

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Bruno Emílio Martins Ferreira

Soluções para Instrumentação de um Molde em Ambiente Industrial

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica
Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Outubro de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Bruno Emílio Martins Ferreira

Endereço eletrónico: Brunoemf1993@gmail.com Telefone: 916745492

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14399288

Título da dissertação: Soluções para Instrumentação de um Molde em Ambiente industrial

Orientador:

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Ano de conclusão: 2017

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero deixar um agradecimento especial à minha família, porque sempre acreditaram em mim e me acompanharam durante todos os momentos. Pela companhia e suporte, e sobretudo pela educação que me deram, permitindo-me atingir os meus objetivos e ser o homem que sou hoje.

Quero também agradecer ao meu orientador desta dissertação, Professor Doutor Luís Gonçalves, por todo o apoio e conhecimento partilhado neste percurso. Uma palavra especial de apreço também para o Professor Doutor Luís Rocha e Professor Doutor Alexandre Silva por toda a ajuda neste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, Carlos Silva, Luís Vinhas e Rafael Névoa, por toda a ajuda dada nesta jornada, pela boa disposição e pelos momentos de companheirismo e amizade, um muito obrigado.

Aos meus amigos de sempre e companheiros de curso, por todos os momentos de divertimento, pela confiança depositada e por nunca me abandonarem, um obrigado especial.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento especial à minha namorada, Filipa Pereira, por todo o apoio, alegria e compreensão ao longo desta jornada, reconfortando-me nos piores momentos e respeitando sempre o meu trabalho.

A todos, um muito obrigado!

RESUMO

O estado atual da economia, as constantes alterações dos valores da matéria-prima e o aumento da concorrência têm contribuído para o desgaste da rentabilidade dos fabricantes de peças de injeção. Uma das possíveis medidas para contrariar estes aspetos passa por reduzir os custos de produção através do desenvolvimento de moldes mais eficientes e de custo reduzido.

Para assegurar um aumento do desempenho do molde é necessário haver uma evolução ao nível da incorporação do conhecimento tecnológico no molde. Ao serem incorporados sistemas avançados que permitem um controlo contínuo e em tempo real de determinados parâmetros do molde, possibilita que haja um aumento da eficiência do seu processo.

Esta dissertação foca-se na implementação da instrumentação necessária para realizar a monitorização contínua das componentes responsáveis pelo controlo da temperatura e deformação do molde, assim como as condições ambientais em que este está inserido. A leitura da temperatura é feita com a utilização de um termopar e consequente circuito de leitura, enquanto que a deformação é medida utilizando um extensómetro ligado a uma configuração de ponte de Wheatstone de quatro ramos ativos.

A resposta dos sensores utilizados foi testada individualmente de forma a verificar o seu comportamento nas várias situações a que o molde é submetido. Do trabalho desenvolvido resultou um protótipo do sistema de instrumentação que permite viabilizar a abordagem proposta, mas com um custo mais reduzido que as outras abordagens existentes no mercado.

Palavras-chave: Moldes eficientes, Sistema de Instrumentação, Sensores de Temperatura, Sensores de Deformação.

ABSTRACT

The current state of the economy, the constant changes of the feedstock and the increase of the competition has contributed to the wear and tear of the profitability of the injection parts manufacturers. One of the possible ways to contradict these aspects is to reduce the costs of production through the development of more efficient and cost-effective molds.

To ensure an increase in mold performance it's necessary to have an improvement regarding the incorporation of technological knowledge in the mold. The incorporation of advanced systems, which allows continuous and real time monitoring of certain parameters, enables increased efficiency of its process.

This dissertation focuses on the implementation of the necessary instrumentation to perform the continuous monitoring of the components responsible for temperature and strain control in the mold, and the environmental conditions in which it is inserted. The measurement of temperature data is made with the use of a thermocouple and consequent reading circuit, while the strain is measure with a strain gage connected to a Wheatstone bridge with four active branches.

The response of the used sensors was tested individually to verify their behaviour in the various situations to which the mold is submitted. The developed work resulted in a prototype of the instrumentation system that allows the proposed approach to be feasible, but at a lower cost than the other approaches in the market.

Keywords: Efficient Mold, Instrumentation System, Temperature Sensors, Strain Sensors.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas.....	xiii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xv
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Estado da Arte	3
1.5 Organização e Estrutura.....	5
2. Fundamentação Teórica.....	7
2.1 Sensores de Fibra Ótica - FBG	7
2.1.1 Princípio de Funcionamento.....	8
2.1.2 Sensibilidade à Deformação e à Temperatura	9
2.2 Sensores de Temperatura.....	10
2.2.1 Termopar.....	11
2.2.2 Detetor de Temperatura Resistivo	15
2.2.3 Termístor.....	17
2.2.4 Comparação das Tecnologias Abordadas	19
2.3 Sensores de Humidade	21
2.4 Sensores de Deformação	22
2.4.1 Extensómetro.....	22
2.4.2 Piezoelétrico.....	25
2.4.3 Comparação das Tecnologias Abordadas	27
2.5 Protocolos de Comunicação.....	28
2.5.1 Serial Peripheral Interface.....	28

2.5.2	Inter-Integrated Circuit	30
3.	Desenvolvimento do Sistema de Leitura	33
3.1	Descrição do Sistema.....	33
3.1.1	Seleção dos Componentes de Hardware	34
3.2	Caracterização do Termopar.....	36
3.2.1	Circuito de Leitura	36
3.2.2	Ligação a Vários Termopares	40
3.2.3	Rotina de Leitura do Termopar	41
3.2.4	Procedimento Experimental.....	42
3.3	Caracterização do Sensor de Humidade.....	46
3.3.1	Rotina de Leitura do Sensor.....	47
3.3.2	Procedimento Experimental.....	48
3.4	Caracterização do Extensómetro	49
3.4.1	Instalação do Extensómetro.....	49
3.4.2	Circuito de Leitura	51
3.4.3	Rotina de Leitura do Extensómetro	55
3.4.4	Procedimento Experimental.....	56
3.5	Cenário de Aplicação do Sistema de Instrumentação.....	60
4.	Conclusão e Trabalho Futuro	61
	Bibliografia.....	63
	Anexo I – Esquemático do Sistema de Leitura	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: REPRESENTAÇÃO DE UM MOLDE DE INJEÇÃO [3].....	3
FIGURA 1.2: SENSOR DE TEMPERATURA E PRESSÃO DA KISTLER [4].....	5
FIGURA 2.1: REPRESENTAÇÃO CONCEPTUAL DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM FBG [8].....	8
FIGURA 2.2: ESTRUTURA DE CINCO SENSORES DE REDES BRAGG EM UMA SÓ FIBRA ÓTICA.	9
FIGURA 2.3: VARIAÇÃO DA RESPOSTA DO COMPRIMENTO DE ONDA DE UMA REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.	10
FIGURA 2.4: ESTRUTURA DE UM TERMOPAR TIPO J [9].....	11
FIGURA 2.5: VARIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DE UM TERMOPAR TIPO J, TIPO K E TIPO T COM A TEMPERATURA [11].....	14
FIGURA 2.6: CIRCUITO DE LEITURA DE UM TERMOPAR DO TIPO K.....	14
FIGURA 2.7: CONFIGURAÇÕES EXISTENTES DO RTD. ESQUERDA, DOIS FIOS; CENTRO, TRÊS FIOS; DIREITA, QUATRO FIOS.....	16
FIGURA 2.8: RESPOSTA DA TEMPERATURA COM A RESISTÊNCIA DE UM TERMÍSTOR NTC E UM RTD [10].	18
FIGURA 2.9: CIRCUITO DE LEITURA DE UM TERMÍSTOR USANDO UM DIVISOR DE TENSÃO.....	19
FIGURA 2.10: FORMATO TÍPICO DE UM EXTENSÓMETRO DE UM ÚNICO ELEMENTO. (A) LARGURA DA GRADE; (B) COMPRIMENTO DA GRADE; (1) COMPRIMENTO DA BASE; (2) LARGURA DA GRADE..	22
FIGURA 2.11: CIRCUITO PONDE DE WHEATSTONE.....	23
FIGURA 2.12: EFEITO PIEZOELÉTRICO.	26
FIGURA 2.13: CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL PARA UM SENSOR PIEZOELÉTRICO.....	26
FIGURA 2.14: BARRAMENTO BÁSICO DE SPI.....	28
FIGURA 2.15: LIGAÇÃO ENTRE VÁRIOS DISPOSITIVOS SPI.....	29
FIGURA 2.16: DIAGRAMA TEMPORAL DE UMA COMUNICAÇÃO SPI COM CPHA = 0. É ILUSTRADA A FORMA DE ONDA DO SCLK PARA CPOL = 0 E CPOL = 1 [31].	30
FIGURA 2.17: LIGAÇÕES ENTRE DOIS DISPOSITIVOS MASTERS E DOIS SLAVES I2C.	30
FIGURA 2.18: DIAGRAMA TEMPORAL DE UMA COMUNICAÇÃO I2C [32].....	31
FIGURA 3.1: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO.....	33
FIGURA 3.2: TERMOPAR DO TIPO K ESCOLHIDO.....	34
FIGURA 3.3: SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE ESCOLHIDO.	35

FIGURA 3.4: EXTENSÓMETRO ESCOLHIDO.	35
FIGURA 3.5: RASPBERRY PI 3.	36
FIGURA 3.6: CIRCUITO DE LEITURA IMPLEMENTADO PARA LEITURA DO TERMOPAR.	37
FIGURA 3.7: DIAGRAMA DE BLOCOS DO DISPOSITIVO ADS1118.	38
FIGURA 3.8: LIGAÇÃO DE VÁRIOS DISPOSITIVOS ADS1118 À RASPBERRY PI.	40
FIGURA 3.9: FLUXOGRAMA DE LEITURA DA TEMPERATURA.	41
FIGURA 3.10: SETUP DE MONTAGEM DO TERMOPAR UTILIZANDO O NI-9211.	43
FIGURA 3.11: PCB DE TESTE PARA LEITURA DO TERMOPAR.	43
FIGURA 3.12: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS DOIS SISTEMAS DE LEITURA DURANTE O AQUECIMENTO DO FORNO.	44
FIGURA 3.13: EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS DOIS SISTEMAS DE LEITURA DURANTE O ARREFECIMENTO DO FORNO.	45
FIGURA 3.14: RESPOSTA DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO TERMOPAR.	45
FIGURA 3.15: FLUXOGRAMA DE LEITURA DO SENSOR DE HUMIDADE E TEMPERATURA.	47
FIGURA 3.16: RESPOSTA DO SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE DURANTE O ENSAIO.	48
FIGURA 3.17: ESQUEMÁTICA DE UMA PONTE DE WHEATSTONE COMPLETA.	49
FIGURA 3.18: INSTALAÇÃO DOS EXTENSÓMETROS. A IMAGEM À ESQUERDA REPRESENTA A PARTE INFERIOR DA BARRA METÁLICA, A IMAGEM À DIREITA A PARTE SUPERIOR.	50
FIGURA 3.19: DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO DE LEITURA DO EXTENSÓMETRO.	51
FIGURA 3.20: ESQUEMÁTICO DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO INA128.	52
FIGURA 3.21: ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DA TENSÃO DE REFERÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO.	52
FIGURA 3.22: ESQUEMÁTICO DO FILTRO PASSA-BAIXO 2º ORDEM.	53
FIGURA 3.23: DIAGRAMA DE BLOCOS DO ADS1115.	54
FIGURA 3.24: FLUXOGRAMA DE LEITURA DO EXTENSÓMETRO.	56
FIGURA 3.25: ILUSTRAÇÃO DO ENSAIO DA APLICAÇÃO DE UMA FORÇA SOBRE UMA BARRA METÁLICA SUSPensa.	57
FIGURA 3.26: DIAGRAMA COM AS LIGAÇÕES DE UMA PONTE COMPLETA AO NI 9237 [40].	57
FIGURA 3.27: PCB DE TESTES PARA LEITURA DOS EXTENSÓMETROS.	58
FIGURA 3.28: RESULTADOS DOS DOIS SISTEMAS DE LEITURA PARA O ENSAIO DA APLICAÇÃO DE FORÇAS SOBRE UMA BARRA METÁLICA.	59
FIGURA 3.29: VISTA DE TOPO DO SISTEMA DE INSTRUMENTAÇÃO.	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: DESVIO EM OHMS E GRAUS CENTIGRADOS DO VALOR ABSOLUTO DE UM RTD EM PLATINA [13].	16
TABELA 2.2: COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUATRO TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA [10].	20
TABELA 2.3: COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUATRO TIPOS DE SENSORES DE DEFORMAÇÃO.	27
TABELA 3.1: DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO DE LEITURA.	38
TABELA 3.2: MAPEAMENTO DOS ENDEREÇOS DO CONFIG REGISTER.	40
TABELA 3.3: FÓRMULAS DE CONVERSÃO DA TEMPERATURA E HUMIDADE.	47
TABELA 3.4: MAPEAMENTO DOS ENDEREÇOS DO CONFIG REGISTER.	55

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

°C	Grau Centígrado (Temperatura)
C	Coulomb (Carga)
FBG	Fiber Bragg Grating
GUI	Graphical User Interface
HR	Humidade Relativa
Hz	Hertz (Frequência)
I2C	Inter Integrated Circuit
LSB	Least Significant Byte
m	Metros (Distância)
MSB	Most Significant Byte
N	Newton (Força)
NI	National Instruments
NTC	Negative Temperature Device (Termístores)
PCB	Printed Circuit Board
PTC	Positive Temperature Device (Termístores)
PGA	Programmable Gain Amplifier
RTD	Resistive Temperature Device
SoC	System-on-Chip
SONAR	Sound Navigation And Ranging
UV	Radiação Ultravioleta
V	Volt (Tensão)
Ω	Ohm (Resistência)
ΔR	Variação Resistência
Δt	Variação Temperatura

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o enquadramento desta dissertação, bem como a sua motivação. É feita ainda uma exposição dos objetivos, do estado da arte e esclarecida a organização e respetiva estrutura.

1.1 Enquadramento

Durante o processo de fabrico de peças por injeção encontram-se diversos problemas e falhas associadas ao molde, originando processos instáveis, evidenciados pelo aumento do número de peças defeituosas, o que pode levar a morosas ações de manutenção que podem comprometer as linhas de montagem dos fabricantes. Isto ocorre devido à falta de sistemas que avaliem a cada instante o estado de funcionamento de componentes críticos [1].

Esta dissertação pretende expor uma solução para este problema ao desenvolver um sistema de instrumentação, que incorporando vários sensores, permita um controlo contínuo e em tempo real de determinados parâmetros do molde e do processo. O sistema permite a monitorização de vários parâmetros, tais como, pressão, caudal, distância, humidade, temperatura e deformação, sendo os três últimos abordados neste documento. Estes sensores permitem monitorizar todas as zonas responsáveis pelo fabrico das peças.

O trabalho realizado centra-se no desenvolvimento do sistema de instrumentação, sensores e respetiva comunicação com o sistema embebido, com especial foco na caracterização e teste dos sensores escolhidos face às diferentes condições a que estão sujeitos no interior do molde.

1.2 Motivação

O ambiente deflacionário da economia global, a constante variação dos preços da matéria-prima e o aumento da concorrência têm contribuído para o desgaste da rentabilidade dos fabricantes de peças de injeção. Para isso torna-se fundamental a

redução de custos de produção, quer seja através do desenvolvimento de moldes mais eficientes ou na otimização do peso e/ou dimensões do molde.

A volatilidade do mercado da indústria automóvel, caracterizada pelas mudanças frequentes no consumo, em simultâneo com a necessidade de eliminação de desperdícios, em particular pela redução dos *stocks*, define a estratégia da produção *on-demand*. Esta tendência de mercado exige uma maior e mais rápida capacidade de resposta em tempo real, assegurada pela estabilidade da produção.

Os moldes atuais incorporam sistemas que permitem o controlo de parâmetros do processo de injeção, que combinados com o índice de qualidade das peças plásticas resultam em *inputs* que permitem ajustar os parâmetros na máquina de injeção. No entanto, apesar da evolução das tecnologias que asseguram o funcionamento do molde, tais como, o controlo da temperatura, o sistema de extração e o sistema de injeção, continuam a existir diversos problemas com o molde devido à falta de monitorização durante o processo de fabrico. Para além disso, o custo de cada sensor utilizado para o controlo dos parâmetros do processo de injeção é demasiado elevado.

Assim, o sistema desenvolvido nesta dissertação terá vantagens em relação aos existentes pois permite monitorizar todas as áreas do molde, aumentando a eficiência do processo de injeção do molde, e reduzindo os custos na qualidade para a empresa.

1.3 Objetivos

O objetivo predominante da dissertação é garantir a aquisição (fiabilidade) de todos os sensores utilizados de acordo com as especificações definidas.

Para atingir essa meta é necessário: em primeiro lugar, definir a arquitetura do sistema de instrumentação para a medição da temperatura, humidade e deformação das várias zonas do molde, sabendo de antemão o tipo de protocolo de comunicação que cada sensor vai utilizar para comunicar com o sistema embebido.

Seguidamente, parte-se para a caracterização de cada sensor e do seu circuito de leitura. De maneira a verificar o cumprimento dos requisitos do sistema são simuladas as condições no interior do molde, e com recurso a uma placa de aquisição de dados da NI (National Instruments), vão ser comparados os resultados dos dois sistemas de forma a apurar a precisão do sistema de leitura. Este método vai ser utilizado para o

sensor de temperatura e deformação. Após a aprovação de todos os circuitos de leitura, é desenhado o protótipo final do sistema de instrumentação contendo todos os circuitos de leitura em uma só PCB (*Printed Circuit Board*).

1.4 Estado da Arte

O processo de moldação por injeção tornou-se numa das ferramentas de produção mais importantes para a indústria de plásticos. No mercado atual, é praticamente impossível fazer qualquer produto sem usar peças moldadas por injeção. Estão presentes em peças de interiores de automóveis, aparelhos domésticos, brinquedos, baldes, etc [2]. Na Figura 1.1 é possível ver representação de um molde de injeção e identificar os seus principais componentes.

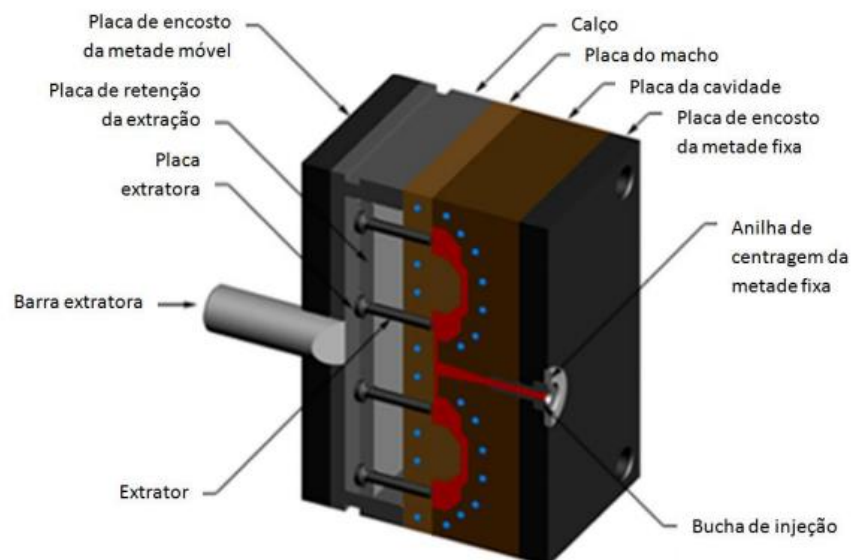


Figura 1.1: Representação de um molde de injeção [3].

Existem já soluções disponíveis para o controlo e monitorização do processo de injeção. Estas utilizam técnicas distintas das abordadas nesta dissertação e consistem em soluções isoladas, que permitem controlar os parâmetros da máquina de injeção e avaliar a qualidade da peça plástica. Atualmente, a instrumentação utilizada passa pela aplicação isolada de sensores de posição, contadores de ciclos, sensores de pressão e temperatura em alguns pontos que fornecem informações do processo de injeção.

Recentemente, foi introduzido o conceito de medição de pressão e de temperatura na cavidade do molde, permitindo descrever as condições de injeção durante a criação da peça plástica. Estes dados permitem obter informações sobre a geometria da peça, ou seja, se a peça está completa ou se possui defeitos geométricos, através da combinação dos parâmetros ideais do processo com os parâmetros reais.

Em certos casos, são aplicadas câmaras externas na máquina de injeção que permitem inspecionar a peça plástica após a extração. Estas câmaras não têm qualquer ligação ao molde e tal como a restante tecnologia existente, funcionam de forma independente e sem cruzamento instantâneo com outro tipo de dados. Em suma, as soluções presentes no mercado não permitem monitorizar o molde, mas sim controlar o processo de injeção e, pontualmente avaliar se a peça plástica resultante do molde está completa.

O projeto **TIPSS** – *Tools for Innovative Product-Service-Systems for Global Tool and Die Networks*, desenvolveu ferramentas colaborativas para integração da informação entre fornecedor e cliente. Este projeto trouxe algum avanço ao nível da integração da informação recolhida por sensores, sendo que a informação gerada ficava disponível no local para consulta pelo operador ou técnicos autorizados, ou poderia ser consultada remotamente. Os utilizadores recebem alertas para poder alertar para as anomalias e/ou fornecer informações para a sua resolução.

Relativamente aos sensores disponíveis no mercado, existem empresas que se dedicam ao fabrico de soluções próprias para moldes por injeção, sendo que duas das maiores empresas na área são a Kistler e a Priamus. Estas dispõem de uma vasta gama de sensores mediante as necessidades da aplicação capazes de medir pressão e temperatura.



Figura 1.2: Sensor de temperatura e pressão da Kistler [4].

Exemplo destes sensores é o modelo 6190 da Kistler, que permite medir, em simultâneo, pressão e temperatura, a sua representação está ilustrada na Figura 1.2. O que distingue estes sensores dos demais é o seu encapsulamento, sendo idealizados para encaixar perfeitamente na cavidade do molde. No entanto, e como já foi referido estes sensores têm um custo muito elevado (1200 €/uni.) e uma vez que é preciso uma constante monitorização em várias zonas do molde torna-se insuportável para a empresa que desenvolve o molde ter vários sensores deste tipo alojados no molde. Quanto a sensores de deformação, ainda não existe nenhuma empresa que se dedique ao desenvolvimento especializado deste tipo para moldes por injeção e, portanto, a solução que vai ser apresentada neste documento referente à monitorização dos veios é pioneira nesta área.

1.5 Organização e Estrutura

O presente documento encontra-se dividido em 4 capítulos, denotando a seguinte estrutura:

No capítulo introdutório são expostos o enquadramento e a motivação que levaram à realização deste projeto de investigação, sendo igualmente apresentados os principais objetivos.

No segundo capítulo é descrita a teoria das várias tecnologias de sensores de temperatura, humidade e deformação abordados no documento e terminando com a

explicação dos protocolos de comunicação utilizados no desenvolvimento do sistema de instrumentação. O capítulo inicia-se com uma breve explicação sobre sensores de fibra ótica, mais concretamente os FBGs (*Fiber Bragg Grating*), e como se pode utilizá-los para medir temperatura e/ou deformação. Seguidamente, são apresentados três tipos de tecnologias de sensores de temperatura, sendo também expostos o seu funcionamento, as suas vantagens e desvantagens. É ainda feita uma exposição sobre os tipos de medição da humidade existentes. Após isso, são abordados, dois tipos de tecnologias de sensores de deformação, sendo igualmente expostos o funcionamento de cada um, bem como as vantagens e desvantagens. Por fim, é indicada a tecnologia mais correta para medir cada parâmetro nesta aplicação.

No capítulo três é apresentada a arquitetura do sistema de instrumentação. O capítulo inicia-se com uma visualização geral do sistema de instrumentação, sendo depois dada a devida atenção à escolha dos vários componentes tais como, o microcontrolador, o sensor de temperatura e humidade e o de deformação com base nos requisitos da aplicação. Após isso, é explicado o funcionamento detalhado do circuito de condicionamento de sinal para o sensor de temperatura, bem como todo o procedimento experimental que verifica o seu funcionamento. Após isso, é explicado o funcionamento do sensor de humidade e ainda demonstrado o procedimento experimental. Em seguida, são repetidos os mesmos passos realizados para o sensor de temperatura, mas desta feita para o sensor de deformação. O capítulo encerra com a ilustração do protótipo final do sistema de instrumentação que acopla todos os sensores utilizados.

Finalmente, o quarto e último capítulo apresenta-se as conclusões e um conjunto de sugestões de trabalho futuro.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O propósito deste capítulo é apresentar algumas tecnologias que servem de base para se poder medir os parâmetros desejados, a temperatura, a humidade e a deformação. O capítulo inicia-se com a apresentação de um sensor ótico que permite medir vários parâmetros, estando a temperatura e a deformação incluídos. Seguidamente, é explicado o funcionamento de três tecnologias de sensores de temperatura, bem como as suas características. Após isso, é introduzida uma breve explicação sobre a humidade e como é possível medir o seu valor. É ainda apresentada, e à semelhança dos sensores de temperatura, algumas tecnologias que permitem medir a deformação no molde, explicando o funcionamento de cada uma e as suas características. Por último, é feito um esclarecimento dos tipos de protocolos de comunicação utilizados nesta dissertação.

2.1 Sensores de Fibra Ótica - FBG

Nos últimos anos, tem-se assistido à popularização da fibra ótica como método de comunicação de dados, o que proporcionou um crescimento significativo dos sensores a si associados. É neste contexto que surgem os sensores de fibra ótica com redes de Bragg ou FBG (*Fiber Bragg Grating*). Entre as principais vantagens, destacam-se a imunidade a interferências eletromagnéticas, baixas perdas na transmissão, alta sensibilidade, dimensões reduzidas e isolamento elétrico e ainda, a sua confiabilidade a longo prazo [5].

Estes não são sensíveis a flutuações da amplitude da fonte ótica, uma vez que o mecanismo de leitura é baseado no comprimento de onda em detrimento da intensidade da luz. A rede de Bragg é inserida iluminando-se transversalmente a fibra ótica com um raio laser UV e utilizando uma máscara de fase para gerar um padrão de interferência no núcleo, mantendo assim a estrutura da fibra intacta. Por último, podem ser produzidos em larga escala e a baixo custo, oferecendo assim uma solução competitiva em termos de preço. Todas estas vantagens levam a que este tipo de sensores apresente um grande

crescimento nas mais distintas áreas da indústria, permitindo monitorizar grandezas físicas, tais como, temperatura, deformação, pressão, deslocamento e aceleração.

2.1.1 Princípio de Funcionamento

Os primeiros FBGs foram demonstrados pelo Dr. Kenneth O. Hill em 1978. Inicialmente, as estruturas de Bragg eram fabricadas utilizando um laser visível propagando ao longo do núcleo da fibra [6].

Este pode ser definido como uma microestrutura capaz de provocar uma alteração periódica no índice de refração do núcleo da fibra. O conceito em volta deste fenómeno designa-se por fotossensibilidade. Basicamente, é a capacidade de introduzir alterações permanentes no índice de refração do núcleo, quando exposto a luz com características específicas ao qual é sensível. Quer isto dizer que, se for injetada na fibra ótica luz de uma fonte de banda larga, apenas a luz dentro de uma região espectral muito estreita, centrada no comprimento de onda de Bragg, será refletida. A luz remanescente irá continuar o seu caminho pela fibra ótica sem qualquer perda. Isto sucede devido ao conceito da teoria da reflexão de Fresnel. Sucintamente diz que, quando um feixe de luz incide na fronteira entre dois meios diferentes, com um determinado ângulo, uma parte da luz é refratada e a outra parte é, novamente, refletida para o meio original com um ângulo de reflexão igual ao de incidência [7]. Nas estruturas de Bragg quando a luz incide na fronteira entre dois meios com índices de refração diferentes, esta reflete-se e refrata-se, dividindo-se em dois sinais diferentes. A Figura 2.1 demonstra o funcionamento destes sensores.

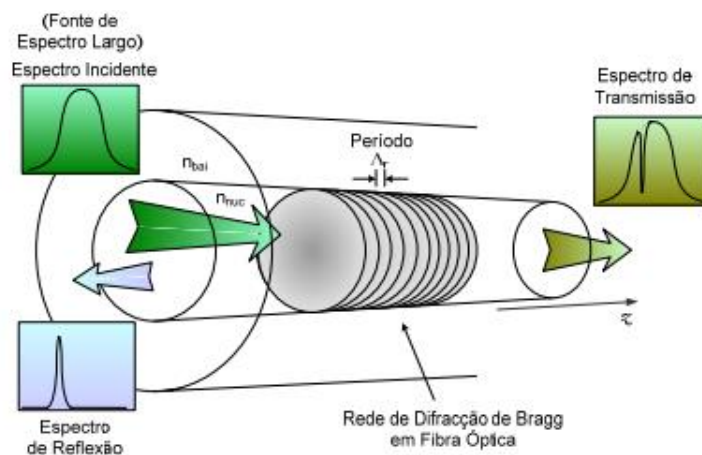


Figura 2.1: Representação conceptual do princípio de funcionamento de um FBG [8].

Os FBGs utilizam o comprimento de onda como mecanismo de leitura em detrimento da intensidade da luz. O comprimento de onda refletido, também denominado de onda de Bragg, λ_B , é obtido através da seguinte equação:

$$\lambda_B = 2n_{ef} \times \Lambda \quad (2.1)$$

onde n_{ef} é o índice de refração efetivo e Λ o período de cada elemento constituinte da rede Bragg. Este comprimento de onda varia consoante uma alteração no sistema de medida onde o sensor está colocado.

Uma das vantagens do FBG é a sua capacidade de multifuncionalidade, utilizando apenas uma fibra ótica é possível multiplexar vários sensores de redes Bragg separados por milímetros ou mesmo quilómetros [8]. Assim, com uma única fibra ótica é possível medir vários parâmetros tais como, temperatura e deformação. Para que seja possível, é necessário que cada sensor tenha um comprimento de onda Bragg específico. Na Figura 2.2, é possível verificar a representação de uma única fibra ótica contendo cinco sensores de redes Bragg, cada um com um comprimento de onda diferente.

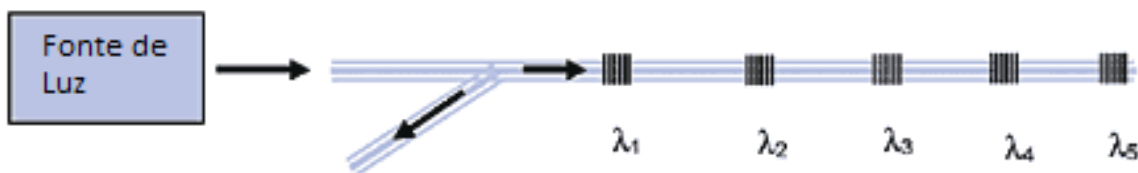


Figura 2.2: Estrutura de cinco sensores de redes Bragg em uma só fibra ótica.

2.1.2 Sensibilidade à Deformação e à Temperatura

O princípio básico de funcionamento dos sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica é dado pela equação (2.1), que corresponde à variação do comprimento de onda refletido, λ_B , de acordo com alteração da grandeza que o deforma ou que altera as suas propriedades físicas, nomeadamente a deformação e temperatura. A resposta à deformação é provocada quer pelo alongamento físico do sensor (e correspondente alteração no período da rede, Λ), quer pela alteração do índice de refração da fibra devido a efeitos fotoelásticos. A resposta à temperatura é originada pela natural expansão do material da fibra e à dependência da temperatura do índice de refração.

Assim, são apontadas algumas vantagens a este tipo de sensor, como a insensibilidade às flutuações de potência da fonte, às perturbações eletromagnéticas externas, e às perdas introduzidas pelos conectores ou pelas curvaturas na fibra ótica. A Figura 2.3 ilustra as condições de variação da resposta da rede de Bragg às duas grandezas físicas, deformação e temperatura. No caso 1, pode-se observar que o sensor está no seu estado normal. No caso 2, o sensor sofre uma deformação negativa (compressão) ou redução da temperatura. No caso 3, o sensor sofre uma deformação positiva ou aumento de temperatura.

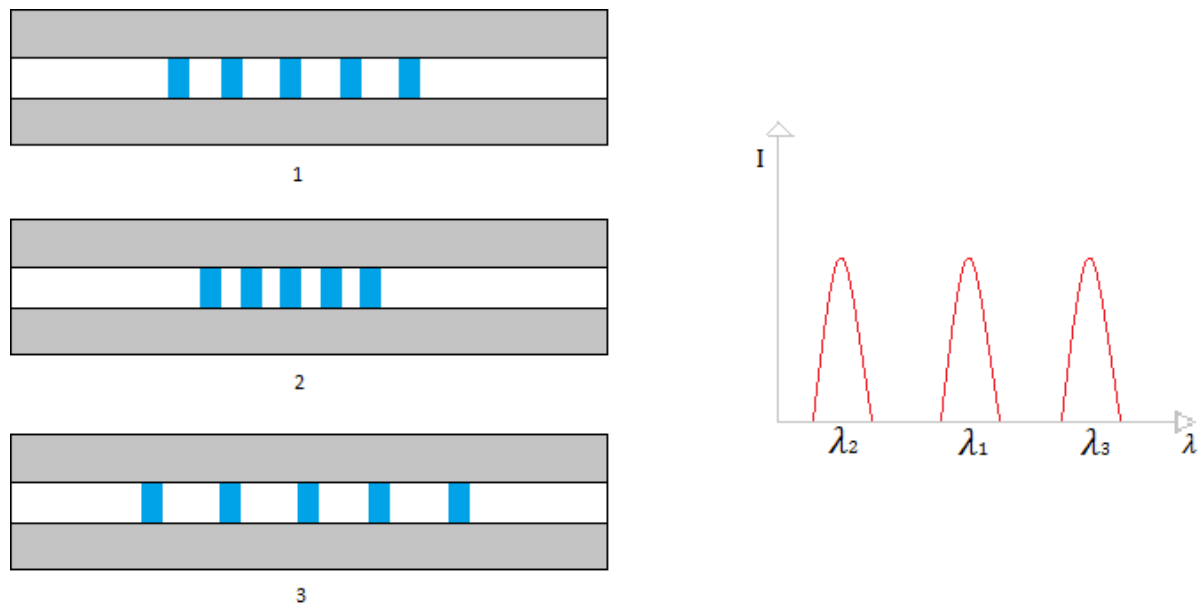


Figura 2.3: Variação da resposta do comprimento de onda de uma rede de Bragg em fibra ótica.

2.2 Sensores de Temperatura

Atualmente, conhecer a temperatura absoluta ou relativa de um ambiente é um aspecto crítico em variadas aplicações. Isto faz com que os sensores de temperatura sejam os mais comuns no universo das tecnologias de rastreamento. Prova disso, é o facto de outros tipos de sensores, tais como, pressão, fluxo, posição, entre outros, necessitem de monitorização da temperatura a que estão expostos, para garantirem a sua boa precisão, dado a medição ser afetada pela temperatura a que estão expostos.

Os sensores de temperatura mais utilizados e que serão abordados neste capítulo são os termopares, termístores e os detetores de temperatura resistivos (RTD). Cada uma destas tecnologias tem específicas características mediante os requisitos da aplicação, que podem ser ao nível do alcance, robustez, sensibilidade ou linearidade. De

notar que não existe um sensor de temperatura capaz de satisfazer toda e qualquer necessidade onde seja necessário a medição da temperatura, pois cada sensor tem a sua construção dependente da sua aplicação final, para assim manter uma taxa de fiabilidade elevada nas suas medições.

2.2.1 Termopar

O termopar é de longe o sensor de temperatura mais utilizado de todos os existentes no mercado. A sua popularidade vem da sua simplicidade de uso, e a velocidade de resposta perante alterações da temperatura.

Este sensor é do tipo termoelétrico, baseado no efeito Seebeck, e basicamente consiste em duas junções de metais distintos, tal como, o cobre ou o constantan. Uma das junções é mantida a uma temperatura constante chamada de junção fria, enquanto a outra é a junção de medição (quente) [9]. Quando as duas junções estão a diferentes temperaturas, existe uma diferença de potencial na junção permitindo medir a temperatura do sensor, tal como é demonstrado na Figura 2.4.

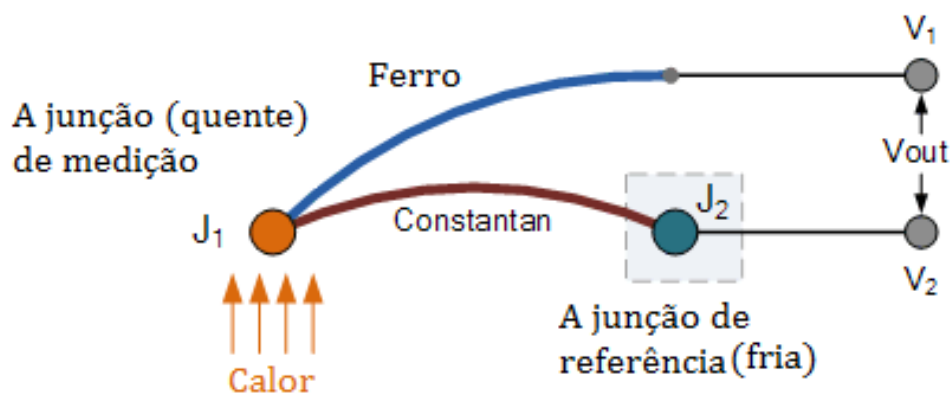


Figura 2.4: Estrutura de um termopar tipo J [9].

O princípio de operação do termopar é bastante simples. Quando fundidas, as duas junções de metais distintos sofrem o efeito Seebeck, que faz com que haja uma diferença de potencial de poucos milivolts entre elas. A tensão gerada entre as junções é chamada de efeito de Seebeck. A tensão de saída do termopar vai então variar conforme as alterações da temperatura. No entanto, como o termopar é um dispositivo de medição diferencial e não absoluto, é necessário saber o valor da junção de referência para se

obter com exatidão uma leitura da temperatura. Este processo é chamado de compensação da junção de referência (ou compensação da junção-fria).

Os termopares podem ser fabricados por uma variedade de metais distintos permitindo a leitura de temperaturas extremas, desde -200 °C a 2000 °C. Dada esta larga variedade de escolha de metais, foi adaptado um código *standard* internacional de pares de metais, combinando-os com base na linearidade desejada e diferença de potencial em função da temperatura. Os tipos mais comuns são o J, Ferro-Constantan, o T, Cobre-Constantan e o K, Níquel-Crômio [10].

Devido ao seu largo alcance de medida e baixo custo, os termopares tornaram-se o principal sensor de temperatura utilizado na indústria. Para além das vantagens já referidas, o termopar é ainda um sensor bastante robusto, é imune a choques e vibrações e ainda é o mais adequado para usar em ambientes mais adversos. Têm uma rápida resposta a variações de temperatura, uma vez que possui uma baixa capacidade térmica e reduzidas dimensões. Por último, já que não necessita de alimentação externa não corre o risco de sobreaquecer, tornando-o também um sensor seguro e sem interferir significativamente com a variável a medir [11].

No entanto, este não é um sensor perfeito tendo também algumas desvantagens. Para converter o sinal de tensão para temperatura é necessário um complexo condicionamento de sinal de maneira a que não introduza erros de precisão. É um sensor suscetível à corrosão, uma vez que consiste em dois metais distintos, e em certos ambientes estes podem corroer com o tempo, deteriorando a sua precisão. Consequentemente, é necessário um bom encapsulamento e manutenção. E ainda, é suscetível a ruído, dado que mede alterações de sinal na gama dos microvolts e o ruído dos campos elétricos e magnéticos dispersos pode ser um problema. Para isso, é necessário que o circuito de leitura tenha uma forte rejeição de frequência de linha (50 Hz) e dos seus harmónicos.

Para transformar o sinal lido pelo termopar em valores de temperatura é necessário resolver três situações, a tensão lida é muito baixa, é preciso fazer a compensação da junção de referência e a relação da tensão-temperatura não é linear. De seguida, vai ser analisado cada uma destas situações.

Tensão de saída muito baixa: como já foi referido, os tipos de termopares mais utilizados são o J, K e T. À temperatura ambiente, a sua tensão varia $52 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, e $41 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, respetivamente. Os outros tipos de termopares têm valores ainda menores. Isto faz com que seja necessário utilizar um amplificador com alto ganho, normalmente a rondar os 100, antes da conversão analógico-digital. Uma vez que, as pontas do termopar são compridas e costumam estar localizadas em ambientes eletricamente ruidosos, faz com que seja mais difícil distinguir o sinal do ruído induzido. Existem duas soluções para resolver este problema. A primeira passa por usar um amplificador diferencial para amplificar o sinal. Como o ruído existente aparece nos dois cabos, ao usar esta configuração, é eliminado. A segunda hipótese, é utilizar um filtro passa-baixo para remover o ruído fora de banda. É fundamental colocar o filtro antes de se fazer a amplificação do sinal.

Compensação da junção de referência: A temperatura da junção de referência tem de ser conhecida de forma a fazer uma leitura correta da temperatura com o termopar. As primeiras técnicas de compensação eram feitas utilizando um banho de gelo, onde se colocava lá a junção de referência, sabendo que a temperatura do banho de gelo era 0°C era possível saber a temperatura da junção de medição. Este método foi utilizado exaustivamente para caracterizar os vários tipos de termopares. No entanto, este método torna-se impraticável para a maior parte das aplicações. Em vez disso, é utilizada a técnica de compensação da junção-referência, que passa por utilizar outro dispositivo sensível à temperatura para medir a junção-fria, tipicamente, é utilizado um termistor ou um RTD. É importante que a leitura feita com estes sensores seja o mais precisa possível, pois qualquer erro reflete depois na leitura final do termopar.

Sinal lido não é linear: A inclinação da curva da resposta do termopar varia com a temperatura. Por exemplo, a 0°C a sensibilidade de um termopar tipo T varia a $39 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, mas a 100°C aumenta para $47 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (Figura 2.5). Existem duas soluções para compensar a não linearidade de um termopar. A primeira passa por escolher um tipo de termopar em que a inclinação da curva de resposta seja o mais linear possível dentro da gama de valores que se pretende medir. A segunda abordagem, é utilizar equações de ordem elevada para modelar o comportamento do termopar. Apesar deste método ser o mais preciso, é também o mais complexo de aplicar.

Na Figura 2.5, pode-se ver a variação da sensibilidade de um termopar com a temperatura. De notar que, o termopar tipo K tem o coeficiente de Seebeck mais linear, mantendo-se praticamente constante a $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ dos 0°C até aos 1000°C

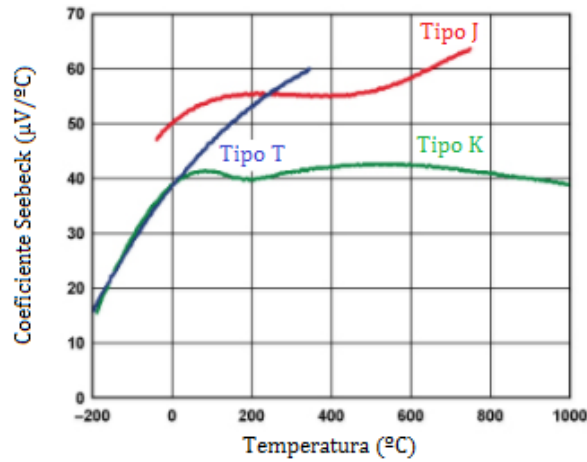


Figura 2.5: Variação da sensibilidade de um termopar tipo J, tipo K e tipo T com a temperatura [11].

É agora demonstrado o esquemático de um simples circuito de leitura para um termopar tipo K, Figura 2.6. Este é baseado num circuito integrado desenhado especialmente para termopares do tipo K, uma vez que possui um sensor de temperatura integrado de forma a fazer a compensação da junção de referência. A redução do ruído é feita pelo filtro passivo RC de 1ª ordem e também pelo amplificador de instrumentação, sendo as altas frequências removidas pelo filtro e as baixas frequências pelo amplificador. Quanto à amplificação e correção da não linearidade do sinal, é também tratado pelo amplificador de instrumentação. No capítulo três, será explicado com mais detalhe o funcionamento do circuito de leitura do termopar bem como do amplificador de instrumentação.

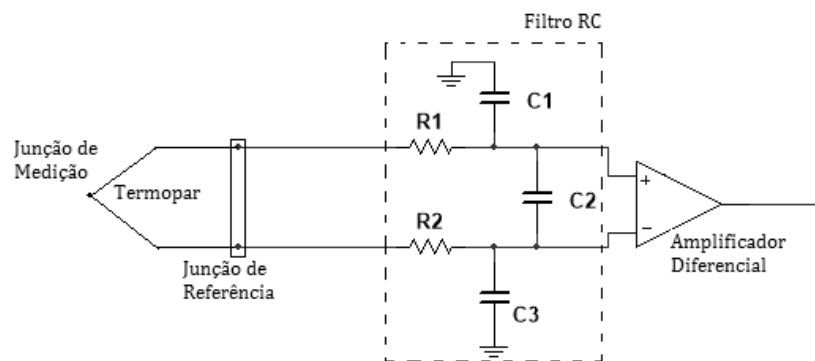


Figura 2.6: Circuito de leitura de um termopar do tipo K.

Para terminar, este tipo de tecnologia oferece uma medição robusta e fiável para uma larga gama de valores, no entanto para aplicações onde é precisa alta precisão já não são aconselháveis.

2.2.2 Detetor de Temperatura Resistivo

O RTD é um sensor de temperatura resistivo construído a partir de um metal puro, tal como, Platina, Níquel ou Cobre, cuja resistência varia com a temperatura [12]. Os demais dispositivos de medição de temperatura, não têm uma resposta tão linear em relação à temperatura como o RTD, como já foi referido, o termopar é um destes dispositivos. A relação linear entre a resistência e a temperatura do RTD simplificam bastante a implementação do circuito de condicionamento de sinal.

A platina é o metal menos suscetível a contaminações do ambiente, enquanto que o cobre é propício à corrosão a longa duração provocando problemas na estabilidade. O Níquel, apesar de suportar bastante bem contaminações do ambiente, é um material limitado a pequenas gamas de valores de temperatura.

Ao escolher o RTD, o utilizador pode seleccionar o valor da resistência que deseja para a temperatura de 0 °C. Por exemplo, o RTD mais conhecido do mercado é a Pt-100, contruída em Platina, apresenta uma resistência de 100 Ω à temperatura de 0 °C. Com a Pt-100, a variação da resistência dos 0 °C aos 100 °C é medida da seguinte forma:

$$\Delta R = (\text{Resposta térmica}) \times R_0 \times \Delta t \quad (2.2)$$

$$\Delta R = 0.00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C} \times 100 \Omega \times 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta R = 38.5 \Omega$$

Quer isto dizer que para uma temperatura de 100 °C, o valor da resistência da Pt-100 será de 138.5 Ω.

No entanto, como todos os sensores de temperatura o RTD também apresenta algumas desvantagens. Através da análise da Tabela 2.1 é possível verificar que o valor medido da resistência apresenta um certo desvio que se reflete depois no valor da temperatura. Por exemplo, à temperatura de 100 °C, o valor da resistência pode variar $\pm 0.30 \Omega$ o que se traduz num desvio de $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ do real valor. Para além destes erros, existem outras fontes de erro que afetam a precisão do sensor. Defeitos na integridade mecânica da peça, tais como, fios entortados, vibrações ou a expansão térmica do material podem levar a alterações na repetibilidade e estabilidade do sensor a longo

prazo [10]. Uma vez que o RTD é um sensor passivo precisa de uma forma de excitação para produzir uma tensão mensurável aos seus terminais, daí que seja necessário alimentar o sensor através de uma fonte de corrente. No entanto, poderão surgir problemas de sobreaquecimento que depois vão afetar a precisão do RTD.

Tabela 2.1: Desvio em Ohms e graus Centígrados do valor absoluto de um RTD em Platina [13].

Temperatura (°C)	Valor absoluto da resistência (Ω)	Desvio em Ω	Desvio em °C
-100	61.5	± 0.32	± 0.8
0	100.0	± 0.12	± 0.3
100	138.5	± 0.30	± 0.8
200	177.0	± 0.48	± 1.3
300	215.5	± 0.64	± 1.8

Como já referido, o RTD é um sensor de temperatura passivo e por isso necessita de uma corrente de alimentação para produzir uma tensão. Normalmente, é utilizado um circuito em ponte para obter o sinal do RTD, sendo que existem três configurações possíveis para o fazer, Figura 2.7.

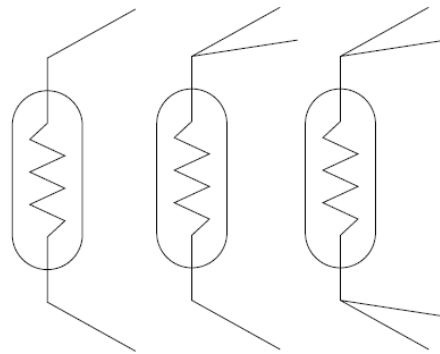


Figura 2.7: Configurações existentes do RTD. Esquerda, dois fios; Centro, três fios; Direita, quatro fios.

A configuração a dois fios é a mais barata, no entanto é a menos precisa. A configuração a quatro fios é a mais precisa, mas também é a mais complicada de implementar. Por último, a ligação a 3 fios, não sendo tão precisa como a ligação a quatro fios, consegue à mesma remover os erros a que a ligação a dois fios está sujeita, tornando-a na mais utilizada.

2.2.3 Termístor

Um termístor é basicamente um transdutor com dois terminais sensíveis à temperatura, permitindo que ele varie o seu valor resistivo em função de pequenas mudanças de temperatura. Este tipo de sensor pode operar de duas maneiras, aumentando ou diminuindo o valor da sua resistência com a temperatura. Assim, faz com que existam dois tipos de termístores disponíveis, o coeficiente de resistência à temperatura negativo (NTC) e o coeficiente de resistência à temperatura positivo (PTC) [14].

Em contraste com os RTDs que alteram a resistência de forma quase linear, os termístores NTC são altamente não lineares e diminuem o valor da sua resistência com o aumento da temperatura. No entanto, o que os torna tão populares é que possuem uma resposta relativamente alta, significando que a mais pequena alteração da temperatura produz uma variação da sua resistência elétrica. Isto faz com que este tipo de sensor seja ideal para medições de temperatura exatas [15]. Por norma, o valor mais comercializado de resistência para a temperatura de 25 °C são 10 k Ω .

Na Figura 2.8, é feita uma comparação da variação da resistência com a temperatura de um termístor e de um RTD em Platina. Através da análise da mesma, é possível concluir que o termístor tem uma variação da resistência muito maior, o que faz com que seja mais sensível. Outro ponto de destaque que pode observar, é que a resistência do termístor decai com o aumento da temperatura, o que faz dele um NTC. Para terminar, o RTD tem um rácio da resistência dos -50 aos 300 °C sempre semelhante, enquanto que o termístor na mesma gama de temperatura varia cerca de 100,000 vezes, tornando-o o sensor de temperatura mais indicado para medições precisas.

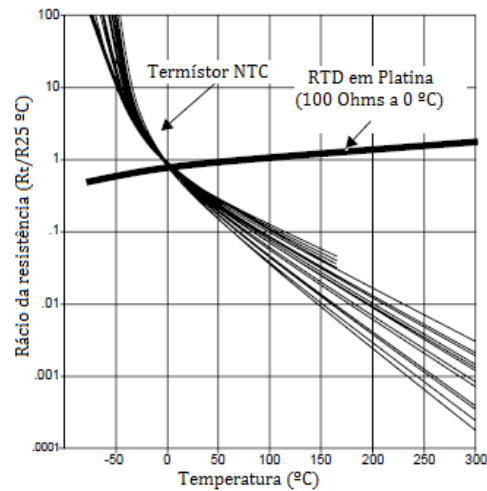


Figura 2.8: Resposta da temperatura com a resistência de um termístor NTC e um RTD [10].

O termístor NTC, assim como o RTD, são sensores de temperatura resistivos, ou seja, possuem os mesmos problemas. Ao utilizar o termístor, facilmente podem ocorrer erros derivados de sobreaquecimento, tal como acontece com o RTD. De facto, é preciso ainda mais cuidado ao desenhar o circuito de excitação do termístor pois a variação da resistência é bem mais elevada em função da temperatura que o RTD.

O termístor PTC, tem um coeficiente de temperatura positivo e é contruído a partir de titanato de bário. A sua sensibilidade é consideravelmente maior que a do NTC, devendo ser usado apenas para um intervalo de temperatura que varie entre os -25 e os 150 °C. A temperaturas mais elevadas, as características da resistência em função da temperatura vão alterar-se drasticamente, impossibilitando o seu uso.

O termístor sendo um sensor ativo, necessita de uma forma de excitação para poder operar. Utilizando-o num circuito divisor de tensão (Figura 2.9), é possível medir a sua temperatura ao ler a alteração do sinal de saída do circuito. Quando a resistência do termístor variar devido a alterações da temperatura, vai produzir uma tensão de saída proporcional à resistência do termístor. A expressão da tensão de saída deste circuito é demonstrada na equação:

$$V_{sai da} = V_s \times \frac{R_{TH}}{R_{TH} + R} \quad (2.3)$$

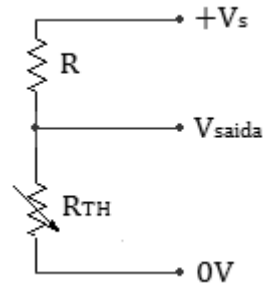


Figura 2.9: Circuito de leitura de um termistor usando um divisor de tensão.

2.2.4 Comparação das Tecnologias Abordadas

Após o estudo das tecnologias previamente descritas, é necessário fazer uma análise para concluir qual a tecnologia mais indicada para calcular a temperatura no interior do molde. Os aspetos mais importantes a ter em atenção são, o intervalo de valores que o sensor consiga detetar, robustez, as dimensões e o custo. Como a aplicação é dentro de um molde que utiliza a técnica de fabrico de injeção de plástico, é esperado que atinja elevadas temperatura (ordem das centenas de graus centígrados). Uma vez que se trata de um ambiente industrial, o sensor terá que ser bastante robusto pois vai estar sujeito a várias formas de ruído e vibrações. As suas dimensões também é um dos principais aspetos a considerar pois os sensores vão ser alojados no interior do molde. Por último, como são necessários vários sensores de temperatura para medir diferentes zonas do molde, este não pode ter um custo demasiado elevado para não inviabilizar a sua concretização. A Tabela 2.2 apresenta várias características de cada uma das tecnologias de sensores de temperatura abordadas [10] e de um FBG [16].

Tabela 2.2: Comparação das características de quatro tipos de sensores de temperatura [10].

	Termopar	RTD	Termístor	FBG
Alcance	-270 a 1800 °C	-250 a 900 °C	-100 a 450 °C	0 a 200 °C
Sensibilidade	41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (Tipo K)	0.00385 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ (Platina)	Alta sensibilidade, > RTD	100 $^\circ\text{C}/\text{nm}$
Precisão	± 0.5 °C	± 0.01 °C	± 0.1 °C	± 0.1 °C
Não Linearidade	Método muito complexo (polinómio ordem 4)	Linear (Polinómio ordem 2)	Método complexo (polinómio ordem 3)	Linear
Robustez	Bastante robusto	Muito suscetível ao dano	Sensível a choques e vibrações	Bastante robusto
Excitação	Não é necessário	Corrente	Tensão	Luz
Tipo de saída	Tensão	Resistência	Resistência	Comprimento de onda
Dimensões	6 mm \varnothing frontal	6.35 x 6.35 mm	2.54 x 2.54 mm	3 mm \varnothing

Pela observação da tabela anterior, cada sensor tem características específicas que o tornam o mais indicado para uma determinada aplicação. O termopar deve ser utilizado em aplicações onde é preciso medir temperaturas mais elevadas e que não seja preciso alta precisão ou repetibilidade. O RTD é o mais apropriado para medições de temperaturas ambiente em que seja desejado boa linearidade. Para aplicações de baixas temperaturas em que a sensibilidade seja um aspeto crucial a escolha tem de recair sobre o termístor. Para terminar, o FBG é o mais indicado em aplicações que seja preciso medição em vários pontos, graças à sua capacidade de multifuncionalidade, sendo ainda imune a ambientes opressivos.

Após a análise das várias tecnologias apresentadas conclui-se que o sensor mais adequado a utilizar é o termopar pois garante fiabilidade na medição da temperatura para uma maior gama de valores, é o mais robusto dos quatro apresentados e ainda não corre o risco de sobreaquecimento.

2.3 Sensores de Humidade

A humidade é a quantidade de vapor de água presente na atmosfera. Esta indica a probabilidade de precipitação, orvalho ou nevoeiro. A variação da humidade provoca no ser humano uma sensação térmica, que é a forma como os sentidos apercebem-se da temperatura do ar, e que podem diferir da temperatura real, ou seja, um aumento da humidade dá a sensação de a temperatura ter aumentado quando na realidade ela se manteve constante [17].

Existem três maneiras de medir a humidade, a absoluta, a relativa e a específica. A humidade absoluta é a quantidade de massa de água presente num dado volume de ar. A unidade de medida do sistema internacional é quilogramas por metro cúbico (kg/m^3). Concretamente, a humidade absoluta numa base volúmica é igual à massa de água condensada por metro cúbico do ar húmido total (Equação 2.4). A uma temperatura de 20 °C, a humidade absoluta varia entre 0 (completa ausência de água) e 0.02 quilogramas por metro cúbico.

$$HA = \frac{m_{\text{água}}}{V} \quad (2.4)$$

A humidade relativa (HR) é definida como a razão entre a quantidade de água presente numa determinada porção da atmosfera ($\rho_{\text{água}}$) com a quantidade total de vapor de água que a atmosfera pode suportar a uma determinada temperatura ($\rho^*_{\text{água}}$). Esta medição é expressa em percentagem e é calculada da seguinte forma:

$$HR = \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho^*_{\text{água}}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Por último, a humidade específica é a razão de vapor de água com o ar para a massa total de uma parcela de ar.

$$HE = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}} \quad (2.6)$$

2.4 Sensores de Deformação

Depois de estudar algumas tecnologias para a medição da temperatura segue-se a análise dos sensores de deformação. A tecnologia escolhida deverá ser capaz de medir com alguma precisão deformação nos veios extratores (Figura 1.1), de maneira a prevenir que eles possam partir, o que provoca uma paragem da linha de montagem para corrigir esse problema.

Os sensores que permitem medir deformação e que são abordados neste documento são os extensómetros, os piezoelétricos e ainda os FBG também serão mencionados na parte final do capítulo.

2.4.1 Extensómetro

O extensómetro é um dispositivo utilizado para análise de tensão e deformação em estruturas mecânicas. Descoberto por Edward E. Simmons e Arthur C. Ruge em 1938, apresenta tipicamente o formato de uma “grade” [18]. Este tipo de sensor sendo piezoresistivo, ao aplicar uma força sobre a superfície em que está inserido a sua resistência vai variar, essa variação é então medida para se saber o quanto deformou.

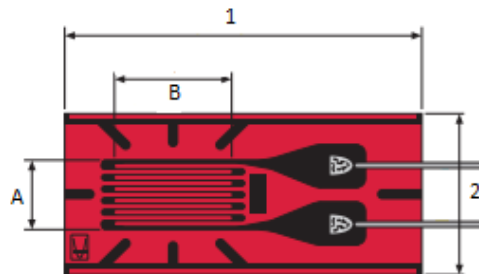


Figura 2.10: Formato típico de um extensómetro de um único elemento. (A) Largura da grade; (B) Comprimento da grade; (1) Comprimento da base; (2) Largura da grade.

Na Figura 2.10, é possível ver o formato de um extensómetro. Normalmente, são necessários alguns milímetros de fio para se atingir a resistência nominal pretendida (varia entre 50 Ω a vários milhares de Ω), e como o comprimento da grade desejado é quase sempre inferior ao comprimento do fio, utiliza-se esta forma de “grade” para reduzir espaço e assim permitir fazer extensómetros de menores dimensões [19]. A orientação para onde o extensómetro é sensível sabe-se através das dimensões da grade, sendo o maior lado, a direção que este vai medir a deformação. No entanto, existem

também extensômetros capazes de medir em várias direções, para isso necessitam de ser construídos com mais do que um elemento encapsulado.

Para os vários tipos de extensômetros existentes, a deformação é calculada através da relação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/R}{G_F} \quad (2.7)$$

Onde, ε - deformação na direção do eixo do extensômetro,

$\Delta R/R$ - variação da resistência,

G_F - fator de sensibilidade do extensômetro, fornecido pelo fabricante.

Atualmente, os melhores materiais para a construção de extensômetros são aqueles que apresentam uma baixa variação da resistividade com a deformação, assim como um pequeno coeficiente de temperatura. As ligas metálicas mais utilizadas para a confecção de extensômetros são a Constantan, a Isoelastic e a Karma, apresentando um fator de sensibilidade de 2.1, 3.6 e 2, respectivamente [20].

Uma vez que o extensômetro é um sensor passivo, é necessário ligá-lo a um circuito de excitação. Um dos circuitos utilizados, e que é abordado neste capítulo é conhecido por ponte de Wheatstone e foi idealizado pelo físico inglês Sir Charles Wheatstone em 1843 [21]. O princípio básico de funcionamento deste circuito de ponte consiste em comparar o valor de resistências desconhecidas com umas definidas previamente.

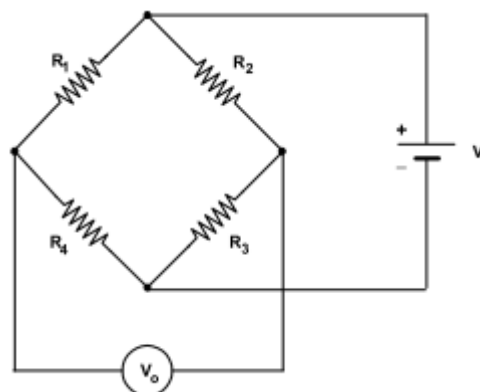


Figura 2.11: Circuito ponte de Wheatstone.

Na Figura 2.11, está representado um circuito ponte de Wheatstone, constituído por quatro resistências conectadas em forma de um quadrado e excitadas por uma fonte de alimentação, V_i , este produz um sinal de tensão V_o que varia em função dos valores das resistências:

$$V_o = V_i \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_4)(R_3 + R_2)} \quad (2.8)$$

Quando os valores das resistências são todos iguais ou obedecem à relação, $R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3$, ou o valor de V_o é igual a zero, diz-se que a ponte está equilibrada.

Se as resistências da ponte sofrerem uma variação ΔR_i , a ponte ficará desequilibrada e uma tensão V_o diferente de zero aparecerá. Assumindo que a variação ΔR_i é muito menor que a resistência R_i a seguinte relação é então válida:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2.9)$$

Substituindo a equação 2.4 na 2.6 acima, resulta:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{G_F}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.10)$$

Para aplicar este método na medição de extensómetros basta substituir as resistências por um extensómetro. Se não haver deformação a ponte vai estar equilibrada e assim $V_o = 0$, se houver tração ou contração a resistência do extensómetro vai variar provocando uma tensão V_o diferente de zero [19]. Existem três tipos de configurações diferentes da ponte de Wheatstone: um quarto de ponte, neste caso substitui-se uma das resistências por um extensómetro; meia ponte, onde se substitui duas resistências por dois extensómetros; e por último, ponte completa, nesta configuração, substitui-se as quatro resistências por extensómetros.

No entanto, neste circuito é também necessária a aplicação de algumas correções:

Temperatura: na configuração de um quarto de ponte, é comum que o extensómetro acoplado esteja distante do resto do circuito. Com a variação da

temperatura, os fios de cobre que o ligam tendem a contrair ou dilatar, variando a sua resistência. Isso causa uma tensão de saída diferente de zero ainda que não haja nenhuma deformação no extensômetro. Para corrigir isto, liga-se um terceiro fio ao transdutor adjacente à resistência da ponte. A medição da tensão é então feita nesse fio.

“Dummy Gauge”: a dilatação dos fios do próprio extensômetro devido à variação da temperatura provoca também variações na resistência. Para corrigir, substitui-se a resistência da ponte adjacente ao extensômetro por outro extensômetro igual, mas de maneira a não sofrer nenhuma deformação mecânica. Assim, ambos estão sujeitos às mesmas condições de temperatura mantendo a ponte equilibrada.

Condicionamento de sinal: na prática, a saída dos extensômetros é cerca de 10 mV por cada *volt* de tensão de excitação à ponte de Wheatstone. Ou seja, se a tensão de excitação for de 5 V, a tensão de saída será de 50 mV. Logo, é necessário um amplificador para aumentar a tensão de saída. Para além disso, como este tipo de sensores são utilizados em ambientes eletricamente ruidosos, deve-se eliminar ruídos que possam acoplar ao circuito. Para isso, é fundamental colocar um filtro passa-baixo para descartar todas as altas frequências.

2.4.2 Piezoelétrico

Um sensor piezoelétrico é um dispositivo que utiliza o efeito piezoelétrico para medir alterações de pressão, aceleração, temperatura, deformação ou força. A piezoeletricidade é entendida como a interação linear entre o estado mecânico e elétrico dos cristais de quartzo. Ou seja, quando ocorre uma deformação mecânica do material piezoelétrico é produzida uma alteração proporcional na polarização do material [22]. A piezoeletricidade foi descoberta em 1880 pelos físicos franceses Jacques e Pierre Curie, teve em 1920 umas das primeiras aplicações práticas que consistia num transmissor e recetor de quartzo para som subaquático, que ficou conhecido como o primeiro SONAR [23].

O efeito piezoelétrico pode ser ilustrado utilizando uma placa de quartzo, tal como ilustrada na Figura 2.12. A força F deforma a placa e produz através da piezoeletricidade uma carga I .

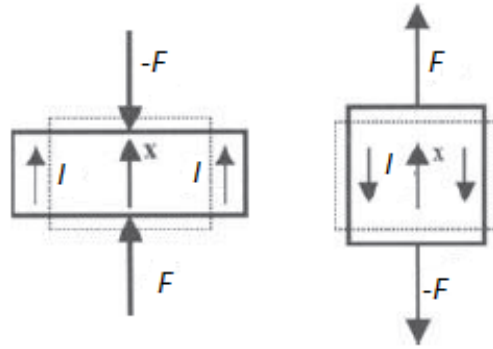


Figura 2.12: Efeito piezoelétrico.

Para ser possível medir com exatidão a deformação que o sensor piezoelétrico sofreu é necessário acoplá-lo a um circuito de condicionamento de sinal de maneira a ler a tensão por ele produzida. Uma maneira é utilizar um circuito amplificador de carga para medir a carga gerada pelo sensor e assim chegar à deformação. O circuito de condicionamento de sinal para o sensor piezoelétrico está ilustrado na Figura 2.13, o sensor pode ser modelado como uma fonte de tensão em paralelo com um condensador em paralelo com uma resistência [25].

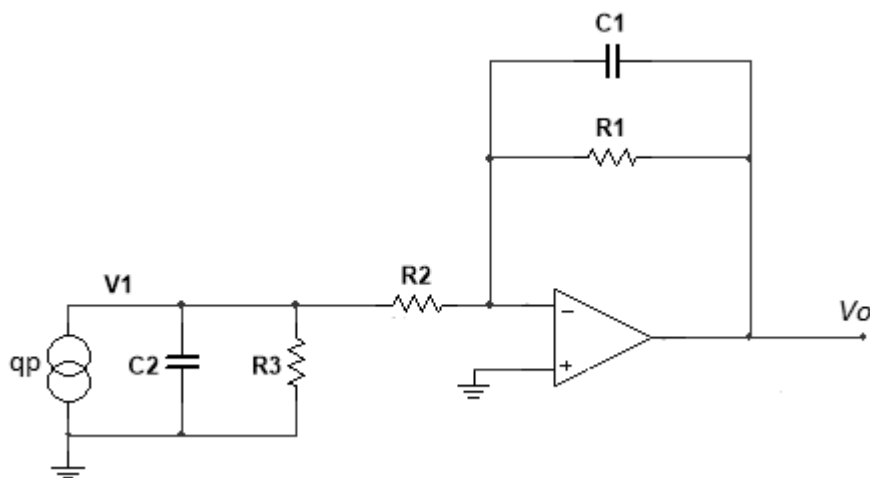


Figura 2.13: Circuito de condicionamento de sinal para um sensor piezoelétrico.

A relação de saída deste circuito é dada por:

$$V_o = -\frac{qp}{c_1} + V_{cc} \quad (2.11)$$

Sendo, q_p – a carga produzida pelo sensor,

V_{cc} – a tensão de alimentação do amplificador.

A constante de tempo deste circuito é dada pelos valores de R_1 e C_1 e é usada para definir intervalo de frequência do circuito.

2.4.3 Comparação das Tecnologias Abordadas

Após o estudo de três tipos de tecnologias para medir deformação, o FBG, o extensómetro e o piezoelétrico, é necessário fazer uma análise para concluir qual o mais indicado a utilizar na medição dos veios extratores. Este sensor deve permitir ao utilizador saber se houve alguma quebra do extrator após a extração da peça dentro do molde. Outro cuidado a ter na escolha da tecnologia é as suas dimensões, pois a zona dos extratores tem dimensões bastante reduzidas e não permite a instalação de sensores com mais do que algumas dezenas de milímetros de área. Na Tabela 2.3 apresenta as características mais importantes do FBG [26], do extensómetro [27] e piezoelétrico [28].

Tabela 2.3: Comparação das características de quatro tipos de sensores de deformação.

	FBG	Extensómetro	Piezoelétrico
Tipo de saída	Comprimento de onda	Resistência	Carga
Valor típico	1500 nm	120 Ω	0 C
Sensibilidade	670 ($\mu\text{m}/\text{m}$)/ ηm	2.4 Ω/mm	1.74 $\eta\text{C}/\text{mm}$
Dimensões	45 x 15 x 0.3 mm	4.8 x 2.4 mm	25 x 13 mm
Temperatura de operação	-20 a 80 $^{\circ}\text{C}$	-196 a 120 $^{\circ}\text{C}$	0 a 85 $^{\circ}\text{C}$
Excitação	Luz	Fonte de tensão	Não precisa

Pela observação da tabela anterior é possível concluir que o sensor que melhor se enquadra na aplicação é o extensómetro. As suas reduzidas dimensões fazem com que seja a escolha ideal, pois como já foi referido em cima, a utilização deste sensor vai ser numa zona com um espaço bastante reduzido. Para além disso, como no interior do molde vão estar temperaturas elevadas, o extensómetro é também o sensor com melhor capacidade térmica.

2.5 Protocolos de Comunicação

2.5.1 *Serial Peripheral Interface*

O barramento *serial peripheral interface* (SPI) é um tipo de comunicação síncrona utilizada para comunicações a curtas distâncias. Esta interface foi desenvolvida pela Motorola no final da década de 80 [29]. Os seus dispositivos permitem uma comunicação bidirecional, *full duplex*, utilizando a arquitetura *master-slave* com um único *master*. Neste projeto, é utilizado para fazer a comunicação entre o circuito de leitura do termopar e o circuito de leitura do extensómetro.

A interface SPI utiliza um barramento de quatro fios sendo eles, o MOSI – *Master Output Slave Input*, MISO – *Master Input Slave Output*, SCLK – *Serial Clock* e o \overline{SS} – *Slave Select*. A ligação entre o dispositivo *master* e um dispositivo *slave* está ilustrada na Figura 2.14.

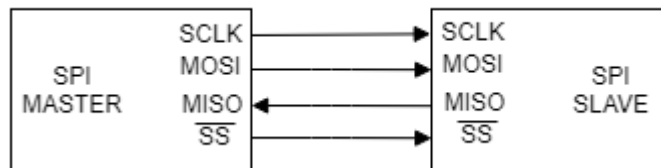


Figura 2.14: Barramento básico de SPI.

Este protocolo, também permite ligar vários *slaves* ao *master*. A seleção entre os dispositivos *slave* é efetuada através do \overline{SS} , sinal que ativa apenas o *slave* com o qual o *master* pretende comunicar. Na Figura 2.15 está ilustrada a conexão de vários dispositivos SPI [30].

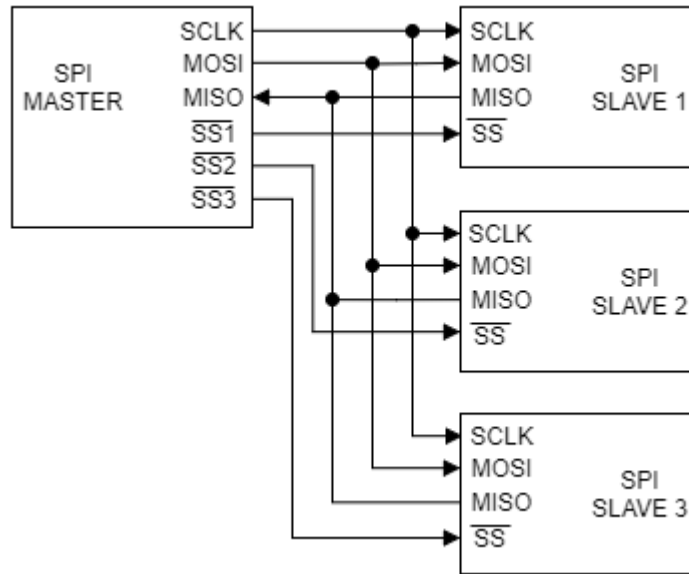


Figura 2.15: Ligação entre vários dispositivos SPI.

Na Figura 2.16 observa-se o comportamento de cada uma das linhas da comunicação SPI. É possível observar que a comunicação é bidirecional, isto é, quando o master está a transmitir através da linha MOSI, esta está simultaneamente a receber dados através da linha MISO. Os pulsos de relógio são sempre gerados pelo dispositivo *master*; deste modo, um dispositivo *slave* não tem a capacidade para iniciar uma comunicação, pois apenas envia informação quando o *master* gera pulsos de relógio. Para além de definir a frequência do relógio, o *master* também tem de configurar a polaridade, CPOL, e fase, CPHA, do relógio com os respetivos dados [31]. As comunicações são sempre iniciadas pelo dispositivo *master* através da ativação da linha \overline{CS} correspondente ao dispositivo *slave* com o qual pretende comunicar. Neste momento, o dispositivo *slave* fica ativo e aquando da receção dos pulsos de relógio este transmite dados na linha MISO e recebe os dados enviados pelo *master* através da linha MOSI.

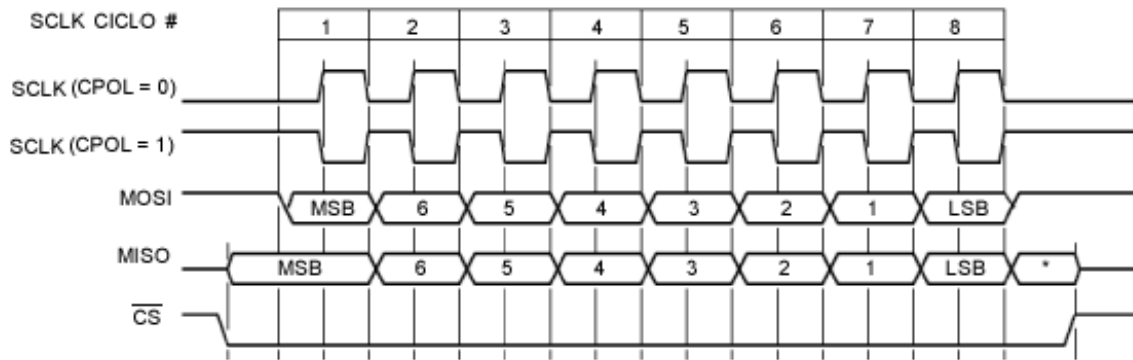


Figura 2.16: Diagrama temporal de uma comunicação SPI com $CPHA = 0$. É ilustrada a forma de onda do SCLK para $CPOL = 0$ e $CPOL = 1$ [31].

2.5.2 Inter-Integrated Circuit

O protocolo *inter-integrated circuit* (I2C), é um barramento série que permite que vários *slaves* comuniquem com um ou mais *masters*, contrariamente ao SPI que apenas permite comunicar com um único *master*. Este protocolo foi desenvolvido pela Philips no ano de 1982, e apenas permitia comunicações a 100 kHz, com um limite de dispositivos ligados de 112, atualmente permite a ligação de 1008 [32].

O I2C utiliza apenas duas linhas bidirecionais para comunicar, o SDA - *Serial Data Line* e o SCL - *Serial Clock Line*. Uma comunicação I2C entre um dispositivo *master* e um dispositivo *slave* está ilustrada na Figura 2.17.

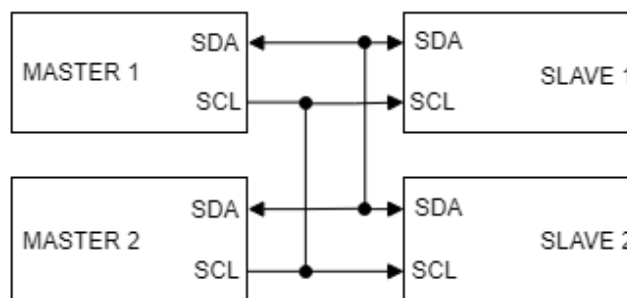


Figura 2.17: Ligações entre dois dispositivos masters e dois slaves I2C.

Na Figura 2.18 observa-se o comportamento de cada uma das linhas de comunicação I2C. As mensagens transmitidas são partidas em duas tramas, uma trama de endereço, onde o *master* indica o *slave* para onde a mensagem vai ser enviada e uma trama de dados, que contém mensagens com 8-bits de dados. Os dados são colocados na

linha SDA depois de a linha SCL passar para o nível lógico zero e são amostrados após a linha SCL passar a “1”.

Para indicar que vai ser iniciada uma comunicação o dispositivo *master* deixa a linha SCL a “1” e põe a linha SDA a “0”. Se houver conflito entre dois *masters* para iniciar uma comunicação, aquele que passar a linha SDA para “0” primeiro ganha o controlo do barramento. O bit “ACK” indica se o *slave* desse endereço respondeu ao pedido do *master*; “0” respondeu com sucesso, “1” não. Após isso, é enviada trama com o endereço seguido do tipo de operação, para leitura (1), para escrita (0). Após o envio da trama com o endereço, podem ser começados a transferir os dados. O *master* vai gerar impulsos de relógio continuamente até todos os dados serem colocados na linha SDA, tanto pelo *master* como pelo *slave*. Depois de toda a informação ser enviada o *master* vai gerar uma condição de paragem. Esta condição é definida pela transição positiva (0->1) da linha SDA após haver uma transição positiva na linha SCL, com esta a continuar positiva.

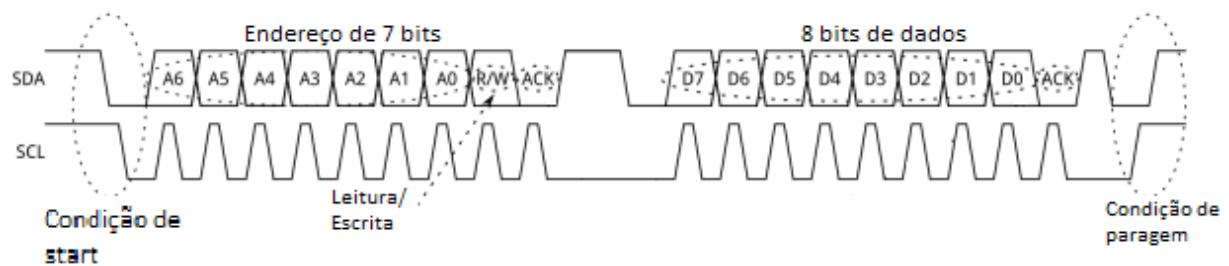


Figura 2.18: Diagrama temporal de uma comunicação I2C [32].

3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE LEITURA

A análise ao sistema eletrónico implementado para leitura dos sensores é efetuada neste capítulo. Inicialmente, é descrito de uma forma sucinta, o sistema desenvolvido e indicados quais os sensores a utilizar com base nos requisitos do sistema. Após isso, é explicado detalhadamente o funcionamento e as ligações do circuito de leitura utilizado para a medição da temperatura e também para o sensor de humidade, assim como todos os testes realizados. Em seguida, repetem-se os passos referidos para o sensor de temperatura, mas desta vez, para o sensor de deformação. O capítulo termina com a ilustração do protótipo final do sistema de instrumentação.

3.1 Descrição do Sistema

O sistema de instrumentação foi projetado de maneira a ser possível ler em tempo real os valores fornecidos pelos vários sensores. Cada um dos sensores tem o seu próprio circuito de leitura desenhado com base nos requisitos do sistema.

A Figura 3.1, ilustra o esquema geral do sistema eletrónico de leitura que foi desenvolvido para a medição dos vários sensores utilizados na monitorização de um molde.

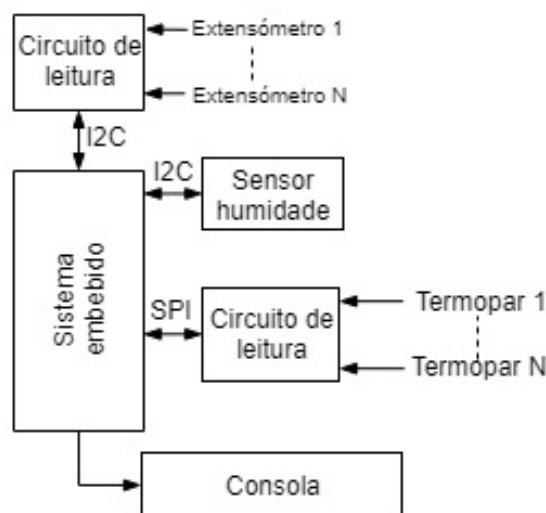


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema de instrumentação.

Como se pode observar pela figura anterior, os vários sensores ligados através da interface específica para cada um, vão ser controlados por um sistema embestado. A

informação recolhida vai ser tratada por ele, onde será guardar os dados de cada um dos sensores ou então apresentá-los através da consola.

3.1.1 Seleção dos Componentes de *Hardware*

O primeiro passo antes de começar a projetar o sistema de instrumentação passa pela seleção dos sensores a empregar. Como já referido, vão ser utilizados três tipos de sensores diferentes, o termopar que vai ser usado para medir a temperatura em várias zonas no interior do molde, o extensómetro, responsável por detetar alguma quebra/fratura nos veios extratores e ainda o sensor de humidade que deve ser capaz de medir a temperatura e a humidade do ambiente em que o molde foi colocado.

Para a escolha do termopar, o primeiro critério a ter em atenção foi o intervalo de valores que este consegue medir. Durante o fabrico de uma peça, o interior do molde chega a atingir os 350 °C, por isso o termopar tem de ser capaz de medir temperaturas dessa magnitude. Outra característica que foi tomada em conta é o seu formato e as suas dimensões, este deverá ter uma ponta comprida de maneira a facilitar o encaixe no molde. Tendo em conta estas especificações foi escolhido um termopar do tipo K do fabricante Labfacility [33], o seu formato está ilustrado na Figura 3.2



Figura 3.2: Termopar do tipo K escolhido.

A seleção do sensor de temperatura e humidade foi feita com base na sua interface de comunicação. Como a aplicação do sensor é para medir a temperatura ambiente e a humidade relativa, não existe a mesma preocupação em medir temperaturas elevadas como no caso do termopar. Apenas é necessário garantir que este consiga medir temperaturas negativas e a humidade com relativa precisão. Tendo em vista estas características, foi escolhido o sensor T9602 do fabricante Telaire. Este

permite ler a temperatura desde $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ com uma precisão de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Possui ainda uma precisão de 2% na medição da humidade relativa e inclui uma interface de comunicação I2C [34]. O seu formato está ilustrado na Figura 3.3.



Figura 3.3: Sensor de temperatura e humidade escolhido.

O extensómetro, uma vez que é utilizado para medir a deformação dos extratores, sabendo assim se houve alguma quebra, não precisa de ter alta precisão nas medições. No entanto, é fundamental que aguente com temperaturas na ordem dos $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e que as suas dimensões sejam muito reduzidas de maneira a facilitar a sua aplicação. Por isso, foi escolhido o extensómetro do fabricante Kyowa [27]. O seu formato está ilustrado na Figura 3.4.

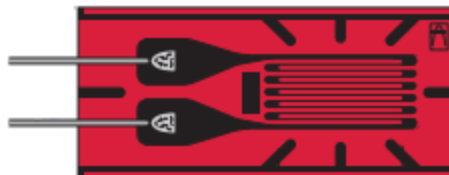


Figura 3.4: Extensómetro escolhido.

Depois de escolhidos os sensores a utilizar é necessário escolher o sistema embebido que vai executar as tarefas de leitura dos seus valores. Para isso, escolheu-se o SoC (*System-on-chip*) Broadcom BCM2837 presente na placa de desenvolvimento Raspberry Pi 3, ilustrado na Figura 3.5. Esta placa cumpre os requisitos necessários para obter um bom funcionamento do sistema de instrumentação. Os seus 40 pinos de GPIO, incluem as duas interfaces de comunicação necessárias, o I2C e o SPI e ainda os 5 V e 3.3 V para alimentar os vários sensores. Para além disso, a RPI vem instalado com uma

distribuição do Raspbian, que é um sistema operativo desenhado especificamente para ela, permitindo guardar e visualizar os valores lidos pelos sensores.

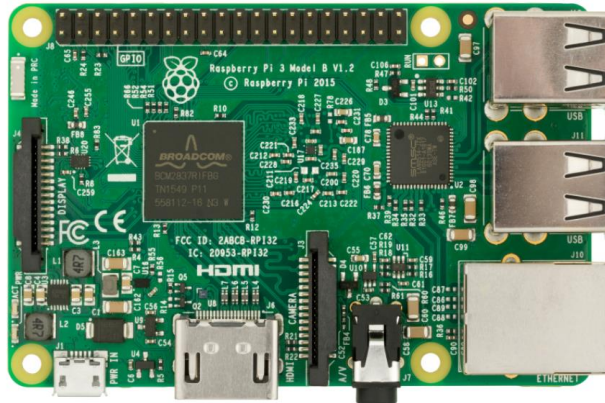


Figura 3.5: Raspberry Pi 3.

3.2 Caracterização do Termopar

Neste subcapítulo vai ser detalhadamente explicada toda a implementação que foi feita ao nível do termopar. O primeiro passo refere-se à implementação do seu circuito de leitura, após isso foi demonstrado como se podem ligar, em simultâneo, vários termopares ao sistema de instrumentação. Por último, são esclarecidos os testes realizados para caracterização do sistema de leitura.

3.2.1 Circuito de Leitura

Como já referido no subcapítulo 2.2.1, o termopar ao ter a sua junção de medição exposta a variações de temperatura gera uma diferença de potencial, valor que é então medido para calcular o valor da temperatura.

No entanto, existem dois problemas a resolver: A tensão de saída tem de ser amplificada, a sensibilidade ronda apenas os $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. É fundamental ter um valor de referência da temperatura na junção fria para ser possível saber a que temperatura corresponde o valor de tensão que está a ser lido. Por último, é importante que o sinal lido seja linear. Isto resolve-se ao escolher um termopar do tipo K, uma vez que este apresenta uma sensibilidade bastante linear para o intervalo de temperatura que é pretendido para esta aplicação, Figura 2.5 do subcapítulo 2.2.1.

De maneira a resolver os problemas referidos, foi implementado o circuito ilustrado na Figura 3.6. Composto por um filtro passa baixo diferencial e o circuito integrado ADS1118 [35], que é um conversor analógico para digital de precisão. Este é composto por um amplificador de ganho programável (*PGA*), um conversor analógico digital de 16-bits sigma-delta e um preciso sensor de temperatura. A informação recolhida é transmitida por SPI para a Raspberry Pi.

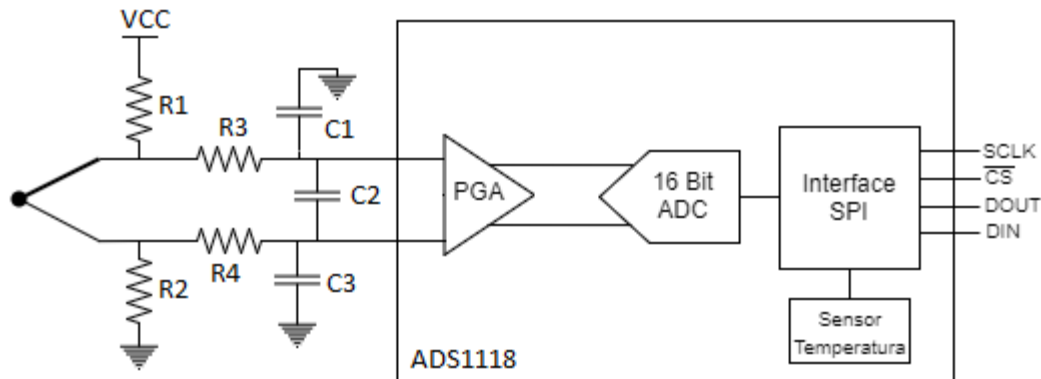


Figura 3.6: Circuito de leitura implementado para leitura do termopar.

As resistências de polarização ($R1$ e $R2$) servem três propósitos, o primeiro é definir a tensão de modo comum do termopar dentro da gama de tensão do circuito. O segundo é para servirem como resistências de *pullup* e *pulldown*, de forma a detetar que uma das junções do termopar não está ligada. E servem ainda para garantir a corrente de polarização nas entradas do PGA.

De seguida, surge o filtro passivo de primeira ordem para atenuar as componentes de ruído de alta frequência. O filtro diferencial RC é formado pelas resistências $R3$ e $R4$ e ainda o condensador $C2$, frequência de corte do filtro é calculada pela equação 3.1. Ao dimensionar as resistências do filtro é necessário ter algum cuidado, pois se o valor for muito grande (acima de $1\text{ k}\Omega$) pode provocar um erro de *offset* à entrada do ADC.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (R3 + R4) \cdot C2} \quad (3.1)$$

Os dois condensadores restantes (C1 e C3) são adicionados para oferecer ainda mais atenuação para as altas frequências das componentes de ruído do modo comum. Ao dimensionar o valor dos condensadores, é aconselhável que o condensador diferencial C2, seja pelo menos 10 vezes maior que os condensadores de modo comum pois desajustes nos condensadores de modo comum, podem converter ruído de modo comum em ruído diferencial.

Na Tabela 3.1, estão apresentados os valores dos dimensionamentos das resistências e condensadores da parte analógica do circuito de leitura. O filtro passa-baixo RC apresenta uma frequência de corte de 160 Hz, comprovado pela equação 3.1. A tensão de alimentação do circuito, V_{cc} , é de 3.3 V.

Tabela 3.1: Dimensionamento dos componentes do circuito de leitura.

Componente	R1	R2	R3	R4	C1	C2	C3
Valor	1 M Ω	1 M Ω	500 Ω	500 Ω	0.1 μ F	1 μ F	0.1 μ F

De seguida surge o ADS1118, este é um conversor analógico para digital do tipo sigma-delta ($\Sigma\Delta$), de 16-bits, com baixo consumo e de dimensões reduzidas. Este permite ter o ganho ajustável, uma tensão de referência interna, um oscilador e ainda interface SPI. Este dispositivo, pode também, ser configurado para funcionar como um sensor de temperatura altamente linear e preciso. A Figura 3.7 ilustra o diagrama de blocos do ADS1118. Basicamente, o conversor mede um sinal diferencial, V_{in} , que é a diferença entre $V_{(AINP)}$ e $V_{(AINN)}$, nesta aplicação são os terminais do termopar, este permite a ligação de dois sensores em simultâneo. A seleção do termopar é feita através de um *multiplexer* que é configurado através do *Config Register*. Esta arquitetura do conversor resulta numa forte atenuação dos sinais em modo-comum.

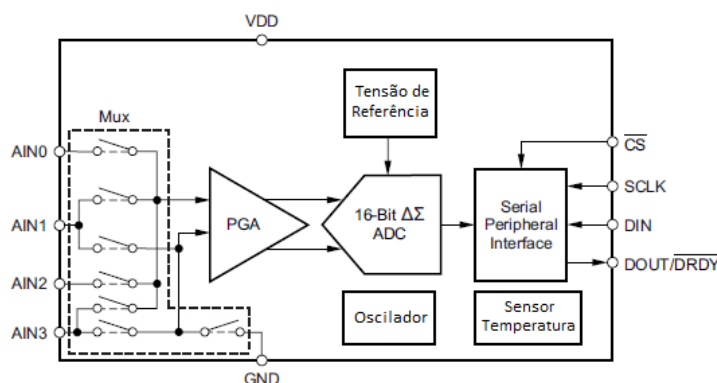


Figura 3.7: Diagrama de blocos do dispositivo ADS1118.

O amplificador de ganho programável é configurado por três bits (PGA [2:0]) do *Config Register*.

O preciso sensor de temperatura incluído no ADS1118, é ativado através do bit TS_MODE do *Config Register*. Este é também utilizado para fazer a compensação da junção fria do termopar. A sua temperatura é representada por 14-bits, sendo que o bit menos significativo, ou seja, a resolução do sensor corresponde a 0.03125 °C. As temperaturas negativas são apresentadas no formato de complemento para dois. Para converter o valor digital para graus Celsius, é necessário primeiro verificar se o MSB (*Most Significant Bit*) está a “1” ou “0”, para saber se o valor é positivo ou negativo, e de seguida multiplicar por 0.03125 para MSB = “0”, ou multiplicar por (-0.03125) caso o MSB = “1”.

O ADS1118 tem dois registos acessíveis através da interface SPI. O *Conversion Register* é um registo de 16 bits de leitura apenas, que contém o resultado da última conversão de 16 bits. Ao iniciar o dispositivo, o registo tem o valor de 0 e continua assim até a primeira conversão estar completa.

O *Config Register*, é um registo de 16 bits que é utilizado para controlar o modo de operação do ADS1118 e o seu formato está detalhado na Tabela 3.2. A configuração deste registo para a leitura da temperatura com o termopar faz com que tenha o valor 0x850Dh. Neste modo, o ADS1118 vai fazer apenas uma leitura por cada ciclo, seleccionando as entradas “AIN0” e “AIN1” do *multiplexer*. De modo a conseguir uma medição com maior precisão possível foi escolhido o valor mínimo de amostras por segundo (8 samples por segundo). Uma vez que o dispositivo foi alimentado a 3.3 V o sinal de saída do PGA nunca poderá ser superior a esse valor, por isso foi escolhido o valor de 2h para o endereço do PGA, o que corresponde a ± 2.048 V para o *full scale range*.

Tabela 3.2: Mapeamento dos endereços do Config Register.

Bit	Endereço	Tipo	Valor	Descrição
15	SS	R/W	1h	Inicia uma conversão única
14:12	MUX[2:0]	R/W	0h	Seleciona as entradas do <i>multiplexer</i>
11:9	PGA[2:0]	R/W	2h	Configura o PGA para uma escala de ± 2.048 V
8	MODE	R/W	1h	Configura o ADS1118 para conversão única
7:5	DR[2:0]	R/W	0h	Define o número de amostras por segundo para 8
4	TS_MODE	R/W	0h	Seleciona o sinal diferencial lido do termopar como saída do ADC
3	PULL_UP_EN	R/W	1h	Ativa uma resistência de <i>pullup</i> interna no pino DOUT
2:1	NOP[1:0]	R/W	1h	Guarda o valor do <i>Config Register</i>
0	Reservado	R	1h	Reservado

3.2.2 Ligação a Vários Termopares

Como já referido, um dos objetivos da dissertação é permitir medir a temperatura em várias zonas do molde. Para isso, é necessário utilizar vários dispositivos ADS1118 consoante o número de zonas que seja preciso medir, o SPI permite que os vários dispositivos sejam ligados à mesma interface. Para isso, os pinos SCLK, DIN e DOUT têm de ser partilhados. Para seleccionar qual o dispositivo que se pretende medir basta configurar o pino \overline{CS} dedicado para “0”. Na Figura 3.8 ilustra as ligações de dois dispositivos ADS1118 ao GPIO da Raspberry Pi.

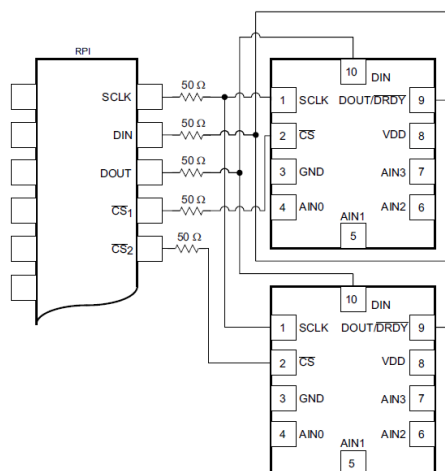


Figura 3.8: Ligação de vários dispositivos ADS1118 à Raspberry Pi.

3.2.3 Rotina de Leitura do Termopar

Para ler os valores medidos pelos sensores utilizados neste projeto, foi desenvolvido um programa na Raspberry Pi recorrendo à linguagem de programação Python. Na Figura 3.9, é apresentado o fluxograma para leitura de dois termopares utilizando apenas um dispositivo ADS1118. Como o objetivo desta dissertação é permitir uma monitorização contínua dos parâmetros do molde, os sensores de temperatura vão ter de estar a medir durante o seu tempo de utilização. No entanto, este fluxograma apenas exemplifica como o sistema funciona para um só ciclo.

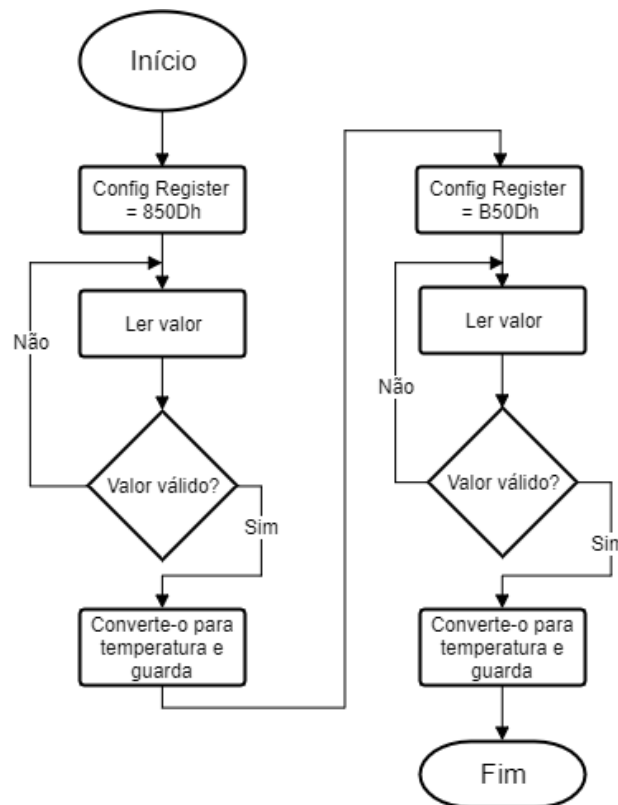


Figura 3.9: Fluxograma de leitura da temperatura.

A Raspberry Pi começa por estabelecer ligação com o ADS1118 ao configurar o *Config Register* e enviando o valor pelo pino MOSI. O valor enviado 850Dh faz com que o dispositivo retorne pela linha MISO o valor convertido pelo ADC do termopar ligado às entradas “AIN0” e “AIN1”. Para obtenção do valor final da tensão de saída são realizadas cinco leituras e depois calculada a média de maneira a eliminar ruído. Após receber o valor, o programa verifica se este está dentro do intervalo de valores permitidos caso não esteja volta a repetir a medição até obter um valor válido. Depois de o valor ser

aceite este é convertido para temperatura e guardado para se se iniciar a leitura do valor do segundo termopar. O *Config Register* é então novamente configurado, mas desta vez alterando as entradas do *multiplexer* para a “AIN2” e “AIN3”. De seguida, é repetido o processo feito para o primeiro termopar, ler o valor, verifica-se se este é válido e em caso afirmativo, este é convertido para temperatura e guardado.

3.2.4 Procedimento Experimental

Os resultados experimentais do sistema de instrumentação para medição da temperatura são apresentados nesta subsecção. Inicialmente, é descrito o procedimento utilizado para verificar o comportamento do sistema de leitura perante altas variações de temperatura. Em seguida, é feita a exposição dos resultados obtidos, comparando e analisando o sistema de instrumentação desenvolvido com um sistema de aquisição mais preciso.

De maneira a testar o comportamento do sistema de instrumentação foi realizado um ensaio que consiste em colocar o termopar selecionado no interior de um forno e aquecê-lo para simular as condições a que este vai sujeito no interior do molde. De forma a verificar a precisão dos valores foi utilizado outro termopar com as mesmas características para se poder comparar os valores lidos. O segundo termopar vai estar ligado a um sistema de aquisição de dados pertencente à empresa National Instruments. Este dispositivo, NI-9211 [36], é utilizado especialmente para a leitura de termopares, e efetua todo o condicionamento de sinal necessário para ser possível ler o valor de tensão gerado pelo termopar. Para visualizar a informação lida por este sistema foi utilizada uma *script* em Matlab que utiliza comunicação série para comunicar. Com o uso deste *software* é possível guardar a informação lida sob a forma de tensão ou temperatura para depois ser analisada. O *setup* de leitura do termopar com o NI-9211 está ilustrado na Figura 3.10.



Figura 3.10: Setup de montagem do termopar utilizando o NI-9211.

Como se trata de uma fase de caracterização do termopar e do seu sistema de leitura, foi desenvolvida uma PCB contendo apenas o circuito de leitura, o resultado do seu desenho está ilustrado na Figura 3.11.

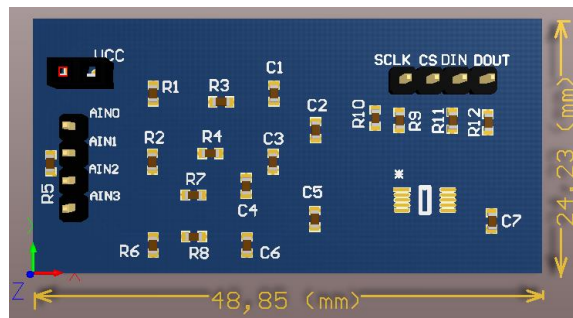


Figura 3.11: PCB de teste para leitura do termopar.

Tal como já referido neste capítulo, os termopares devem ter capacidade para medir altas temperaturas no interior do molde, mais propriamente 350 °C. Tendo em conta esse valor, traçou-se uma rampa de aquecimento gradual do forno até aos 400 °C. De forma a que as medições sejam o mais precisas possíveis, os dois termopares foram prendidos a uma barra metálica estando assim sujeitos à mesma temperatura. Este ensaio foi dividido em duas fases, a primeira inicia-se com o aquecimento do forno e acaba no momento em que este estabiliza a temperatura no seu interior. A segunda fase, inicia no momento em que o forno começa a arrefecer e termina quando a temperatura voltar a atingir os 60 °C. Durante o ensaio, foi analisada a resposta da tensão de saída dos dois sistemas de leitura a cada cinco segundos. De notar que, apesar de o forno ter

vido configurado para 400 °C, este não atinge o seu máximo a essa temperatura. Uma vez que o aquecimento do mesmo é feito de forma gradual, mesmo depois de parar de aquecer, a temperatura vai continuar a aumentar, mas de forma mais lenta até estabilizar. Os resultados dos testes estão ilustrados na Figura 3.12 e Figura 3.13.

A primeira fase do ensaio teve a duração de cerca de 12 minutos, tendo perfeito um total de quase 140 amostras. Ambos os sistemas de leitura iniciaram a leitura da temperatura a 30 °C, no entanto o valor de estabilização difere um pouco. O termopar controlado pelo sistema da NI atingiu um valor máximo de 446 °C, enquanto que o termopar controlado pela RPI fez um valor máximo de 457 °C, esta diferença de valores cria um erro de medição de 2.46 % para a temperatura máxima.

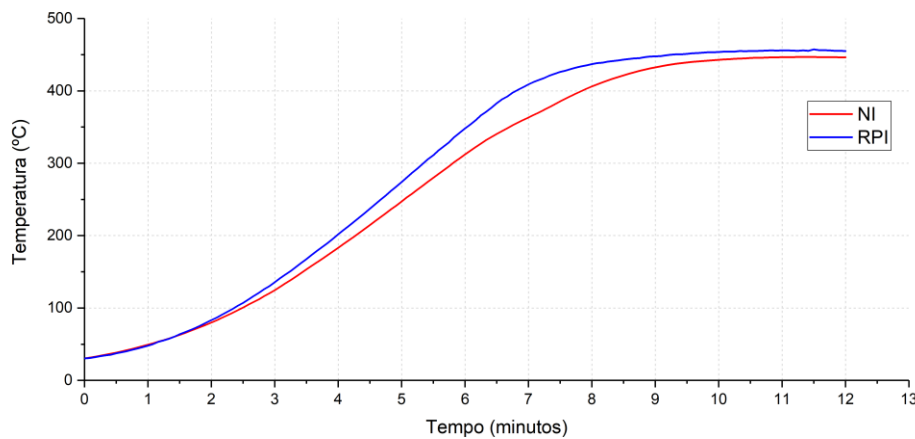


Figura 3.12: Evolução da temperatura dos dois sistemas de leitura durante o aquecimento do forno.

A segunda fase do teste, inicia-se no término do ensaio anterior, e tem a sua conclusão quando o interior do forno volta a 60 °C. Esta teve uma duração de cerca de 2 horas e 40 minutos, tendo sido recolhidas um total de quase 1940 amostras. Durante o teste, o erro máximo medido entre os dois sistemas foi de 1.96 % medido à temperatura de 454 °C pelo sistema RPI. Aproximadamente à temperatura de 130 °C o forno foi aberto daí que a temperatura tenha arrefecido consideravelmente mais rápido do que no resto do ensaio.

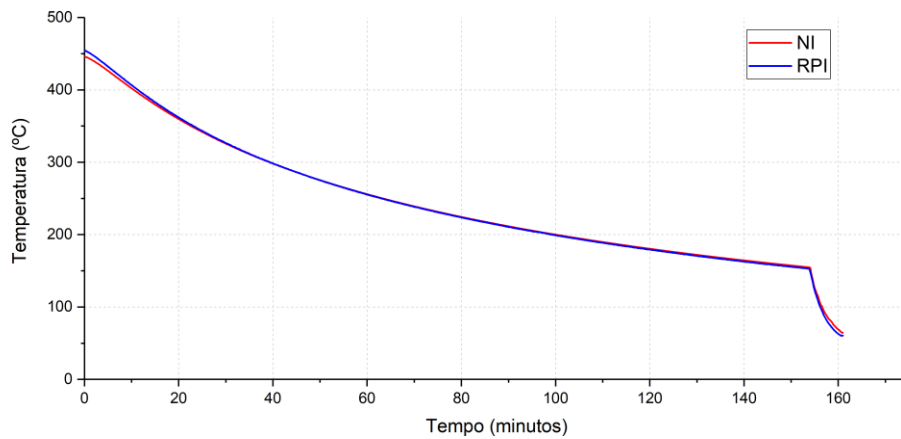


Figura 3.13: Evolução da temperatura dos dois sistemas de leitura durante o arrefecimento do forno.

Para além dos resultados já apresentados, foi ainda realizado um novo ensaio, mas desta vez, para analisar a resposta da tensão do termopar em função da temperatura lido pelo sistema da Raspberry Pi, de maneira a avaliar a sua linearidade. Para esta análise foram utilizadas 1970 amostras retiradas durante o arrefecimento do forno. Neste novo ensaio, a temperatura no interior do forno variou desde 50 °C até 440 °C. Na Figura 3.14 é possível verificar o resultado obtido.

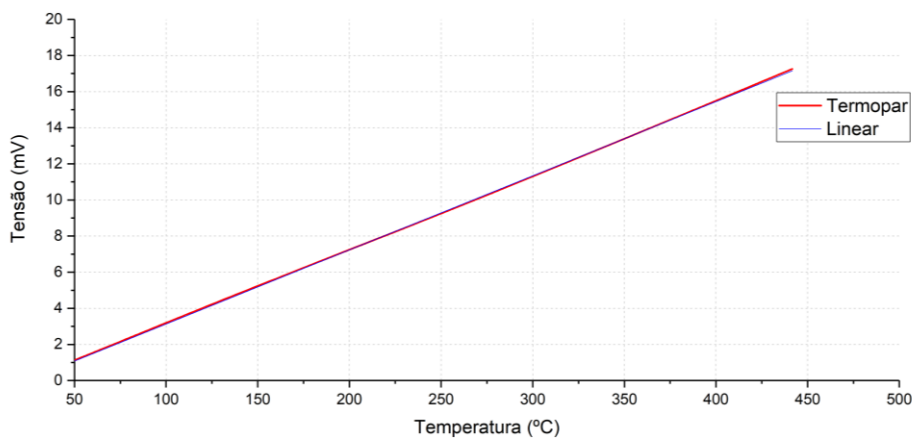


Figura 3.14: Resposta da tensão em função da temperatura do termopar.

Pela análise ao gráfico é possível obter a equação da reta linear do sistema de leitura do termopar, esta está descrita na equação 3.2. Como se pode ver pelo declive da equação da reta linearidade, a sensibilidade do termopar tipo K é igual ao valor já referido anteriormente, $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

$$y = 0.04105x - 0.9774 \quad (3.2)$$

De maneira a calcular a não linearidade do circuito de leitura do termopar é preciso saber o desvio máximo de saída e, também, o valor da gama dinâmica de saída, esta é a diferença entre o valor de tensão máximo e mínimo lido. À temperatura máxima registada a tensão é igual a 17.1540 mV e à temperatura mínima é igual a 1.0865 mV. A relação destes dois parâmetros para o cálculo da não linearidade é dada pela equação:

$$\text{Não linearidade} = \frac{\text{desvio máximo}}{\text{gama dinâmica}} \times 100 = \frac{0.10394}{16.0675} \times 100 = 0.65\% \quad (3.3)$$

Ambos os ensaios foram um sucesso, uma vez que foi comprovado que o termopar aguenta as altas temperaturas a que vai estar sujeito no interior do molde, é um sensor bastante linear, obtendo uma não linearidade de apenas 0.65 % e, ainda consegue medir com a precisão necessária. Por isso, pode-se afirmar que os três problemas referidos no princípio deste subcapítulo foram resolvidos com sucesso.

3.3 Caracterização do Sensor de Humidade

Nesta subsecção, vai ser esclarecido o funcionamento do sensor de humidade e temperatura ambiente, assim como ilustrados os resultados do teste realizado para verificar o seu funcionamento.

Como já referido no início deste capítulo, o sensor escolhido para esta aplicação permite medir a humidade relativa e a temperatura do meio em que se encontra. Contrariamente ao termopar já apresentado, este sensor possui o sistema de leitura já incorporado, sendo apenas necessário tratar da comunicação com a Raspberry Pi, a interface utilizada é o I2C. Após a leitura dos dados da informação proveniente do sensor, é preciso converter o valor hexadecimal para humidade relativa e temperatura. As fórmulas utilizadas para esse efeito estão apresentadas na Tabela 3.3, a variável “Dados” representa o valor hexadecimal de 4 *bytes* lido pela linha SDA. De seguida, é elucidada a rotina de leitura

Tabela 3.3: Fórmulas de conversão da temperatura e humidade.

Humidade (%RH)	$(Dados[7:0] \times 256 + Dados[15:8]) / 2^{14} \times 100$
Temperatura (°C)	$(Dados[23:16] \times 64 + Dados[31:24] / 4) / 2^{14} \times 165 - 40$

3.3.1 Rotina de Leitura do Sensor

A rotina de leitura utilizada para medição da temperatura ambiente e da humidade relativa com o sensor T9602 está ilustrada na Figura 3.15. À semelhança do que já foi escrito com o termopar, este sensor também tem que estar a medir durante 24 horas, devendo realizar uma medição a cada 60 segundos. O fluxograma apresentado apenas retrata a rotina para uma medição. O programa inicia com a abertura da comunicação I2C, indicando à RPI (master) qual o endereço do sensor (*slave*), neste caso, 0x28h. Após a leitura de 4 bytes prossegue-se à conversão do valor hexadecimal para temperatura e humidade, este passo é repetido cinco vezes, sendo depois calculada a média dos valores lidos de maneira minimizar possíveis erros de leitura. Seguidamente, é avaliada a veracidade dos dois valores e caso não se verificarem prossegue-se a uma nova medição, caso contrário o valor é guardados e termina-se o ciclo.

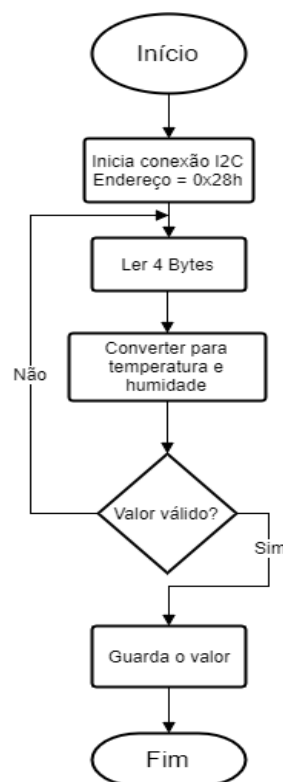


Figura 3.15: Fluxograma de leitura do sensor de humidade e temperatura.

3.3.2 Procedimento Experimental

Os resultados experimentais para o sensor de temperatura e humidade são apresentados nesta subsecção. De maneira a testar o bom funcionamento deste sensor foi realizado um ensaio medindo as duas componentes. Este consiste na colocação do sensor numa sala em que lhe foi variada a humidade e a sua temperatura mantida constante. Este teste tem dois pontos fulcrais, o primeiro, ocorre logo no início com abertura de uma torneira de água quente de forma a que humidade relativa do ar aumentasse consideravelmente, até perto dos 100 %. O segundo ponto, ocorre no momento em que a torneira é fechada e é ligado um desumidificador, de maneira a remover a humidade que foi acrescida com a água quente. Os resultados deste ensaio estão ilustrados na Figura 3.16. Ao iniciar, a humidade na sala estava a 64 % e a temperatura nos 22 °C, após 15 minutos com a água quente ligada, o valor da humidade lida pelo sensor atingiu o seu máximo que foi 95 %. Nesse instante, o desumidificador foi ligado e manteve-se assim até ao fim do teste, durante esse tempo a humidade reduziu para cerca de metade, 47 %. De salientar que, como era esperado, a temperatura manteve-se constante durante todo o período do teste. Concluindo, este teste foi um sucesso, pois foi possível verificar que o sensor consegue medir grandes variações da humidade e ao mesmo tempo manter um correto valor da temperatura.

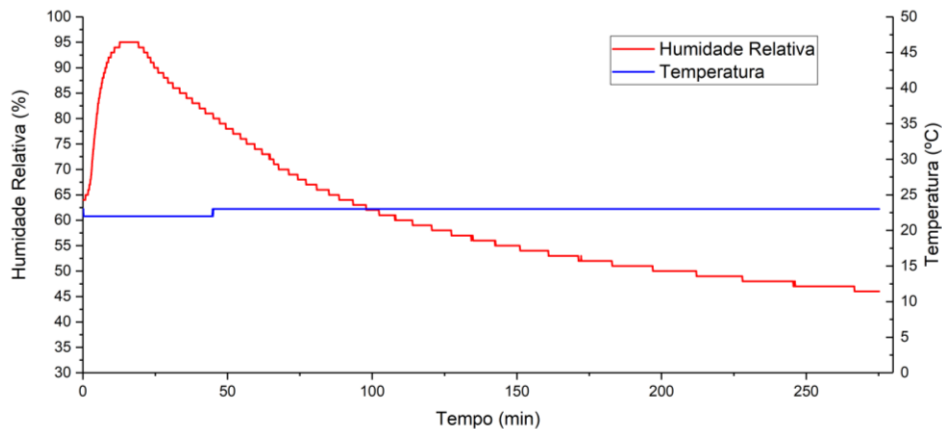


Figura 3.16: Resposta do sensor de temperatura e humidade durante o ensaio.

3.4 Caracterização do Extensómetro

Neste subcapítulo é detalhada toda a implementação que foi feita relativa ao extensómetro. Inicialmente, é descrita a implementação do circuito de leitura discriminando cada um dos blocos desenvolvidos. Seguidamente, é ilustrada a rotina de leitura do valor da deformação através de um fluxograma, por fim são esclarecidos os testes realizados para a caracterização do sistema de leitura.

3.4.1 Instalação do Extensómetro

O primeiro passo na utilização de um extensómetro passa por definir o tipo de circuito de excitação a usar. Na subsecção 2.4.1 em que foi introduzida esta tecnologia, é referido que um dos circuitos de excitação a utilizar é o da ponte de Wheatstone, e que este permite três tipos de configurações diferentes. Para esta aplicação, escolheu-se a configuração da ponte completa. Utilizando quatro extensómetros para ligar a ponte de Wheatstone, todos vão estar sujeitos às mesmas condições, fazendo com que a contração ou dilatação dos fios de cobre devido às altas temperaturas já não provoque uma variação da tensão de saída. Na Figura 3.17 ilustra o esquemático de uma ponte de Wheatstone completa, em que cada resistência variável representa um extensómetro.

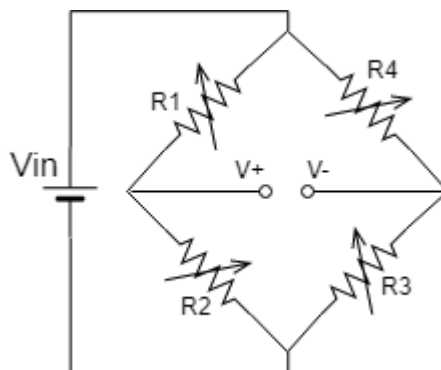


Figura 3.17: Esquemática de uma ponte de Wheatstone completa.

Após definir o circuito de excitação é necessário tratar da instalação dos extensómetros. Como esta é uma fase para caracterização do sensor, utilizou-se uma pequena barra metálica como plano para colocar os quatro extensómetros. Estes, apenas são sensíveis a forças aplicadas perpendicularmente à barra, uma vez que, os veios extratores do molde, também, tendem a deformar apenas para uma direção. Por isso,

para medir a deformação da barra metálica foram colocados dois extensômetros (R1 e R3) com a mesma orientação na parte superior e os outros dois (R2 e R4), também com a mesma orientação, na parte inferior. Desta forma, se for aplicada uma força sobre a parte superior da barra, o valor das resistências R1 e R3 vai diminuir enquanto que o valor de R2 e R4 vai aumentar. Se for aplicada uma força sobre a parte inferior, o valor de R2 e R4 vai diminuir e o de R1 e R3 vai aumentar. Para colocar cada extensômetro na barra metálica foram seguidos os seguintes passos:

- Polir a área de aplicação do extensômetro e limpar utilizando álcool isopropílico para eliminar impurezas não causando erros de medição;
- Traçar as marcas onde vai ser aplicado o extensômetro de maneira a ficar paralelo à barra metálica;
- Com recurso a fita adesiva posicionar o extensômetro para poder segurá-lo com recurso a cola instantânea.

O resultado final da instalação dos quatro extensômetros está ilustrado na Figura 3.18.

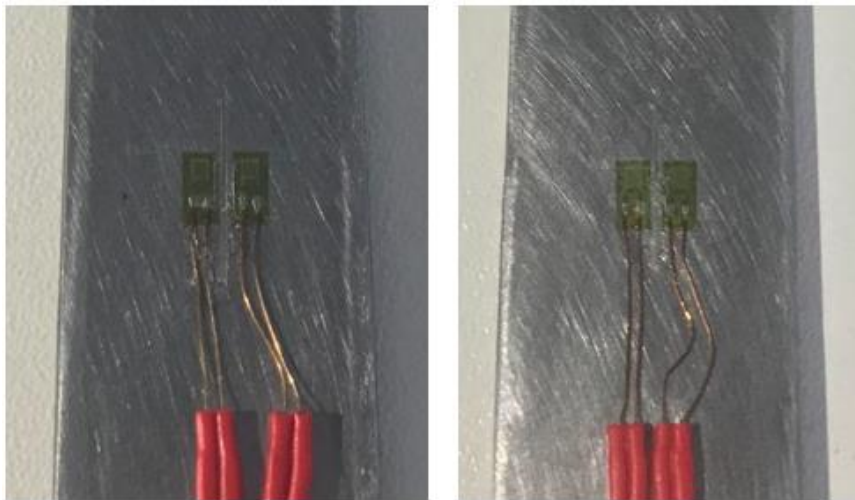


Figura 3.18: Instalação dos extensômetros. A imagem à esquerda representa a parte inferior da barra metálica, a imagem à direita a parte superior.

3.4.2 Circuito de Leitura

Como já referido na secção 2.4.1, a tensão de saída do circuito ponte Wheatstone é um sinal bastante pequeno, na ordem das centenas de microvolts, daí que seja necessário amplificar este valor. Para além disso, sendo esta uma aplicação de sensores em ambientes ruidosos é também fundamental filtrar o ruído existente para não introduzir erros de medição da deformação. Por último, é preciso converter o valor analógico lido para possibilitar a sua leitura pela Raspberry Pi. Tendo em vista estas necessidades foi desenhado um sistema de leitura, o seu diagrama de blocos está ilustrado na Figura 3.19. De seguida vão ser explicados cada um dos blocos.

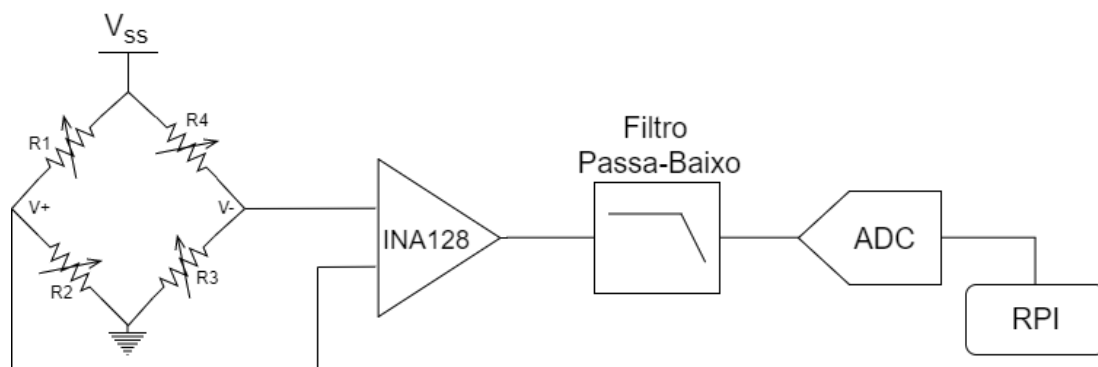


Figura 3.19: Diagrama de blocos do circuito de leitura do extensómetro.

O circuito de leitura possui na entrada o amplificador de instrumentação INA128, este integrado amplia a diferença de tensão da ponte de Wheatstone. As suas principais características são baixo consumo, e elevada precisão [37]. O esquemático desta fase do circuito de leitura está ilustrado na Figura 3.20. O ganho deste amplificador de instrumentação é dado pela equação:

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (3.4)$$

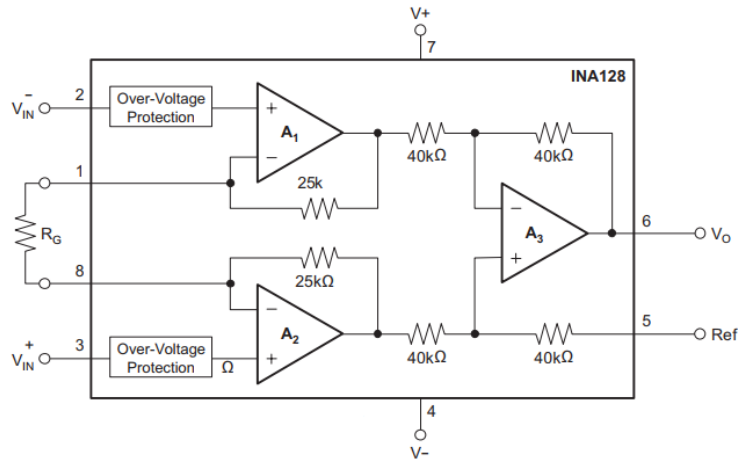


Figura 3.20: Esquemático do amplificador de instrumentação INA128.

Para se obter um valor na saída do amplificador na gama dos 0-5 V, o ganho deve ser de 150. Daí que o valor de R_G seja igual a 335Ω , devido aos valores *standard* das resistências escolheu-se o valor de 360Ω , este valor faz com que o ganho seja alterado para 140. Uma vez que, a tensão de alimentação do amplificador é 0 e 5 V, a sua tensão de referência tem de ser o valor intermédio deste intervalo. Para isso foi utilizado um divisor de tensão ligado a um seguidor de tensão de forma a que na sua saída estejam 2.5 V. Para utilizar o seguidor de tensão foi escolhido o integrado AD822, que possui dois amplificadores, este é também usado para o filtro passa-baixo. O circuito da tensão de referência está ilustrado na Figura 3.21.

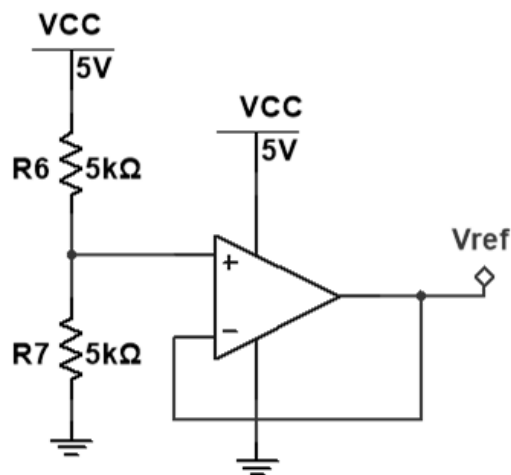


Figura 3.21: Esquemático do circuito da tensão de referência do amplificador de instrumentação.

Seguidamente, é introduzido no circuito de leitura o filtro passa-baixo, uma vez que, na medição da deformação com o extensómetro apenas interessa a componente

contínua do sinal. Para isso, foi implementado um filtro passa-baixo Sallen-Key de 2ª ordem, ilustrado na Figura 3.22. Utilizando valor de 15 Hz para a frequência de corte (f_0) e um fator de qualidade (Q) de 1, é possível dimensionar o filtro. Em primeiro lugar, escolhe-se um valor para C1. C2 é igual a duas vezes C1. As resistências R1 e R2 são dimensionadas a partir da seguinte fórmula:

$$R1 = R2 = \frac{1}{2\sqrt{2} \times \pi \times C1 \times f_0} \quad (3.5)$$

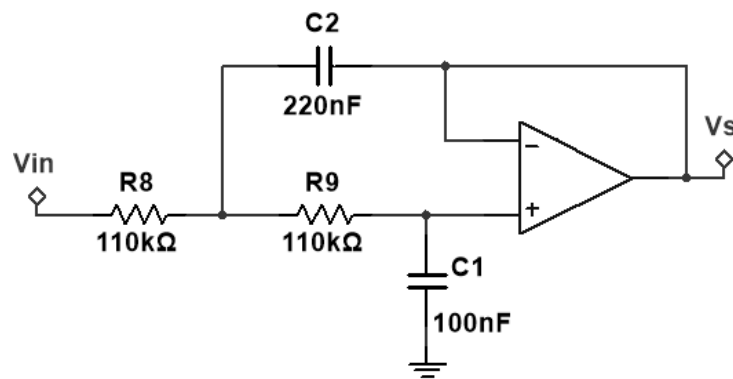


Figura 3.22: Esquemático do filtro passa-baixo 2ª ordem.

O conversor analógico para digital utilizado é bastante semelhante ao conversor que já foi referido para medir o sinal do termopar. O ADS1115, é um conversor analógico para digital do tipo sigma-delta ($\Sigma\Delta$), de 16-bits, baixo consumo e reduzidas dimensões [38]. Este dispositivo permite ligar até quatro entradas analógicas, sendo ainda permitido introduzir ganho configurável ao valor lido na entrada analógica. Por último, este dispositivo utiliza interface I2C para comunicar com a Raspberry Pi. O diagrama de blocos do ADS1115 está ilustrado na Figura 3.23.

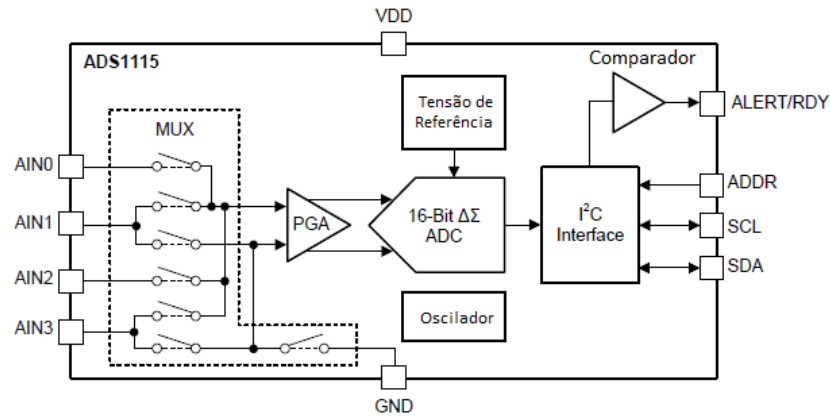


Figura 3.23: Diagrama de blocos do ADS1115.

Este dispositivo inclui um comparador, que para esta aplicação não é utilizado. Através do pino “ADDR” é possível configurar o seu endereço para a comunicação I2C com a Raspberry Pi, ao ligá-lo diretamente ao *GND*, o seu endereço passa a ser igual a 48h. Para além disso, este possui cinco registos acessíveis através da interface I2C. São eles, o *Address Point Register*, endereço de 8 bits que indica qual vai ser o registo a ser acedido, o *Conversion Register*, é um endereço de 16 bits que contém o resultado da última conversão, o *Config Register*, que permite configurar o modo de operação do ADS1115 e ainda dois registos utilizados para o comparador, o *Hi_thresh* e o *Lo_thresh*.

O *Config Register* é um endereço de 16 bits e o seu mapeamento está detalhado na Tabela 3.4. A configuração utilizada para converter o sinal lido desde a saída da ponte de Wheatstone faz com que este registo tenha o valor 4200h. Neste modo, o ADS1115, seleciona a entrada “AIN0” e o “GND” do *multiplexer*. Para permitir uma conversão mais fiável e precisa foi selecionado o menor número possível de amostras por segundo (*samples* por segundo).

Tabela 3.4: Mapeamento dos endereços do Config Register.

Bit	Endereço	Tipo	Valor	Descrição
15	OS	R/W	0h	Sem efeito
14:12	MUX[2:0]	R/W	4h	Seleciona as entradas do <i>multiplexer</i>
11:9	PGA[2:0]	R/W	1h	Configura o PGA para FSR igual a ± 4.096 V
8	MODE	R/W	0h	Configura o ADS1115 para conversão contínua
7:5	DR[2:0]	R/W	0h	Define o número de amostras por segundo para 8
4:0	Reservado	R/W	0h	Configurações do comparador não utilizadas

3.4.3 Rotina de Leitura do Extensômetro

A rotina de leitura utilizada para medição da deformação do extensômetro está ilustrada na Figura 3.24. À semelhança do funcionamento do termopar, o extensômetro também tem que monitorizar os veios extratores durante o tempo em que o molde está em funcionamento, no entanto, o fluxograma apresentado apenas ilustra a rotina de uma medição, sendo depois este processo. O programa inicia com a abertura da comunicação I2C, indicando à Raspberry Pi qual o endereço do dispositivo ADS1115, neste caso, 0x48h. De seguida, é iniciada a comunicação enviando pela linha SDA 4 bytes de forma a definir o *Config Register*, os primeiros sete bits indicam o endereço do *slave* seguido de um bit a “0” indicando que se trata de uma operação de escrita. O segundo byte tem o valor do *Address Point Register* para informar que será uma operação de escrita para o *Config Register*, os dois últimos bytes são, respetivamente, o MSB e LSB do registo. Seguidamente, é lido o valor enviado pelo *slave*, mas primeiro é preciso voltar o tipo de operação que vai ser feita para o determinado registo definido pelo *Address Point Register*, sendo este depois convertido para variação da resistência utilizando a equação 2.9. A leitura e conversão do valor é repetida cinco vezes e calculada a média das leituras de forma a minimizar possíveis erros. Após isto, é verificada a veracidade da média resultante e caso o valor não se encontre dentro do intervalo esperado é realizada uma nova medição. Caso o valor esteja dentro do esperado, é guardado e termina assim a rotina.

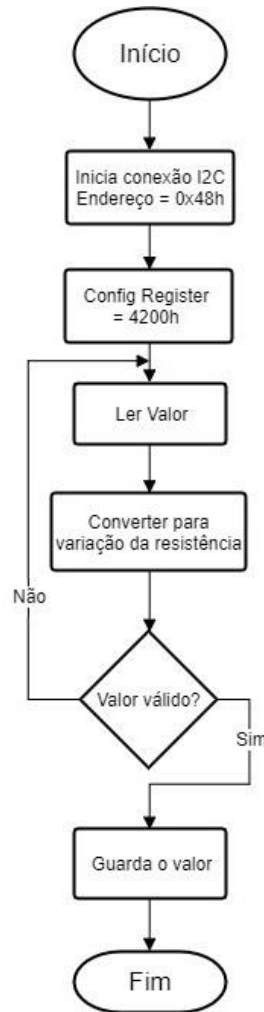


Figura 3.24: Fluxograma de leitura do extensômetro.

3.4.4 Procedimento Experimental

Os resultados experimentais do sistema de instrumentação para medição da deformação são apresentados nesta subseção. Inicialmente, é descrito o procedimento utilizado para verificar o comportamento do sistema perante a aplicação de uma força. Em seguida, é feita a exposição dos resultados obtidos, comparando o sistema de instrumentação desenvolvido com um sistema de aquisição de dados da National Instruments.

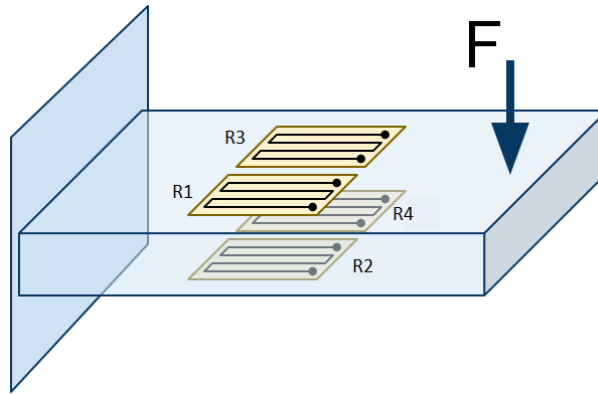


Figura 3.25: Ilustração do ensaio da aplicação de uma força sobre uma barra metálica suspensa.

De forma a validar o comportamento do sistema de instrumentação foi feito um ensaio que consiste em aplicar uma força sobre a extremidade de uma barra metálica em que foram colocados os extensômetros, Figura 3.25. De maneira a comparar os resultados obtidos, foi utilizado em simultâneo o sistema da NI. Este sistema consiste em dois dispositivos, o primeiro trata-se do NI-9949 [39], que é utilizado para simular o circuito de ponte completa e onde se ligam os quatro extensômetros, o segundo dispositivo que liga ao anterior utilizando um cabo RJ50, é o NI-9237 e realiza todo o condicionamento de sinal necessário à leitura do extensômetro, ainda possui um resistência de *shunt* interna para correção de erros das ligações. Na Figura 3.26 estão ilustradas as ligações do sistema de aquisição da NI. Com a utilização de uma *script* em Matlab é possível visualizar os resultados obtidos com o ensaio.

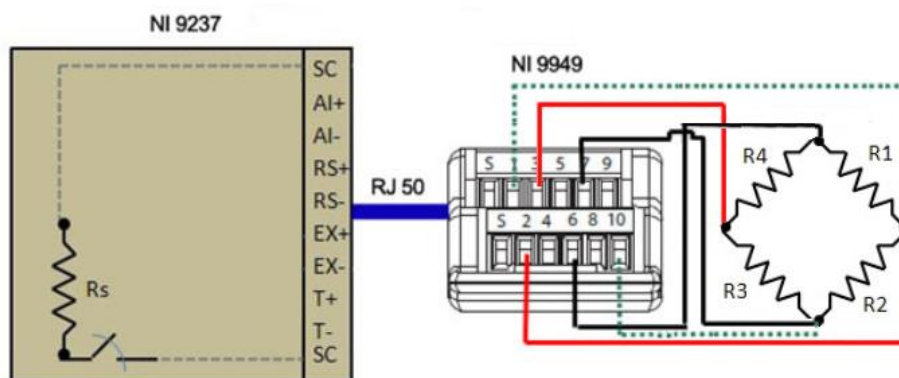


Figura 3.26: Diagrama com as ligações de uma ponte completa ao NI 9237 [40].

Uma vez que, esta é uma fase de caracterização dos extensômetros e do seu circuito de leitura, foi desenvolvida uma PCB contendo apenas o circuito de leitura

ilustrado na subsecção anterior. A PCB desenhada pode ser visualizada na Figura 3.27, o conversor analógico para digital ADS1115, está integrado em uma pequena PCB à parte que encaixa nos pinos com a descrição “ADC”. Os extensómetros são ligados de maneira a que se faça *shunt* entre eles.

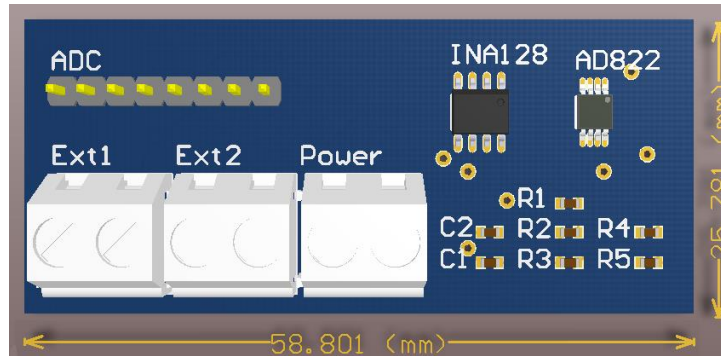


Figura 3.27: PCB de testes para leitura dos extensómetros.

Tal como já referido neste documento, a utilidade deste sensor é detetar fraturas nos veios extratores do molde. Por isso, com este ensaio pretende-se validar o circuito de leitura implementado ao analisar e comparar os seus resultados com o sistema da NI. Este ensaio consiste na aplicação de forças variadas sobre a barra em que estão colocados os extensómetros, medindo a diferença de potencial aos terminais da ponte, e consequentemente, calcular a variação da resistência dos extensómetros tendo por base a equação 2.9, presente na subsecção 2.4.1. Durante a subsecção da Instalação do Extensómetro, é referido que os quatro extensómetros vão sofrer a mesma elongação, sendo que a variação da resistência do extensómetro 2 e 4, têm sentido contrário à do 1 e 3. Portanto, a equação 2.9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{V_+ - V_-}{V_{in}} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R}{R} - \left(-\frac{\Delta R}{R} \right) + \frac{\Delta R}{R} - \left(-\frac{\Delta R}{R} \right) \right) = \frac{\Delta R}{R} \quad (3.6)$$

Durante o teste, foram aplicadas sete forças diferentes, intervaladas de cerca de 1 N. Os resultados do ensaio para os dois sistemas de leitura estão ilustrados na Figura 3.28.

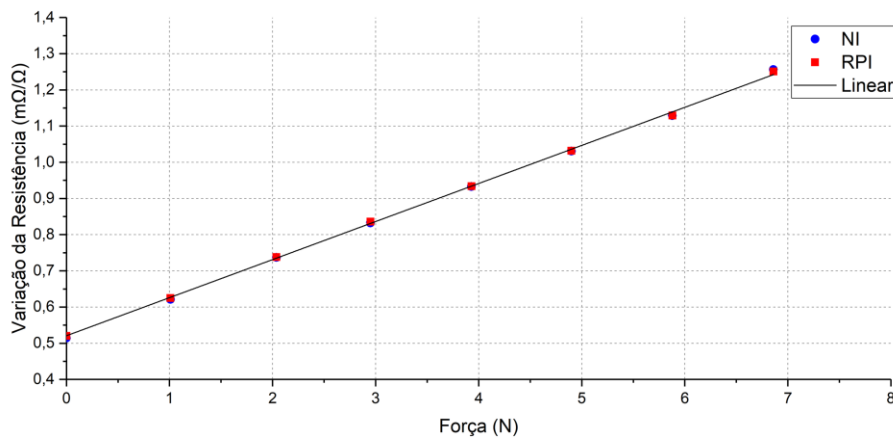


Figura 3.28: Resultados dos dois sistemas de leitura para o ensaio da aplicação de forças sobre uma barra metálica.

Como se pode ver pela observação do gráfico, os dois sistemas tiveram resultados praticamente idênticos, sendo que o maior erro entre os dois sistemas foi de 0.77 % quando aplicada uma força de 5 N. A linearidade do sistema de leitura da RPI é descrita pela equação 3.4, e está representada pela linha preta no gráfico. A sensibilidade do extensómetro, é dada pela resposta do sensor para uma variação de um 1 N, e o seu valor é igual ao declive da equação 3.6, que é 0.10517 mΩ/Ω, outra informação importante retirada da equação é o valor de offset de entrada que é 0.52071 mΩ/Ω.

$$y = 0.10517x + 0.52071 \quad (3.7)$$

De maneira a calcular a não linearidade do extensómetro, é necessário saber o desvio máximo da resposta à linearidade e o valor da gama dinâmica. A relação destes dois parâmetros para o cálculo da não linearidade é dado pela equação:

$$\text{Não linearidade} = \frac{\text{desvio máximo}}{\text{gama dinâmica}} \times 100 = \frac{0.01}{0.721} \times 100 = 1.39 \% \quad (3.8)$$

Para concluir, pode-se afirmar que este teste foi um sucesso uma vez que o sistema de leitura implementado obteve uma resposta quase idêntica ao sistema da NI e uma não-linearidade de apenas 1.39 %.

3.5 Cenário de Aplicação do Sistema de Instrumentação

Após a validação do sensor de humidade e dos circuitos de leitura para medir o termopar e o extensómetro é necessário desenvolver o protótipo final do sistema de instrumentação. O aspeto do sistema de instrumentação desenvolvido é apresentado na Figura 3.29, demonstrando a representação tridimensional da vista de topo do sistema. O esquemático completo referente ao desenvolvimento total desta PCB está integrado no Anexo I.

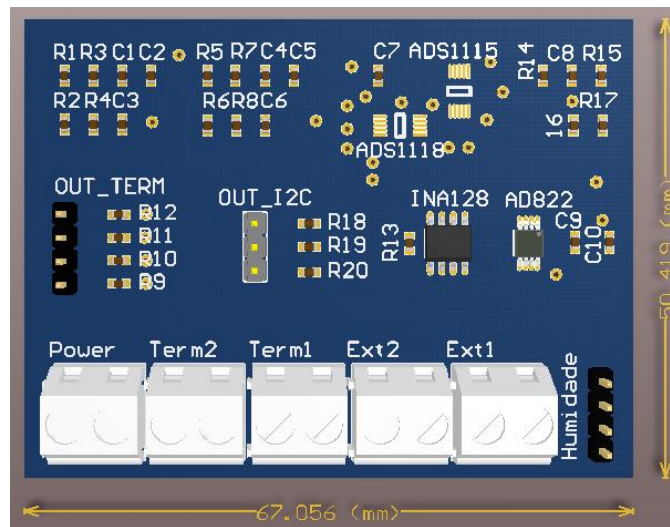


Figura 3.29: Vista de topo do sistema de instrumentação.

Apenas é preciso ligar os sensores aos seus devidos conetores e ligar os dois tipos de saída, SPI e I2C à RPI,

Resumidamente, com a utilização desta PCB integra-se todo o sistema desenvolvido, reduzindo a quantidade de material necessário, e acima de tudo reduz-se o esforço temporal para medir individualmente cada sistema de leitura.

4. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Nesta dissertação foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de instrumentação capaz de monitorizar continuamente o funcionamento de um molde, com especial incidência nos sensores de temperatura e humidade e nos sensores de deformação. Os sistemas de leitura de cada um dos sensores foram desenhados tendo em vista os requisitos do sistema, sendo que a informação lida por cada um deles pode ser consultada utilizando a consola disponível na Raspberry Pi.

Apesar de ainda ser necessário testar o sistema de instrumentação com recurso a um postigo¹, de maneira a simular as condições reais, mas em menor escala, os resultados experimentais obtidos em laboratório são bastante promissores. O sistema de leitura da temperatura conseguiu medir com precisão todos os valores que o interior do molde vai estar sujeito, registando-se um erro máximo inferior a 2 % quando comparado com um sistema de aquisição bastante completo como é o NI-9211. Com a utilização do extensómetro deu para perceber que esta é uma ótima solução para controlo de quebras nos veios extratores, no entanto, poderá ser necessário melhorar a filtragem do sinal quando este for testado em ambiente industrial. O último dos requisitos do sistema, a medição da temperatura ambiente e da humidade, que apesar de ser o sistema com menores restrições, relativas à precisão e à sensibilidade, foi também concluído com sucesso. Por isso, é possível afirmar que o sistema de instrumentação desenvolvido é fiável, e uma boa alternativa a um custo mais reduzido.

Contudo, há ainda formas de melhorar este sistema, por isso é destacado para o trabalho futuro, a inclusão de mais termopares e o respetivo sistema de leitura de forma a cobrir todas as zonas que rodeiam o interior do molde. Permitir ainda a monitorização de mais parâmetros do molde tais como a pressão e controladores de caudal para os sistemas de arrefecimento. Por último, passa por permitir uma visualização mais atrativa ao utilizador através da criação de uma GUI (*Graphical User Interface*) utilizando o Qt Creator, por exemplo.

¹ Postigo: Parte integrante de um molde.

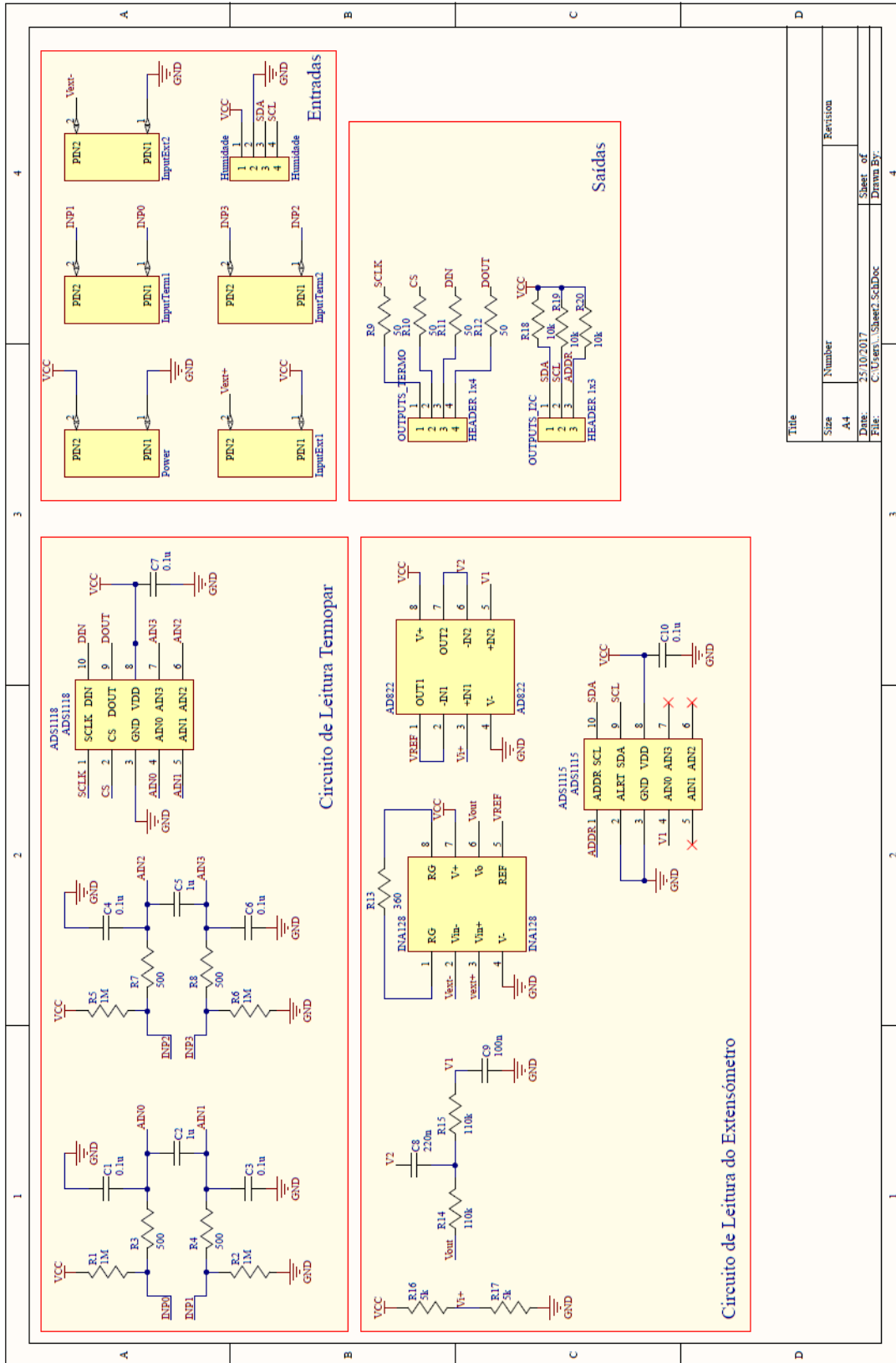
BIBLIOGRAFIA

- [1] “9 Scenarios of Common Assembly Line Issues.” [Online]. Available: <http://www.eflexsystems.com/lean-manufacturing-blog/scenarios-of-common-assembly-line-issues>.
- [2] “Processo de Moldagem Por Injeção.” [Online]. Available: <http://www.dow.com/polyethylene/la/pt/fab/molding/improcess.htm>.
- [3] M. Manuel and M. Moreira, “Projeto de molde para a injeção de peça plástica complexa para a indústria automóvel,” 2015.
- [4] Kistler, “Sensor for Mold Cavity Pressure and Temperature with Front \varnothing 4 mm,” pp. 2–5, 2014.
- [5] “O que é um sensor FBG (Fiber Bragg Grating)? | HBM.” [Online]. Available: <https://www.hbm.com/pt/4596/dicas-e-informacoes-o-que-e-sensor-fbg/>.
- [6] M. Kreuzer, “Strain measurement with fiber bragg grating sensors,” *HBM, Darmstadt, S2338-1.0 e*, 2006.
- [7] Dr. Paschotta, “Optical Fiber Technology- Physical Principles and Applications of Different Types of Optical Fibers,” *Opt. Photonik*, vol. 52, no. 2, pp. 52–55, 2008.
- [8] J. F. Almeida, “Monitorização de estruturas de engenharia baseada em redes de Bragg em fibra óptica: contribuição para a optimização de dois sistemas de interrogação,” 2007.
- [9] “Temperature Sensor Types for Temperature Measurement.” [Online]. Available: http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html.
- [10] B. Baker, “Temperature sensing technologies,” *Microchip Technol. Inc*, 1998.
- [11] “Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples.” [Online]. Available: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/measuring-temp-using-thermocouples.html>.
- [12] “Aquisição e Tratamento de Dados – Teoria: Sensores de Temperatura Resistivos (RTDs).” [Online]. Available: <http://www.profelectro.info/aquisicao-e-tratamento-de-dados---teoria-7-sensores-de-temperatura-resistivos-rtds/>.
- [13] “DIN IEC 751 Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors.”
- [14] “What is a thermistor? | Omega Engineering.” [Online]. Available:

- <http://www.omega.com/prodinfo/thermistor.html>.
- [15] “Thermistors and NTC Thermistors.” [Online]. Available: <http://www.electronicstutorials.ws/io/thermistors.html>.
- [16] O. Dielectric and T. Sensor, “FS63 - High Temperature Dielectric Probe,” pp. 2–3, 2008.
- [17] “Water Vapor Myths: A Brief Tutorial.” [Online]. Available: <http://www.atmos.umd.edu/~stevenb/vapor/>.
- [18] A. G. P. T. L. Paez, *Harris’ Shock and Vibration Handbook*, Sixth Edit. .
- [19] W. M. Murray and W. R. Miller, “The Bonded Electrical Resistance Strain Gage,” p. 409, 1992.
- [20] “Extensómetros Elétricos.” [Online]. Available: http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3086/Extensometros_eletricos.pdf.
- [21] K. Hoffmann, “Applying the Wheatstone Bridge Circuit.” HBM, 1986.
- [22] G. Gautschi, *Piezoelectric Sensorics, Force, Strain, Pressure and Acceleration.* Springer, 2002.
- [23] M. Specialties, “Piezo Film Sensors Technical Manual,” *Measurement*, no. March, p. 57, 2006.
- [24] Svein and K. E. Hansen, “Design and Experimental Investigation of Charge Amplifiers for Ultrasonic Transducers,” no. June, 2014.
- [25] J. Karki, “Signal Conditioning Piezoelectric Sensors,” *Sensors Peterbrgh. NH*, vol. 48, no. September, pp. 1–6, 2000.
- [26] “FS62 - Surface Strain Sensor | FiberSensing.” [Online]. Available: <http://www.fibersensing.com/products/fbg-sensors/view/surface-strain-sensor>.
- [27] KYOWA, “General-purpose Foil Strain Gages KFG,” pp. 18–25.
- [28] P. F. Sensors and H. Sensativity, “LDT with Crimps Vibration Sensor / Switch LDT with Crimps Vibration Sensor / Switch,” *Response*, pp. 1–4, 2008.
- [29] Motorola Inc., “SPI Block Guide,” *ReVision*, vol. 3, pp. 1–38, 2003.
- [30] “Serial Peripheral Interface (SPI) - learn.sparkfun.com.” [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>.
- [31] “SPI/I²C Bus Lines Control Multiple Peripherals - Application Note - Maxim.” [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app->

- notes/index.mvp/id/4024.
- [32] "I2C - learn.sparkfun.com." [Online]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>.
- [33] T. Class, "Temperature and Process Technology," p. 1971, 1971.
- [34] A. Sensors, "T9602 Humidity & Temperature Sensor for OEM Installation Amphenol."
- [35] Texas Instruments, "Analog-to-Digital Converter with Internal Reference," *Datasheet*, 2009.
- [36] National Instruments, "DATASHEET NI 9211 Datasheet," 2015.
- [37] Texas Instrument, "INA128: Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers," no. 1, p. 20, 2005.
- [38] D. Information and S. B. Diagrams, "With Internal Reference , Oscillator , and Programmable Comparator," 2016.
- [39] National Instruments, "Datasheet NI USB-6221," *Online*, no. 866, pp. 1-7, 2014.
- [40] "Connecting Strain Gages and Shunt Resistors to the NI 9237 - National Instruments." [Online]. Available: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/892C84122A6501AE86257547007E5C53>.

ANEXO I – ESQUEMÁTICO DO SISTEMA DE LEITURA



Title	
Size	Number
A4	Revision
Date	Sheet of
25/10/2017	Drawn By
File:	C:\Users\... \Sheet3.dwg