

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

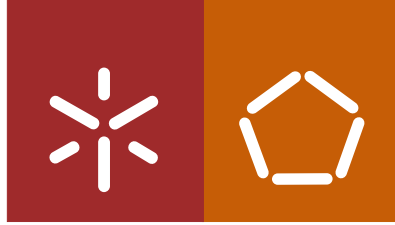
Pedro José da Silva Pires

**Sistema de leitura de sensores de
temperatura obtidos através de
tecnologias de impressão**

Pedro José da Silva Pires **Sistema de leitura de sensores de temperatura obtidos através de tecnologias de impressão**

UMinho | 2015

outubro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Pedro José da Silva Pires

**Sistema de leitura de sensores de
temperatura obtidos através de
tecnologias de impressão**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Electónica Industrial e de Computadores

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

e coorientação do
Professor Doutor Senentxu Lanceros-Mendez
e do
Professor Doutor Vítor Manuel Gomes Correia

outubro de 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Pedro José da Silva Pires

Endereço eletrónico: a61995@alunos.uminho.pt Telefone: 913581228/ 933241032

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14159250

Título da dissertação: Sistema de leitura de sensores de temperatura obtidos através de tecnologias de impressão

Orientador:

Professor Doutor José Gerardo Vieira Rocha

Coorientadores:

Professor Doutor Senentxu Lanceros-Mendez

Professor Doutor Vítor Manuel Gomes Correia

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia Electónica Industrial e de Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Antes de mais, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Gerardo Rocha, Professor Senentxu Lanceros-Mendez e Professor Vítor Correia por toda a disponibilidade e empenho que demonstraram, ajudando-me a seguir o caminho correto e a ultrapassar os problemas encontrados na realização desta dissertação.

Queria também agradecer a todos os colegas presentes no laboratório, pela constante ajuda e troca de ideias.

Devo também os meus mais sinceros agradecimentos aos meus familiares, com principal atenção aos meus pais e irmã, por todo o incentivo que sempre prestaram, porque sem vocês nada seria possível.

Deixo um obrigado especial à minha companheira de sempre, Adriana Teixeira, já que contigo tudo fica mais fácil.

Finalmente, deixo os meus agradecimentos aos meus colegas e amigos de curso, por todo o auxílio que me deram, nas alturas difíceis em que a carga é muita e as horas são poucas e por nunca deixarem que motivação se tornasse um problema. De entre todos os amigos, há um que não poderia passar sem ser mencionado. Emanuel Ribeiro, vais ser sempre o nosso “Hermione”, obrigado por teres sido um verdadeiro amigo, aprendi muito contigo, foste um exemplo e uma referência para todos nós. Nunca serás esquecido!

RESUMO

Na última década notou-se uma evolução significativa da tecnologia a nível da sensorização, relacionado com o surgimento de novos materiais e técnicas de produção de sensores, aumento da sua precisão, diminuição das suas dimensões e redução dos custos de fabrico. Este avanço fez com que os sensores passassem a ser um elemento do dia-a-dia, não só em sistemas estáticos mas também em dispositivos móveis e de baixos níveis de consumo energético.

Nesta dissertação é desenvolvida uma matriz de sensores térmicos para ser aplicada numa prótese transfemural, com o objetivo de medir o perfil térmico no contato prótese/corpo humano. Para que possa cumprir este fim, os sensores terão de apresentar elevada flexibilidade, deixando logo assim de parte sensores rígidos ou mesmo os produzidos em silício com substratos em filmes finos, visto que, estes apesar de flexíveis, acabariam por se deteriorar com o constante movimento. Desta forma os sensores escolhidos são de base polimérica e aplicados através de tecnologias de impressão, devido ao seu baixo custo, elevada flexibilidade e fácil produção.

É também desenvolvido todo o sistema eletrónico, de reduzidas dimensões, responsável pela aquisição de dados da matriz de sensores. Este sistema será adaptável a vários tipos de sensores resistivos e tem como função realizar os processos de multiplexagem dos sensores, filtragem e amplificação do sinal, processamento de dados e envio destes através de comunicação serial.

Posteriormente, foi desenvolvido um software de computador que garante a aquisição dos dados enviados pelo sistema de leitura, permite a visualização em tempo real dos seus valores e imprime um gráfico com as curvas de valores de cada um dos sensores.

Por fim, o sistema foi sujeito a testes, com diferentes sensores e cargas resistivas, mostrando os resultados obtidos a utilidade e bom funcionamento do sistema.

ABSTRACT

A significant evolution of sensor technology was noticed on the last decade, with the appearing of new sensor materials and production techniques, increasing precision and reduction of the production costs. This advance allowed a widespread use of sensors, not only in static products, but also, in mobile devices with low energy consumption.

In this dissertation, a thermal sensor matrix was developed, to be applied in a leg prosthesis, measuring the thermal profile in the prosthesis/ human contact area. To achieve this goal, the sensors need to be highly flexible, ruling out the possibility of using hard sensors, or silicon thin films that would deteriorate with the constant movement. Thus, polymer based sensors fabricated by printing technologies were selected, due to their low production cost, flexibility and easy production.

The electrical system responsible for the acquisition of the matrix thermal sensor data was also designed and fabricated. This system will automatically adapt to different printed resistance sensors and will allow sensor selection, filtering, signal amplification, data processing and serial communication.

Finally, a computer software was developed, to receive the information sent by the sensor acquisition system, allowing real time visualisation of the sensor values and obtain the sensor data in a graphical plot.

The system was tested with various sensors and resistive charges, demonstrating the proper performance of the system.

KEYWORDS: SENSOR ACQUISITION, THERMAL SENSORS, FLEXIBLE SENSORS, MATRIX

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xiii
1. Introdução	1
1.1 Objetivos e Motivação.....	1
1.2 Organização e Estrutura da Dissertação	2
2. Estado da arte	3
2.1 Sensores Térmicos	3
2.1.1 Sensores térmicos Flexíveis	7
2.2 Sistemas de leitura de sensores de temperatura resistivos.....	9
2.3 Tecnologias de impressão de dispositivos eletrônicos	12
2.3.1 Screen Printing	12
2.3.2 Inkjet Printing.....	14
2.3.3 Spray Printing.....	17
2.4 Análise comparativa entre os diferentes tipos de sensores térmicos existentes:	19
3. Desenvolvimento do sensor em tecnologia impressa	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Processo de desenvolvimento.....	22
3.3 Resultados experimentais	25
3.4 Conclusões.....	27
4. Desenvolvimento do sistema de leitura dos sensores de temperatura impressos	28
4.1 Introdução.....	29
4.2 Processo de desenvolvimento.....	29
4.2.1 Aquisição de dados de uma matriz de sensores	32
4.2.2 Cálculo do valor de resistência de um sensor	34
4.2.3 Desenho do circuito em <i>Printed board Circuit (PCB)</i>	36
4.3 Resultados experimentais	37

4.4	Conclusões.....	42
5.	Desenvolvimento do Firmware para o microprocessador	45
5.1	Introdução.....	45
5.2	Análise do microcontrolador	46
5.3	Implementação do Firmware	46
5.4	Resultados experimentais	51
5.5	Conclusões.....	52
6.	Desenvolvimento de uma plataforma de testes em software	55
6.1	Introdução.....	55
6.2	Estruturação e desenvolvimento do software de testes	56
6.3	Resultados experimentais	59
6.4	Conclusões.....	61
7.	Conclusão e Trabalho Futuro.....	63
	Bibliografia.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Princípio de efeito térmico de sensor termopar[9]	5
Figura 2: Exemplo de sensor térmico utilizando MOSFETS [11].....	6
Figura 3: Um termistor fabricado numa SOI wafer[13].....	8
Figura 4: Sensor fabricado num substrato PDMS [13].....	8
Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de leitura de sensores resistivos que realiza conversão para frequência [14]	10
Figura 6: Diagrama de blocos de sistema de aquisição com autocalibração[15].....	11
Figura 7: Circuito de interrogação de resistência, com um gerador programavel de tensão [15]	12
Figura 8: Processo de impressão por screen printing [2]	13
Figura 9: Matriz de 12 sensores de temperatura impressos por screen printing [1].....	13
Figura 10: Inkjet printing em modo contínuo [19].....	15
Figura 11: Inkjet printing por DOD térmico [19]	15
Figura 12: Inkjet printing por DOD piezoelétrico [19]	16
Figura 13: Nanopartículas de prata impressas em papel [3]	16
Figura 14: Fotografia de resistencias e condensadores obtidos por inkjet printing [3].....	17
Figura 15: Variação de resistencia com a temperatura de prata impressa em papel [3]	17
Figura 16: Ilustração de sistema de revestimento utilizando spray [20]	18
Figura 17: Tela e sistema de screen printing manual utilizados para a realização da matriz...	22
Figura 18: Impressão de tinta de prata num substrato flexivel, utilizando screen printing.....	23
Figura 19: Deposição da pasta termoelétrica por spray printing.....	24
Figura 20: Matriz de 4x4 sensores termoresistivos	25
Figura 21: Circuitos em tinta de prata impressos por screen printing.....	26
Figura 22: Flexibilidade apesentada pela matriz de sensores térmicos produzida por tecnologia de impressão	27
Figura 23: Diagrama de blocos do sistema de leitura de sensores térmicos impressos	31
Figura 24: Esquemático do sistema de leitura de sensores térmicos impressos.....	33
Figura 25: Método de medição da resistência do sensor.....	35
Figura 26: Desenho do circuito de leitura de matrizes de sensores térmicos em PCB	36

Figura 27: PCB do sistema de aquisição em 3D	37
Figura 28: LINKAM THMS 600 [24].....	38
Figura 29: Variação entre 30 e 50°C medido pelo sistema de leitura de sensores térmicos impressos.....	39
Figura 30: Variação entre 30 e 50°C medido pelo multímetro comercial.....	39
Figura 31: Variação entre 35 e 45°C medido pelo sistema de leitura de sensores térmicos impressos.....	41
Figura 32: Variação entre 35 e 45°C medido pelo multímetro comercial.....	41
Figura 33: Fluxograma representativo da função principal do Firmware do MCU.....	49
Figura 34: Fluxograma da função de selecção de resistência.....	50
Figura 35: Ambiente gráfico da plataforma de testes	57
Figura 36: Fluxograma representativo do algoritmo do software da plataforma de testes	58
Figura 37: Plataforma de testes recebendo dados obtidos de uma matriz de 2x2.....	60
Figura 38: Plataforma de testes recebendo dados obtidos de um array de 2 posições.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADC	Analog-to-digital converter
ASF	Atmel Softwares Framework
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DAC	Digital-to-analog converter
DC	Corrente Contínua (direct current)
DOD	Drop-on-demand
IA	Amplificador de Instrumentação
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconduter Field-Efect
MCU	Microcontrolador
MUX	Multiplexador
MWCNT	Nanotubos de carbono de parede múltipla
PCB	Printed board Circuit
PDMS	Polydimethylsiloxane
PEN	Polyethylene Naphtalate
PET	Polyethylene Terephtalate
RAM	Memória de Acesso Aleatório
SEBS	Estireno-Etileno-Butileno-Estireno
SOI	Silicon on Insulator
SPI	Serial Peripheral Interface
TC	Timers/Counters
UART	Hardware Serial Port

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se uma introdução ao tema do trabalho realizado no âmbito desta dissertação, apresentando-se de seguida os objetivos e motivação para a realização da mesma. No fim é exposta a organização e estrutura da dissertação.

1.1 Objetivos e Motivação

Dado o célere avanço tecnológico a nível da sensorização registado nas últimas décadas[1], que possibilitou a produção, a um baixo custo, de vários tipos de sensores com dimensões reduzidas e ótimas especificações de funcionamento[2], tornou-se exequível a inserção destes em dispositivos de utilização diária.

Também a descoberta de novos materiais com características inovadoras, tais como flexibilidade, transparência e baixa densidade possibilitou o desenvolvimento de diferentes sensores e abriu alas à sua utilização em áreas onde antes não seria possível. Estes diversos tipos de aplicações, requerem muitas das vezes, sistemas de aquisição que preencham exigências e apresentem propriedades diferentes das anteriores.

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento de um sistema capaz de monitorizar sensores e matrizes resistivas, focando-se especialmente nos sensores térmicos impressos, devendo-se este foco ao seu baixo custo, fácil obtenção e flexibilidade[2], [3].

O sistema desenvolvido deverá permitir medir as temperaturas presentes em cada um dos sensores das diferentes matrizes impressas ligadas a este. Para além disto, o sistema de leitura será também capaz de enviar os dados obtidos para um ambiente gráfico onde o utilizador os possa analisar com clareza.

Para sua realização foi tido em conta uma possível aplicação futura, que consiste na medição do perfil térmico do contato de uma prótese transfemural com o corpo humano, visando identificar irregularidades na prótese ou na sua utilização que causem temperaturas irregulares em certas zonas do contato que serão possivelmente um fator de desconforto para o paciente. Perante isto, a matriz de sensores a utilizar tem de ser obrigatoriamente muito flexível, suave e preferencialmente de baixo custo, já o sistema de aquisição associado deve ser leve e

de dimensões reduzidas, para que não se torne um constrangimento acrescido na utilização da prótese.

1.2 Organização e Estrutura da Dissertação

Capítulo 1 – Neste capítulo faz-se uma introdução ao tema do trabalho, apresentando-se de seguida os objetivos e motivação para a realização da mesma. No fim é exposta a organização e estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Com este capítulo pretende-se rever o estado da arte no tema da dissertação. Inicia-se pelos diferentes tipos de sensores térmicos e explicando o seu princípio de funcionamento. Seguidamente apresentam-se vários sistemas de aquisição para sensores, e matrizes de sensores térmicos resistivos. Por último explicam-se as principais técnicas de impressão de dispositivos eletrónicos.

Capítulo 3 - Neste capítulo descreve-se o processo de realização de uma matriz de sensores térmicos impressa, e conseqüente análise das propriedades físicas e elétricas desta.

Capítulo 4 - Durante este capítulo explica-se o desenvolvimento e montagem do sistema eletrónico para leitura de sensores e matrizes termoresistivos, apresentando o respetivo esquemático. Depois faz-se um estudo do seu funcionamento, observando a sua precisão e alcance.

Capítulo 5 - Aqui é descrita a implementação do *firmware* do microcontrolador (MCU), responsável por controlar todo o sistema eletrónico. Os principais algoritmos são ilustrados em fluxogramas simplificados, e seguidamente esclarecidos. Finalmente, analisa-se com algum detalhe o seu funcionamento.

Capítulo 6 – Neste capítulo expõe-se o desenvolvimento de uma aplicação com ambiente gráfico, que corre no computador, recebendo e imprimindo os dados obtidos pelo sistema de leitura. O seu algoritmo é apresentado em fluxogramas e são exibidas imagens do seu funcionamento em vários casos.

Capítulo 7 – Durante este capítulo é apresentado uma conclusão geral com base naquilo que foi realizado e analisado durante esta dissertação e são propostas algumas ações de aperfeiçoamento que poderiam ser realizadas como trabalho futuro.

2. ESTADO DA ARTE

Com este capítulo pretende-se rever o estado da arte no tema desta dissertação. Inicia-se pelos diferentes tipos de sensores térmicos e explicando o seu princípio de funcionamento. Seguidamente apresentam-se vários sistemas de aquisição para sensores, e *arrays* de sensores térmicos resistivos. Por último explicam-se as principais técnicas de impressão de dispositivos eletrónicos.

2.1 Sensores Térmicos

Partindo do princípio que é necessária a utilização de sensores térmicos com as características previstas, flexibilidade e baixo custo, é essencial analisar os sensores já existentes bem como os princípios físicos nos quais estes se baseiam.

- **Termoresistências:**

Uma das formas mais utilizadas para a medição de temperaturas é através das termoresistências. Estes dispositivos são compostos por materiais termo-sensíveis, cuja resistência se altera abruptamente quando a temperatura ultrapassa o chamado ponto de Curie [4]. Estes materiais podem ser PTC ou NTC consoante a sua resistência varie positivamente ou negativamente com o aumento da temperatura [5].

A importância desta tecnologia baseia-se na alta condutividade térmica e de fácil encapsulamento desses materiais [5].

Quando a temperatura é superior à temperatura de Curie de um material PTC, a sua resistividade sobe exponencialmente, e pode ser representada pela Equação 1.

$$\rho_{PTC} = 10^{BT+\beta} \quad (1)$$

Onde B é o gradiente da relação resistividade-temperatura, β está relacionado com as propriedades do material PTC e T é a temperatura em graus Celsius [6].

Por isso, a resistência do material PTC pode ser expresso como descrito na Equação 2.

$$R_{PTC} = \rho_{PTC} \cdot \frac{L}{A} = 10^{BT+\beta} \cdot \frac{L}{A} = 10^{BT+\beta+\log\frac{L}{A}} \quad (2)$$

Este tipo de sensores é bastante utilizado na indústria, devido à sua não vibração ou corrosão, boa permutabilidade e estabilidade, sendo o mais comum, dentro deste tipo de sensores, o PT100. Este sensor, composto por platina, tem a particularidade de o valor da sua resistência ser aproximadamente 100Ω à temperatura de 0°C [7].

Quando a exatidão da medida não é muito elevada a resistência deste sensor em função da temperatura é dada pela Equação 3.

$$R_{PT100} = R_0(1 + \alpha T) \quad (3)$$

$$\alpha=3.92\text{E-}3, R_0=100\Omega \text{ [7]}$$

Os sensores baseados em Termoresistências são geralmente usados para medição de temperaturas baixo-médio, tendo nessa janela vantagem sobre os do tipo Termopar visto que a queda de tenção nas termoresistências é muito superior à tensão de saída do termopar [7].

- **Termopares:**

Outro tipo de sensores térmicos muito utilizado em diversas áreas, tais como na indústria automóvel, fundições, aeronáutica, na aviação, entre outas [8].

O princípio de funcionamento deste sensor é baseado no efeito termoelétrico de dois metais diferentes, ao qual se dá o nome de efeito de *Seebeck*. Para a criação de um potencial térmico é necessário, para além deste ser composto por dois

metais diferentes, que os dois terminais do termopar estejam a temperaturas diferentes [8].

Conectando dois condutores diferentes, A e B, num circuito fechado e colocando os dois nós a temperaturas diferentes, T_0 e T_1 , gera-se um potencial elétrico também em circuito fechado, ao qual se dá o nome de força eletromotriz térmica [9].

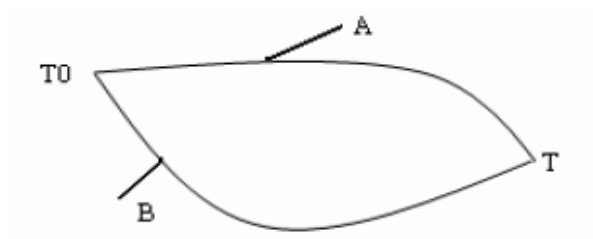


Figura 1: Princípio de efeito térmico de sensor termopar [9]

Ao contato com temperatura constante dá-se o nome de ponto de referência (*cold end*) e ao contato que é colocado na zona cuja temperatura se pretende medir é chama-se ponto de medição de temperatura (*hot end*) [9].

A força eletromotriz térmica final $E(T,0)$ pode ser calculada pela soma da força eletromotriz na saída do termopar $E(T,T_0)$, na qual T_0 é a temperatura do ponto de referência, com a força eletromotriz térmica de compensação $E(T_0,0)$ [8], o que é ilustrado pela Equação 4.

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0) \quad (2)$$

O sensor do tipo termopar pode ser usado para medir temperaturas entre -250°C e 2000°C [9], usando o de tipo K para medição desde a temperatura inferior até cerca de 1200°C e os de tipo B para as mais elevadas [10]. Para além da sua alargada gama dinâmica estes dispositivos são também de fácil produção e apresentam uma estrutura simples [9]. Contudo, a sua não linearidade, a necessidade de compensar a junção de referência (*cold junction*) e a relativamente lenta velocidade de resposta são alguns pontos negativos característicos deste tipo de sensores [8].

- **Sensores de temperatura em *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS):**

Os sensores de temperatura integrados baseados em transístores têm vindo a ser estudados durante as últimas três décadas. Tem sido realizada uma extensa investigação acerca de sensores de temperatura baseados em metal-oxide-semiconductor field-effect (MOSFET) que geralmente são sujeitos a uma corrente constante e a variação de temperatura altera a tensão de gate-source (V_{GS}) [11].

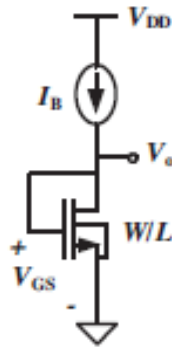


Figura 2: Exemplo de sensor térmico utilizando MOSFETS [11]

O MOSFET na figura 2 pode ser modelado pela Equação 5:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (5)$$

Onde I_D é a corrente no drain, V_{GS} é diferença de potencial entre a gate e a source, W e L são as dimensões do canal, V_{TH} é a tensão de *threshold*, μ é a mobilidade dos transportadores e C_{OX} é a capacidade da gate por área. É sabido que os valores tanto de μ como de V_{TH} variam com a temperatura [11] de acordo com a Equação 6 e Equação 7, nas quais T é a temperatura absoluta e T_0 é a temperatura de referência em Kelvin, α é uma constante entre -1.5 e -2, μ_0 é a mobilidade dos portadores à temperatura T_0 e β é um coeficiente de temperatura

negativo. Sabendo que β e α são valores negativos, então μ e V_{TH} diminuem com a temperatura [11].

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^\alpha \quad (6)$$

$$V_{TH}(T) = V_{TH0} + \beta(T - T_0) \quad (7)$$

Já foram também realizados alguns sensores mais complexos baseados na mesma tecnologia, tais como time-to-digital-converter, ou osciladores em anel (*ring-oscillator*) [12].

Em suma, este tipo de sensores, para além de uma possível boa linearidade e realização em dimensões bastante reduzidas (tecnologia de 0,35 μ CMOS) conta também com a possibilidade de ajuste da sua sensibilidade alterando as suas dimensões e corrente de *bias*. No entanto, estes sensores são bastante sensíveis a variações de corrente de *bias*, e por isso é necessária a existência de uma fonte com elevada estabilidade [11], [12].

2.1.1 Sensores térmicos Flexíveis

A necessidade de expandir a monitorização térmica para meios com características específicas que impeçam a utilização de sensores rígidos motivou o esforço para o desenvolvimento de sensores flexíveis. Como resultado deste esforço surgiram vários tipos de alternativas, entre elas, várias tecnologias de impressão em substratos Polyethylene Naphtalate (PEN), Polyethylene Terephtalate (PET) [1] ou mesmo papel [3] e ainda os fabricados em silício utilizando substratos em filmes finos como *Silicon on Insulator (SOI)* e polydimethylsiloxane (PDMS) [13].

- **Sensores fabricados em filmes finos:**

Estes sensores são desenvolvidos utilizando as técnicas comuns de fabrico de dispositivos em silício, tais como, *sputter deposition*, processo de *lift-off* e

reactive ion etching [13]. As imagens apresentadas na Figura 3 ilustram um termistor fabricado numa *SOI wafer*.

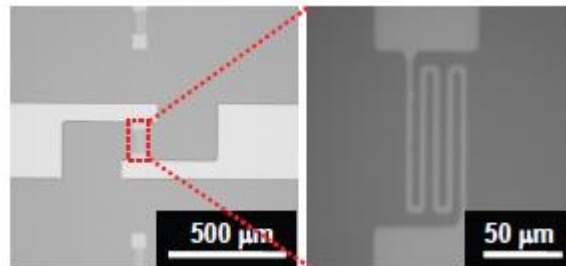


Figura 3: Um termistor fabricado numa *SOI wafer*[13]

Sabe-se que sensores térmicos como o representado na Figura 4, fabricados num substrato de PDMS, podem ser dobrados, até ao seu limite definido (usualmente 30%), inúmeras vezes sem sofrer danos ou alterar a sua relação linear entre resistência e temperatura [13]. Isto acontece porque a força aplicada é acomodada pela alteração da amplitude e comprimento de onda. Contudo, este tipo de sistema apresenta uma possibilidade de deformação limitada, esticado ou comprimido até 30%, a qual, quando ultrapassada, arruína o funcionamento do sensor [13].

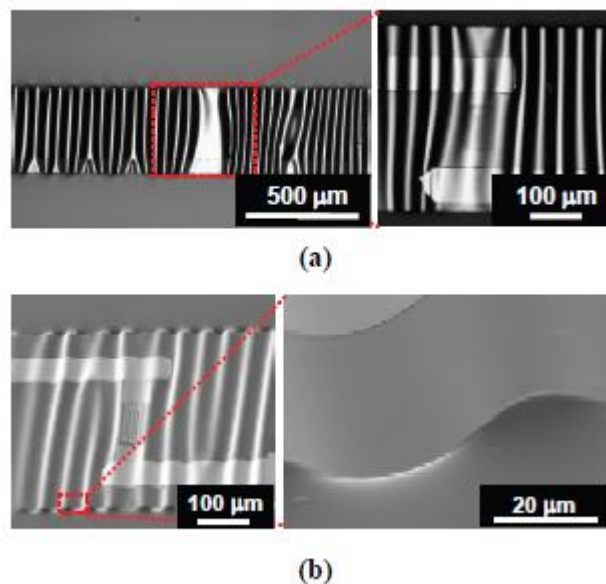


Figura 4: Sensor fabricado num substrato PDMS [13]

2.2 Sistemas de leitura de sensores de temperatura resistivos

O desenvolvimento do circuito eletrônico, para leitura de sensores resistivos, com baixo ruído, banda dinâmica elevada e alta sensibilidade é um processo complicado e desafiante [14].

É também sabido que a exatidão do sistema tem como custo uma calibração bastante sofisticada que se reflete no aumento da área do circuito e do seu custo de realização [14].

Existem várias tecnologias que permitem a aquisição de dados de sensores resistivos, entre elas, vários tipos de conversores de valores de resistência para frequência ou para intervalos de tempo e circuitos com autocalibração recorrendo à utilização de MCU [15].

- **Sistemas com conversão de resistência para frequência:**

A medição de frequência e tempo poder ser eficientemente implementada utilizando um sistema de contagem. Desta forma, um conversor de resistência para período torna-se uma boa escolha para o condicionamento de sinal na interface de sensores resistivos [16].

A Figura 5 representa um diagrama de blocos de um sistema de leitura de sensores resistivos que realiza a conversão para frequência.

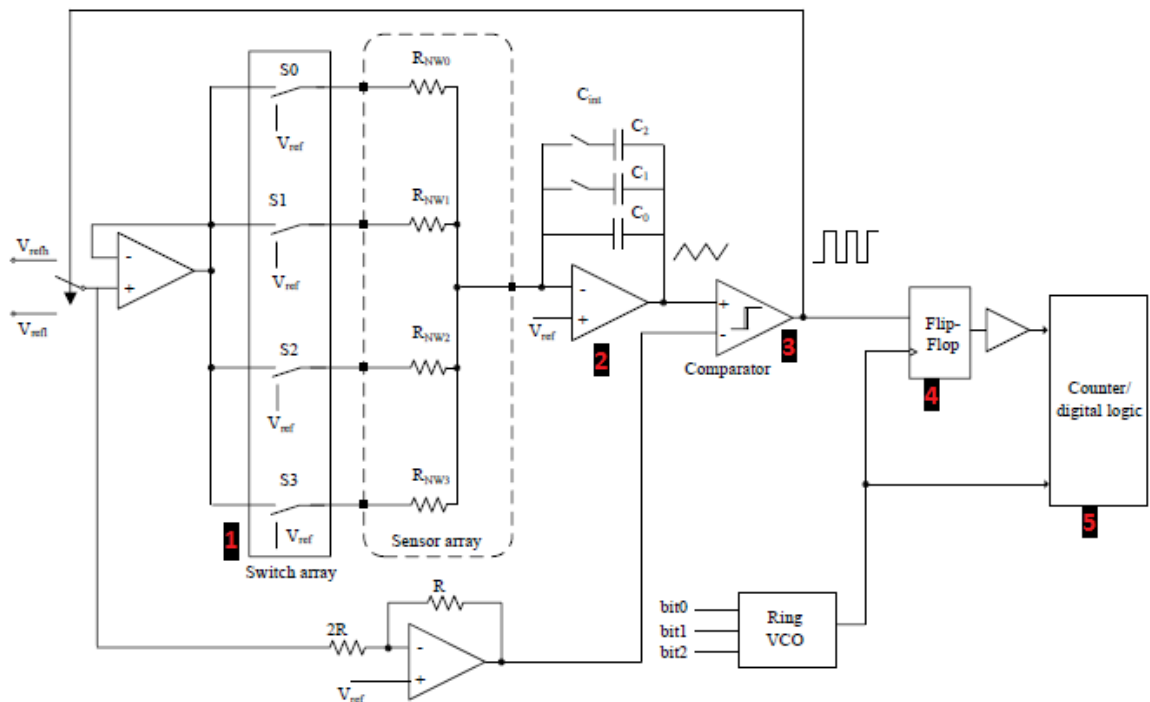


Figura 5: Diagrama de blocos de sistema de leitura de sensores resistivos que realiza conversão para frequência [14]

Este sistema é composto por um seletor de sensores (1), um amplificador de integração programável (2), um comparador com histerese (3), um *flipflop* (4) cujo *clock* é controlado por um oscilador de tipo anel de três bits digitalmente controlado e um contador (5) que lê as alterações de período que corresponde a alterações de impedância nos sensores [14].

Neste caso, é necessário que o dimensionamento dos *ampops* tenha em vista a diminuição do *offset* e da corrente na gate.

Pode também dizer-se que o tempo de atraso do sinal poderá ser ignorado se este for muito inferior ao período [14].

Os sistemas de leitura de sensores resistivos que utilizam este tipo de tecnologia apresentam uma arquitetura simples, baixo custo e a frequência de saída do sistema não afeta os sensores devido ao uso do amplificador de integração programável, no entanto, estes sistemas são normalmente pouco lineares [16].

- **Sistemas com autocalibração que recorrem à utilização de microcontroladores:**

No caso de aquisição de dados em *arrays* de sensores, onde estes podem estar pouco especificados, é necessária a utilização de um sistema que seja capaz de se autocalibrar. O sistema de aquisição interage continuamente com o ambiente e o *software* embebido lê os valores dos sensores e controla os circuitos de forma sincronizada.

A Figura 6 representa o diagrama de blocos de um sistema de aquisição deste tipo.

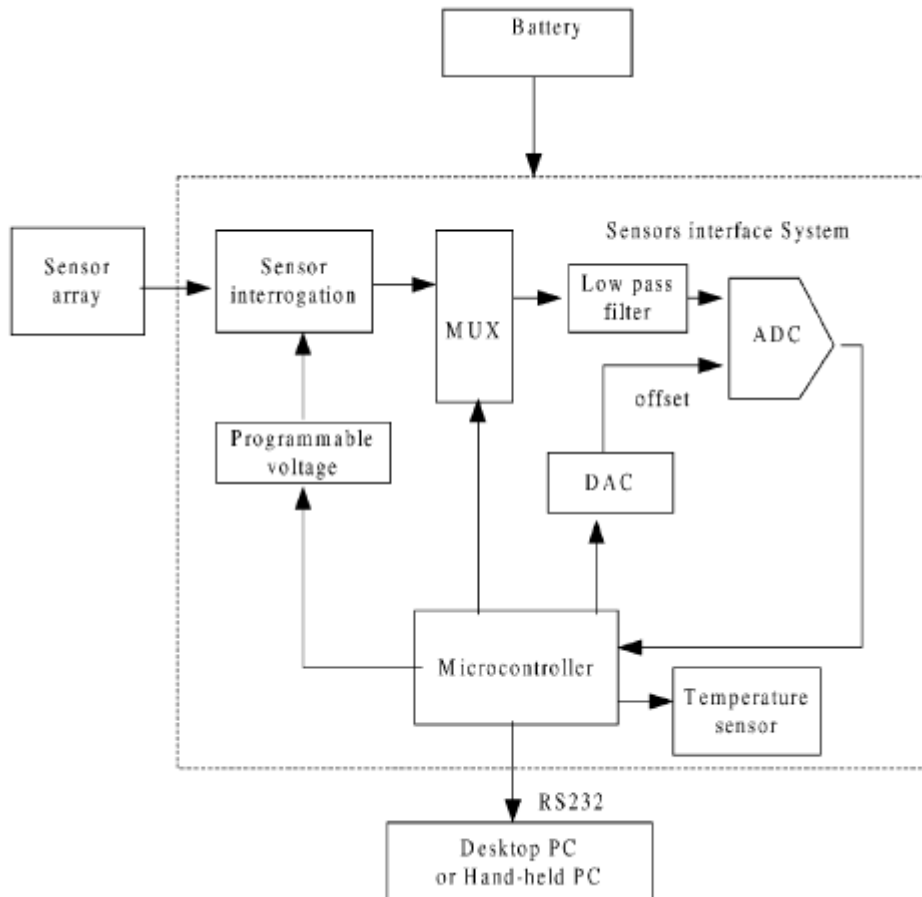


Figura 6: Diagrama de blocos de sistema de aquisição com autocalibração[15]

O sistema de interrogação dos sensores é capaz de medir grandes variações de resistência, alimentando-os com tensões variáveis obtidas através do bloco de tensão programada [15]. O circuito de interrogação de resistência é ilustrado na Figura 7.

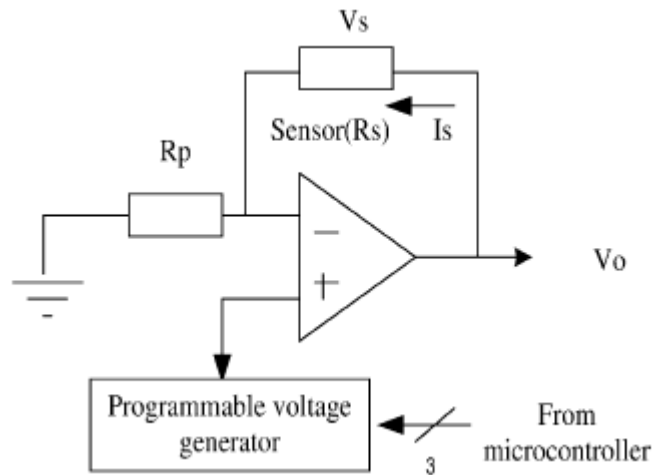


Figura 7: Circuito de interrogação de resistência, com um gerador programavel de tensão [15]

Cada um dos sensores produz uma tensão DC quando interrogados que é enviada para o sistema de autocalibração (MCU) e para um filtro passa baixo para eliminar o ruído indesejado. Os dados destes são guardados na memória de acesso aleatório (RAM) do MCU para ser utilizada numa calibração e compensação de não linearidade posterior.

Devido às suas características, este tipo de sistema pode ainda ser energeticamente eficiente, utilizando as potencialidades do MCU que permitem colocar o sistema eletrónico em modo “*sleep*” e apenas o ativar quando necessário, podendo também se fazer deste um sistema portátil [15].

2.3 Tecnologias de impressão de dispositivos eletrónicos

2.3.1 Screen Printing

Recorrendo a técnica de Screen Printing é possível fabricar sensores térmicos, em substratos flexíveis, tais como, PEN ou PET [1] ou mesmo elásticos como é o caso da borracha. Nestes substratos podem ser impressas pastas PTC ou NTC as quais podem ser utilizadas como simples sensores resistivos ou integradas em pontes de Wheatstone para alcançar uma sensibilidade superior, juntamente com uma cama de metal condutor,

por exemplo, ouro [1]. Na sua impressão deverá também ser impressa uma camada hidrofóbica para proteger o sensor da humidade e garantir uma maior estabilidade e fiabilidade deste.

Para realização deste tipo de impressão é necessária a utilização de uma tela, um rodo e uma mesa de apoio. A pasta a depositar é espalhada, numa camada fina, pela tela que apresenta a geometria a imprimir. Tendo em consideração a geometria da tela, a pasta apenas se deposita nos espaços pretendidos do substrato. Por fim, o substrato com o material depositado passa por um processo de cura térmica, que garante a adesão deste.

O processo de impressão por *screen printing*, pode ser visualizado na Figura 8.

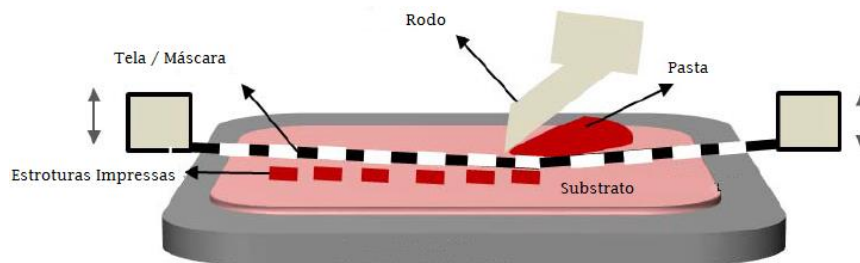


Figura 8: Processo de impressão por *screen printing* [2]

Na Figura 9, pode observar-se uma matriz de 12 sensores de temperatura, obtidos por tecnologia *screen printing*.

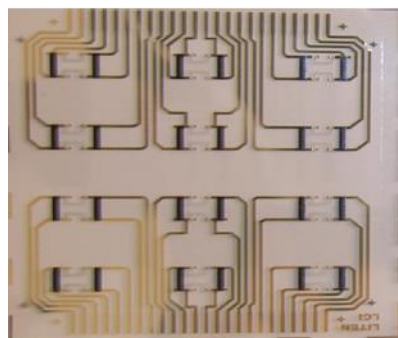


Figura 9: Matriz de 12 sensores de temperatura impressos por *screen printing* [1]

Assim, utilizando estas técnicas de impressão, podem realizar-se sensores ou matrizes de sensores térmicos, com uma larga área de aplicações, sabendo que estes

podem ser impressos em substratos flexíveis, de baixo custo e com uma boa reprodutibilidade, processo de impressão com temperaturas entre 100 °C e 130 °C, onde é possível alcançar uma sensibilidade de 0.06V/°C para uma tensão de entrada de 4.8V. Podendo estes medir temperaturas entre os 20°C até 80°C para esta tensão de entrada então, serão capazes de se integrar em várias aplicações como medir temperaturas ambientais ou fazer mapeamentos de temperatura em sistemas industriais [1].

2.3.2 Inkjet Printing

A tecnologia de *Inkjet Printing* é um método popular na impressão industrial convencional devido à sua injeção sem contato, ao inferior consumo de material a depositar e fácil repetibilidade e alteração de escala [17]. Outras características, como uma boa impressão fotográfica adquirível por preços razoáveis, tornou este tipo de impressoras num produto presente no dia-a-dia [18].

Conjuntamente, o avanço tecnológico permitiu uma melhoria na resolução e velocidade de impressão e suscitou o interesse da indústria da eletrónica a utilizar esta tecnologia para fabricar dispositivos, tais como, díodos orgânicos de emissão de luz, filtros de cor para ecrãs de cristais líquidos e até transístores orgânicos com excelentes propriedades elétricas [18]. Este processo inclui ainda as vantagens de apresentar baixo custo, poder imprimir em substratos flexíveis, tais como, papel ou polímeros flexíveis [3] e são uma das técnicas mais promissoras para a realização de dispositivos eletrónicos que abrangem áreas elevadas [17].

Existem vários métodos para realização de impressão por *inkjet printing*, sendo o modo contínuo, o *drop-on-demand* (DOD) térmico e o DOD piezoelétrico os mais relevantes.

No modo contínuo, apresentado pela Figura 10, a tinta é bombeada através de um bico de impressão de modo a obter um jato líquido. Gotas com a mesma dimensão e uniformemente espaçadas são obtidas através de uma perturbação periódica do jato. Este método é utilizado quando a velocidade de impressão é essencial [19].

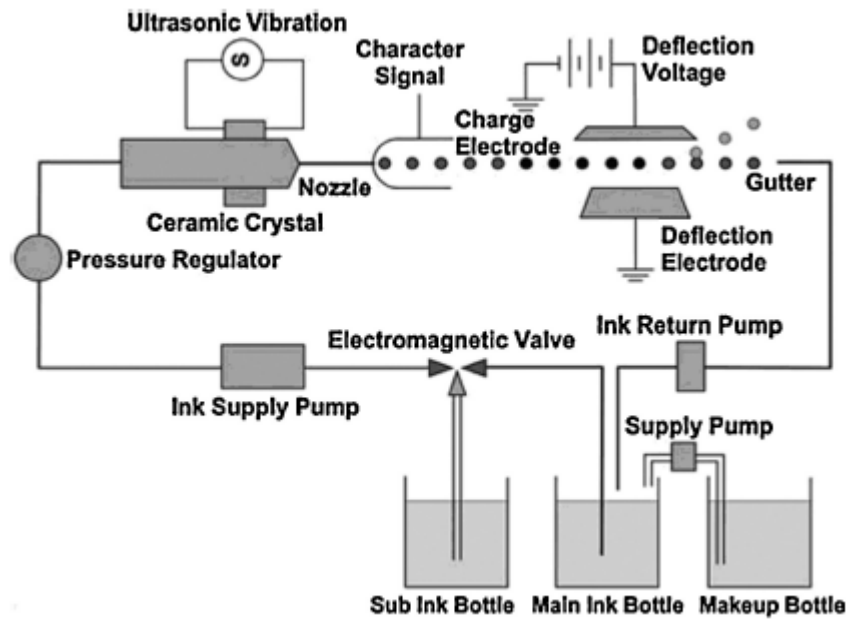


Figura 10: Inkjet printing em modo contínuo [19]

Os métodos DOD oferecem tamanhos inferiores das gotas, maior resolução e menos restrições nas propriedades da tinta. Neste método, um pulso de calor ou piezoelétrico é gerado ejetando gotas de tinta do reservatório através do bico de impressão.

No DOD térmico, Figura 11, uma resistência de aquecimento é aplicada para aumentar a temperatura da tinta, provocando uma bolha de vapor que força a saída de uma gota de tinta. Contudo, este método é restrito a sistemas aquosos [19].

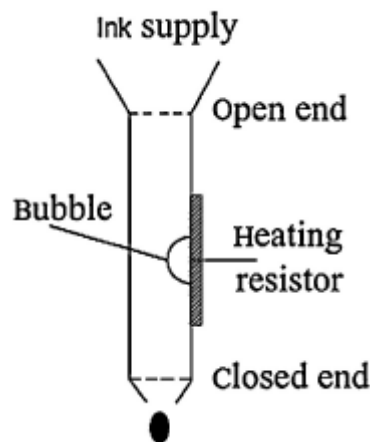


Figura 11: Inkjet printing por DOD térmico [19]

O método que utiliza a piezoelectricidade, Figura 12, assenta na deformação de uma membrana piezoelétrica para geração de um pulso acústico. Não recorrendo à variação de temperatura, este método é compatível com uma vasta gama de solventes [19].

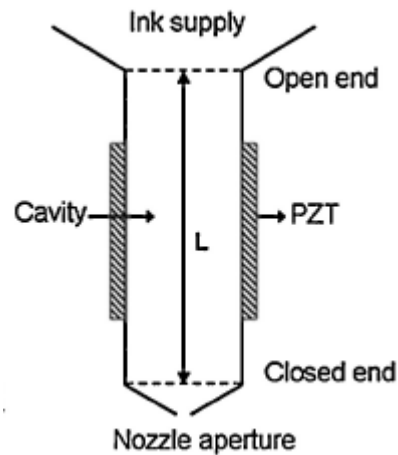


Figura 12: Inkjet printing por DOD piezoelétrico [19]

Alguns trabalhos a nível sensorial já foram desenvolvidos com esta tecnologia, por exemplo, foi desenvolvido por inkjet printing, com base em tinta de partículas de prata num substrato de papel um sensor térmico resistivo e um sensor capacitivo de humidade, ilustrados pela Figura 14, tendo a prata apresentado uma boa adesão ao papel [3], como se pode verificar na Figura 13.

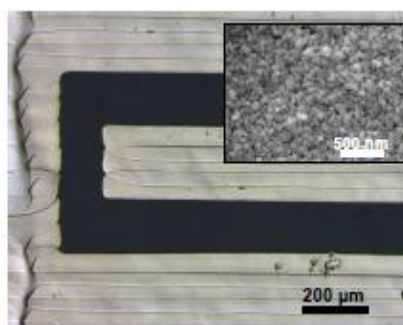


Figura 13: Nanopartículas de prata impressas em papel [3]

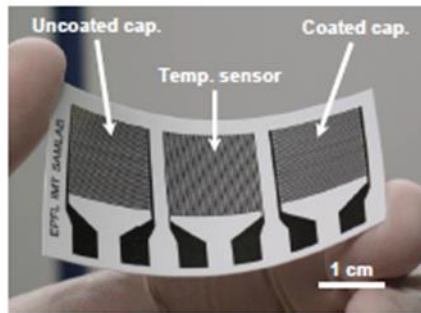


Figura 14: Fotografia de resistências e condensadores obtidos por inkjet printing [3]

No gráfico da Figura 15 é apresentada a variação de resistência do sensor com a variação de temperatura com dois diferentes graus de humidade. Para um valor de humidade baixo verifica-se que o sensor apresenta um comportamento razoavelmente linear entre os -20°C e os 60°C . No entanto, é também visível um comportamento bastante irregular e imprevisível para valores humidade elevados [3].

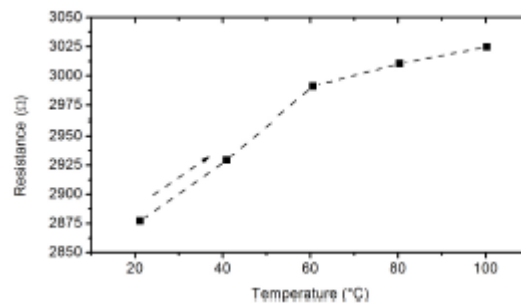


Figura 15: Variação de resistência com a temperatura de prata impressa em papel [3]

2.3.3 Spray Printing

A tecnologia de *Spray printing* é utilizada numa larga gama de aplicações como no revestimento de superfícies e humidificação [20].

A Figura 16 ilustra uma técnica de impressão de Spray, na qual é depositado um material sobre um determinado substrato. O material a depositar é pulverizado no substrato com o auxílio de um gaz pressurizado. O substrato é colocado a alguma distância do bico de pulverização, normalmente entre os 8 e os 20 centímetros, para que o material se deposite de forma homogénea [18], [20], [21].

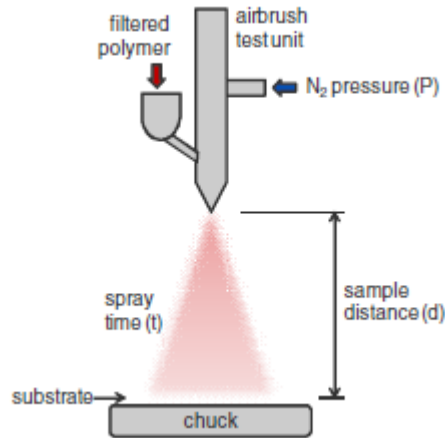


Figura 16: Ilustração de sistema de revestimento utilizando spray [20]

Cada área de aplicação requer um bico de pulverização diferente de modo a preencher os requisitos necessários para obter os resultados esperados. É também necessário ajustar a pressão do gás cujo valor regula a viscosidade máxima, do material a depositar, suportada pelo sistema, a distância para o substrato, cujo ajuste resulta numa deposição húmida ou seca e mais ou menos homogênea, ou seja, quanto menor a distância menor será a homogeneidade e maior será a humidade do material depositado e quanto maior esta distância maior será a homogeneidade e a deposição será mais seca, visto que, o solvente evapora antes do material chegar ao substrato, a taxa de pulverização de material e o tempo de pulverização que vão interferir na espessura da deposição [20].

Esta tecnologia é essencialmente benéfica por apresentar um custo baixo de fabrico de largas áreas de eletrónica orgânica. Para além disso, é um processo de fabrico simples e rápido, compatível com a utilização de substratos flexíveis, que permite um fácil ajuste da espessura das camadas depositadas e, ao contrário de outras tecnologias de impressão como inkjet printing, esta consegue utilizar materiais com viscosidade elevada, e fá-lo alterando a pressão de N_2 [17], [18], [20].

No entanto, este processo apresenta algumas desvantagens importantes, entre elas, um baixo nível de homogeneidade, uma baixa resolução e uma rugosidade superficial extremamente elevada na camada depositada [20].

2.4 Análise comparativa entre os diferentes tipos de sensores térmicos existentes:

Depois de expostos os vários tipos de sensores térmicos atualmente existentes realiza-se uma análise comparativa entre estes, visando a escolha do mais apropriado para a utilização na prótese transfemural.

Os critérios de seleção para esta aplicação foram o custo do sensor, a sua linearidade, a dificuldade de obtenção destes e ainda a flexibilidade necessária para medir as temperaturas na zona de contato entre a prótese e o corpo humano. A gama de funcionamento não foi considerada para esta análise, visto que a janela de medição não apresentará variações superiores a 20°C a temperaturas normalmente entre os 30°C e os 50°C. Esta análise comparativa é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Análise comparativa entre diferentes tipos de sensores de temperatura

Tipo de sensor	Custo	Linearidade	Obtenção	Flexibilidade
Metálicos	Médio	Boa	Complexa	Sim
Termopares	Médio	Fraca	Complexa	Não
CMOS	Baixo	Boa	Muito complexa	Não
Poliméricos impressos	Baixo	Boa	Simple	Sim

Com base na análise realizada, deduz-se que os sensores de temperatura em polímeros obtidos através de tecnologias de impressão são os mais indicados para medição do perfil térmico na prótese transfemural, sendo estes de baixo custo, apresentando boa linearidade, sendo de simples obtenção e fisicamente, para além de serem leves, apresentam um elevado nível de flexibilidade.

3. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR EM TECNOLOGIA IMPRESSA

Neste capítulo descreve-se o processo de realização de uma matriz de sensores térmicos impressa, e consequente análise das propriedades físicas e elétricas desta.

3.1 Introdução

Como resultado de uma elevada aposta na investigação de materiais, apoiada por uma tecnologia extremamente desenvolvida que fornece as mais variadas ferramentas, para o auxílio dessa investigação, surgem materiais com características inovadoras. Esses materiais apresentam propriedades diversificadas tais como, flexibilidade, baixa densidade e transparência associados a um baixo custo de obtenção e replicação.

Assim, o aparecimento destes novos materiais deu origem a novas aplicações que apresentavam requisitos preenchidos apenas pelas características dos novos materiais. Também, o reduzido custo destes, influenciou a sua utilização em abundância, como é o caso dos vários sensores presentes nos objetos pessoais, tais como *smartphones*, *tablets*, carros e etc.

Outra variante da sua utilização é o uso de vários sensores em conjunto, ligados em *array* ou matriz, como é o caso das telas *touch screen* capacitivas.

Com base nesta informação, resolveu-se criar uma matriz de sensores térmicos, obtida através de tecnologia de impressão. Com esta matriz será possível medir as temperaturas nos diferentes pontos desta, obter o perfil térmico de uma zona, comparar diferenças entre zonas e ainda identificar transferências térmicas entre pontos.

Uma utilização mais específica para esta matriz, seria a sua utilização numa prótese transfemural, para medição das temperaturas na zona de contato desta com o corpo humano. Esta ação possibilitaria encontrar zonas com temperaturas irregulares, que poderiam resultar de imperfeições na prótese, e proporcionariam o desconforto do utilizador.

3.2 Processo de desenvolvimento

Com o objetivo da realização da matriz de sensores térmicos impressos, começou-se pela impressão das pistas do circuito que permitirão ler os sinais elétricos dos sensores e dos interdigitados que futuramente iriam resultar nos sensores pretendidos.

Para isso, recorreu-se ao método de impressão em *screen printing*, a qual consiste em vaziar uma tinta através de uma tela, com o desenho pretendido, com a ajuda de um rodo.

A tela utilizada no processo foi produzida pela Sefar, apresenta 62 fios por centímetro, uma abertura de 64 micrómetros, o material que a constitui é poliéster e a sua tensão no quadro é de 17 N. A tela foi aplicada num sistema manual de screen printing, com mesa de posicionamento de dois eixos. O tamanho máximo do quadro neste sistema de impressão é de 450 por 450 milímetros. A técnica referida é ilustrada pela Figura 17.

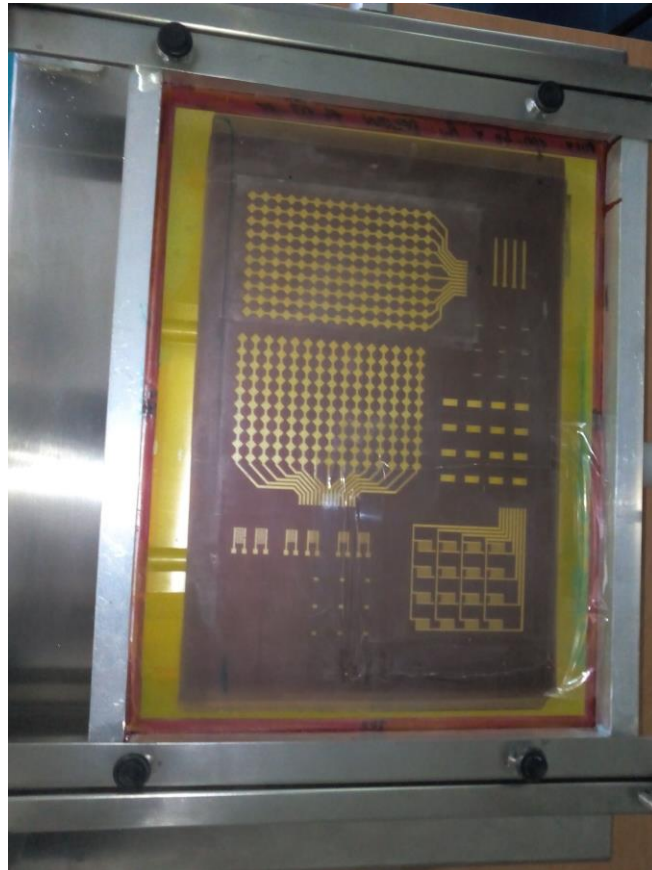


Figura 17: Tela e sistema de screen printing manual utilizados para a realização da matriz

O substrato usado para impressão do circuito foi o Melinex 505 - ST-MX505-0100, com uma espessura de 100 micrómetros [22]. A sua escolha deveu-se ao fato de este ser muito

flexível, ser transparente, ser fino e apresentar um tratamento nas duas superfícies para melhorar a adesão das tintas.

Por fim, a tinta utilizada para desenho das pistas e interdigitados foi tinta de nano partículas de prata HPS-021LV da Novacentrix, compatível com vidro, plástico e papel [23].

A fim de realizar a impressão do circuito, espalha-se a tinta de um dos lados da estrutura escolhida, e com a ajuda do rodo, espalha-se a tinta uniformemente pela tela perfurada. Pode visualizar-se o método na Figura 18.

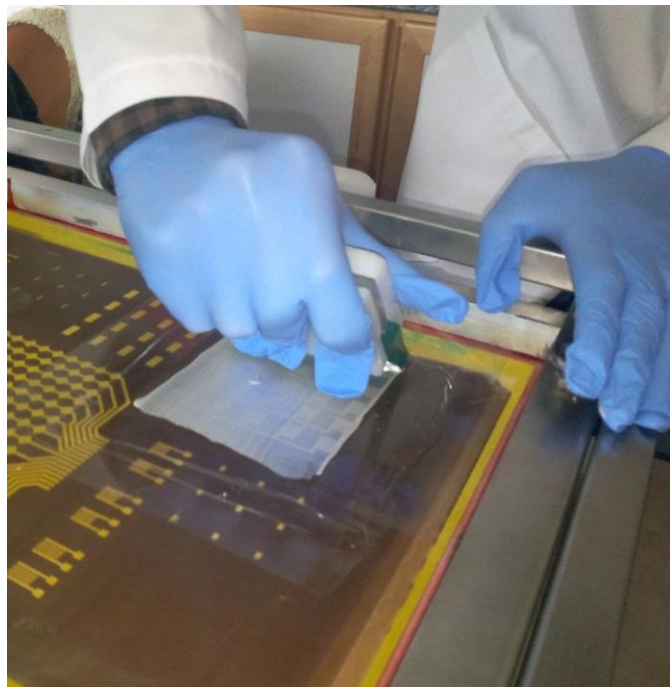


Figura 18: Impressão de tinta de prata num substrato flexível, utilizando screen printing

Ainda assim, alguns cuidados são necessários para que a impressão seja realizada devidamente. Em primeiro lugar, a tela não deverá apresentar sujidade, depois, é necessária muita atenção à quantidade de tinta utilizada, uma vez que, para além de representar desperdício monetário, isto pode danificar a impressão, criando curtos circuitos onde a distância entre pistas é reduzida. Por fim, o movimento efetuado para espalhar a tinta tem de ser realizado a uma velocidade aproximadamente constante para garantir a uniformidade da tinta depositada no substrato, este passo requer alguma experiência da parte do executante.

Finalmente, para conclusão da impressão do circuito, é necessário efetuar a cura térmica da impressão durante uma hora a 80°C para secagem e adesão da tinta. Depois desta secagem, é ainda necessário realizar algumas ligações manualmente, utilizando também tinta de prata.

Este procedimento deriva da existência de cruzamento de pistas no circuito, as quais não poderão ficar em curto-circuito.

Seguidamente, já depois das pistas e interdigitados impressos, processa-se a pasta a depositar nos interdigitados, para dar origem aos sensores térmicos.

Para a preparação de um nanocompósito termoelétrico de nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT)/ Estireno-etileno-butileno-estireno (SEBS), com uma razão de 1,5% em massa de MWCNT e com uma concentração de 12,4% de SEBS em tolueno. Essa dispersão das nanopátículas no solvente foi executada por um banho de ultrassons, utilizando o equipamento ATU ATM40-3LCD. Este banho teve a duração de 5 horas, operando em modo contínuo, renovando a água a cada 40 minutos, para manter a água entre os 17 e os 30°C. Finalmente, adicionou-se o polímero à solução, através de agitação magnética, até se obter uma dissolução total do polímero (3 horas aproximadamente).

De modo a se depositar a pasta termoelétrica anteriormente desenvolvida, recorreu-se ao método spray printing, que consiste em pulverizar um material para uma superfície, com o auxílio da utilização de gás comprimido. Para que isso se verifique, a viscosidade do material não deverá ultrapassar os valores suportados pela ferramenta utilizada. O método utilizado é ilustrado pela Figura 19.



Figura 19: Deposição da pasta termoelétrica por spray printing

Neste caso, sabendo-se que apenas se pretende depositar a pasta em locais específicos do substrato é necessária a utilização de uma máscara, recortada na zona dos interdigitados.

Por fim, a matriz é secada à temperatura ambiente (25°C) durante 24 horas, para obter a evaporação completa do solvente. Na Figura 20 apresenta-se a matriz de 4x4 sensores térmoresistivos obtidos.

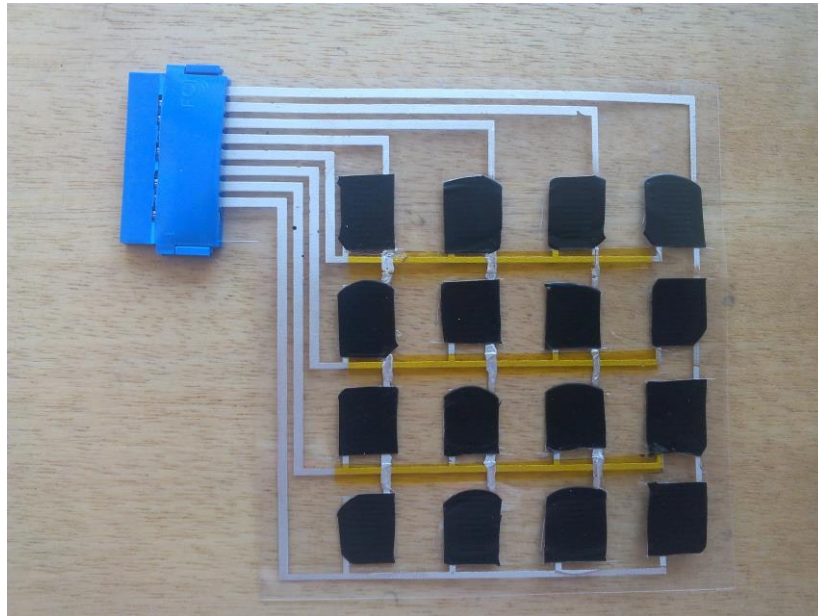


Figura 20: Matriz de 4x4 sensores termoresistivos

3.3 Resultados experimentais

Seguidamente à produção de uma matriz de 4x4 sensores térmicos resistivos, executa-se-lhe uma análise, observando-se as suas características físicas e medindo-se o seu desempenho elétrico.

Durante a sua produção, observou-se que facilmente bazavam excessivas quantidades de tinta de prata, curto-circuitando alguns interdigitados e algumas pistas. Essa falha levava à necessidade da impressão de novos circuitos ou, em casos menos graves, a remoção manual dos excessos. Na Figura 21 pode observar-se algumas impressões obtidas na impressão dos circuitos.



Figura 21: Circuitos em tinta de prata impressos por screen printing

Quanto às suas características físicas, estas matrizes apresentam vários pontos positivos. Por um lado, estas são bastante leves e finas. As matrizes apresentam também alguma transparência e mais importante de tudo, estas são bastante flexíveis, como se pode observar na Figura 22.



Figura 22: Flexibilidade apresentada pela matriz de sensores térmicos produzida por tecnologia de impressão

Já eletricamente, os sensores da matriz apresentam uma boa variação de resistência em resposta da variação da temperatura, como se pode verificar nos resultados experimentais do capítulo 4, aumentando a sua resistência quando a temperatura também é elevada. Porém, a variação da resistência apresentada pelos sensores tem tendência a descer à medida que as experiências vão sendo realizadas, o que dificulta a análise dos dados medidos nos sensores.

3.4 Conclusões

Seguindo os passos anteriormente apresentados, foi-se capaz de desenvolver, com sucesso, uma matriz de sensores térmicos impressos, neste caso, uma matriz de 4x4 sensores. Para a sua produção, recorreu-se a duas diferentes tecnologias de impressão, o *screen printing* e o *spray printing*.

Os sensores obtidos mostraram uma boa resposta à variação de temperatura.

Para além disso, as suas características físicas fazem destes sensores uma boa opção quando se pretende medir temperaturas por uma larga superfície, sabendo-se que, modificando a tela pode obter-se diferentes arquiteturas para a matriz de sensores, podendo alterar o número de sensores e a distância entre eles, de modo a adaptar a sua arquitetura à utilidade pretendida.

Além disso, estes são também uma opção viável quando se pretende aplicar os sensores a uma aplicação móvel, devido à sua estrutura fina e leve.

Por fim, recomenda-se também a utilização destes em superfícies não planas, atendendo à sua elevada flexibilidade.

Concluindo, obteve-se uma matriz de sensores térmicos impressos, funcional, cujas características lhe dão uma vasta gama de utilização, podendo ser empregue onde grandes partes dos sensores comerciais não preenchem os requisitos necessários.

4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE LEITURA DOS SENSORES DE TEMPERATURA IMPRESSOS

Durante este capítulo explica-se o desenvolvimento e montagem do sistema eletrônico para leitura de sensores e matrizes termoresistivos, apresentando o respetivo esquemático. Depois faz-se um estudo do seu funcionamento, observando a sua precisão e alcance.

4.1 Introdução

A descoberta de novos tipos de sensores que apresentam propriedades inovadoras, como é o caso dos sensores obtidos através de tecnologia de impressão, sendo estes dotados de flexibilidade e a sua produção ou obtenção é relativamente fácil, abre alas à expansão da sua utilização para diversas áreas, tais como, aplicação em superfícies não placas, ou que possam sofrer deformações, nas quais a monitorização de diversos dados passa a ser possível e plausível, considerando as novas características físicas e o baixo custo de obtenção, e, em certos casos, obter informação de elevada importância, como é o caso da medição do perfil térmico na prótese transfemural. Este alargamento da utilização de sensores cria a necessidade da criação de novos sistemas de leitura destes. Estes sistemas têm de garantir os requisitos para cada tipo de aplicação, que pode passar pela focagem na precisão, no aumento da gama de funcionamento ou na velocidade de resposta. Para além disso, os sistemas de aquisição têm de ser apropriados ao tipo de variação das propriedades elétricas de cada tipo de sensor, como é o caso da variação da resistência e da capacidade.

No caso dos sensores de temperatura, deve-se colocar um maior ênfase no aprimoramento da sensibilidade e na maximização da gama de funcionamento, aproveitando o facto de ser desnecessária uma alta frequência de aquisição de dados.

Assim, na escolha de componentes para a realização deste projeto, optou-se por seleccionar os de resistência e erro inferior, pois influenciariam negativamente a sensibilidade e resolução do sistema e deu-se menor ênfase à sua frequência máxima de funcionamento, atendendo às diferenças do valor de resistência apresentadas pelos diferentes sensores impressos.

4.2 Processo de desenvolvimento

Tem-se neste trabalho, como objetivo principal, a idealização e desenvolvimento de um sistema de leitura de sensores resistivos, direcionado mais especificamente para a utilização em sensores de temperatura obtidos através de tecnologias de impressão.

Esse dispositivo tem de ser capaz de obter dados de diferentes sensores, com diversos valores de resistência e distintas gamas de variação. Tem também a aptidão para comunicar com um computador, enviando-lhe, em tempo real, os dados obtidos em cada leitura.

Para a realização de obtenção de dados, processamento e comunicação é necessária a utilização de um MCU, neste caso, um que permita comunicar via porta série, aceder a várias portas *Analog to digital converter* (ADC) e que garanta uma boa frequência de processamento. Perante isto, optou-se pelo MCU Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU (1) com uma arquitetura de 32 bits. Este dispositivo apresenta 54 pins de entrada e saída digital, 12 pins de entrada analógica com 12 bits de resolução, 2 pins *digital-to-analog converter* (DAC) e trabalha à frequência de 84MHz. Para além de todas estas características adequadas este MCU encontra-se integrado na placa de desenvolvimento Arduino Due, o que auxilia à elaboração deste projeto.

De modo a aumentar a resolução do sistema é necessária a amplificação do sinal, antes da sua leitura nos pinos de entrada analógica. Para isto, foi utilizado o amplificador de instrumentação de ganho programável, via *Serial Peripheral Interface* (SPI), LTC6915 (2), da LINEAR TECHNOLOGY, que apresenta 14 níveis de ganho programável. A possibilidade de alteração de ganho em tempo real, comandada pelo MCU, é uma grande benefício visto que deste modo pode-se obter a amplificação máxima apropriada e automaticamente adaptada ao valor de resistência do sensor.

Para possibilitar um alargamento do alcance do sistema, foi adicionado um banco de 8 resistências. A sua seleção era efetuada pelo multiplexador de 8x1, SN74LV4051A da Texas Instruments, componente da ponte adaptativa (3), com uma resistência máxima em ligação de 100Ω.

No caso da leitura de matrizes de sensores utilizam-se os dispositivos integrados *switch*, MAX4619 (4) produzidos pela Maxim Integrated. Cada um destes contém três *switches*, que possibilitam a ligação da entrada a uma de duas saídas distintas, ligando assim automaticamente à massa as linhas e as colunas da matriz não selecionadas. Um motivo importante na sua escolha foi a resistência em ligação de apenas 10Ω, visto que estes dispositivos são ligados aos sensores aos quais se aplica uma medição de resistência, assim quanto menor a resistência destes componentes menor será a tua interferência na leitura.

Finalmente, com o objetivo de regular e estabilizar a tensão do circuito para 5V DC, adicionou-se o regulador de tensão da Texas Instruments TPS73601 (5), o qual admite tensões de entrada entre os 1.7 e 5.5V e permite ajustar a tensão na saída com valores que pertençam ao intervalo de 1.2 até 5V. Este regulador admite uma corrente máxima de saída de 400mA.

O diagrama de blocos ilustrado pela Figura 23 explicita, de forma simplificada, o funcionamento do sistema de leitura de sensores e matrizes de sensores térmicos.

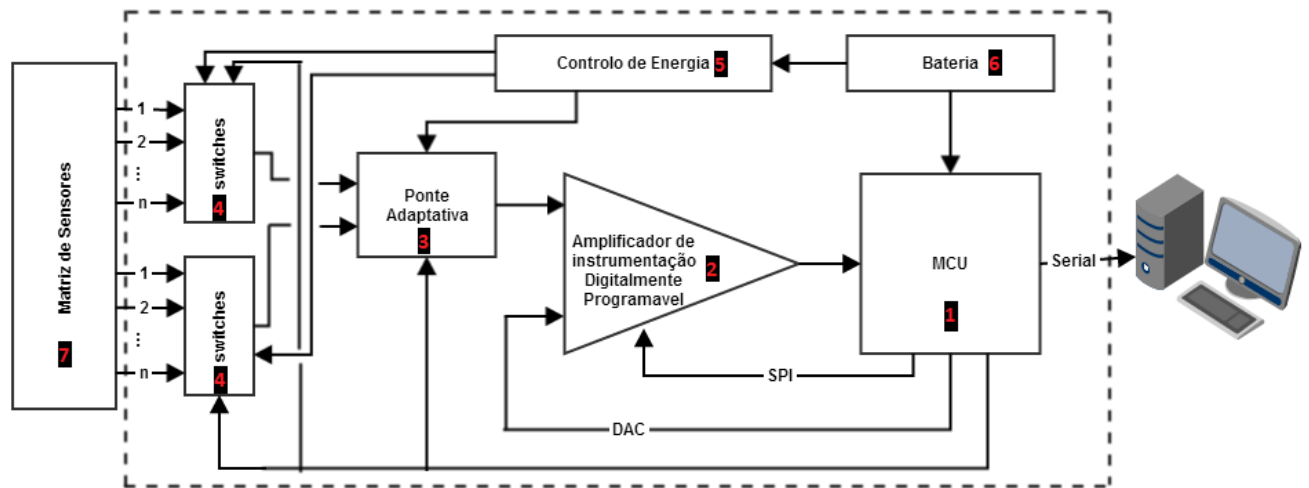


Figura 23: Diagrama de blocos do sistema de leitura de sensores térmicos impressos

Com facilidade, pode verificar-se que o MCU é o centro de todas as ações que se realizam no sistema. Este é responsável por controlar todos os outros periféricos, sendo capaz de determinar como ele e os restantes dispositivos têm de agir perante as diferentes condições a que são expostos.

Cabe a este, ajustar o ganho do amplificador de instrumentação, comunicando com este por SPI. Esse ajuste é realizado duas vezes em cada leitura de um sensor.

Do bloco da ponte adaptativa, é escolhida a resistência que mais se adequa a ligar ao sensor a ler, para formar um divisor de tensão, do qual será feita a aquisição do valor em tensão no seu ponto intermédio. Esta alteração de resistência permite ajustar a janela de leitura ao sensor, e a soma de todas as possibilidades dá ao sistema um alcance consideravelmente elevado.

Posteriormente ao ajuste da janela, o sistema mede a tensão de saída do amplificador, calcula a tensão do ponto médio do divisor de tensão, e coloca na saída DAC ligada ao amplificador um valor ligeiramente inferior a este calculado. Desta forma é possível aumentar consideravelmente o ganho do amplificador de instrumentação (IA), e obter com mais precisão

o valor tensão no ponto médio da ponte adaptativa, valor esse que permite calcular a resistência do sensor.

Considera-se assim que o controlo da entrada positiva do amplificador de instrumentação através da saída DAC do MCU funciona como um ajuste fino na leitura dos sensores.

Além disso, o MCU comanda o conjunto de dispositivos *switch*, que por sua vez, estão conectados às linhas e colunas das matrizes de sensores, possibilitando a seleção de qualquer sensor presente nesta. A dimensão máxima da matriz a medir está limitado pela quantidade de dispositivos *switch* inseridos no circuito.

Finalmente, concluído o ciclo de leitura, o MCU transmite, através da porta série, o valor lido do sensor, e a identificação deste. Essa informação será posteriormente interpretada por um computador, com um *software* especialmente dedicado a este propósito.

4.2.1 Aquisição de dados de uma matriz de sensores

Todo o sistema eletrónico implementado para medição dos sensores térmicos foi desenvolvido para possibilitar utilização de um único sensor, ou de matrizes destes com dimensões diversificadas.

Com a Figura 24 pretende-se ilustrar o esquemático do sistema eletrónico implementado, apresentando-se todos os dispositivos presentes e todas as ligações entre eles.

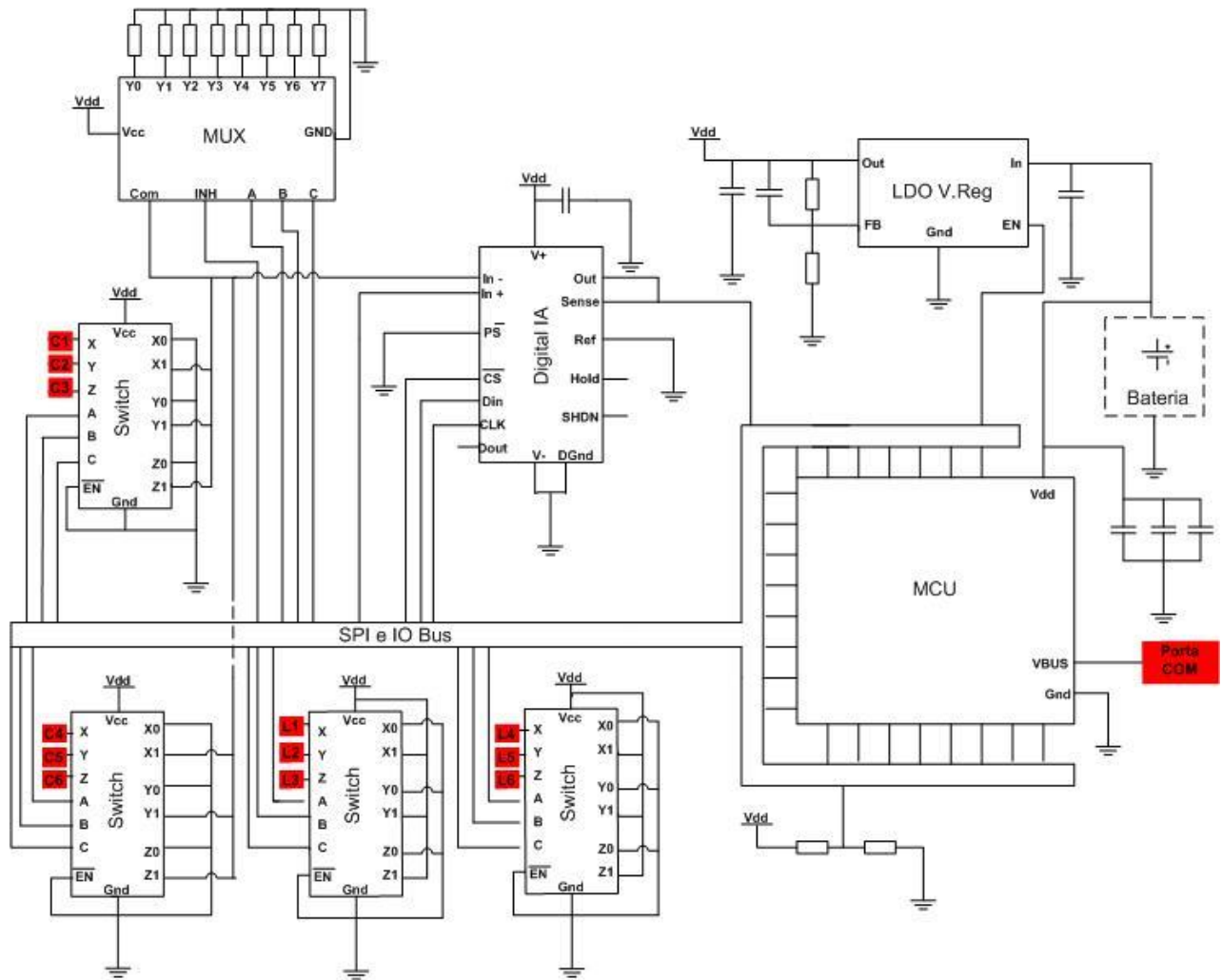


Figura 24: Esquemático do sistema de leitura de sensores térmicos impressos

Colocando inicialmente um foco no regulador de tensão escolhido (LDO V.Reg), observa-se que este tem ligado às suas portas de saída e entrada alguns condensadores e resistências. Os condensadores, de modo geral, diminuem o ruído que poderá ser causado por este e melhoram a impedância da fonte. Já as resistências colocadas têm a função de definir o valor da tensão pretendida para a saída do regulador. Colocando as resistências com os valores corretos, posiciona-se a tensão Vdd do circuito em 5V DC.

Seguidamente, no canto superior esquerdo é ilustrado o multiplexador de 8x1 (Mux), do qual a sua saída comum se encontra ligada à entrada negativa do IA, e as oito ligações possíveis deste estão conectadas a resistências diversas, cujos valores vão de 150Ω até 470kΩ. Esta montagem garante ao sistema de leitura de sensores um alcance entre os 150Ω e os 1.5MΩ. Uma característica positiva é a facilidade de deslocação do alcance, sendo apenas necessário substituir as resistências e alterar os seus valores definidos como constantes no *firmware* do

MCU. Para o mesmo fim, poderia ter sido utilizado um reóstato programável, substituindo o banco de resistências, no entanto, estes dispositivos apresentam normalmente erros entre os 10 e os 20%, o que reduziria a qualidade de leitura do sistema.

Por baixo do MCU está um circuito simples com duas resistências de valor igual. A tensão no ponto entre elas é medida através de uma entrada ADC. Com isso pretende-se medir a tensão que alimenta o circuito Vdd, utilizando para os cálculos o seu valor real em vez do seu valor pré definido, protegendo a leitura de alterações neste valor e tornando o sistema mais independente da sua tensão de alimentação.

Junto ao pino Vdd do MCU está presente um conjunto de condensadores, composto por 3 condensadores de 10 μ C, cuja função é manter estável a sua alimentação, protegendo o seu bom funcionamento da existência de picos de consumo energético.

As etiquetas apresentadas a vermelho expõem as ligações do circuito para o exterior. As etiquetas de L1 até L6 e C1 até C6 são as ligações com as linhas (L) e colunas (C) das matrizes de sensores térmicos. Deste modo, o sistema será apenas capaz de lidar com dimensão máxima de matriz de sensores de 6x6, ou seja, com seis linhas e seis colunas. Para medição de matrizes maiores seria necessário adicionar ao circuito do sistema mais dispositivos do tipo *switch*.

Durante a ativação de um sensor, os *switches* ligados às linhas da matriz alimentam o respetivo sensor e ligam as restantes linhas à massa, enquanto os ligados às colunas conectam a saída do sensor à entrada In- do IA e as restantes colunas à massa. Esta ligação das linhas e colunas não selecionadas à massa diminui a interferência realizada por estas na leitura do valor de resistência do sensor escolhido.

Finalmente, a etiqueta denominada “Porta COM” simboliza a conexão do MCU com um computador, para envio dos valores obtidos, via porta série.

4.2.2 Cálculo do valor de resistência de um sensor

Sabemos que o valor inicialmente obtido pelo MCU corresponde à tensão na saída do amplificador de instrumentação (Vout), pretendendo-se com ele obter o valor da resistência elétrica apresentada pelo sensor em medição.

Com a Figura 25 descreve-se o método de medição da resistência do sensor.

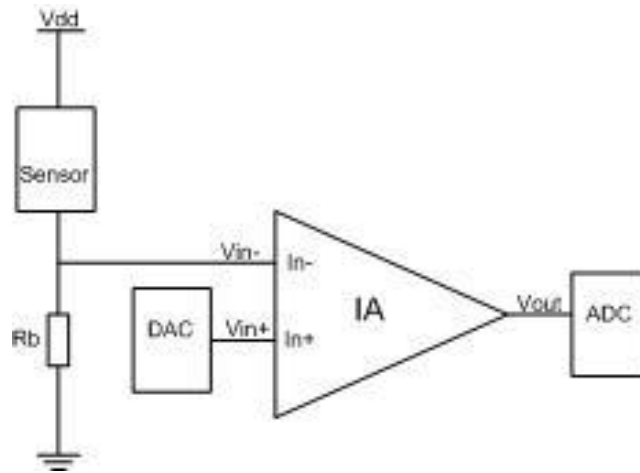


Figura 25: Método de medição da resistência do sensor

Tendo em conta que a tensão de saída do IA corresponde à diferença entre as duas tensões de entrada multiplicada pelo ganho programado neste, e que a entrada positiva ($In+$) corresponde sempre à tensão imposta pelo DAC, obtêm-se as Equações 8, 9 e 10.

$$V_{Out} = (V_{in+} - V_{in-}) \times GanhoIA(=) \quad (8)$$

$$(=)V_{in-} = V_{in+} - \frac{V_{Out}}{GanhoIA} \quad (9)$$

$$V_{in+} = V_{DAC} \quad (10)$$

Depois de calculado o valor na entrada negativa do IA (V_{in-}), utilizam-se as regras do divisor de tensão para se calcular a resistência do sensor, tendo em conta que R_b é a resistência escolhida do banco e o seu valor é conhecido. Sabendo-se que V_{in-} é dado pela Equação 11, a resistência do sensor pode ser obtida utilizando a Equação 12.

$$V_{in-} = \frac{R_b}{R_b + R_{sensor}} \times V_{dd} (=) \quad (11)$$

$$(=)R_{sensor} = \frac{R_b \times V_{dd}}{V_{in-}} - R_b \quad (12)$$

Com a expressão obtida, é possível calcular-se a resistência do sensor, com os dados obtidos da medição da tensão de saída do IA.

4.2.3 Desenho do circuito em *Printed board Circuit* (PCB)

Com a finalidade de eliminar os problemas existentes nos circuitos montados em *breadboard*, e apontando à obtenção de um produto final, de menores dimensões e de simples processo de replicação foi desenhado o circuito do sistema de leitura de sensores térmicos recorrendo ao software de desenho de PCBs intitulado Altium. Este disponibiliza no seu website as bibliotecas com os componentes das marcas mais imponentes do mercado, neste caso, da Texas Instruments, Linear Technology e ATMEL.

Na Figura 26 apresenta-se o desenho do circuito de leitura de matrizes de sensores térmicos em PCB.

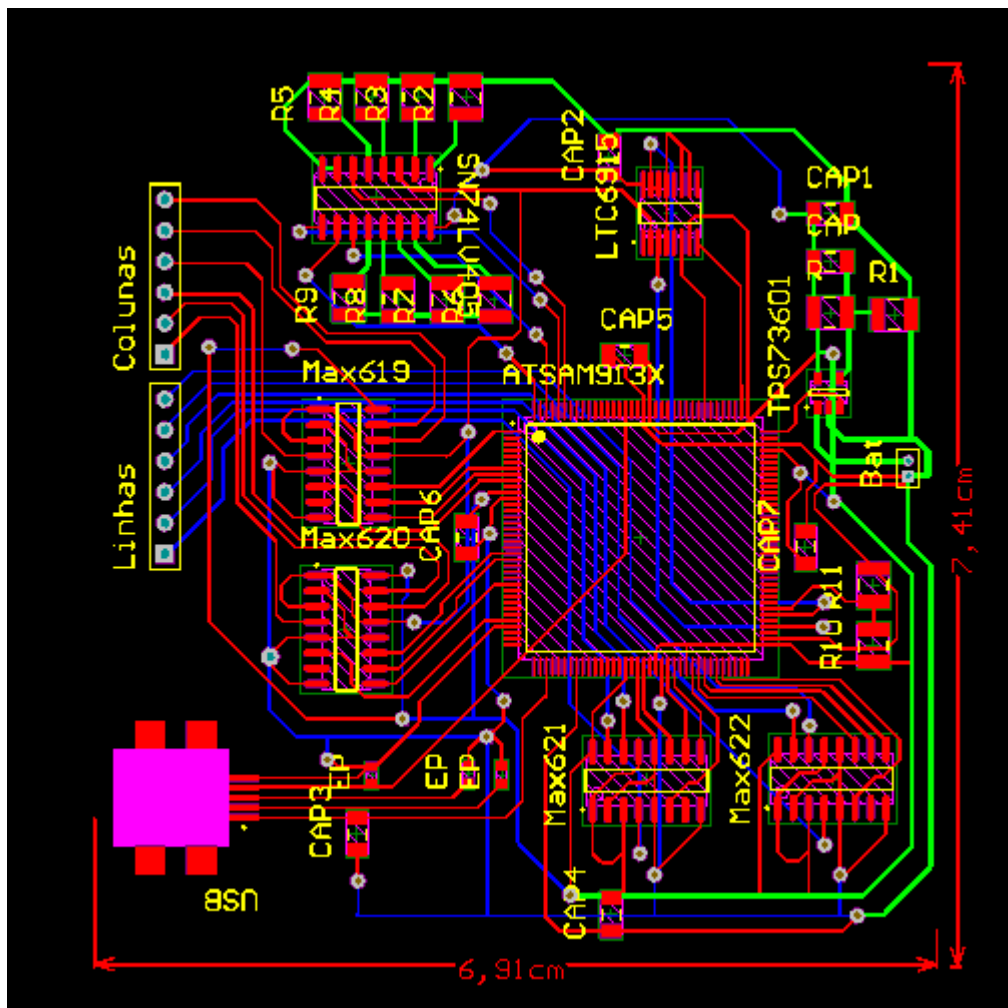


Figura 26: Desenho do circuito de leitura de matrizes de sensores térmicos em PCB

Pode visualizar-se no desenho, a porta USB para comunicação do sistema com o computador, todos os componentes utilizados e ainda os *headers* para ligação das matrizes de sensores e colocação da bateria, respetivamente identificados.

A placa obtida apresenta as dimensões de 6,91 por 7,41cm. Para melhor visualização observa-se em 3D na Figura 27 o produto final obtido, obtido também utilizando o Altium.

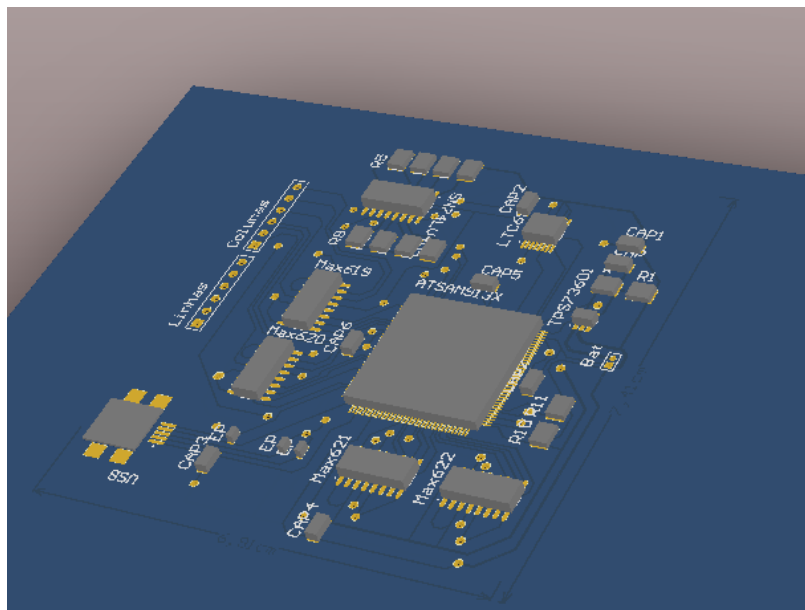


Figura 27: PCB do sistema de aquisição em 3D

Esta placa foi desenhada para trabalho futuro e, desta forma, esta não foi impressa. Antes disso será necessário realizar alguns melhoramentos no sistema eletrónico de leitura de sensores, ficando assim, exposta uma aproximação daquilo que poderá ser o produto final e das dimensões que este irá apresentar.

4.3 Resultados experimentais

Encontrando-se o sistema de leitura de sensores térmicos desenvolvido e funcional é necessário pô-lo à prova, submetendo-o à leitura de um sensor de temperatura sujeito a diversas variações térmicas controladas.

O sensor utilizado para a recolha de dados experimentais era baseado numa matriz polimérica de SEBS e com um 1,5% de massa de MWCNT.

De modo a obter um ambiente térmico controlado utilizou-se o LINKAM THMS 600, mecanismo que permite variar a temperatura num pequeno espaço isolado, com uma precisão

de 0.1°C. Esta ferramenta comercial, apresentada pela Figura 28, é controlada por uma aplicação de computador dedicada, na qual se podem definir ciclos de elevação e diminuição da temperatura controladas em amplitude e em tempo.



Figura 28: LINKAM THMS 600 [24]

Contudo, para verificação do funcionamento do sistema de leitura de sensores, fizeram-se as mesmas experiências medidas por um multímetro digital comercial, com seis dígitos e meio de resolução, intitulado Agilent 34401A. Este multímetro digital, enviava as suas medições para um ambiente gráfico desenvolvido em LabVIEW, onde era possível analisar os dados em tempo real e guarda-los para posterior análise e comparação, neste caso.

Inicialmente submeteu-se o sensor a variações entre os 30 e os 50°C à taxa de 10°C/minuto, taxa que o sistema não era capaz de manter nas descidas de temperatura e, por isso, os tempos de descida de temperatura eram mais elevados.

Fez-se o mesmo teste duas vezes consecutivas, na primeira realizando as medições com o sistema desenvolvido neste trabalho e seguidamente com o multímetro comercial.

A Figura 29 apresenta o histórico dos valores obtidos pelo sistema de leitura de sensores térmicos, em Ohms, durante todo o teste realizado, no qual o sensor inicia o processo à temperatura de 30°C, esta temperatura é elevada até aos 50°C, primeiro pico no gráfico, depois é reduzida à temperatura inicial, para voltar a ser elevada à temperatura máxima de 50°C e, por fim, ser reduzida até aos 30°C.

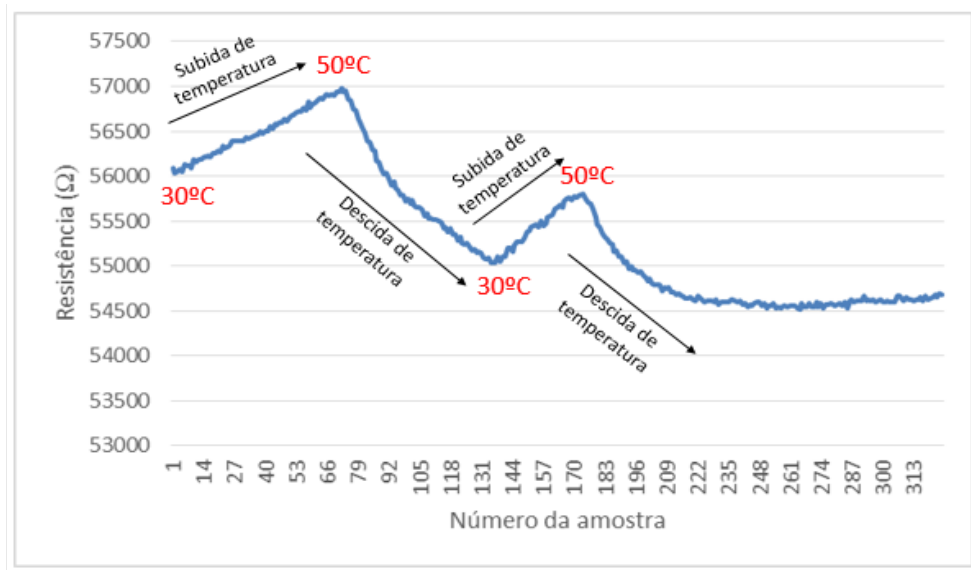


Figura 29: Variação entre 30 e 50°C medido pelo sistema de leitura de sensores térmicos impressos

Posteriormente, a mesma experiência foi realizada ao sensor mas, desta vez, os dados foram obtidos pelo multímetro digital. Esses dados estão representados pela Figura 30.

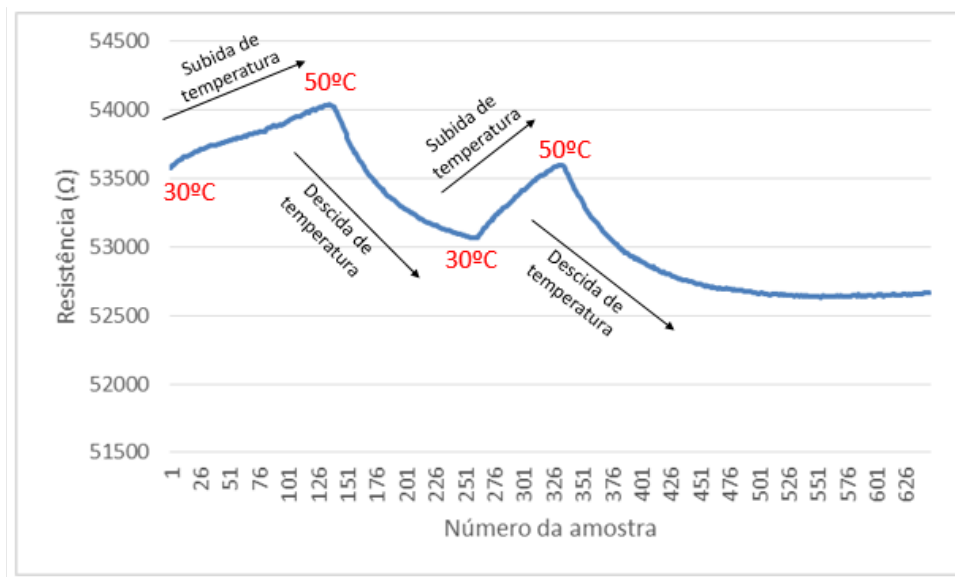


Figura 30: Variação entre 30 e 50°C medido pelo multímetro comercial.

Analisando os dados obtidos, conclui-se que ambas as curvas de evolução resistiva do sensor são semelhantes, apresentando o ponto mais elevado no primeiro pico de temperatura, e mostrando tendência a diminuir a resistência durante a experiência, independentemente da variação da temperatura.

Ainda assim, é em ambos os casos identificável a evolução térmica presente, percebendo-se onde existe aumento ou diminuição da temperatura, e onde se situam os pontos de temperatura máxima e mínima.

Outro ponto importante que se pode verificar, comparando os dois gráficos obtidos, é superioridade da resistência medida pelo sistema de leitura de sensores comparativamente com a obtida pelo multímetro, apesar da semelhança obtida nas curvas. Esta diferença deve-se ao fato do decréscimo constante de resistência do sensor à medida que este vai sendo sujeito aos testes predefinidos. Tendo a medição realizada pelo multímetro sido realizada após a medição com o sistema de leitura, pode-se prever que os valores obtidos do sensor seriam de amplitude inferior.

Desta forma, pode-se considerar que, para este caso, o sistema de leitura apresentou um comportamento correto, adquirindo corretamente a evolução do sensor durante toda a experiência, sendo possível traçar o gráfico no computador com os dados enviados pela porta série. O sistema mantém-se estável ao longo do tempo e obtém com precisão os valores de resistência apresentados pelo sensor.

Apesar de tudo, é ainda verificável algum ruído presente nas leituras, que diminui a qualidade dos dados obtidos em tempo real, cujo valor máximo, neste caso experimental, está nos 0,137%.

Adicionalmente, realizaram-se testes ao mesmo sensor, medido pelos mesmos sistemas, mas com variações diferentes de temperatura. Desta vez variou-se a temperatura entre os 35°C e os 45°C a uma taxa de 5°C/minuto tendo em vista a dificuldade que o sistema tinha em reduzir a temperatura abaixo dos 35°C, tornando as experiências mais demoradas e possuir um tempo de descida de temperatura bastante superior ao tempo de subida.

De novo se apresentam os gráficos das duas curvas obtidas. Na Figura 31 ilustram-se os dados obtidos pelo sistema de leitura para as variações entre os 35°C e os 45°C e na Figura 32 os valores medidos pelo multímetro comercial de seis dígitos e meio, para as mesmas variações térmicas.

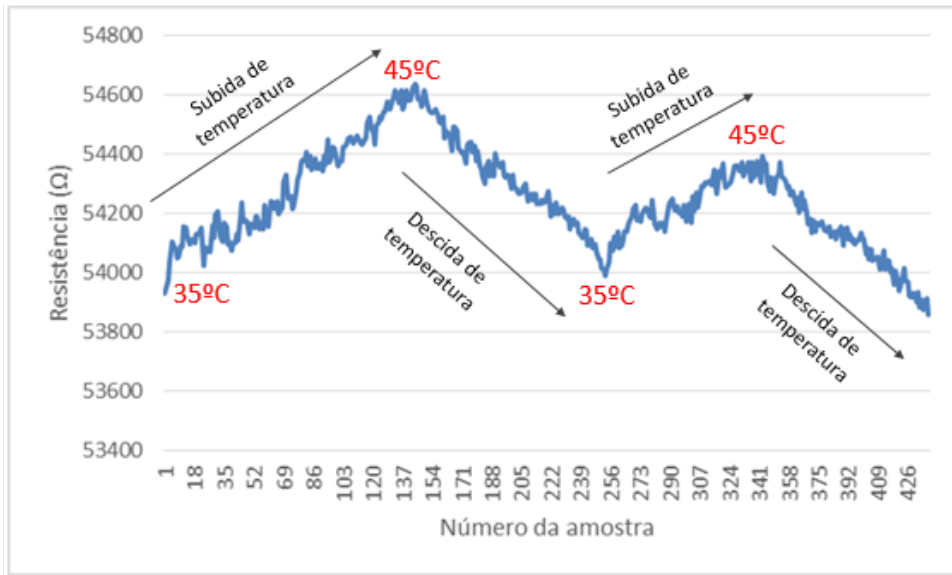


Figura 31: Variação entre 35 e 45°C medido pelo sistema de leitura de sensores térmicos impressos

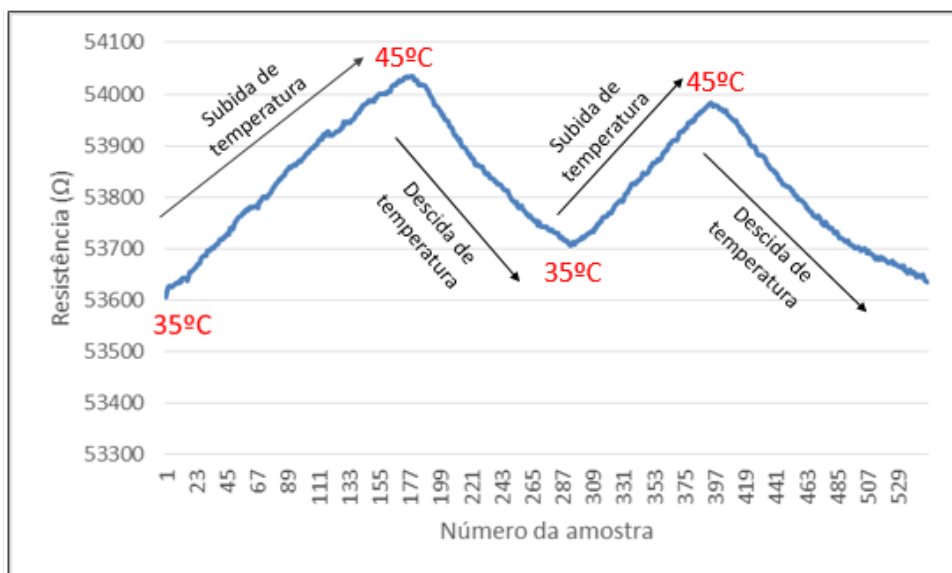


Figura 32: Variação entre 35 e 45°C medido pelo multímetro comercial.

Da mesma forma, se verificam que as curvas adquiridas e enviadas pelos dois diferentes sistemas têm comportamentos idênticos, apesar de neste caso, o sistema de leitura de sensores térmicos apresentar valores com imperfeições mais consideráveis.

Igualmente, sabendo-se que foi utilizado o mesmo material, a resistência do sensor foi decrescendo ao longo das duas realizações experimentais, estando já visivelmente inferior na segunda execução.

Mesmo assim, tendo em conta uma maior imperfeição das medidas do sistema desenvolvido, o sistema apresenta um comportamento esperado apresentando apenas um ruído mais constante do que o verificado na experiência anterior, que poderá ser reduzido com a utilização de filtros *hardware* e *software*, apesar de a sua amplitude máxima ser aproximadamente a mesma, verificando-se as semelhanças nos dois gráficos traçados, e observando-se a evolução correta da leitura, na qual se identificam as subidas e descidas de temperatura, tais como os seus picos de valores nas temperaturas de 45°C e 35°C.

Em suma, com base nas experiências, nos resultados obtidos e nas comparações com um multímetro de comercial, podemos concluir que o sistema se comporta convenientemente, visto que, procurou correta e automaticamente a resistência indicada do banco de resistências, ajustando a janela de leitura para a necessária para efetuar as medições, e enviando os dados medidos para a porta série, não apresentando falhas nem perda de dados, durante todas as experiências realizadas.

E ainda, apesar de nas suas leituras conter níveis de ruído que não podem ser desprezados, os dados obtidos apresentam ainda uma precisão razoável, e nos gráficos traçados com esses valores observam-se claramente as variações térmicas às quais o sensor esteve sujeito.

4.4 Conclusões

Definiu-se como objetivo principal a implementação e desenvolvimento de um sistema eletrónico capaz de efetuar a leitura de sensores e matrizes de sensores resistivos, mais especificamente, direcionando para a utilização com sensores térmicos obtidos através de tecnologias de impressão. Com base nos resultados obtidos, é observada a criação de uma ferramenta funcional, na leitura de sensores e matrizes e respetiva comunicação dos mesmos para a porta série.

O sistema apresenta um funcionamento fluido, que não sofre atrasos nem diminuição da taxa de aquisição de dados com o avanço do tempo em funcionamento e não apresentou em nenhum dos testes algum erro que fizesse o sistema bloquear ou entrar em erro.

A montagem eletrónica desenvolvida para este sistema de leitura é relativamente simples, gerando um circuito de dimensões reduzidas e a sua reprodução não apresenta um custo elevado, o que lhe atribui um valor considerável.

Para além disso, com apoio também nos resultados obtidos experimentalmente, considera-se que as leituras efetuadas têm uma precisão razoável, aliado a um alcance do sistema notavelmente elevado, proporcionado pela utilização do banco de resistências.

Por conseguinte, prova-se que o sistema de leitura de sensores está pronto para ser utilizado com os mais diversificados sensores e matrizes resistivas.

Porém, algum trabalho para melhoramento ficou pendente neste projeto. Para isso, seria imprescindível alguma dedicação ao melhoramento dos filtros em *software* e possivelmente a adição de um filtro *hardware*, com o intuito de eliminar o ruído presente nas leituras, aumentando desta forma a precisão do sistema. Poderia ser ainda ser realizado algum trabalho para redução do seu custo económico e, por fim, tornar o produto totalmente móvel, alargando o leque de possíveis aplicações.

5. DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE PARA O MICROPROCESSADOR

Aqui é descrita a implementação do *firmware* do MCU, responsável por controlar todo o sistema eletrônico. Os principais algoritmos são ilustrados em fluxogramas simplificados, e seguidamente esclarecidos. Finalmente, analisa-se com algum detalhe o seu funcionamento.

5.1 Introdução

Todo o *hardware* presente no circuito desenvolvido está sujeito a um controlo firme e constante, que garanta o funcionamento síncrono de todos os seus componentes. Este apenas poderá ser prestado por um MCU que cumpra todos os requisitos de comunicação com os periféricos, juntamente com um *firmware* consistente e fiável, sabendo-se que uma falha neste pode originar vários problemas, como leituras incorretas de sensores, devido a más seleções nos dispositivos *switch* ou programação incorreta do amplificador de instrumentação.

Substancialmente, este tem de comandar todos os periféricos, entre eles, os *switches* que selecionam os sensores a ler, o multiplexador do banco de resistências, configurar o ganho do amplificador, adquirir dados das portas ADC e fazer a filtragem e processamento dos mesmos e por fim efetuar uma comunicação constante com um computador.

Imperiosamente o *firmware* terá de ser fluído e apresentar rapidez na leitura de vários sensores em simultâneo e nunca poderá ficar congelado em alguma operação, o que proporcionaria o bloqueio permanente do sistema.

5.2 Análise do microcontrolador

Perante a necessidade da existência de uma unidade de processamento, aquisição de sinais analógicos, comando de periféricos e extração de dados para um computador, foi utilizado um MCU da ATMEL baseado numa arquitetura de 32 bits ARM Cortex –M3, intitulado SAM3X8E.

Este microprocessador pode funcionar a uma frequência máxima de 84Mhz, contém 54 pinos de entradas e saídas digitais, 12 entradas analógicas, 4 hardware serial ports (UARTs), 2 de conversão de digital para analógico (DAC), 9 canais de *Timers/Counters* (TC), 96kBystes de memória SRAM e 512KBytes de memória Flash para código.

Um fator bastante positivo deste dispositivo é a existência da placa de testes Arduino Due, permitindo assim utilizar o SAM3X8E sem necessidade de desenvolvimento e construção de uma placa para testes. Isto torna-se uma vantagem, visto que se mostra bastante útil para a realização de testes constantes que provam o bom funcionamento do trabalho realizado.

Por fim, existe a vantagem na possibilidade de utilização da plataforma de desenvolvimento Atmel Studio para desenvolvimento e depuração para o MCU a ser utilizado, fazendo uso de uma interface de fácil utilização que permite a implementação aplicações escritas em Linguagem C/C++ ou assembly. Para além disso, o Atmel Studio vem ainda integrado com o Atmel Softwares Framework (ASF), que é uma imensa biblioteca de códigos *free source*.

5.3 Implementação do Firmware

Perante a necessidade da realização da leitura de um sensor ou uma matriz destes, desenvolveu-se um *firmware* para o MCU capaz de lidar com ambas as possibilidades requerendo apenas pequenas alterações, nas quais a inserção do numero de sensores a ler e o numero de dispositivos *switch* a comandar.

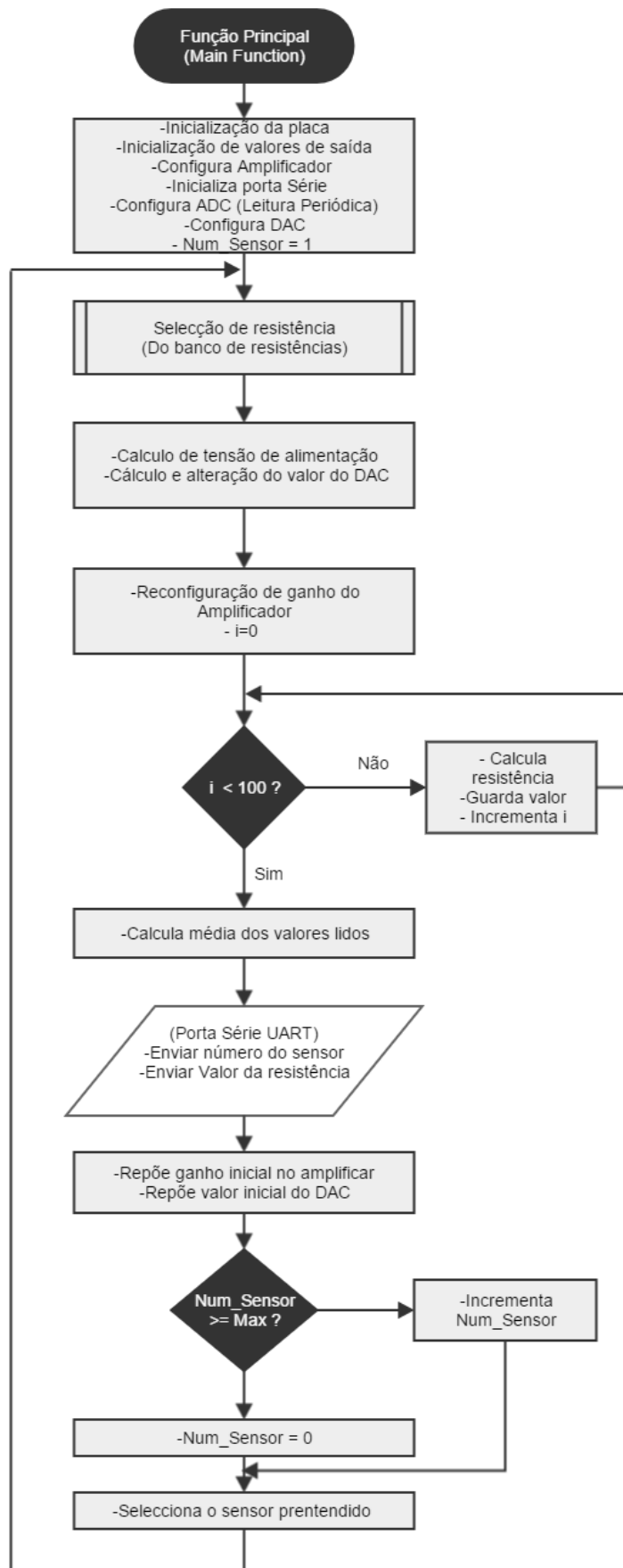
Este *firmware* tem também a potencialidade de controlar o ganho do amplificador de instrumentação em tempo real, via SPI, e de seguida ler a sua tensão de saída através de uma das portas analógicas com ADC do MCU. Outro requerimento, é que este seja capaz de determinar qual das oito resistências do banco de resistências é a mais adequada para a leitura

de um determinado sensor, e seleciona-la, através do comando do multiplexador de 8 para 1 presente no circuito.

Adiciona-se também, a este *firmware*, o valor de resistência apresentado pelo multiplexer quando ligado em série com a resistência do banco e com o sensor, diminuído assim a sua interferência nas leituras. Este procedimento é viável porque o seu valor de resistência é aproximadamente contante.

Todo o *firmware* foi implementado utilizando a plataforma de desenvolvimento Atmel Studio 6.2 aproveitando a sua biblioteca ASF que fornece algumas funções que simplificam a configuração e utilização de vários periféricos, tais como ADC, SPI, UART e outros.

O fluxograma representado na Figura 33 expõe, de forma simplificada, a aplicação de controlo do circuito desenvolvida para o MCU.



Inicialmente, definem-se as configurações da placa, valores de saída de pinos digitais, de modo a garantir os valores corretos nos *switchs* e *multiplexers*, deixando selecionado a resistência com valor intermédio do banco de resistências e o primeiro sensor que se pretende ler. De seguida atribuem-se alguns valores, como por exemplo, a frequência de *clock* para a comunicação SPI, utilizada para definir o ganho do amplificador, e atribui-se-lhe um ganho de 2.

O próximo passo é configurar a porta série, criando as condições para que seja possível comunicar-se com um computador. O *baudrate* configurado para 115200 permite uma boa taxa de transferência de dados.

Também as entradas ADC têm de ser configuradas inicialmente. Para estas definiu-se uma aquisição periódica a funcionar com interrupções no sistema, à frequência de 100KHz e uma resolução de 12bits. Foram utilizadas 4 portas com ADC, a primeira para a tensão de saída do amplificador, outra para medição da tensão de alimentação do circuito, e as últimas duas para as entradas do amplificador.

Finalizando as configurações iniciais, definiu-se uma das saídas possíveis de DAC para obter 2.5 volts numa das entradas do amplificador operacional.

De seguida, invoca-se uma função que contém o algoritmo que permite selecionar a resistência, do banco de resistências, que mais se adequa ao valor do sensor em leitura. Com isto é possível ajustar a gama da leitura para a correta e garantir um alcance enorme do sistema. É imprescindível que a função invocada retorne uma configuração correta para que se possam decorrer os próximos passos.

Passa-se ao cálculo da tensão de alimentação do circuito, através dos dados obtidos através da aquisição do valor de tensão entre duas resistências com o mesmo valor. Com este passo, obtém-se a tensão de alimentação do circuito em tempo real, valor esse que é utilizado nos cálculos seguintes, eliminando erros causados por desvios ou flutuação da tensão de alimentação.

Posteriormente, interpreta-se o valor à saída do amplificador, e com este, calcula-se um novo valor para o pino de DAC. Esta tensão colocada numa das entradas do amplificador será bastante próximo do valor colocado na outra, possibilitando um aumento do ganho, neste caso para 16. A utilização do DAC funciona como um ajuste fino na medição, tornando o valor obtido mais realista do que o anterior realizado para o ganho de 2.

De seguida, adquirem-se 100 valores de saída do amplificador, através da porta com ADC. Calcula-se a média destes, e com o resultado procede-se ao cálculo do valor de resistência do sensor. Esta média funciona como um filtro passa-baixo, reduzindo alguma flutuação e ruído que possa existir no circuito ou que possa ser causado no processo de aquisição.

Com os dados necessários já calculados, o MCU, comunica com a aplicação no computador, enviando-lhe os dados obtidos e informando a qual sensor estes se referem.

Por último, o sistema selecciona o próximo sensor a ler, alterando as suas saídas digitais, que controlam os *switchs*, de modo a ligar o sensor pretendido ao circuito de leitura. Os valores iniciais de ganho e resistência seleciona do banco são repostos para os valores iniciais.

Caso não existam mais sensores a ler, o sistema volta a obter dados do mesmo.

Na Figura 34 expõe-se o fluxograma da função de seleção da resistência do banco.

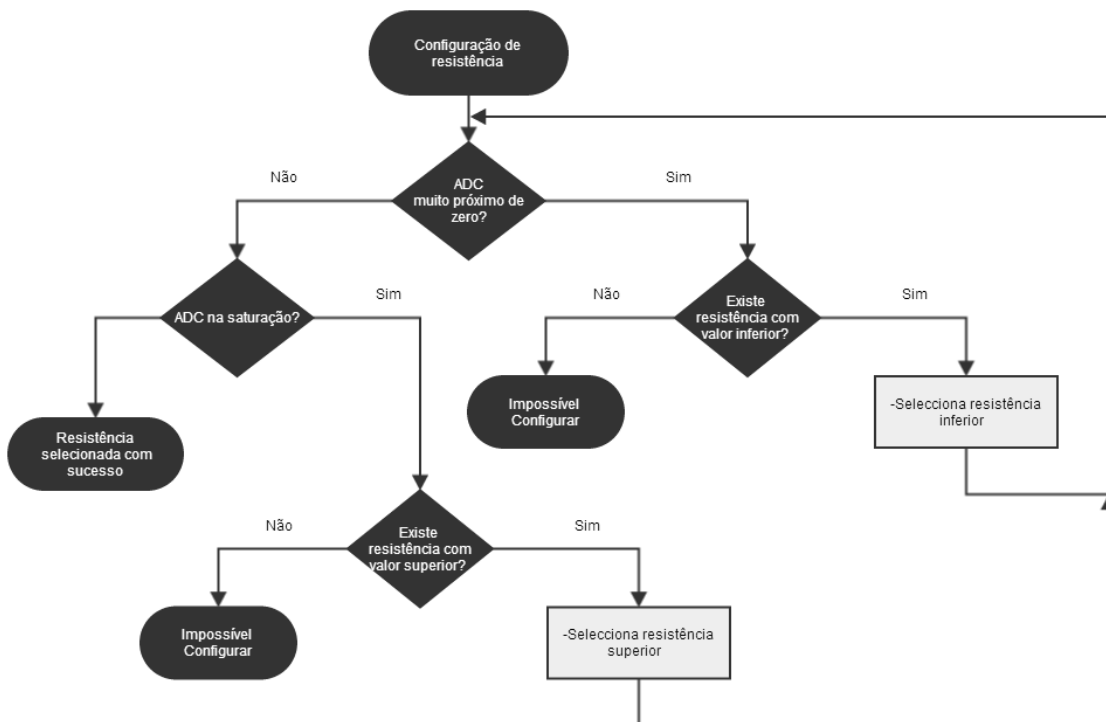


Figura 34: Fluxograma da função de selecção de resitência

Uma das partes fundamentais deste *firmware* é o algoritmo de seleção de uma das resistências do banco, que ficará ligada, em série, com o sensor. Esta seleção tem de respeitar, obrigatoriamente alguns requisitos. Visto que o circuito é alimentado apenas com 5V, positivos, o ampliador apenas funcionará num sentido, ou seja, o valor da resistência selecionada tem de

ser inferior ao do sensor, para que a tensão de entrada no amplificador seja inferior a 2.5V, valor pré definido para a saída com DAC ligado à outra entrada do amplificador operacional. Para além disso, a resistência selecionada não poderá ser bastante inferior ao valor do sensor, pois, desse modo, colocar-se-á a saída do amplificador na saturação, o que impossibilita o processo de leitura.

O algoritmo escolhido, por verificar se o valor lido no ADC não se encontra bastante perto de zero. Não se pode esperar que este seja exatamente zero, considerando a possibilidade de existência de ruído, então dá-se uma pequena margem, para a qual se considera que o valor adquirido pelo ADC é zero. Se a condição for afirmativa há necessidade de ligação de uma resistência com valor inferior e voltar ao início. Caso não exista no banco uma resistência com tais propriedades a configuração torna-se impossível, e a função deve retornar tal informação.

Quando a leitura do ADC ligado à saída do amplificador é diferente de zero é fundamental garantir-se que este não esteja em saturação para se afirmar que a configuração foi realizada com sucesso.

Na hipótese deste se encontrar em saturação procede-se a um aumento da resistência ligada em série com o sensor e volta-se ao início de todo o processo de seleção. Se, por ventura, a resistência atualmente utilizada for a de valor mais elevado a configuração é também impossível, pois o sensor está fora dos limites de alcance do sistema.

5.4 Resultados experimentais

Seguidamente da implementação do código para o MCU é imprescindível que o seu funcionamento seja posto à prova juntamente com o restante *hardware* pré-selecionado, resultando, da junção destes, o sistema de leitura de sensores térmicos impressos.

Experimentado o sistema com diferentes sensores, e matrizes de sensores, observou-se que o *firmware* implementado corria de forma fluida, controlando os periféricos com sucesso, alterando o ganho, selecionando diferentes resistências do banco e percorrendo as matrizes de sensores conforme o pretendido.

O feedback do seu funcionamento consistente foi obtido com o computador, analisando os dados calculados pelo sistema de leitura de sensores que iam sendo enviados pela porta série e comparando-os com os seus valores reais, previamente calculados e medidos utilizando o multímetro. Verificou-se no entanto, que o sistema poderia ter uma taxa de leitura de sensores

e envio de dados superior. Isto deve-se a alguns tempos de espera entre ciclos, leituras de ADC, comunicações SPI e porta série, que garantem que a ação seguinte pode ser realizada em segurança sem interferir com a anterior, e sem contar com estados e dados obtidos desatualizados. Contudo esses tempos poderiam ser ajustados e aperfeiçoados, diminuindo assim o tempo de ciclo de leitura e transmissão do estado de um sensor.

É, no entanto, também de alguma importância citar o elevado nível de dificuldade que surgiu na implementação do *firmware* para o MCU. Essa adversidade deve-se à considerável complexidade do Atmel SAM3X8E somada à falta de exemplos práticos para implementação de diversas funções, tais como, de inicialização e controle do ADC, comunicação SPI, utilização da saída com DAC e ainda da porta série.

A inexistência de código exemplo no documento *datasheet* deste MCU e a sua utilização no Arduíno Due, programado maioritariamente no IDE da arduino, que contem funções bastante simplificadas para a utilização de todos os potenciais do MCU, são a causa maior para a inexistência de exemplos práticos.

Este obstáculo causou um aumento considerável do tempo dispensado para a implementação deste *firmware*.

5.5 Conclusões

Considerando os resultados experimentais, obtidos e analisados anteriormente, pode considerar-se que as metas e requisitos especificados para este *firmware* foram alcançados com sucesso.

Em justificação dessa avaliação positiva, apresenta-se um controlo correto e seguro de todo o *hardware* presente no sistema de leitura de sensores térmicos impressos, um funcionamento fluido e estável do *firmware* que se mostrou pouco suscetível a bloqueios ou atrasos e um envio constante e preciso dos valores obtidos para a porta série.

A filtragem dos valores lidos da saída do amplificador, efetuada por *software*, também acrescenta um ponto positivo a esta etapa do projeto, visto que acrescenta estabilidade e diminui o ruído presente nos valores obtidos da leitura dos sensores térmicos.

Por último, como referido anteriormente, a realização das leituras e transmissão dos dados obtidos poderia ser realizado a uma maior velocidade, contudo, o sistema apresenta já uma taxa de obtenção de dados, estando bastante longe de poder ser considerado lento, ou pouco fluido,

considerando que os sistemas térmicos apresentam variações relativamente lentas e que é garantida uma velocidade de leitura superior a um sensor por segundo, apresentando a rapidez necessária para efetuar a monitorização da matriz de sensores a colocar na prótese transfemural.

6. DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE TESTES EM SOFTWARE

Neste capítulo expõe-se o desenvolvimento de uma aplicação com ambiente gráfico, que corre no computador, recebendo e imprimindo os dados obtidos pelo sistema de leitura. O seu algoritmo é apresentado em fluxogramas e são exibidas imagens do seu funcionamento em vários casos.

6.1 Introdução

Foi delineado inicialmente que o sistema de leitura seria capaz de comunicar com um computador, enviando-lhe, via porta série, os dados obtidos do sensor ou matriz de sensores em questão.

Há várias formas de consultar os dados que são enviados e recebidos na porta série de um computador, entre eles, vários monitores série, nos quais seria extremamente complicado analisar os dados em tempo real, devido à elevada taxa de envio pelo sistema e à possibilidade de existência de mais do que um sensor, ou seja, diferente tipo de dados para analisar no mesmo espaço temporal. Outra forma de analisar os dados recebidos seria utilizar uma ferramenta como *labVIEW*, onde é possível analisar os dados impressos em gráficos o que facilita a sua visibilidade. No entanto, estes *softwares* são muitas vezes pagos e requerem um elevado tempo de aprendizagem.

Perante isto, desenvolveu-se, em *C#*, um *software*, plataforma de testes, que permite receber e interpretar os dados enviados pelo MCU apresentando-os de forma simplificada.

6.2 Estruturação e desenvolvimento do software de testes

Tendo-se como objetivo a realização de uma plataforma de testes, de simples utilização e que proporcione uma análise de dados clara ao utilizador. Esta será responsável por receber e interpretar os dados enviados pelo sistema de leitura de sensores resistivos, através de transmissão via porta série e realizar a impressão, em tempo real, destes num gráfico e numa matriz de valores em que cada posição representa o respetivo sensor, mostrando o último valor lido daquela posição.

Este *software* de testes é capaz de receber informação de um até dezasseis sensores em simultâneo, identifica a qual sensor corresponde cada valor recebido, não tendo este de ser sequencial, ou seja, o MCU poderá enviar dados relativos ao primeiro sensor e de seguida enviar do último, sem que isso consista num erro ou num problema para a plataforma de testes.

Outra das potencialidades do *software* é a sua aptidão para identificar erros e falhas nos dados recebidos. Quando uma anomalia na transmissão acontece, ignoram-se os dados recebidos com defeito, não os imprimindo na matriz de dados nem os adicionando ao gráfico.

Para a implementação deste, recorreu-se ao ambiente de desenvolvimento Microsoft Visual Studio 2010, com o intuito de criar uma aplicação para o sistema operativo Windows. Este ambiente de desenvolvimento permite, entre outras, desenvolver aplicações em linguagem C# utilizando as *Windows Forms Applications*, ou seja, criar com facilidade ambientes gráficos, nos quais se podem adicionar bastantes utilitários, tais como botões, caixas de texto, imagens, gráficos entre outros. A cada um desses utilitários pode atribuir-se funcionalidades, interrupções para eventos, exibição de dados e atualização dos mesmos e ainda proporcionar a interação com o utilizador.

A Figura 35 ilustra o ambiente gráfico criado para o *software* de testes. Nesta vê-se um botão *Start*, um botão *Stop*, uma caixa de texto que espelha toda a informação recebida na porta série, 16 caixas de texto que mostram o atual valor lido em cada sensor e uma janela gráfica com escala automática que representa o histórico de dados recebidos.

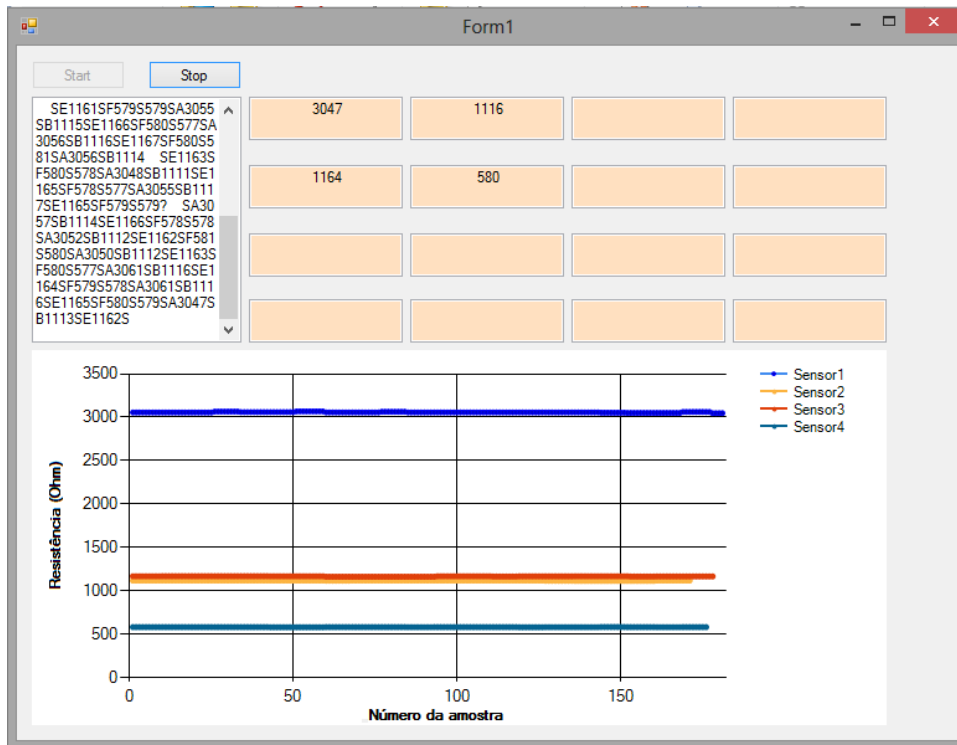


Figura 35: Ambiente gráfico da plataforma de testes

Com um *click* no *Start* inicia-se a conexão com o sistema de leitura e, se esta for realizada com sucesso, a aplicação está pronta para receber dados. Depois disto, a qualquer momento o botão *Stop* poderá ser pressionado, fechando as conexões com a porta série e congelando os dados presentes no ambiente gráfico.

A caixa de texto que espelha a porta série permite verificar a taxa de chegada de dados, identificar onde existem erros de transmissão e com que frequência estes ocorrem.

Para possibilitar a consulta do valor exato de qualquer sensor é apresentada uma matriz representativa, na qual cada posição representa um sensor da matriz. Este valor é atualizado de segundo em segundo para tornar a sua consulta possível caso a taxa de recepção de dados seja muito elevada.

Como em sistemas térmicos o mais importante nem sempre é a temperatura exata mas sim a evolução térmica ao longo do tempo, o ambiente gráfico imprime um gráfico de linhas, no qual cada linha corresponde a um sensor, e a cada sensor corresponde uma cor diferente, no qual se observa o histórico dos valores lidos em cada sensor e se reconhece com facilidade as subidas e descidas de temperatura em cada um.

É de citar que todos os valores presentes na plataforma de testes estão em ohms, visto que o objetivo é criar um sistema generalizado de leitura de sensores térmicos resistivos, ou

seja, seria necessário em primeiro lugar caracterizar os sensores utilizados e introduzir esses dados no sistema, para que este possa calcular valores de temperatura e não apenas resistência.

O algoritmo que deu origem ao *software* implementado é mostrado pela Figura 36, onde se pode verificar que este apresenta um baixo nível de complexidade.

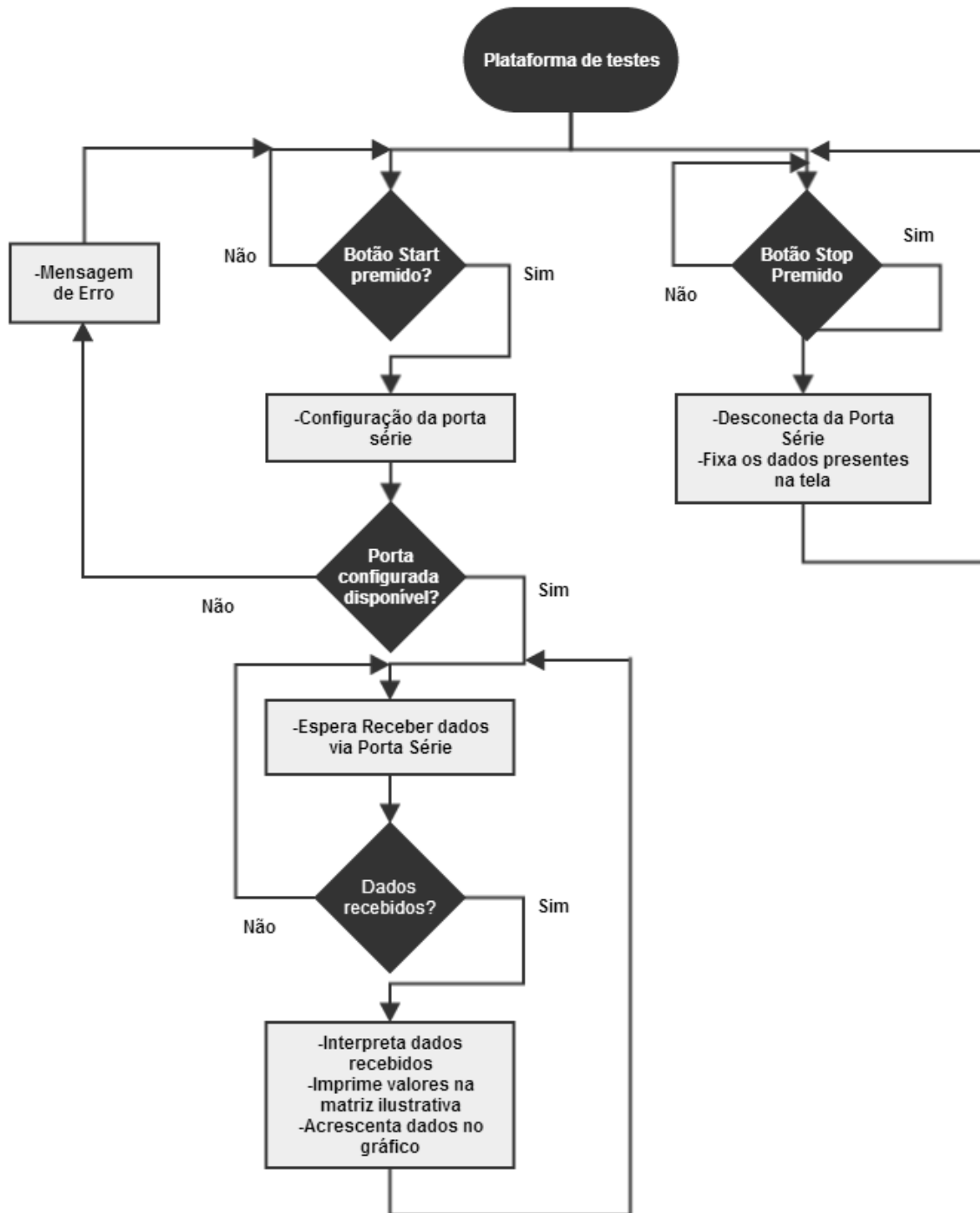


Figura 36: Fluxograma representativo do algoritmo do software da plataforma de testes

A aplicação começa por esperar que o botão *Start* seja premido. Assim que isso acontece, o sistema configura a porta série, número da porta COM e *baudrate*, e executa a ligação, retornando uma Mensagem de erro ao utilizador caso a porta em questão não esteja disponível. Assim que a conexão esteja realizada a aplicação fica à espera de receber algo via porta série, acontecimento que gera uma interrupção no sistema para separar e guardar os dados corretamente.

Seguidamente esses dados são filtrados, para encontrar erros, e os seus valores são interpretados e atribuídos aos respetivos sensores, mostrando-os na matriz do ambiente gráfico.

Por último, os dados recebidos são acrescentados ao gráfico de linhas que será atualizado para visibilidade do utilizador de segundo em segundo.

A qualquer momento o utilizador poderá premir o botão *Stop*, cancelando todos os processos a executar, fechando as comunicações com o MCU e fixando os dados apresentados ao utilizador.

6.3 Resultados experimentais

Com o fim de testar a aplicação, pondo à prova o seu bom funcionamento e identificar as suas falhas, este foi submetido a diferentes situações, com diferentes números de sensores que possam apresentar valores de resistência em gamas bastante diferentes.

Em primeiro lugar, constatou-se que o *software* da plataforma de testes era bastante leve e fluido e a interface escolhida mostrou-se de simples utilização e, na qual, os dados apresentados são de compreensão e análise clara.

Com o avançar dos testes provou-se também que o sistema se comportava corretamente perante a existência de qualquer quantidade de sensores, compreendida entre 1 e 16, valores definidos inicialmente, e que as diferenças de gamas entre eles não seria um entrave, nem na sua leitura nem na sua impressão no gráfico de linhas, sabendo-se que este tem a capacidade de ajustar a janela automaticamente.

Já de cariz negativo, verificou-se que existia uma quantidade considerável a serem recebidos com erros, nos quais faltava a identificação do sensor ou o valor estava corrompido,

felizmente o algoritmo de interpretação dos dados ignora com efetividade os dados que apresentam incorreções.

Perante Figura 37 é possível analisar um exemplo de funcionamento da plataforma de testes.

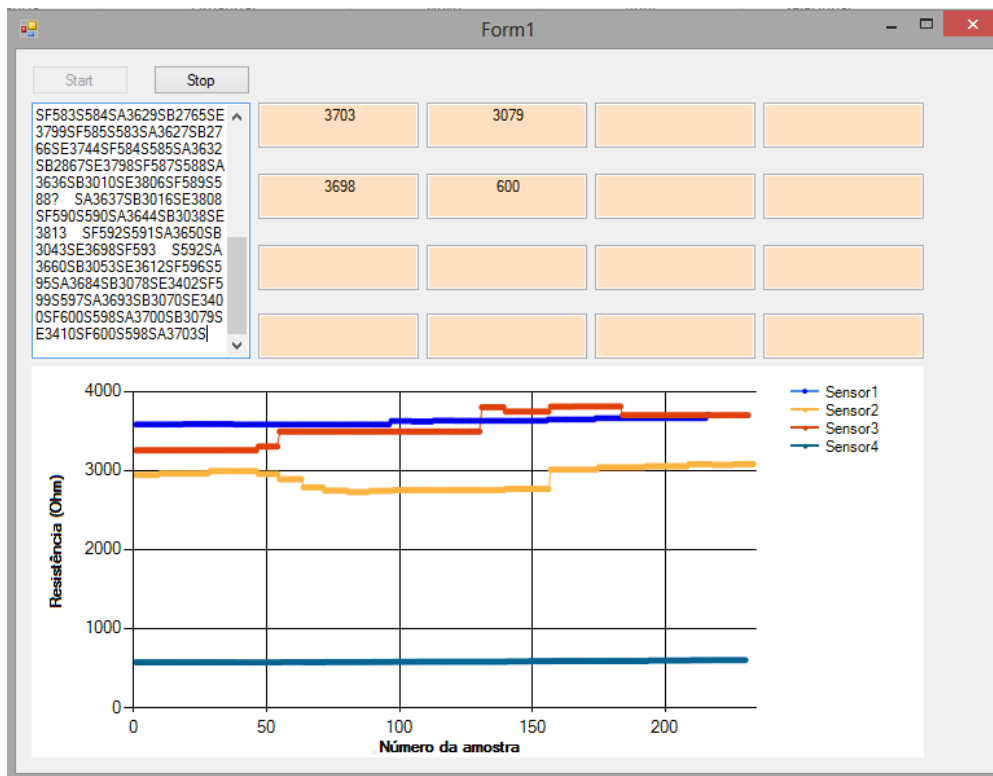


Figura 37: Plataforma de testes recebendo dados obtidos de uma matriz de 2x2

Neste caso é obtida informação sobre uma matriz de 2x2 sensores, todos diferentes. Pode observar-se que três destes apresentam variações e um destes mantem-se constante durante este teste.

Um caso diferente é exibido na Figura 38, onde a aplicação recebe do sistema de leitura de sensores informação sobre um array de dois sensores. Estes apresentam gamas de valores bastante distintos, mantendo-se o Sensor1 sempre constante enquanto o Sensor2 apresenta rápidas e bruscas variações.

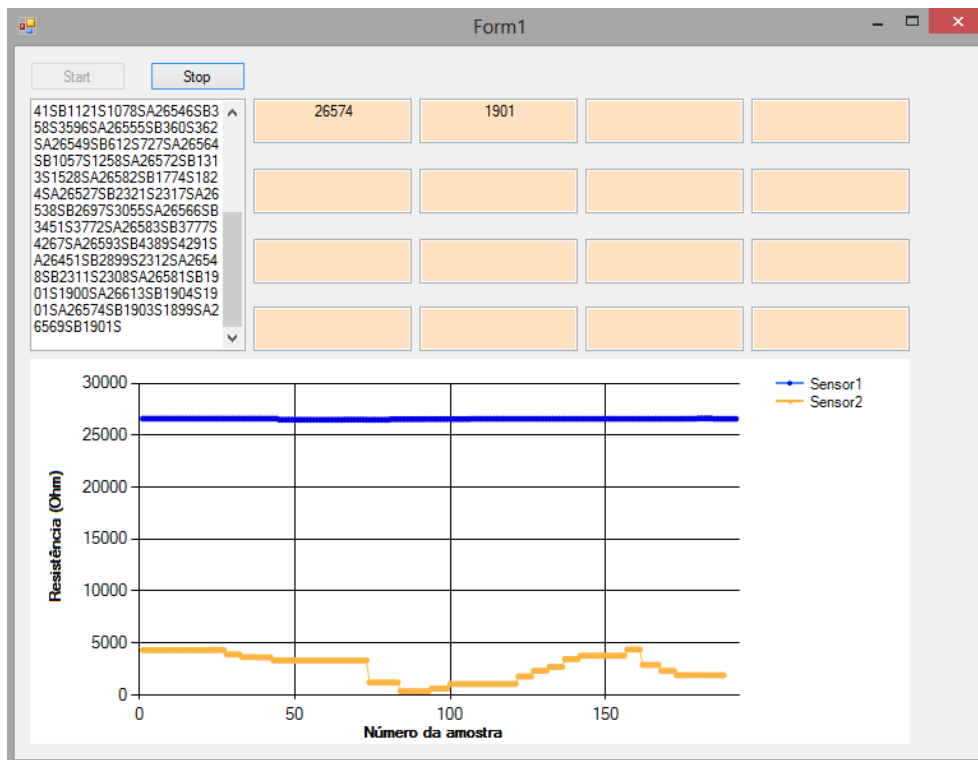


Figura 38: Plataforma de testes recebendo dados obtidos de um array de 2 posições

Com estes exemplos comprova-se a estabilidade e bom desempenho deste *software* em vários casos distintos.

6.4 Conclusões

Com o desenvolvimento desta plataforma para testes pretendia-se obter um ambiente simples, leve e funcional no qual fosse possível adquirir e analisar dados com clareza, enviados, via porta série, pelo sistema de leitura de sensores de temperatura impressos.

Com base nos resultados obtidos, considera-se esse objetivo principal como atingido visto que cumpre todos os requisitos inicialmente pretendidos para este, no entanto, alguns pormenores poderiam ter sido atendidos de forma distinta, resultando em alterações para o ambiente gráfico.

Visto que, a informação medida de vários sensores é desenhada no mesmo gráfico de linhas, a sua escala está sempre dependente do sensor com valor de resistência superior, o que pode ser prejudicial quando se procura por pequenas variações nos sensores com valores muito inferiores. Uma solução para este problema seria dar ao utilizador a possibilidade de separar a informação em vários gráficos, com escalas independentes.

Por fim, visto que o sistema está desenvolvido especificamente para sensores térmicos, e que os sistemas térmicos geralmente apresentam alguma inércia a variações, definiu-se o período de atualização de dados do gráfico de linhas para um segundo, porém, caso se pretendesse identificar pulsos num sistema resistivo, este valor teria de ser significativamente reduzido.

7. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Durante este capítulo é apresentado uma conclusão geral com base naquilo que foi realizado e analisado durante esta dissertação e são propostas algumas ações de aperfeiçoamento que poderiam ser realizadas como trabalho futuro.

Finalmente, concluídos todos os passos para a obtenção de um sistema completo para a leitura de sensores térmicos obtidos através de tecnologias de impressão, analisa-se com mais detalhe o objeto resultante.

Em primeiro lugar, realizou-se uma matriz de sensores térmicos impressa, a qual mostrou uma boa resposta à variação de temperatura e cujas propriedades físicas poderiam significar uma vantagem em diversas aplicações, podendo ser aplicado em superfícies não planas, que apresentem movimento ou deformação, permitindo medir as diferentes temperaturas na área apresentada pela matriz, como é o caso da prótese transfemural, anteriormente referida ou podendo ser adaptada a diferentes tipos de próteses. No entanto, a resistência elétrica e a resposta à temperatura apresentada pelos sensores tinha tendência a cair naturalmente ao longo das experiências. Para aprimoramento deste passo, propunha-se como trabalho futuro a realização da matriz utilizando um material termoelétrico distinto objetivando à obtenção de sensores cuja resistência se mantenha constante perante temperaturas constantes, visto que, a resistência dos sensores realizados tinha tendência a diminuir ao longo da realização dos testes experimentais. Outra ideia, seria a realização de uma tela diferente, para impressão de matrizes com uma maior dimensão e número de sensores, originando assim novas possibilidades de utilização. Por fim, poder-se-ia imprimir os sensores utilizando uma tecnologia diferente, como por exemplo, em *inkjet printing*.

Em segundo lugar, foi desenhado e montado um sistema eletrônico para leitura de sensores e matrizes resistivos. Com apoio nos testes realizados, constatou-se que o sistema apresentava uma larga zona de alcance, garantida pelo banco de resistências presente no circuito, e uma precisão razoável de leitura. A montagem deste sistema eletrônico é relativamente simples e não apresenta dimensões elevadas.

Futuramente, para garantir uma melhoria deste bloco, melhorar-se-ia a precisão do sistema, dimensionando-se um filtro em *hardware*, para eliminar o ruído presente nas leituras. Com o intuito de reduzir o preço de custo do sistema, seria necessário substituir o atual MCU

por um com que contenha apenas as potencialidades necessárias, visto que este não utiliza grande parte das suas neste projeto. Por último, substituir-se-ia a comunicação série, por comunicação sem fios, utilizando, por exemplo, um módulo de Bluetooth. Esta alteração tornaria o sistema totalmente móvel, e neste caso, poder-se ia enviar os dados para um *smartphone*.

Seguidamente, e porque o anterior não funcionaria sem este, implementou-se o *firmware* para o MCU, responsável por comandar todo o circuito de aquisição e comunicar os dados obtidos.

Foi possível observar que este corria fluidamente, mantendo a taxa de aquisição constante e a um valor razoável e nunca bloqueando por existência de erro. Foi também programado um filtro digital para a leitura dos valores dos sensores, no entanto, um dos melhoramentos futuros passaria pela implementação de um filtro mais eficaz. Também a taxa de leitura e envio de dados poderia ser melhorada, aperfeiçoando tempos entre comunicações e medições.

Em último lugar, foi desenvolvida uma plataforma de para testes, cuja utilidade é mostrar de forma simples, a evolução térmica medida em cada sensor, e o último valor lido em cada sensor da matriz em monitorização. Esta interface gráfica é de uso extremamente simples.

Para seu aperfeiçoamento, define-se como trabalho futuro a possibilidade do utilizador separar os gráficos dos diferentes sensores por várias janelas, permitindo uma melhor visualização. Seria também importante permitir ao utilizador a inserção da equação que relaciona a resistência e a temperatura para cada sensor da matriz, podendo assim o utilizador observar as temperaturas medidas e não os valores de resistência.

Em suma, dão se os objetivos principais como atingidos, visto que o projeto está totalmente funcional, apesar de algumas melhorias que poderiam ser efetuadas, este é capaz de medir, calcular e imprimir os valores de diferentes matrizes de sensores termoresistivos.

Fica como principal trabalho futuro a aplicação deste numa prótese transfemural, com uma matriz de sensores indicada a este propósito.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Enhanced printed temperature sensors on flexible substrate.pdf.” .
- [2] S. . B. Khan, S. . B. Tinku, L. . B. Lorenzelli, and R. S. . Dahiya, “Flexible tactile sensors using screen-printed P(VDF-TrFE) and MWCNT/PDMS composites,” *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3146–3155, 2015.
- [3] J. Courbat, Y. B. Kim, D. Briand, and N. F. De Rooij, “INKJET PRINTING ON PAPER FOR THE REALIZATION OF HUMIDITY AND TEMPERATURE SENSORS Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Institute of Microengineering (IMT), Sensors , Actuators and Microsystems Laboratory (SAMLAB), Neuchâtel , Switzerland,” pp. 1356–1359, 2011.
- [4] W. Cheng, S. Yuan, and J. Song, “Studies on preparation and adaptive thermal control performance of novel PTC (positive temperature coefficient) materials with controllable Curie temperatures,” *Energy*, vol. 74, pp. 447–454, Sep. 2014.
- [5] W. Cheng, W. Wu, J. Song, Y. Liu, S. Yuan, and N. Liu, “A new kind of shape-stabilized PCMs with positive temperature coefficient (PTC) effect,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 79, pp. 470–476, Mar. 2014.
- [6] W. Cheng, J. Song, Y. Liu, S. Yuan, W. Wu, and Z. Xu, “Theoretical and experimental studies on thermal control by using a novel PTC material with room temperature Curie point,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 74, pp. 441–447, Jul. 2014.
- [7] J. Liu, Y. Li, and H. Zhao, “A Temperature Measurement System Based on PT100,” *2010 Int. Conf. Electr. Control Eng.*, pp. 296–298, Jun. 2010.
- [8] D. Wang, L. Song, and Z. Zhang, “Contact temperature measurement system based on tungsten-rhenium thermocouple,” *2010 Int. Conf. Comput. Appl. Syst. Model. (ICCCASM 2010)*, no. Iccasm, pp. V12–660–V12–663, Oct. 2010.
- [9] T. Lian, “Research and Implement of Thermocouple Sensor and Microcontroller Interface,” pp. 10–12, 2010.
- [10] “ecil termopares.” [Online]. Available: <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/termopares/>. [Accessed: 02-Dec-2015].
- [11] F. Reverter and J. Altet, “MOSFET temperature sensors for on-chip thermal testing,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 203, pp. 234–240, Dec. 2013.
- [12] M. Sasaki, M. Ikeda, and K. Asada, “A Temperature Sensor With an Inaccuracy of,” vol. 21, no. 2, pp. 201–208, 2008.
- [13] C. Yu, Z. Wang, J. Zhu, X. Qiu, O. Jon, H. Yu, and H. Jiang, “A MECHANICALLY STRETCHABLE TEMPERATURE SENSOR BASED.”
- [14] H. Liu, “A Low-Power Wide-Range Interface Circuit for Nanowire Sensor Array Based on Resistance-to-Frequency Conversion Technique,” pp. 13–16, 2009.
- [15] H. Chueh and J. V Hat, “A real-time data acquisition system for a hand-held electronic nose (H 2 EN),” vol. 83, 2002.
- [16] M. Malfatti, M. Perenzoni, D. Stoppa, A. Simoni, and A. Adami, “A High Dynamic Range CMOS Interface for Resistive Gas Sensor Array with Gradient Temperature Control,” no. April 2006, pp. 2013–2016, 2013.
- [17] W. Zhou, A. B. Belayl, K. Davisl, and N. Sorloaica-hickmanl, “Transparent Conductive Film Fabrication by Carbon Nanotube Ink Spray Coating and Ink-Jet Printing,” pp. 2324–2327, 2011.
- [18] Y. Jang, Y. D. Park, J. A. Lim, H. S. Lee, W. H. Lee, and K. Cho, “Patterning the organic electrodes of all-organic thin film transistors with a simple spray printing technique,”

- Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, no. 18, p. 183501, 2006.
- [19] X. Liu, T. Tarn, F. Huang, and J. Fan, “Recent advances in inkjet printing synthesis of functional metal oxides,” *Particuology*, vol. 19, pp. 1–13, 2014.
- [20] A. Abdellah, D. Baierl, B. Fabel, P. Lugli, and G. Scarpa, “Exploring Spray Technology for the Fabrication of organic devices based on Poly (3-hexylthiophene),” vol. 8, pp. 831–834, 2009.
- [21] E. Ngo, S. Venkatesan, D. Galipeau, and Q. Qiao, “Polymer Photovoltaic Performance and Degradation on Spray and Spin Coated Electron Transport Layer and Active Layer,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 7, pp. 2372–2378, Jul. 2013.
- [22] “Melinex 505.” [Online]. Available: <http://www.tekra.com/products/films/polyester-films/polyester-pet/melinex-st505-1>. [Accessed: 01-Oct-2015].
- [23] “Novacentrix HPS-021LV.” [Online]. Available: https://store.novacentrix.com/v/vspfiles/assets/images/metalon_hps-021lv_2230.1.pdf. [Accessed: 01-Oct-2015].
- [24] “LINKAM THMS 600.” [Online]. Available: http://www.intergen.ru/files/tovar/100_200/165/y_91bb195d.jpg.