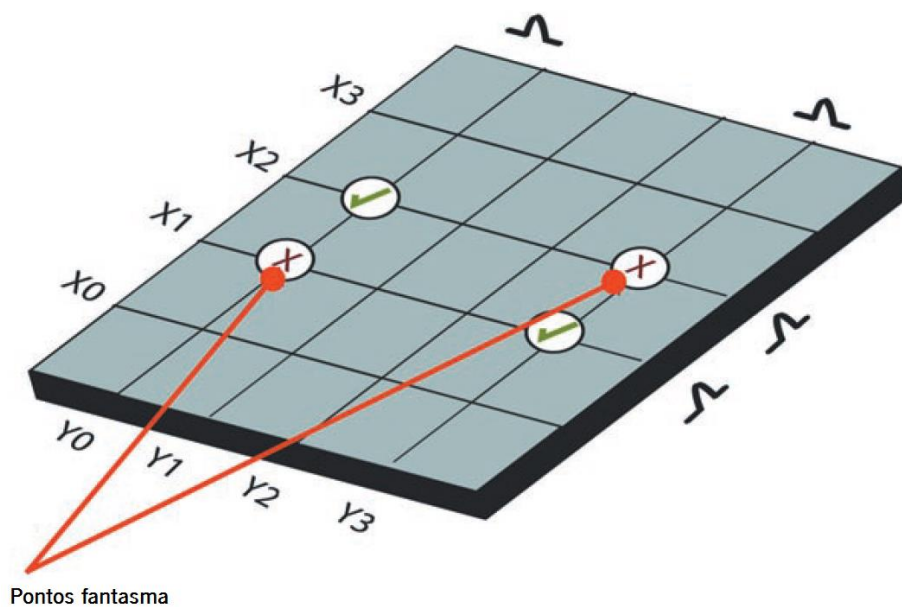


Figura 9 - Pontos fantasmas na tecnologia *self-capacitance* [3]

Analisando a figura 9, podemos ver que ocorreram dois toques, um em (X2, Y0) e o outro em (X1, Y3). Mas são reportados quatro toques diferentes, ou seja, são adicionados dois toques fantasma. Esta desvantagem não elimina a possibilidade de esta tecnologia funcionar para mais que um toque. Para corrigir esta situação é necessário adicionar o auxílio de software para detetar os pontos verdadeiros e eliminar os falsos. Em vez de considerar as posições dos toques, o software usa a direção do movimento dos pontos detetados. Esta função é útil quando considerados gestos como *zoom in* e *zoom out* [3].

## Mutual Capacitance

Esta variação da tecnologia p-cap permite a detecção de um número ilimitado de toques sem que ocorram toques fantasma. Possui melhor resolução e consegue ser mais eficiente no espaço do sensor, através do fenômeno de que quase todos os objetos condutores são capazes de manter uma carga quando estão a pequenas distancias. Se outro objeto condutor, como por exemplo o dedo humano, se aproximar de outros dois objetos condutores, a capacidade entre esses dois objetos muda porque o dedo humano “rouba” alguma dessa carga. A figura 10 ilustra esse fenômeno.

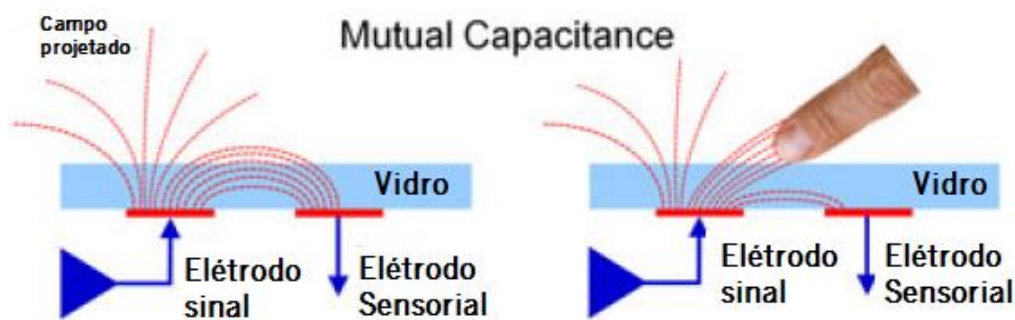


Figura 10 - Capacidade em repouso e capacidade quando um dedo está próximo [1]

Em painéis *touch screen*, de *mutual-capacitance* os condutores são sempre dispostos em padrões, com os elétronodos uniformemente espaçados e dispostos por linhas e colunas, distribuídos por duas camadas separadas eletricamente. Devido às interseções entre linhas e colunas, é produzido um conjunto de coordenadas para um toque específico. Este método produz uma das maiores vantagens, a habilidade de detetar um toque em todas as interseções na superfície.

Existem muitas possibilidades de sensores para a tecnologia *projected capacitive*, que variam desde a sua construção aos materiais utilizados. Os sensores são construídos a partir de duas camadas, sendo que cada uma possui elétronodos dispostos de forma paralela entre eles. As camadas são fixas a numa distância próxima e eletricamente isoladas. A posição de cada camada dever ter em conta que os elétronodos das duas fiquem de forma ortogonal [5]. Na figura 11 é possível observar um exemplo de um sensor com doze elétronodos na camada inferior representados pela cor vermelha sobrepostos a nove elétronodos na cama superior representados pela cor azul visto de cima. A figura 12 ilustra um corte seccional de um exemplo de um sensor p-cap.

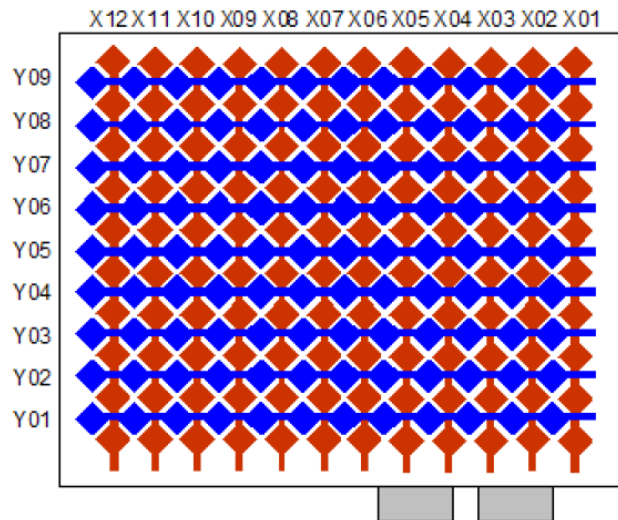


Figura 11 - Exemplo de um projected capacitive senso visto de cima [5]

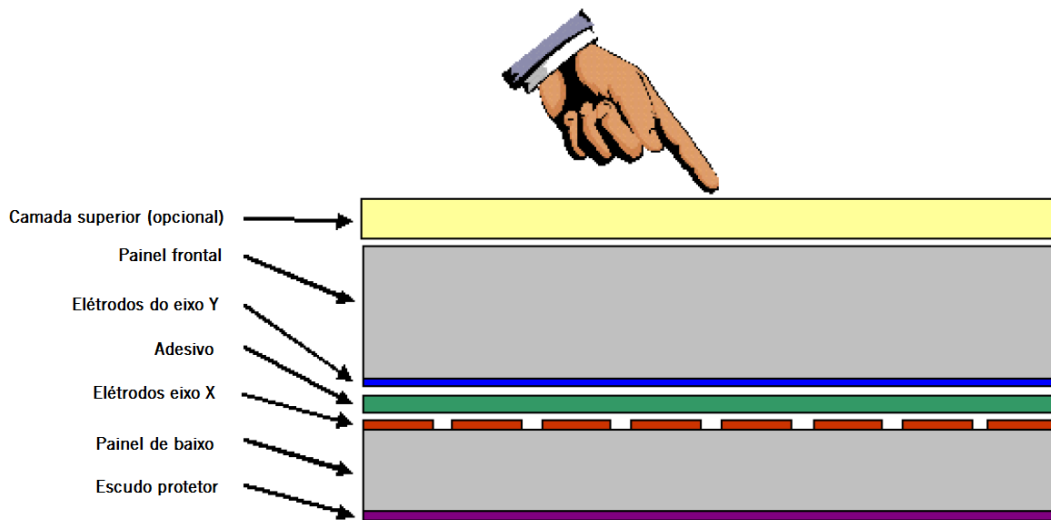


Figura 12 - Vista em secção de um sensor p-cap

Atualmente os sensores que utilizam ITO (Indium Tin Oxide) na sua construção representam a maior parte dos sensores produzidos de tecnologia p-cap. Contudo o manuseamento deste material é complexo e dispendioso e requiere condições especiais de fabricação, como processos de *sputtering* a vácuo e atmosferas controladas. A dependência do ITO constitui uma desvantagem para este tipo de sensores porque eleva o preço de produção. Surgiu então a necessidade de encontrar alternativas ao ITO, materiais como rede metálica de cobre, nano condutores de prata, nano tubos de carbono, polímeros condutivos e tintas ITO [1].



## 2.2 Métodos de impressão

Atualmente existem muitas técnicas de impressão usadas na indústria. Como esta dissertação tem como objetivo produzir um teclado baseado em tecnologias impressas, é necessário analisar as possíveis alternativas para a impressão do sensor. Abaixo, encontram-se analisadas algumas das técnicas mais relevantes no contexto desta dissertação.

### 2.2.1 *Screen Printing*

*Screen printing* ou serigrafia é uma técnica de impressão onde é usada uma tela para passar tinta para o substrato, exceto nas zonas bloqueadas da tela, que são impermeáveis à tinta. A tela é posicionada diretamente por cima do substrato onde se pretende imprimir, mas não em contato. Uma lâmina espalha a tinta pela tela de maneira uniforme num movimento e depois com o movimento reverso, aplica uma pressão sobre a tela fazendo com que haja contacto com o substrato e permita que a tinta passe pelas aberturas da tela ficando, assim, depositadas no substrato com o padrão pretendido [6]. Na figura 13 é possível observar uma representação deste processo.

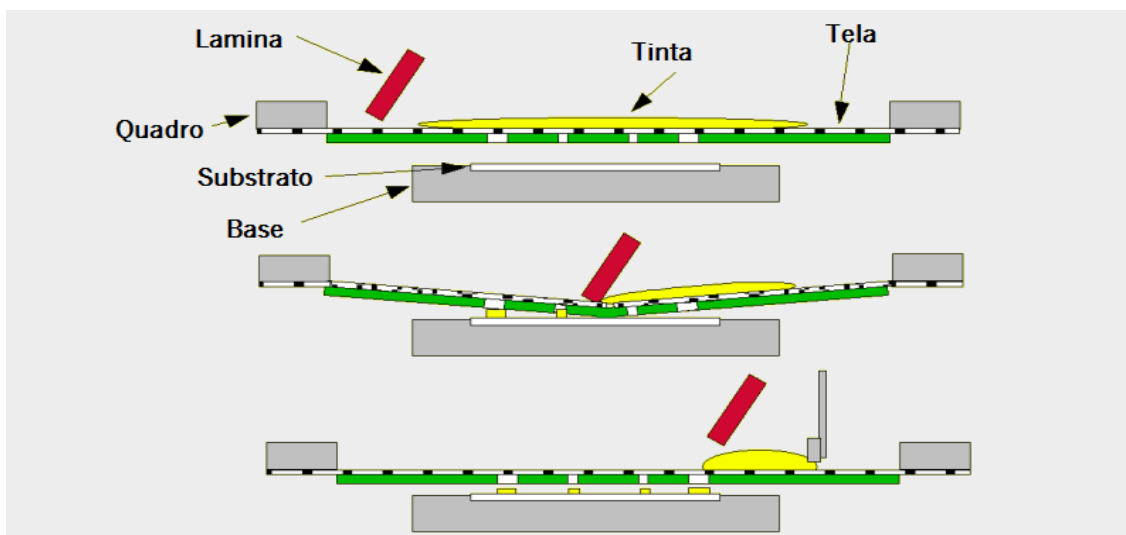


Figura 13 – Ilustração de uma impressão em screen printing [7]

De notar que este processo poder ser efetuado sem ser automatizado, ou seja, não recorrendo a uma máquina. Esta técnica pode ser efetuada manualmente por um operador. No entanto, para escalas de impressão maiores onde é necessária uma velocidade de impressão maior e requisitos como eficiência na tinta utilizada e precisão na repetibilidade o processo a utilização de máquinas automáticas torna-se uma necessidade [7].

### 2.2.2 *Inkjet printing*

*Inkjet printing* é uma tecnologia de impressão direta, onde o padrão é transferido diretamente para o substrato sem necessidade de recorrer a máscaras, comparado com o tradicional método de gravura que é usado vastamente na indústria. Ao contrário da gravura, que é um método no qual é necessário remover o material excedente do substrato, em *inkjet printing* a deposição é precisa, porque as cabeças de impressão apenas depositam a gota de tinta na posição necessária. Sendo assim, reduz o desperdício de tinta resultando num método de impressão mais económico [8].

Existem dois modos mais comuns de operação de uma impressora inkjet: o modo contínuo e o modo *drop-on-demand* (DOD). Quando a impressora opera em modo contínuo, a tinta é bombeada pelo bocal para formar um jato líquido. A tinta é espalhada uniformemente através da imposição de uma perturbação periódica. O modo contínuo é principalmente usado para impressões de alta velocidade. Quando a impressora usa o método *drop-on-demand*, as gotas são de dimensões mais reduzidas e com maior precisão na sua deposição. Este método funciona através de um pulso acústico que faz com que as gotas saiam do reservatório através da boca. Este pulso pode ser gerado termicamente ou ser originado por piezoelectricidade. Numa impressora DOD térmica, a tinta é aquecida localmente para formar um vapor que expande e faz com que a gota saia pelo bocal. Por outro lado, uma impressora baseada em piezoelectricidade depende da expansão dos materiais piezoelétricos que causa em variação do volume e faz com que as gotas saiam pelo bocal [9]. Nas figuras 14 e 15, é possível observar o método contínuo e o método *drop-on-demand* respetivamente.

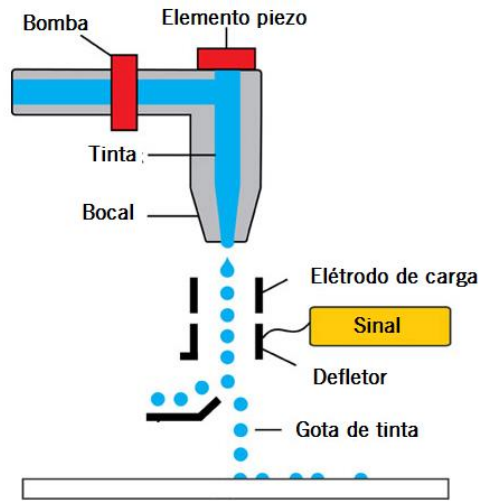


Figura 14 - Inkjet printing - Modo contínuo [12]

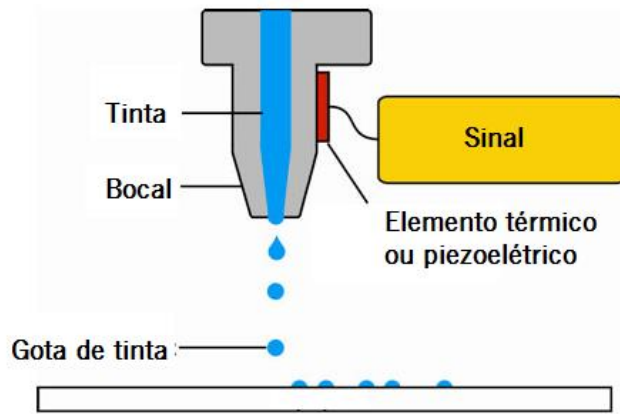


Figura 15 - Inkjet printing - Modo drop-on-demand [12]

### 3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Neste capítulo, serão abordadas as principais decisões de dimensionamento do sistema. Inicialmente, começou por dimensionar-se a geometria do sensor a utilizar. Foram escolhidas duas geometrias distintas, variando apenas a área dos elétrodos. Após o dimensionamento das especificações do sensor, foram dimensionados o circuito de leitura e a conexão circuito-sensor. Para a conexão do sensor ao circuito foram escolhidos conectores flexíveis, que foram incorporados no design da PCB de leitura, cujo circuito elétrico foi baseado num exemplo apresentado no *datasheet* do controlador capacitivo. Posto isto, foram dimensionadas as componentes de processamento de dados. Recorrendo a uma placa de desenvolvimento, que lê os dados provenientes da informação dos toques, envia-os para um sistema terminal onde está uma aplicação gráfica para a representação gráfica dos toques e aplicação de *layouts* diferentes ao teclado.

#### 3.1 Matriz

O objetivo desta dissertação é desenvolver um teclado baseado em tecnologias impressas. Para tal, foi necessário perspetivar as principais dimensões e especificações do sensor. No dimensionamento do tamanho do sensor foram considerados vários fatores, entre eles, o tamanho mínimo que permitisse que a matriz suportasse um conjunto considerável de possíveis botões e que pudesse ser compacta para possivelmente ser integrada em sistemas industriais/comerciais. Outro fator importante na escolha do tamanho foram os controladores disponíveis no mercado, que variam por número de linhas e colunas suportadas e que apresentam diferentes preços de fabrico. Tendo em conta todos estes requisitos foi definido um tamanho do sensor aproximadamente igual a uma folha A5 (148 x 210mm)[10] Quanto ao controlador capacitivo, foi escolhido um controlador que permitisse 18x13, ou seja, treze linhas por dezoito colunas. Após a escolha do tamanho e o controlador capacitivo, o passo seguinte foi definir todas as especificações da matriz como tamanho dos elétrodos, vias de ligação e também a geometria a utilizar. Abaixo são explicadas as decisões de dimensionamento mais importantes para o sensor (matriz).

### 3.1.1 Geometrias

Foram desenvolvidas duas geometrias distintas para a matriz com o objetivo de variar a sensibilidade do sensor. Ambas apresentam o mesmo *layout* exceto na área dos elétrodos. As figuras 16 e 17 ilustram ambos os layouts.

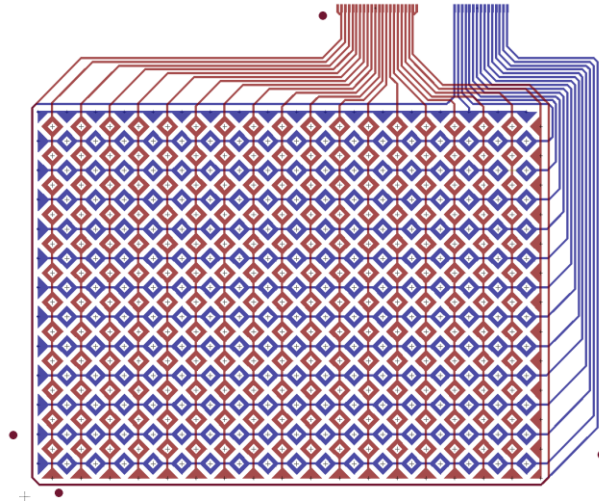


Figura 16 - Layout da matriz com área semipreenchida

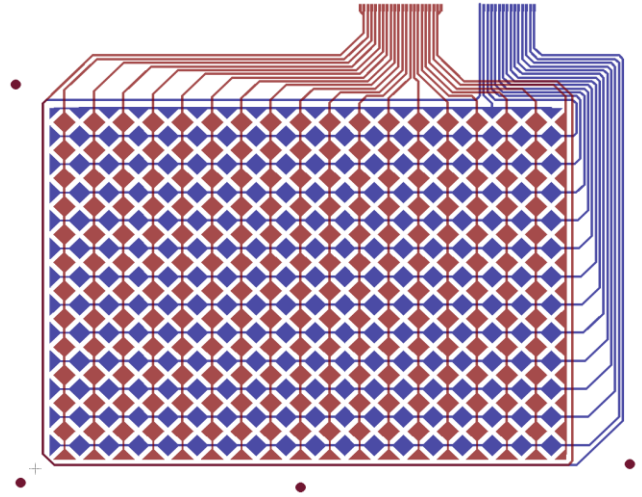


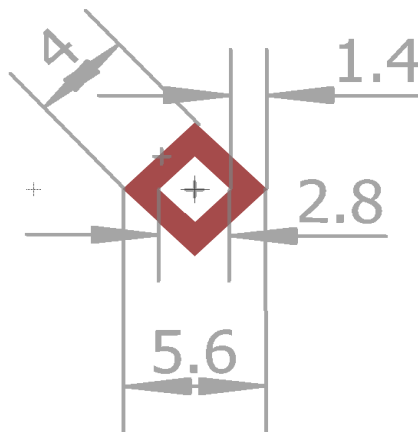
Figura 17 -Layout da matriz com área preenchida

Como é possível observar nas figuras 16 e 17, a diferença entre *layouts* apenas se verifica na área do elétrodo. A razão dessa variação foi criar duas matrizes com sensibilidades diferentes. Comparando os dois designs a matriz da figura 16 apresenta aproximadamente metade da área por elétrodos do que os elétrodos da matriz da figura 17 que estão totalmente preenchidos. Como a

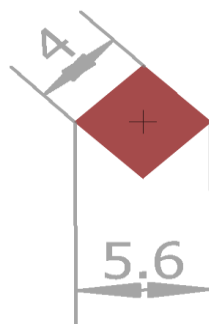
geometria representada na figura 17 possui elétrodos com área superior de material condutor, esta consegue gerar um campo elétrico mais forte. Quando um dedo se aproxima, a variação da capacidade local é menor comparada com a geometria de elétrodos semipreenchidos que, por sua vez, possui menos área, logo o campo elétrico gerado é mais baixo. Como possui menos área condutora, a variação da capacidade elétrica quando um dedo se aproxima é muito maior, o que leva à geometria apresentada na figura 16 a ter uma maior sensibilidade.

### 3.1.2 Especificações

Como foi explicado anteriormente, ambos os designs são idênticos variando apenas a área dos elétrodos. Nas figuras 18 e 19 estão ilustrados os tamanhos dos elétrodos em milímetros.



*Figura 18 - Tamanho dos elétrodos semipreenchidos*



*Figura 19 - Tamanho dos elétrodos*

Outra das medidas que é importante referir é a medida das ligações. Esta foi definida como 0.5mm devido a alguns fatores como por exemplo a resistência da pista, que aumenta quando as pistas são de dimensões mais reduzidas e a compatibilidade com os conectores. Ambos os fatores vão ser melhor explicados ao longo deste documento.

### 3.1.3 Método de impressão

No capítulo anterior foram referidos alguns métodos de impressão como o *screen printing* e o *inkjet printing*. No processo de dimensionamento, foi decidido que o método de impressão que mais se adequava a este tipo de sensores é o *screen printing*. Este método permite um grande controlo do padrão impresso. Através da espessura e do número de fios da malha, é possível controlar a espessura e a resolução do padrão impresso. Outra razão pela qual foi escolhido foi devido à impressão ser relativamente pequena. Como é pretendido imprimir um padrão fixo num substrato, este método adequa-se porque é um método de impressão cujo processo é rápido, garante eficiência dos materiais utilizados e, sendo assim, torna-se pouco poluente. Apenas apresenta uma desvantagem: o padrão impresso não poder ser alterado, ou seja, para novos padrões são precisos novos quadros. Mas no contexto desta dissertação podemos ignorar essa desvantagem, visto que apenas serão impressos dois padrões diferentes, sendo apenas necessários dois quadros.

## 3.2 Sistema de leitura

O sistema de leitura engloba todo o sistema excetuando a matriz de sensores. Neste caso o sistema de leitura lê e processa os dados do sensor e envia para o utilizador, podendo visualizar os dados de forma simplificada e intuitiva. Será então feita uma descrição de todas as fases de dimensionamento do sistema de leitura, desde o controlador capacitivo à interface gráfica.

### 3.2.1 Controlador capacitivo

Como já foi referido anteriormente a área das tecnologias capacitivas de multitoque tem vindo a ganhar relevância nos últimos anos. Por isso, surgiram no mercado controladores capacitivos para controlar a aquisição dos dados provenientes do sensor. Na tabela 2, estão alguns dos mais importantes tendo em conta o contexto desta dissertação.

*Tabela 2 - Lista de controladores capacitivos relevantes*

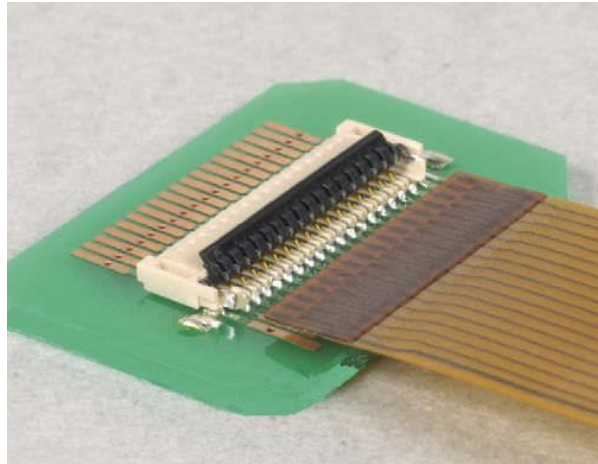
Marca	Modelo	Canais Rx/Tx ou pol	Nº. de toques	Comunicação	Encapsulamento
Microchip	MTCH6301	13*18	10	I2C	TQFP44/QFN44
Microship	MTCH6303	19*27	10	I2C	TQFP44/QFN44
Azoteq	IQS550	10*15	5	I2C	QFN48
Atmel	mXT224T	4.5''	16	I2C	VFBGA49/UFVGA49
Atmel	mXT2954T2	15.6''	16	I2C	-
ST	FingerTip	2'' a 13''	10	I2C/SPI/HID	BGA/QFN
Texas Instruments	TSC3060	6*10	4	I2C	QFN24

Como é possível observar na tabela 2, a escolha de um controlador capacitivo requer a análise de vários fatores que precisam de responder às necessidades da aplicação na qual se vão inserir. Analisando a tabela, podemos verificar que o primeiro listado apresenta um conjunto de vantagens no contexto desta dissertação, atributos como dez toques possíveis simultâneos, comunicação I2C, tamanho de acordo com o dimensionado anteriormente e bom encapsulamento para uma fácil integração no circuito de leitura. Estas representam as principais razões pelo qual este controlador capacitivo foi escolhido. De notar que outros controladores capacitivos da tabela também possuem atributos dentro do requerido para o sistema, mas alguns desses ainda ou já não estão disponíveis no mercado ou então não é possível obter sem ser em quantidades industriais. O controlador MTCH6301 da Microship foi escolhido também pelo seu preço reduzido, visto que um dos objetivos desta dissertação é criar um teclado que possa competir com as soluções já existentes no mercado.



### 3.2.2 Conectores

Os conectores foram adicionados para ligar a matriz ao circuito de leitura. Foram escolhidos conectores de topologia FFC/FPC. A figura 20 ilustra um exemplo deste tipo de conectores.



*Figura 20 - Exemplo de um conector FFC/FPC[13]*

Foi definido que o conector teria um número de contactos igual à soma das linhas e colunas do sensor, ou seja, trinta e um contactos (18 colunas mais 13 linhas).

Para que essa conexão fosse possível, seria necessário estender as pistas da matriz de maneira a emular o tipo de ficha que estes conectores utilizam. Este tipo de conector foi escolhido porque se trata de um tipo de conector muito utilizado na indústria e aproveitou-se o facto de a matriz ter propriedades flexíveis semelhantes às de uma ficha. Também foi considerada a hipótese de desenvolver uma matriz flexível para fazer de interface entre a matriz e o circuito de leitura, mas adicionava complexidade e custos acrescidos por isso foi abandonada esta alternativa. Ao longo desta dissertação, os conectores vão ser abordados mais em profundidade.

### 3.2.3 Microcontrolador

Para processar os dados provenientes do controlador capacitivo e enviá-los para a interface gráfica, surgiu a necessidade de incorporar um microcontrolador no sistema. O processo de escolha deste microcontrolador seria baseado nos requisitos mínimos de processamento e comunicações suportadas. Como foi visto anteriormente, o controlador capacitivo escolhido tinha uma interface de comunicação I2C. Também para comunicar com uma interface gráfica alojada num sistema terminal era necessário garantir que o microcontrolador suportasse porta serie. Analisando as alternativas no mercado, foi escolhida a placa de desenvolvimento Arduino Due, visto que esta possui todos os requisitos necessários acima discutidos. Optou-se por incluir uma placa de desenvolvimento Arduino Due devido à sua facilidade e prototipagem rápida. De notar que, embora tenha sido escolhida uma placa de desenvolvimento para complementar o circuito de leitura, a solução ideal era incluir um microcontrolador dedicado na PCB de leitura, mas, por razões de simplificação e como se trata de uma prova de conceito, optou-se por uma placa de desenvolvimento. Na imagem 21 é possível ver a placa de desenvolvimento escolhida.



Figura 21 - Placa de desenvolvimento Arduino Due [14]

### 3.2.4 Design PCB de leitura

O circuito de leitura é baseado num exemplo de uma aplicação exemplo ilustrada no *datasheet* do controlador capacitivo, com algumas modificações, como o número de linhas e colunas utilizadas. A figura 22 mostra o exemplo pelo qual o circuito de leitura foi dimensionado.

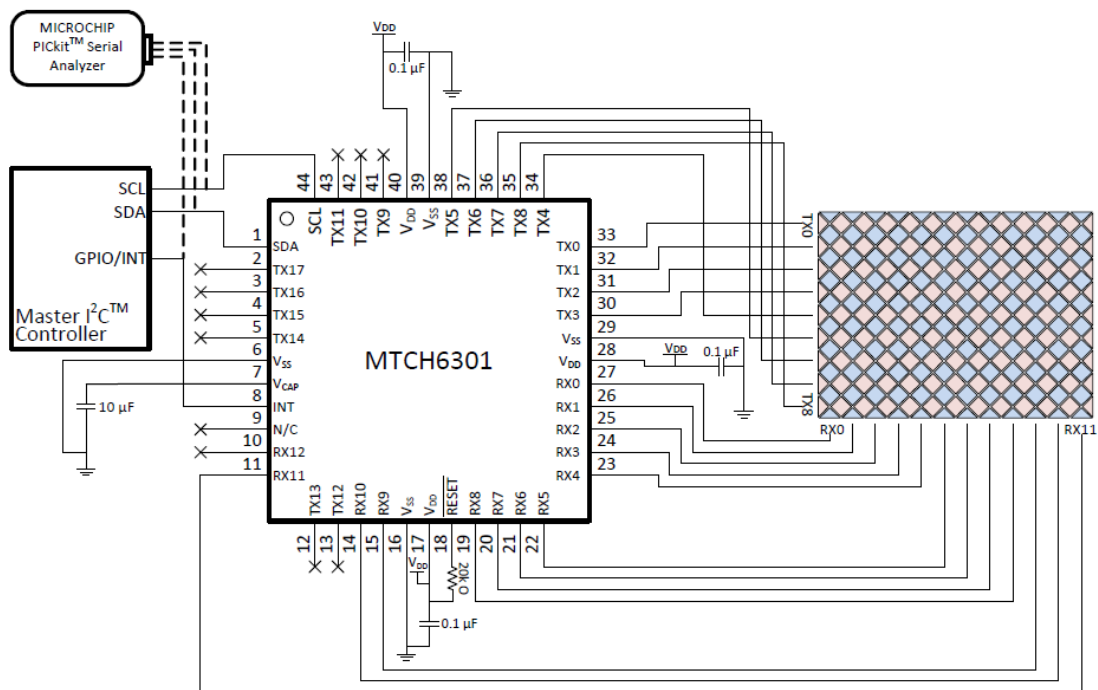


Figura 22 - Exemplo de uma aplicação do controlador capacitivo [15]

Como é possível observar na figura 22, o circuito de leitura está apenas dimensionado para um sensor de 12x9, ou seja, doze colunas por nove linhas. Foi decidido que a matriz teria o número máximo de linhas e de colunas permitidas de maneira a maximizar o tamanho. Portanto, foi necessário modificar o circuito de modo a responder aos requisitos pretendidos. A figura 23 ilustra o esquemático elétrico do circuito de leitura dimensionado.

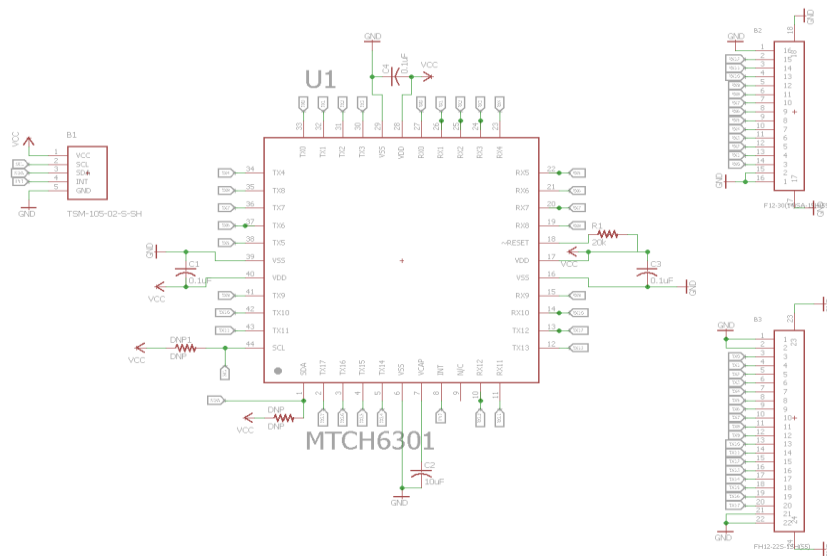


Figura 23 - Esquemático do circuito de leitura

Para o dimensionamento deste esquemático e design do layout da PCB, foi utilizado o *software* CadSoft EAGLE versão 7.5[11]. Como é possível verificar na figura 23, o circuito de leitura está dimensionado para o tamanho máximo suportado pelo controlador.

Após o dimensionamento do circuito de leitura, foi dimensionado o *layout da PCB*, utilizando o mesmo *software*. A figura 24 ilustra o *design* da PCB de leitura.

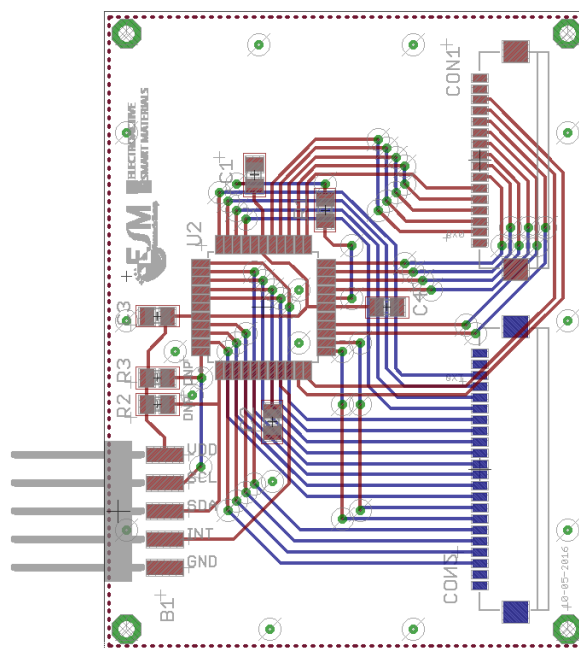


Figura 24 - Layout da PCB de leitura

### 3.2.5 Processamento dos dados

No processamento de dados está incluída a aquisição dos dados por parte do microcontrolador e o seu envio para a interface gráfica. Para receber dados do controlador capacitivo é necessário, primeiro, enviar as configurações para as características do sensor. Após a sua calibração, é preciso criar uma rotina que fique à espera de uma interrupção. O controlador capacitivo, quando deteta uma leitura no sensor, muda o estado de um pino para alto, significando assim que está pronto para o envio de uma leitura. Foi então criada uma rotina para este processo. A figura 25 ilustra o fluxograma do código de aquisição do microcontrolador.

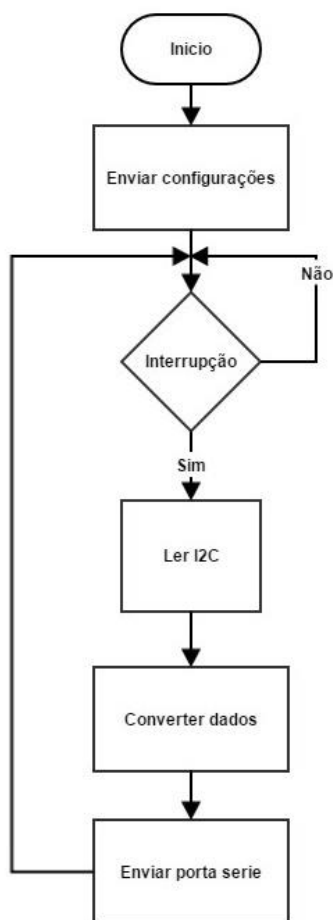


Figura 25 - Fluxograma da rotina do microcontrolador

Analisando a figura 25, podemos ver que o microcontrolador inicialmente envia todas as configurações para o controlador capacitivo. Depois fica à espera que um pino fique em estado alto para entrar na rotina de interrupção. Quando o controlador capacitivo deteta um toque ou mais, o microcontrolador salta para a rotina de interrupção, em que o microcontrolador vai ler via I2C os dados disponíveis. Após a leitura dos dados, é chamada uma função para converter os dados para uma forma mais simplificada e depois são enviados via porta serie para o sistema terminal, que aloja a interface gráfica. De notar que a conversão dos dados no meio desta rotina cria atrasos na execução do código, mas estes são pouco significativos e não atrasam o resto da execução da rotina. A rotina é um ciclo infinito, visto que após o envio dos dados via porta serie, esta fica de novo à espera que o controlador capacitivo volte a ativar a interrupção.

Os dados são enviados então para a interface gráfica. Estes, graças à função de conversão, já estão sob a forma de uma trama específica, que facilita a leitura por parte da aplicação gráfica. A figura 26 mostra o fluxograma da interface gráfica para o processamento e visualização dos dados referentes aos toques.

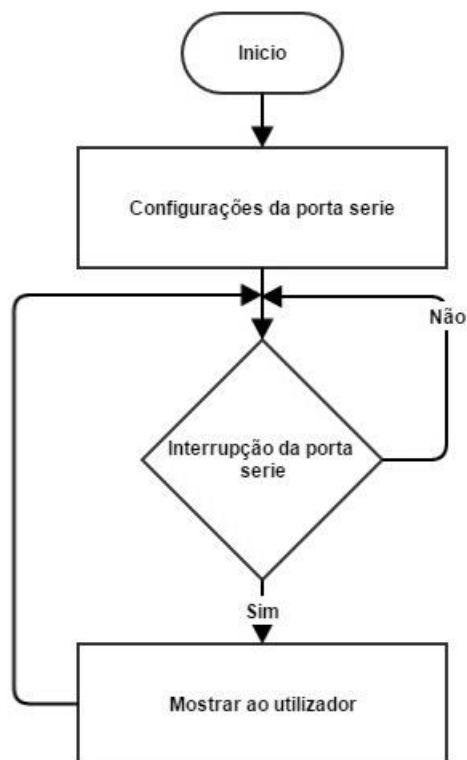


Figura 26 - Fluxograma da rotina da aplicação gráfica

Na figura 26, podemos ver um fluxograma simplificado da aplicação gráfica, que, como no caso da rotina do microcontrolador, funciona como um ciclo infinito. A aplicação inicia-se e são feitas todas as configurações para a porta serie, depois fica à espera que haja comunicação via porta serie, para mostrar os dados ao utilizador.

O fluxograma da figura 26 apenas representa o funcionamento geral do programa, mas, como foi referido anteriormente, um dos requisitos funcionais desta aplicação é permitir ao utilizador que reconfigure o *layout* do teclado, adicionando ou não botões ou movendo os existentes. Para responder a esta questão, foi definido que o utilizador escolhia o seu *layout* e carregava-o para a aplicação gráfica. Para que o programa conseguisse detetar qual dos botões foi pressionado foi necessário que o utilizador criasse o seu teclado de acordo com regras específicas, como, por exemplo, cada cor corresponde a um botão. A posição e tamanho não fazem diferença desde que o código de cores seja respeitado. A figura 27 mostra o fluxograma para a rotina de deteção dos botões.

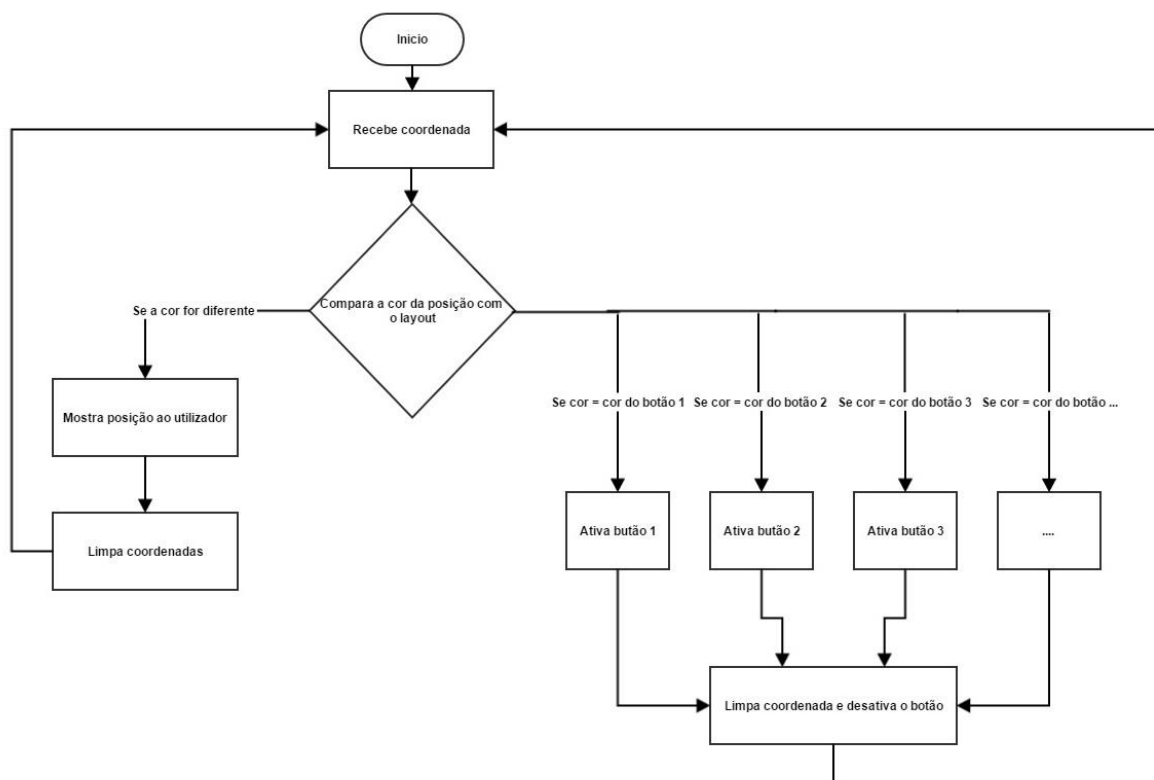


Figura 27 - Fluxograma para a rotina de deteção dos botões

## 4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DO TECLADO

Neste capítulo, serão explicados todos os passos no desenvolvimento dos componentes do sistema do teclado. Será, ainda, descrito todo o processo de *screen printing* para a impressão de ambas as geometrias da matriz. São descritos todos os passos, equipamentos e materiais utilizados na impressão. Também é abordado, neste capítulo, o tratamento efetuado às matrizes após impressão e é feita uma caracterização elétrica às propriedades da matriz.

São também demonstradas todas as metodologias utilizadas para permitir a conexão entre a matriz e a PCB de leitura. É apresentada a PCB de leitura previamente dimensionada, sem e com os componentes elétricos dimensionados para o circuito de leitura apresentado no capítulo 3.

Além disso, é feita uma análise às principais rotinas de código da aquisição e do processamento de dados da placa de desenvolvimento. O desenvolvimento da aplicação gráfica também é explorado, bem como as principais rotinas para o requisito funcional de reconfiguração do *layout* do teclado.

### 4.1 Matriz

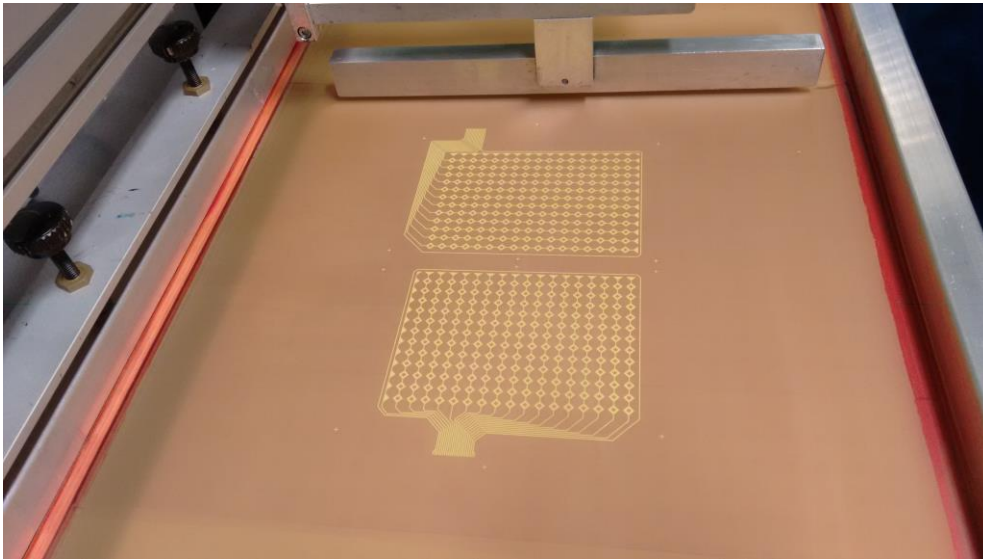
Como foi referido anteriormente, o processo de impressão da matriz escolhido foi o *screen printing*. Abaixo serão explicados todos os passos da impressão da matriz, equipamentos utilizados e materiais.

#### 4.1.1 Impressão da matriz

Para imprimir a matriz através do método *screen printing*, primeiro foi necessário desenhar as geometrias e encomendar as telas com o padrão desejado. Neste caso, foram feitos dois quadros, um para cada geometria dimensionada. De notar que cada matriz de sensores é constituída por duas faces separadas isoladas pelo substrato. A figura 28 mostra um exemplo de um quadro em que é possível distinguir dois padrões. Um deles representa a parte para ser impressa na parte superior do substrato e o outro para ser impresso na parte inferior do substrato. Para garantir o alinhamento de ambas as faces no processo de dimensionamento, foram criados pontos de alinhamento que permitem assegurar a

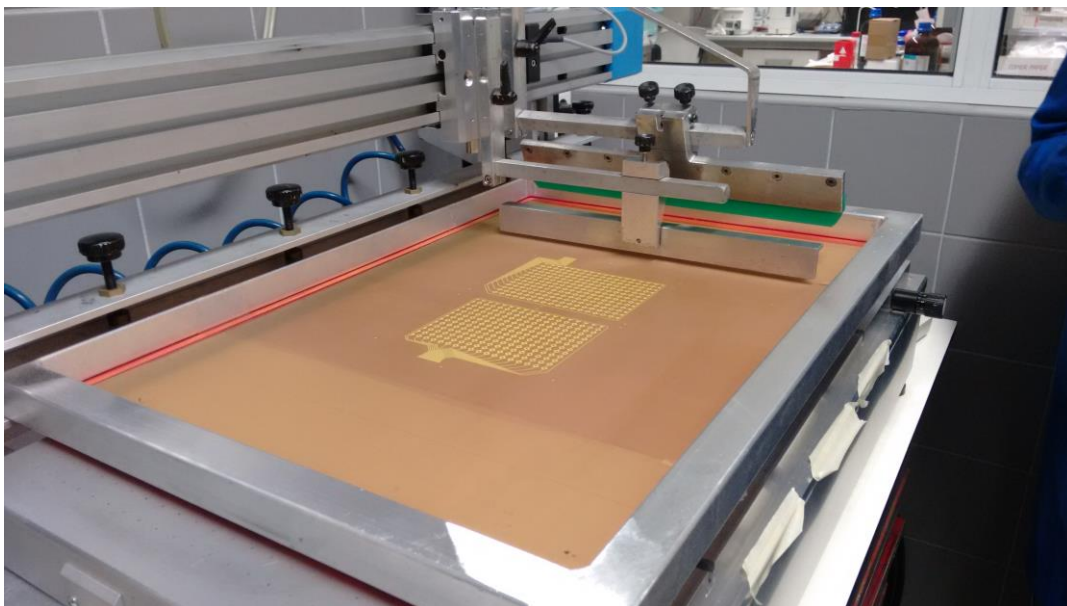


correta disposição de ambas as faces de modo a que a disposição dos eléctodos, vista de cima, fique uniforme.



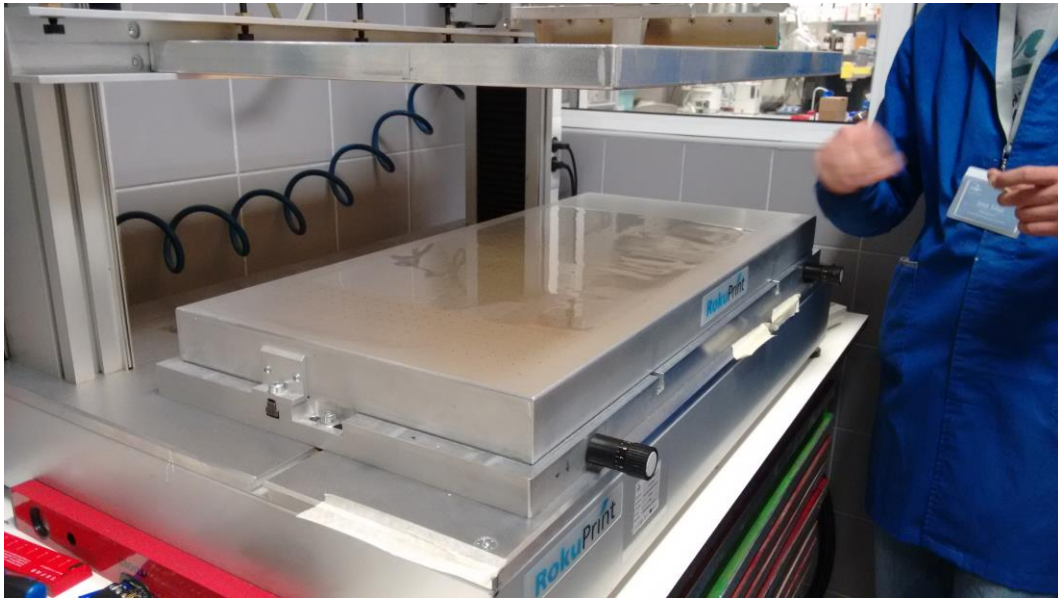
*Figura 28 - Exemplo do quadro utilizado no processo de screen printing*

Tendo os quadros prontos, é necessário encaixá-los na máquina de impressão. Neste caso, a máquina utilizada tem como marca e modelo a seguinte referência: RP 2.2+ KO04 +PRO02+VC02 Ruy Lacerda. A figura 29 mostra os quadros encaixados na máquina acima referida.



*Figura 29 - Quadro inserido na máquina de screen printing*

Depois de posicionado o quadro e de todas as calibrações de posição estarem corretas, é colocado na parte inferior o substrato no qual é pretendido imprimir. Neste caso, o substrato utilizado tem como referencia 7876EC-3MTT2GCPET50-350E/46-65DWG. A figura seguinte mostra o substrato posicionado na máquina de *screen printing*.



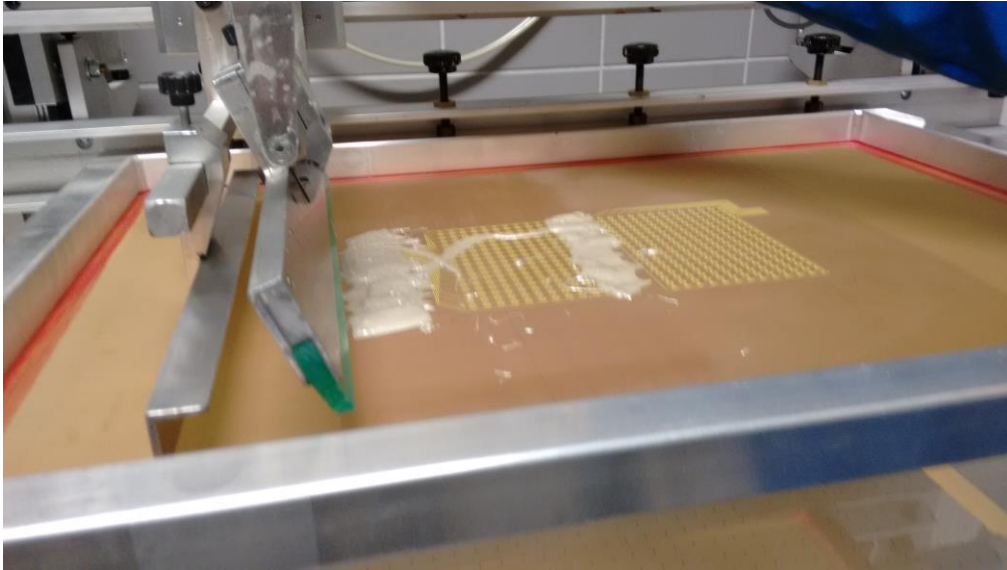
*Figura 30 - Substrato posicionado na máquina de screen printing*

A tinta utilizada para impressão é uma tinta baseada em prata de referência PET HOSTAPHAN GN 4660 75 microns. A figura 31 mostra a tinta utilizada.

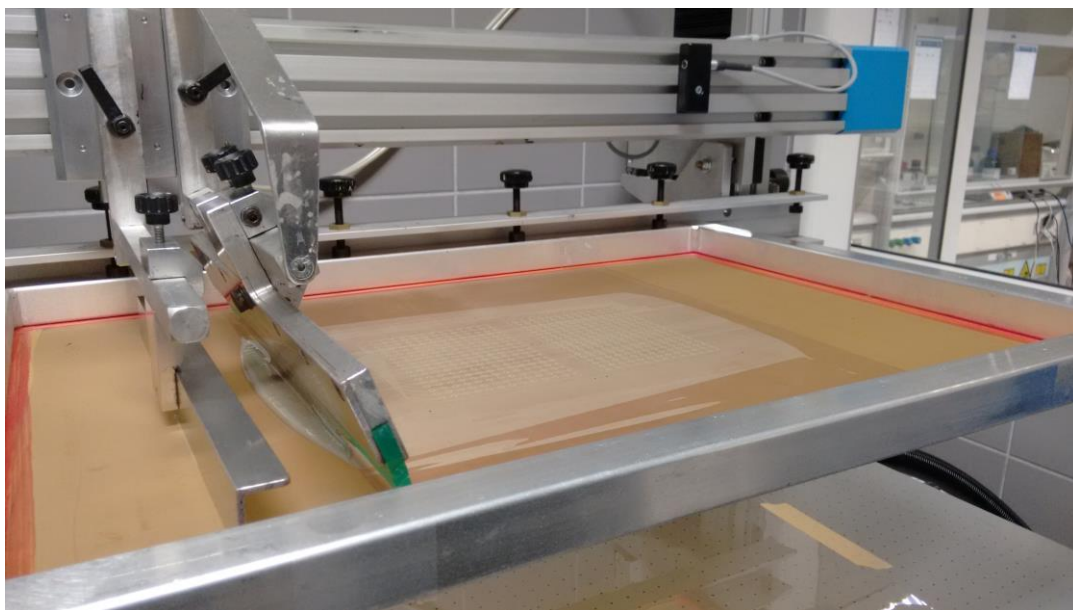


*Figura 31 - Tinta utilizada no processo de screen printing*

A tinta é espalhada de forma abundante por cima do quadro e a espátula da máquina espalha a tinta de forma uniforme e depois, com o movimento reverso, aplica uma força sobre o quadro para fazer com que o quadro entre em contacto com o substrato de maneira que a tinta passe pelos orifícios do padrão e fique depositada no substrato. As figuras 32 e 33 mostram o processo descrito acima.



*Figura 32 - Tinta espalhada no quadro*



*Figura 33 – Quadro após a impressão*

Como foi necessário imprimir em ambas as faces do substrato, foi preciso garantir que a tinta na face que foi impressa primeiro estivesse seca para não deformar o padrão. Para isso, foi utilizada

uma máquina para secar a tinta. Foi utilizada uma máquina de radiação UV/IV para cura química de marca AcosGraf. O processo de secagem foi feito com uma temperatura de 45°C sobre um tapete rolante a uma velocidade de 1m/s, que era a velocidade mínima de operação. Este processo foi repetido cinco vezes, de modo a garantir uma melhor secagem da tinta. Embora o substrato pudesse suportar temperatura mais altas de cura, foi utilizado apenas 45°C, para evitar a deformação térmica do substrato, que, embora fosse mínima, fazia com que quando fosse feita a impressão sobre a outra face os pontos de alinhamento não coincidisse perfeitamente e criassem assim desalinhamentos entre as duas faces.

Após a impressão de ambas as faces, foi necessário um processo de cura adicional. Como já estavam impressas ambas as faces, já não havia o risco de desalinhamento dos padrões, por isso, foi utilizada uma temperatura de 85°C a uma velocidade mínima de operação de 1m/s. Este processo foi repetido umas cinco vezes para cada matriz impressa, de maneira a curar a tinta de prata e diminuir assim a resistência elétrica das pistas. A figura 34 ilustra o processo de cura e a figura 35 mostra o resultado final da impressão.



*Figura 34 – Matrizes impressas após o processo de cura*

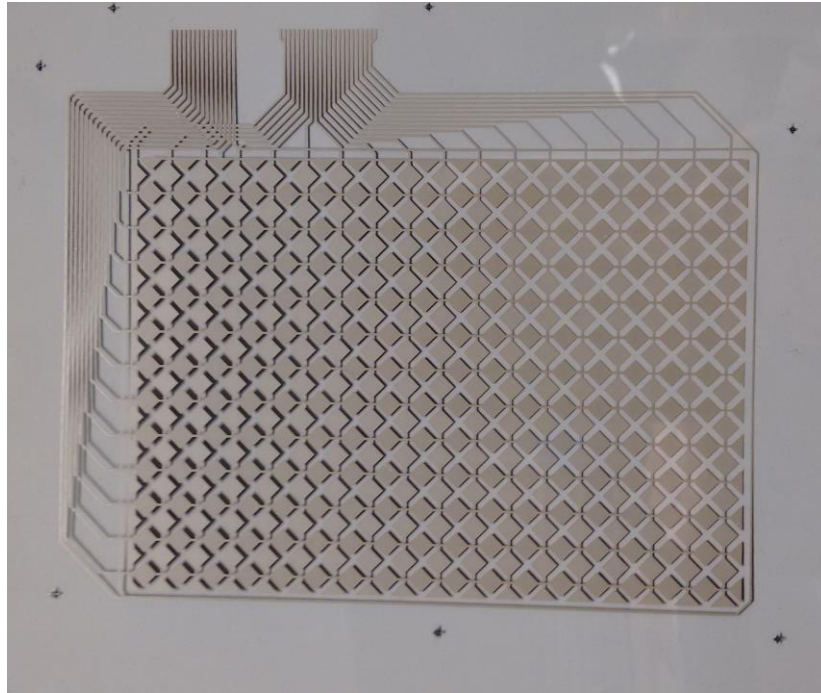


Figura 35 - Matriz impressa de elétrodos preenchidos

Como foi referido anteriormente, foi necessário um processo de cura das matrizes impressas, tanto para secar a tinta como para baixar os níveis de resistência elétrica para valores instrumentáveis, não interferindo, assim, com os limites de operação do controlador capacitivo. Os gráficos seguintes demonstram na resistência elétrica medida nas pistas de ambas as geometrias.

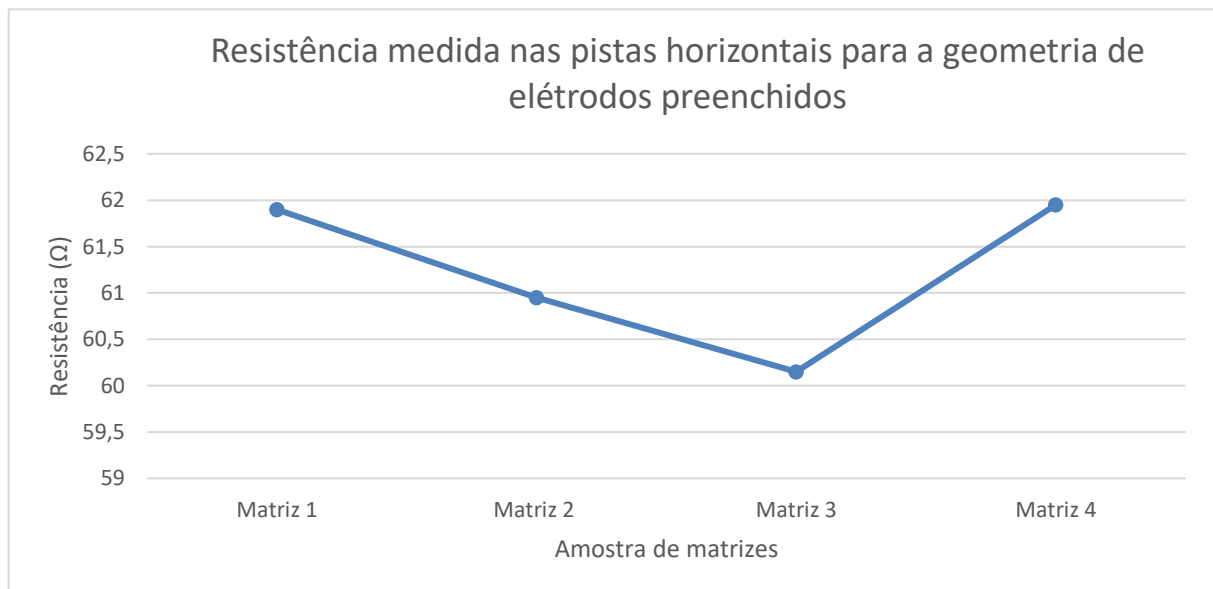
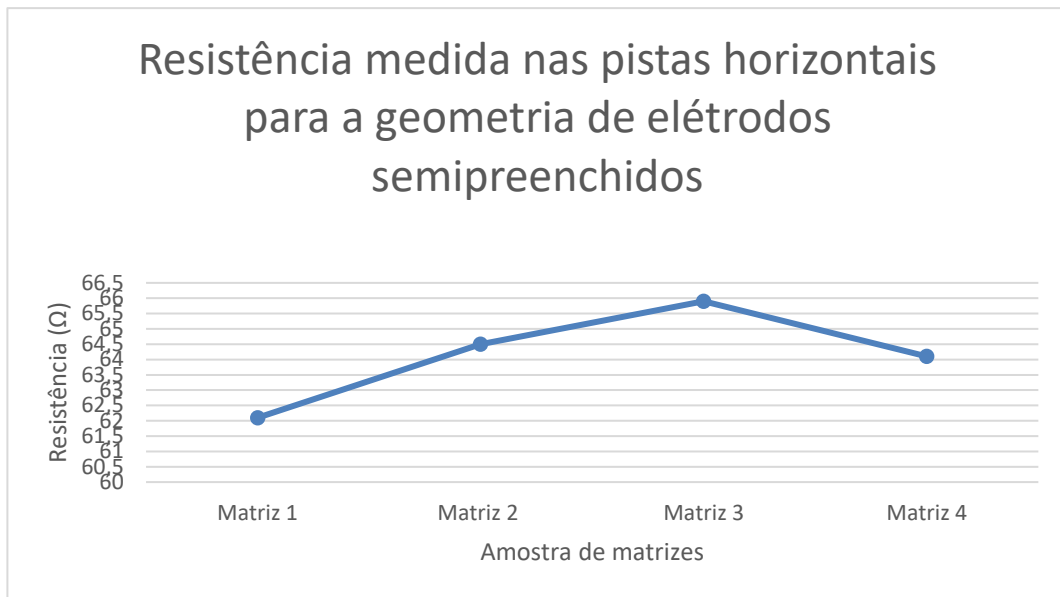


Figura 36 - Gráfico da resistência medida nas pistas horizontais de uma amostra de matrizes de elétrodos preenchidos

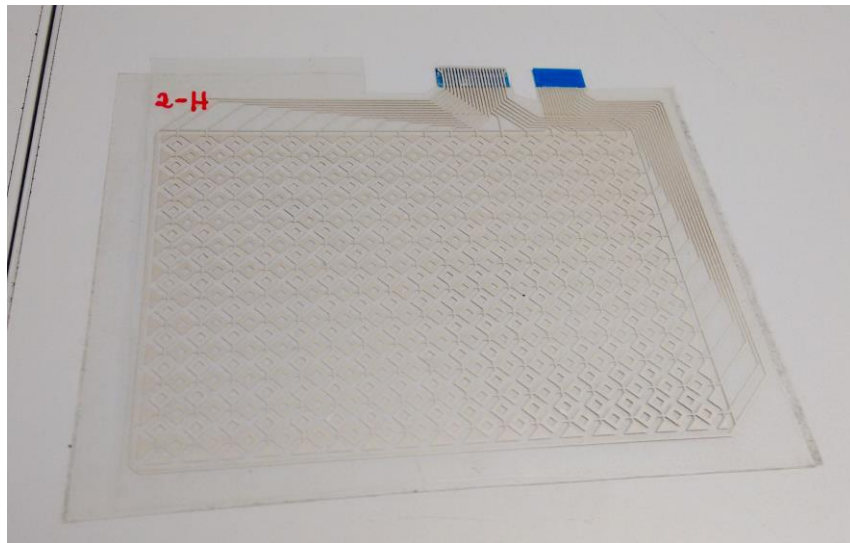


*Figura 37 -Gráfico da resistência medida nas pistas horizontais de uma amostra de matrizes de elétrodos semipreenchidos*

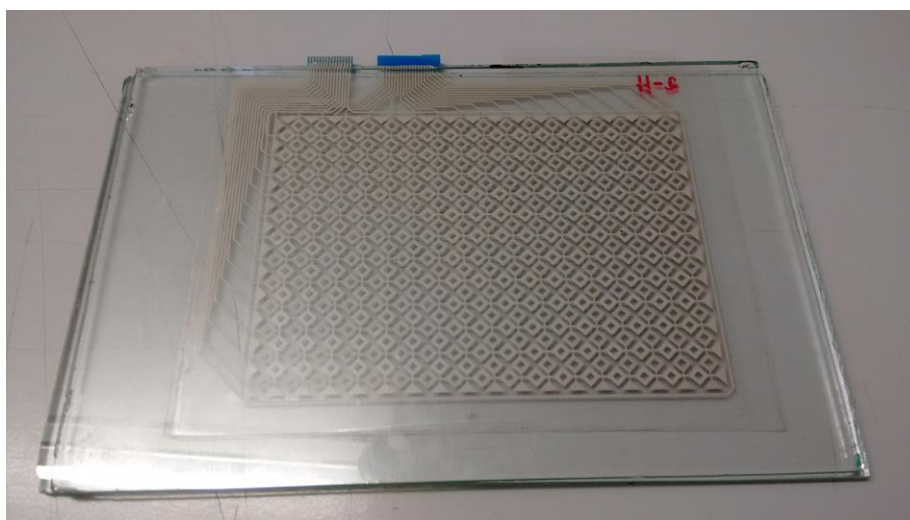
Como é possível observar nas figuras 36 e 37, foram medidos os valores de resistência elétrica para as pistas de maior dimensão. A diferença entre os valores de resistência elétrica medidas de uma amostra de resistências de geometria de elétrodos preenchidos e semipreenchidos encontram-se na mesma gama de valores e as diferenças não são significativas e podem ser ignoradas. É possível constatar que a resistência dos elétrodos das resistências semipreenchidas é superior às matrizes de elétrodos preenchidos. Embora ambas tenham sido sujeitas ao mesmo processo de cura, como a matriz de elétrodos semipreenchidos possui menos área condutora a resistência das pistas aumenta. Os valores médios obtidos enquadram-se no valor pretendido para este sistema.

#### 4.1.2 Encapsulamento da matriz

Para impedir a oxidação da matriz, visto que estas foram impressas com tintas baseadas em prata, foram adicionadas duas camadas protetoras, uma em cada face da matriz impressa. As camadas protetoras adicionam alguma rigidez à matriz, mas permitem que esta tenha uma maior durabilidade e resistência ao meio. Foram adicionados dois tipos de encapsulamento às matrizes, um do tipo do substrato utilizado e vidro. A figura 38 e 39 mostram os encapsulamentos utilizados.



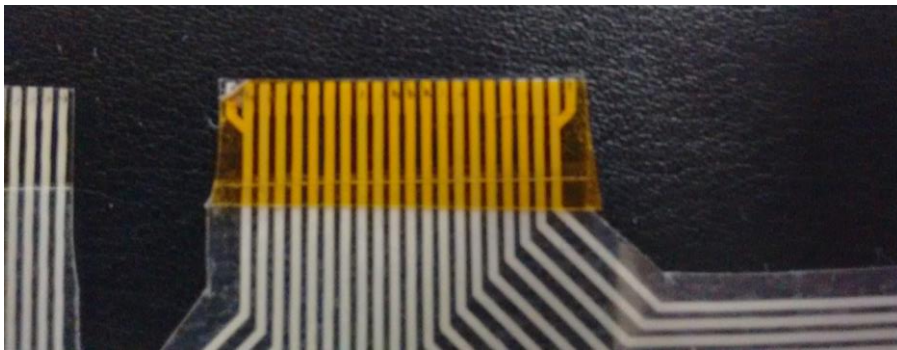
*Figura 38 - Encapsulamento da matriz com substrato autocolante*



*Figura 39 - Encapsulamento da matriz utilizando vidro*

#### 4.1.3 Tratamento dos conectores

Como já foi referido os conectores escolhidos foram do tipo FFC/FPC, que têm como ligação uma ficha flexível. No design das matrizes, as pistas de ligação foram estendidas para fazerem contacto direto com o conector. Foi necessário, então, garantir que as dimensões das pistas impressas coincidissem com o tipo de ficha que os conectores estão preparados. Para uma melhor conexão, foi necessário aumentar a espessura dos terminais da matriz. Inicialmente, foi utilizado um material autocolante para dar espessura, o material utilizado foi kapton. Mas, devido à sua espessura reduzida, foi necessário sobrepor várias camadas do mesmo. A figura 40 demonstra o tratamento aos terminais da matriz.



*Figura 40 - Tratamento dos conectores com várias camadas de kapton*

Depois de experimentar os terminais da matriz no conector, verificou-se que este não possuía a rigidez necessária para que o conector fixasse os terminais de forma eficaz. Para corrigir esse problema, a solução de utilizar kapton nos terminais foi abandonada. Como alternativa, foram analisadas algumas fichas comerciais e verificou-se que todas utilizavam uma placa de reforço na parte da ficha que liga ao conector. Então, essa solução foi aplicada no sistema. A figura 41 mostra o resultado da aplicação de uma placa de reforço nos terminais da matriz. Esta solução permitiu que os conectores fixassem os terminais da matriz de forma eficaz, emulando assim as soluções comerciais.



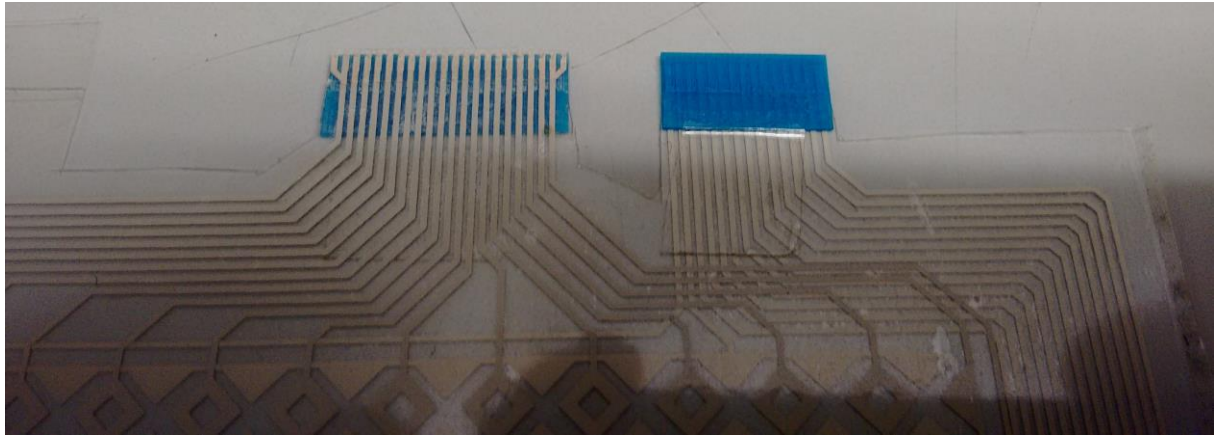


Figura 41 - Tratamento dos terminais da matriz com uma placa de reforço

## 4.2 PCB de leitura

A PCB de leitura foi feita de acordo com as especificações dimensionadas no capítulo 3. A figura 42 mostra a PCB obtida sem componentes.

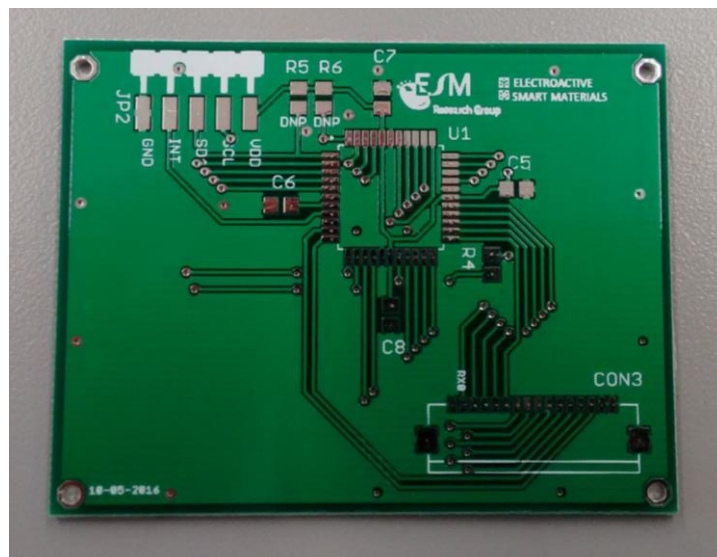
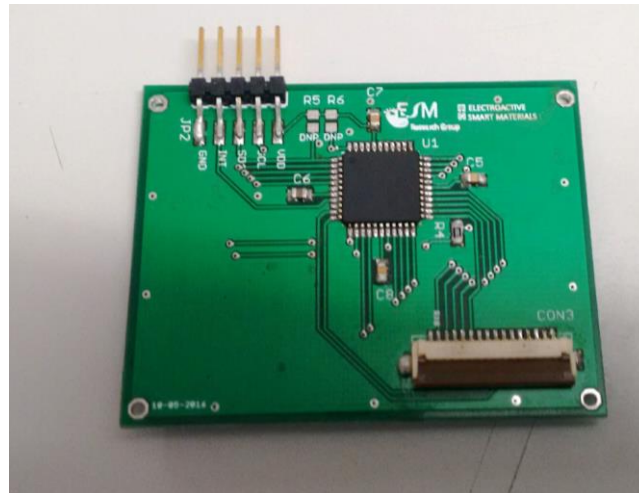


Figura 42 - PCB obtida através do design dimensionado

Depois foram soldados todos os componentes descritos no circuito de leitura. A figura 43 mostra o resultado final.



*Figura 43 - PCB final*

Inicialmente, a ligação entre a matriz e o circuito de leitura foi dimensionada para ser apenas por um único conector. Tal não foi possível desenvolver, porque as soluções comerciais disponíveis não continham conectores para as especificações do projeto. Devido à limitação dos espaços entre linhas dos terminais, que foram desenhadas para ter um espaçamento de 0.5 mm, não existiam conectores para essas especificações. Para resolver o problema, foi decidido separar as linhas e as colunas ficando assim um conector para cada. Outro problema que surgiu foi não ter conectores disponíveis para venda com o número exato de contactos. Esse problema foi resolvido utilizando conectores com mais contactos. Como foram utilizados conectores maiores do que o necessário surgiu a oportunidade de utilizar esses contactos para isolamento. Foi, então, criada uma pista ligada à terra que rodeia todas as outras ligações. O objetivo dessa pista adicional é isolar ambos os conectores, reduzindo assim o ruído do sistema. Outro problema que surgiu foi o facto de os conectores apenas terem contactos na parte inferior, ou seja, foi preciso posicioná-los na parte superior e inferior da PCB. As figuras 44 e 45 mostram as alterações feitas para corrigir o problema dos conectores.



*Figura 44 - Design dos terminais da matriz para ligar a dois conectores*

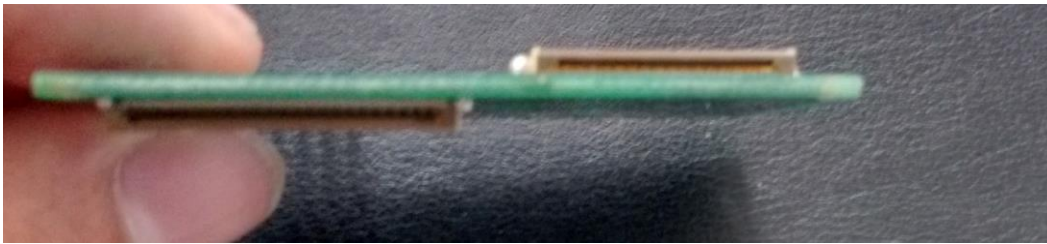


Figura 45 - Posição dos conectores na PCB

### 4.3 Programação do microcontrolador

A programação do microcontrolador segue o fluxograma apresentado no capítulo 3 e foi feita utilizando o IDE fornecido pelo Arduino.

Para facilitar a comunicação entre o microcontrolador e a aplicação gráfica, foi criada uma função para converter os dados obtidos pelo controlador capacitivo para uma trama mais simplificada. A trama escolhida foi: "X[0-4096] Y[0-4096]". Para converter os valores obtidos foi implementada a seguinte função:

```
void conversion (byte lsb,byte msb)
{
  if ((msb & 0x01) == 0x01)
  {
    lsb = lsb | 0x80;
    msb = msb >> 1;
  }
  else
  {
    msb = msb >> 1;
  }

  Serial.print(word(msb,lsb));
}
```

Figura 46 - Função de conversão dos dados

A função da figura 46 converte de acordo com o *datasheet* os valores obtidos do controlador capacitivo para valores decimais.

A imagem seguinte mostra a linhas de código necessárias para gerar a trama acima descrita.

```
Serial.print("X");  
conversion(x_lsb,x_msb);  
Serial.print(" Y");  
conversion(y_lsb,y_msb);  
Serial.println();
```

Figura 47 - Código para gerar a trama "X[0-4096] Y[0-4096]"

## 4.4 Aplicação gráfica

A interface gráfica foi desenvolvida utilizando o IDE Microsoft Visual Studio 2012 PRO, utilizando a linguagem de programação C#. Esta linguagem foi utilizada porque permite a criação de aplicações gráficas e contém bibliotecas para funcionar com dispositivos ligados por porta serie.

### 4.4.1 Interface gráfica

A figura 48 mostra a interface gráfica da aplicação criada para processar e visualizar os dados provenientes do sistema.

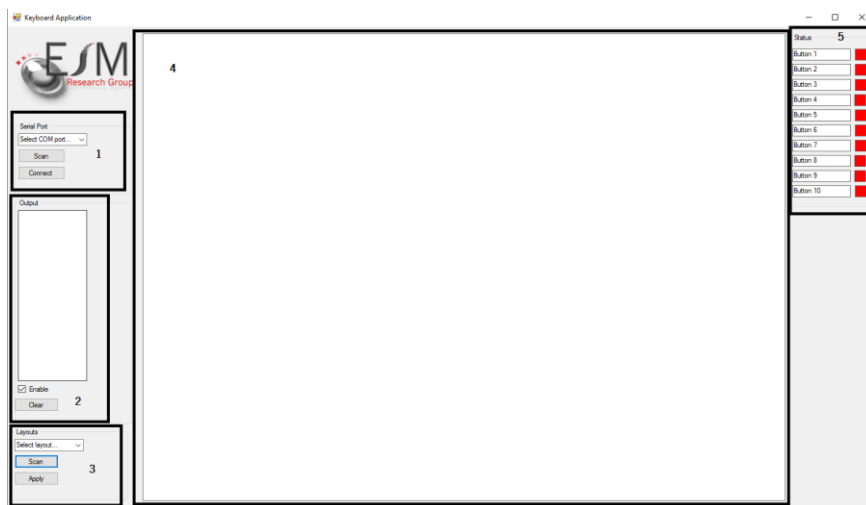


Figura 48 - Interface da aplicação gráfica

Como é possível observar na figura 48, a interface gráfica da aplicação possui várias funcionalidades. Entre elas é possível distinguir as várias áreas numeradas de 1 a 5.

A área 1 diz respeito a comunicação via porta serie com o microcontrolador. A aplicação permite fazer um *scan* aos dispositivos disponíveis, escolher através de uma lista o dispositivo pretendido e depois carregar no botão “*Connect*” para estabelecer comunicação.

O intuito das funcionalidades da área 2 é permitir ao utilizador visualizar o que está a ser transmitido via porta serie, ou seja, no formato anteriormente apresentado. Também é possível limpar o conteúdo dessa janela ou até mesmo desativar essa função.

A área 3 apresenta as funcionalidades que dizem respeito aos diferentes *layouts* de teclados. Nessa área, o utilizador pode fazer *scan* a todos os *layouts* disponíveis e aplicá-los na área de visualização que na figura é marcada pela área 4. A área 4 é onde é visualizada a informação dos toques.

E, por último, temos a área 5, que funciona como mostrador para o utilizador caso a respetiva área do botão seja pressionada.

#### 4.4.2 Requisito funcional: Reconfiguração do teclado

Para implementar o requisito de reconfiguração, foi implementada uma tabela de correspondência de cores baseadas nos códigos RGB (*Red Blue Green*). Para que a aplicação detete se um determinado botão foi pressionado esta compara a cor do pixel do layout do teclado com a tabela de cores para cada botão. Para cada botão foi atribuída uma cor específica. A figura 49 mostra a implementação dessa tabela.

```
Color button1 = Color.FromArgb(255,128,0);  
Color button2 = Color.FromArgb(0, 0, 0);  
Color button3 = Color.FromArgb(255, 0, 0);  
Color button4 = Color.FromArgb(0, 255, 0);  
Color button5 = Color.FromArgb(0, 0, 255);
```

Figura 49 - Código de correspondência de cores aos botões

A figura 50 mostra a interface gráfica da aplicação com um exemplo de um layout carregado pelo utilizador.



*Figura 50 - Exemplo de um layout carregado pelo utilizador*

Como é possível observar na figura, cada botão possui a sua respetiva cor, através do código mostrado na figura 49. O programa consegue distinguir se está algum botão a ser pressionado e qual o botão.



## 5. TESTES AO SISTEMA

Neste capítulo serão apresentados os testes ao sistema completo. Testes às diferentes geometrias com os diferentes encapsulamentos e à funcionalidade da detecção de diferentes *layouts*. Será apresentada a resposta da aplicação gráfica para um conjunto de toques do sensor.

### 5.1 Testes das diferentes geometrias com encapsulamento sem vidro

Foram ligados todos os componentes do sistema e o resultado final pode ser visto nas figuras seguintes. A figura 51 mostra o sistema com uma matriz de geometria com elétrodos preenchidos e a figura 52 o sistema com uma matriz que elétrodos semipreenchidos, ambas sem o encapsulamento de vidro.

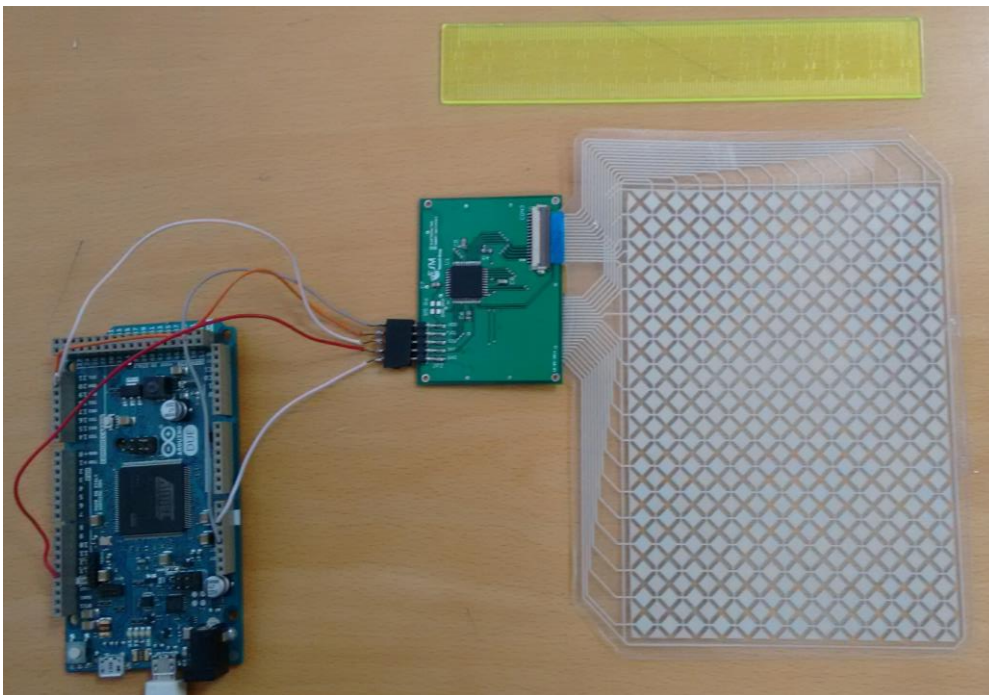


Figura 51 - Sistema completo com uma matriz de elétrodos preenchidos



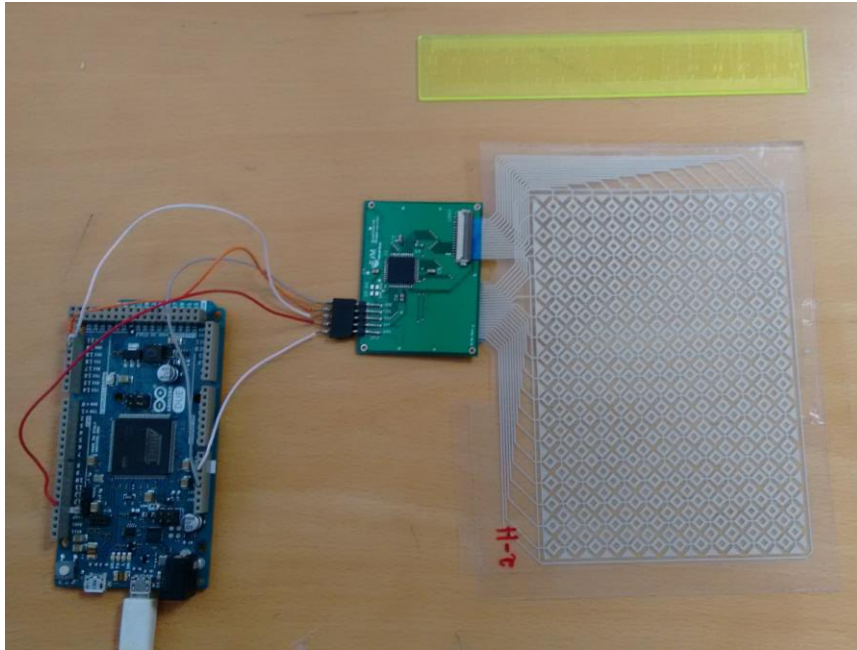


Figura 52 - Sistema completo com matriz de elérodos semipreenchidos

Conectando o sistema com a aplicação gráfica, foi possível obter os seguintes resultados quando um dedo carrega no sensor, como mostra na figura 53. O teste da figura 53 foi feito utilizando uma matriz com uma geometria de elérodos preenchidos.

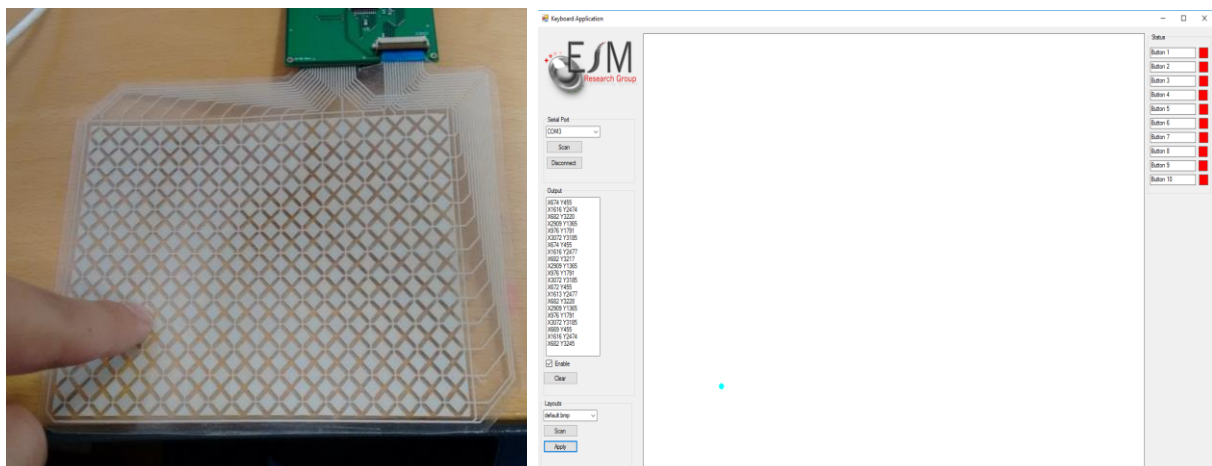


Figura 53 - Toque na matriz de elérodos preenchidos

Foi realizado um teste idêntico com o sistema utilizando uma matriz de geometria de elétrodos semipreenchidos. A figura 54 demonstra o dedo pressionado no sensor e a resposta obtida na aplicação gráfica.

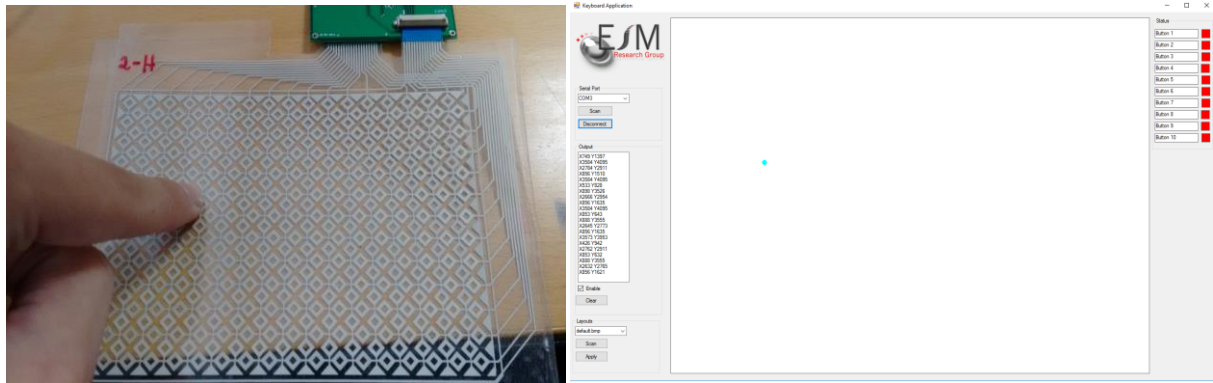
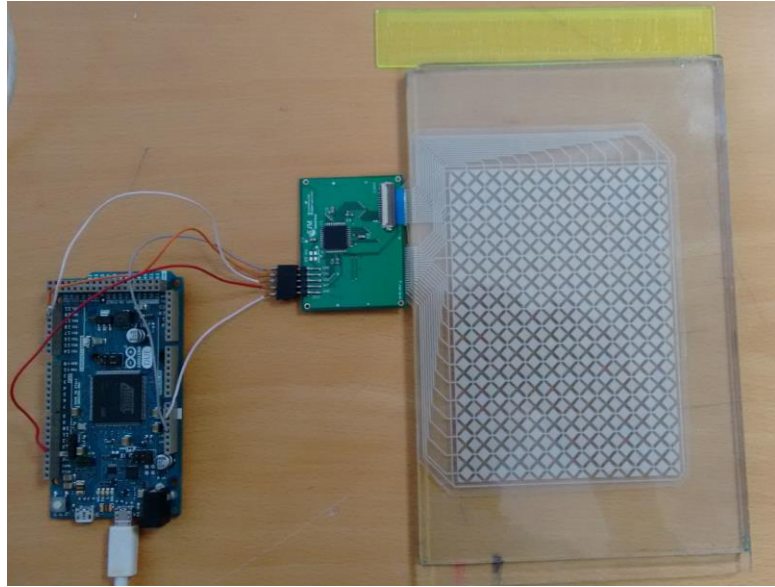


Figura 54 -Toque na matriz de elétrodos semipreenchidos

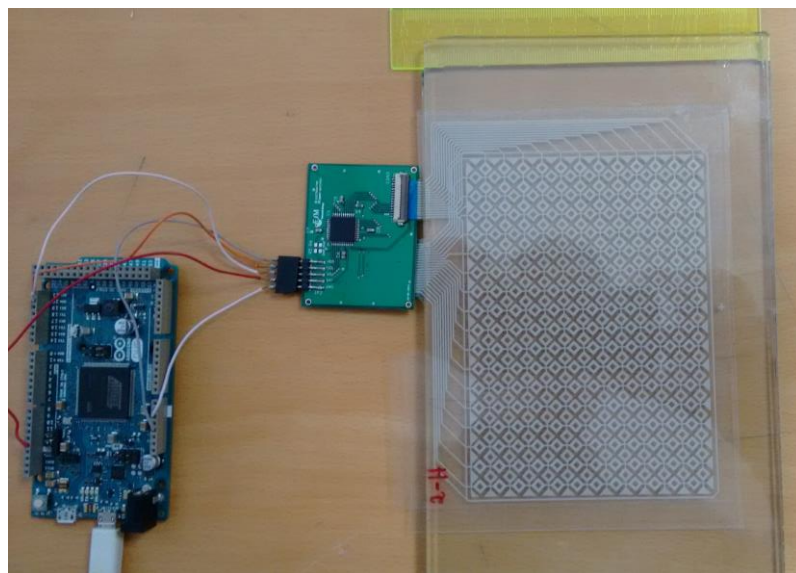
Nas condições dos testes realizados às diferentes geometrias chegou-se ao resultado pretendido, embora existisse algum ruído do sistema, o que leva ao aparecimento de toques fantasma. Apesar do aparecimento de ruído, foi possível chegar aos resultados esperados, ou seja, detetar o toque no sensor com precisão aceitável. De notar que para ambas as geometrias testadas não ocorreram variações significativas. O comportamento em questões funcionais foi idêntico.

## 5.2 Testes das diferentes geometrias com encapsulamento de vidro

Para além do revestimento utilizado nos testes anteriores, foram também adicionadas aos sensores duas placas de vidro, uma em cada face para aumentar a distância dos dedos à matriz e reduzir o ruído. Como as placas de vidro mantêm a película numa posição estática, o ruído gerado nos contactos devido a deformações mecânicas é assim mitigado. As figuras 57 e 58 mostram o sistema completo com revestimento de vidro para ambas as geometrias.



*Figura 55 - Sistema completo com matriz de eléttodos preenchidos revestidos com vidro*



*Figura 56 - Sistema completo com matriz de eléttodos semipreenchidos revestido a vidro*

Às matrizes revestidas com vidro foram efetuados os mesmos testes que as matrizes sem vidro. A figura 57 demonstra um teste de um toque efetuado a uma matriz de eléttodos semipreenchidos revestidos por duas placas de vidro.

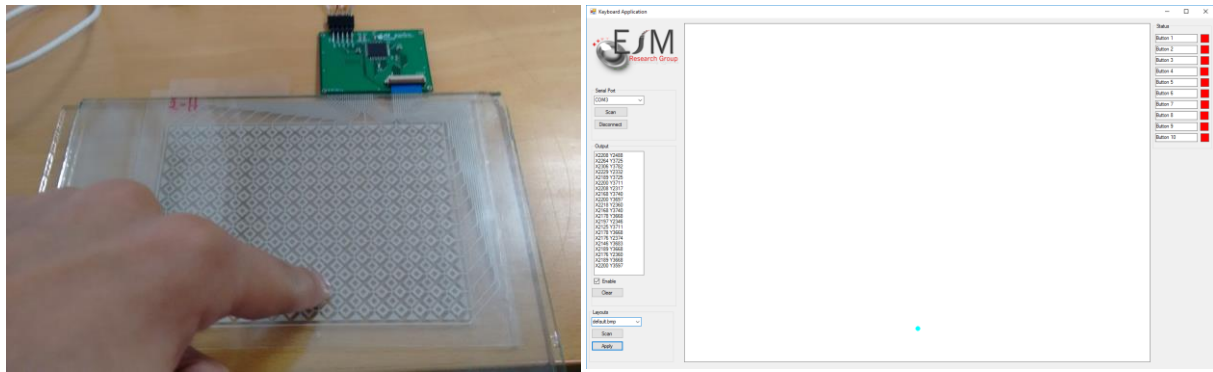


Figura 57 - Toque numa matriz de elétrodos semipreenchidos revestida a vidro

Os mesmos testes foram realizados para uma matriz de geometria de elétrodos preenchidos. A figura 58 demonstra esse teste.

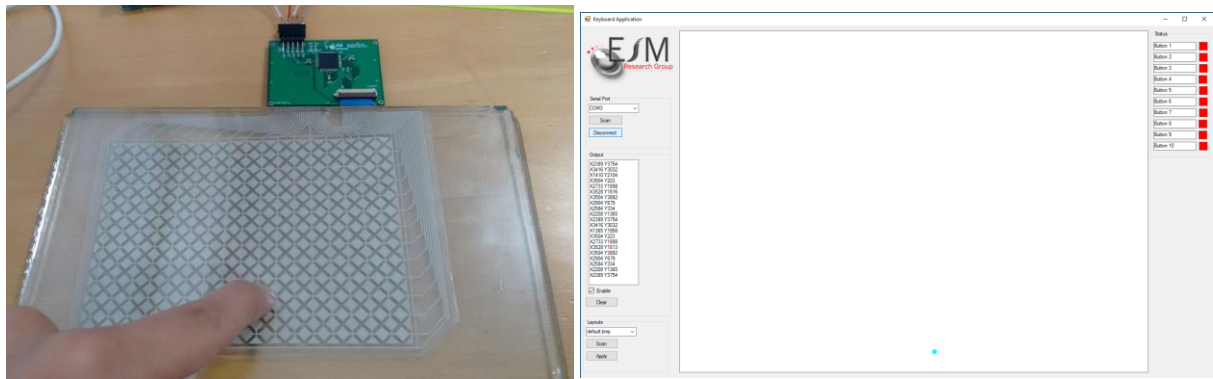


Figura 58 - Toque numa matriz de elétrodos preenchidos revestidos a vidro

Os testes efetuados aos sensores com vidro foram feitos nas mesmas condições que os testes efetuados aos sensores sem vidro, ambos foram feitos numa superfície planar.

Após a realização dos testes com o vidro com extra camada de revestimento, os resultados obtidos foram idênticos aos testes efetuados sem vidro, ou seja, não foram detetadas diferenças significativas ao funcionamento do sistema. O mesmo ruído que afetava os testes sem vidro continuou presente o que dificultou a deteção dos toques. Mas foi possível detetar os toques a precisão idêntica aos resultados obtidos aos testes sem a utilização do vidro.

### 5.3 Teste da detecção dos botões num *layout*

Para testar a funcionalidade dos teclados reconfiguráveis, foram efetuados testes semelhantes aos apresentados anteriormente. Foi escolhida uma configuração do sistema com uma matriz de elétrodos preenchidos e foram testados vários toques para ver se a aplicação reconhecia a área dos botões pressionados.



Figura 59 - Toque fora da área dos botões

Como é possível observar na figura 59, o toque está fora da área dos botões, como está fora a barra de estados, não muda, ou seja, todos os indicadores dos botões mantêm-se a vermelho.

Na figura 60, o toque já está dentro da área dos botões, o que faz com que a barra de estados reporte o toque nos botões, visto que o toque sobrepõe a área do botão 1 e que está definido pela cor laranja. A barra de estados neste caso muda da cor vermelha para verde, indicando o reconhecimento do botão 1. Este caso aplica-se a todos os outros botões, caso o toque esteja dentro da área do respetivo botão.

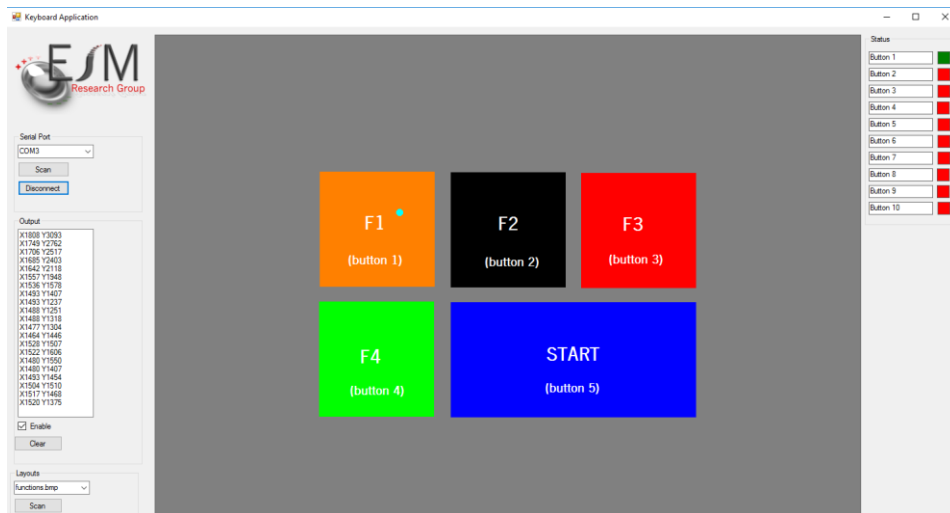


Figura 60 - Toque detetado na área do botão 1

De notar que apenas um *layout* foi testado para verificar a deteção dos botões, mas como todos os outros layouts respeitam o mesmo código de cores podemos aferir que o comportamento será idêntico aos testes realizados anteriormente.



## 6. CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação era desenvolver um sistema de um teclado reconfigurável capacitivo baseado em tecnologias impressas de maneira a que pudesse ser integrado em aplicações comerciais/industriais.

Todos os componentes do sistema foram desenvolvidos com sucesso. Primeiro foram desenvolvidas duas geometrias para o sensor, cuja diferença estava no seu *layout*. O desenvolvimento de duas matrizes distintas permitiu variar o nível de sensibilidade do sensor. Foi desenvolvido um circuito de leitura baseado num controlador capacitivo para matrizes de 18x13. Para a ligação entre o sensor e a PCB de leitura, foram utilizados conectores FFC/FPC de modo a aproveitar as características flexíveis do sensor. Para processar os dados, foi utilizada uma placa de desenvolvimento Arduino Due que, por si, comunicava a informação dos toques para um sistema terminal que alojava uma aplicação gráfica para visualizar e configurar o *layout* do teclado.

Foram efetuados testes ao sistema completo, variando as geometrias utilizadas e também com ou sem um revestimento de vidro. Foi possível obter e representar a informação dos toques na aplicação de forma precisa. Contudo, a obtenção de resultados pretendidos foi dificultada pelo ruído que o sistema possuía. Embora tenham sido testadas várias configurações, esse ruído era uma constante no sistema. Foram aplicadas várias soluções para eliminar ou mitigar o ruído do sistema. Algumas abordagens conseguiram reduzir o ruído, mas não de forma eficaz. Devido a isso, a obtenção da informação dos toques reais torna-se difícil devido ao número de toques reportados, provocados pelo ruído. Embora o sistema tenha sido dimensionado de forma a minimizar o ruído, através da utilização das pistas excedentes dos conectores para criar uma pista isoladora ligada a terra, isso não se provou ser suficiente. Após uma análise cuidada dos possíveis fatores causadores de ruído, chegou-se à conclusão que o principal fator gerador do ruído residia na conexão entre matriz e o circuito de leitura. A topologia da ligação não apresenta as melhores condições, visto ser uma solução experimental. Para resolver esse problema seria necessário aperfeiçoar essa ligação. Feita uma análise aos sistemas atualmente disponíveis no mercado, chegou-se à conclusão de que o ideal seria utilizar um componente intermédio entre a matriz e o circuito de leitura. Esta abordagem é explicada melhor no capítulo seguinte.

Após a realização deste sistema também é possível concluir que as tecnologias impressas associadas a tecnologias de multitoque apresentam grande potencial comparando com as soluções comerciais/industriais usadas atualmente, devido ao seu custo de fabrico e simplicidade.





## 7. TRABALHO FUTURO

Após a conclusão deste trabalho e terem sido obtidos resultados satisfatórios, muitos aspetos, ao longo do processo de desenvolvimento do teclado, podem ser melhorados e substituídos por soluções mais apropriadas, de maneira a transformar o sistema num protótipo viável para futuramente ser comercializado.

Um dos aspetos a melhorar seria ao nível da conexão entre a matriz e o circuito de leitura. Substituindo o método atual de ligação, em que a matriz liga diretamente ao conector do circuito de leitura, seria ideal a criação de uma PCB flexível para fazer a interface entre a matriz o circuito. Com esta solução, o ruído seria consideravelmente menor adicionando, assim, alguma robustez e eficácia e precisão da deteção dos toques. Outra solução que podia ser aplicada seria utilizar conectores mais robustos dos que foram utilizados. Estas alterações permitiriam ao sistema um comportamento mais estável.

Também para diminuir os custos e o tamanho do sistema seria interessante abandonar a placa de desenvolvimento utilizada e incorporá-la juntamente com o circuito de leitura, que contém o controlador capacitivo. Esta alteração permitiria que o sistema apresentasse menos ruído na deteção dos toques. Reduziria também os custos de produção, porque a placa de desenvolvimento atualmente usada apresenta especificações funcionais não adequadas ao sistema. Com a inclusão de um microcontrolador dedicado com apenas as especificações necessárias, reduziria significativamente o custo do sistema.

No que diz respeito ao processamento de dados pelo microcontrolador, a programação utilizada podia ser mais eficiente a nível de comunicação, tornando a resposta do sistema mais rápida. Também podiam ser aproveitadas as funcionalidades de *sleep mode* do controlador capacitivo para fazer com que o sistema tivesse um consumo de energia mais baixo.

O requisito de reconfiguração do teclado embora funcional, podia ser implementado de forma mais dinâmica, ou seja, o próprio utilizador, através da aplicação gráfica com recurso a uma *toolbox* teria a possibilidade de adicionar botões de formas predefinidas ou mesmo desenhar os próprios botões de forma livre de acordo as suas necessidades.

Outro aspeto a considerar como trabalho futuro seria aumentar o tamanho do sensor, para criar a possibilidade de uma área de toque superior, permitindo, assim, a manipulação e adição de mais botões no teclado.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Walker, "A review of technologies for sensing contact location on the surface of a display," *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 20, no. 8, pp. 413–440, 2012.
- [2] M. R. Bhalla and A. V. Bhalla, "Comparative Study of Various Touchscreen Technologies," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 6, no. 8, pp. 2–8, 2010.
- [3] G. Barrett and R. Omote, "Projected-Capacitive Touch Technology," pp. 16–21, 2010.
- [4] B. P. Madaan, P. Kaur, and C. S. Corp, "CAPACITIVE SENSING MADE EASY , Part 1 : An Introduction to Different Capacitive Sensing Technologies," no. April, pp. 1–8, 2012.
- [5] T. O'Connor, "mTouch Projected Capacitive Touch Screen Sensing Theory of Operation: TB3064," *Tech. Bull.*, pp. 1–16, 2010.
- [6] "Screen Printing," 2016. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Screen\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/Screen_printing).
- [7] A. Hobby, "SCREEN PRINTING FOR THE INDUSTRIAL USER," 1997. [Online]. Available: [http://www.gwent.org/gem\\_screen\\_printing.html](http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html).
- [8] L. Yang, A. Rida, R. Vyas, and M. M. Tentzeris, "RFID tag and RF structures on a paper substrate using inkjet-printing technology," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 12, pp. 2894–2901, 2007.
- [9] B.-J. de Gans, P. C. Duineveld, and U. S. Schubert, "Inkjet printing of polymers: State of the art and future developments.," *Adv. Mater. (Weinheim, Ger.)*, vol. 16, no. 3, pp. 203–213, 2004.
- [10] "Dimensions Of A Series Paper Sizes," 2016. [Online]. Available: <http://www.papersizes.org/a-paper-sizes.htm>.
- [11] "CadSoft EAGLE v.7.5." [Online]. Available: <https://cadsoft.io/>.
- [12] "Inkjet," 2016. [Online]. Available: <http://www.dp3project.org/technologies/digital-printing/inkjet>.
- [13] "Board-to-wire connector / FPC/FFC / rectangular / SMT." [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/prod/molex/product-11614-553546.html>.
- [14] "Arduino Due," 2016. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>.
- [15] "MTCH6301 Projected Capacitive Touch Controller." 2014.