



# Condicionamento de sinal para sistema de aquisição de dados em superfícies metálicas finas

Marcos Ademir Bussmann

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) de Bragança no âmbito do programa de dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial, ramo eletrotécnica.

Bragança

2020



# Condicionamento de sinal para sistema de aquisição de dados em superfícies metálicas finas

**Marcos Ademir Bussmann**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) de Bragança no âmbito do programa de dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial, ramo eletrotécnica.

**Orientador:**

Prof. Dr. José Augusto Almeida Pinheiro de Carvalho

**Coorientador:**

Prof. Dr. Nelson Rodrigues

Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Bragança

2020



# Dedicatória

Dedico esse trabalho aos meus pais Nelson e Rosevite, aos meus irmãos Karina e Adiles e aos meus cunhados Franciel e Rosemeri por todo apoio e suporte prestado ao longo de minha jornada acadêmica. Dedico esse trabalho também aos meus amigos, às quais eu não seria nada sem seu apoio, presença e companheirismo.



# Abstract

Metal stamping and plastic injection are widely used in the industry due to their wide application. Giving shape and size by bending sheet metal or injecting melted plastic into molds is a very practical and economical way to create objects and remain in a highly competitive market. Monitoring the pressure and temperature in these processes is of utmost importance so that the good quality of the material produced is maintained. It is in this aspect that the On-Surf project fits. A national project to develop techniques for changing thin surfaces that promote advanced and innovative solutions in different sectors of activity. This work focuses on the monitoring and control of these industrial processes using a reconfigurable data acquisition system for thin surface sensors in a *Wheatstone* bridge. The signal acquisition is made with the use of a commercial amplifier ZSSC 4151. This amplifier is a complete analog data acquisition system, with the benefit of digital processing and calibration of the input signal. The output data are available in an analog way and linearized between the calibration points. Since the signal output is linear, we can infer the temperature value, or any calibrated signal, at an intermediate point in the measurement range. In addition, a graphical interface is provided by the manufacturer for configuration and calibration of the integrated. It is also proposed, based on the analog-digital converter equation, an equation to obtain the resistance of the sensor in the *Wheatstone* bridge.

**Keywords:** data acquisition system; thin surface sensing; metal stamping; plastic injection.



# Resumo

A estampagem metálica e a injeção plástica, são amplamente utilizadas na indústria devido a sua vasta aplicação. Dar forma e tamanho dobrando chapas metálicas ou injetando plástico derretido em moldes, é uma maneira muito prática e econômica de criar objetos e manter-se num mercado altamente competitivo. Monitorar a pressão e a temperatura nesses processos é de extrema importância para que a boa qualidade do material produzido seja mantida. É nesse aspecto que se enquadra o projeto On-Surf. Um projeto nacional (mobilizador) para desenvolvimento de técnicas de alteração de superfícies finas que promovam soluções avançadas e inovadoras em diferentes setores de atividade. Este trabalho tem como foco o monitoramento e controle desses processos industriais a partir de um sistema reconfigurável de aquisição de dados de sensores de superfícies finas em ponte de *Wheatstone*. A aquisição do sinal é feita com a utilização de um amplificador comercial ZSSC 4151. Este amplificador é um sistema de aquisição de dados analógicos completo, com o benefício do processamento digital a calibração do sinal de entrada. Os dados de saída são disponibilizados de maneira analógica e linearizados a partir de pontos de calibração. Uma vez que a saída do sinal é linear, pode-se inferir o valor da temperatura, ou de qualquer sinal calibrado, em um ponto intermediário no intervalo da medida. Além disso, uma interface gráfica é disponibilizada pelo fabricante para configuração e calibração do integrado. É proposto também, com base na equação do conversor analógico digital, uma equação para obtenção da resistência do sensor na ponte de *Wheatstone*.

**Palavras-chave:** aquisição de dados; sensorização; estampagem metálica; injeção plástica.



# Conteúdo

<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estrutura do Documento . . . . .	2
<b>2 Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 A estrutura dos metais . . . . .	5
2.1.1 A estrutura cristalina dos metais . . . . .	5
2.1.2 Forças de deformação . . . . .	8
2.2 Técnicas de medição em superfícies finas . . . . .	9
2.3 Extensometria . . . . .	10
2.3.1 Princípio de funcionamento dos extensômetros . . . . .	11
2.3.2 Sensor de temperatura PT100 . . . . .	12
2.3.3 A ponte de <i>Wheatstone</i> . . . . .	14
2.3.4 A compensação de perdas . . . . .	15
2.4 Sistema de aquisição de dados . . . . .	18
2.4.1 A aquisição de sinal . . . . .	20
2.4.2 Multiplexador (MUX) . . . . .	21

2.4.3	Condicionamento de sinal . . . . .	21
2.4.4	Sample and Hold (S&H) . . . . .	28
2.4.5	Conversor Analógico-Digital (ADC) . . . . .	29
2.4.6	Unidade de processamento digital . . . . .	30
2.5	Síntese . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Proposta de solução</b>	<b>33</b>
3.1	O problema . . . . .	33
3.2	O projeto On-Surf . . . . .	36
3.3	Proposta de solução . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>41</b>
4.1	ZSSC 4151 . . . . .	41
4.2	Etapas de amplificação e condicionamento do sinal . . . . .	42
4.2.1	AFE - Analog Front End . . . . .	43
4.2.2	Digital Core . . . . .	48
4.2.3	Interfaces digitais . . . . .	49
4.2.4	Power management . . . . .	49
4.3	A placa de aquisição de dados . . . . .	50
4.4	O software de configuração . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Testes/Avaliação</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Abstract apresentado no VI Encontro de Jovens Investigadores do Instituto Politécnico de Bragança</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Tabela de resistência do PT100</b>	<b>76</b>

# Lista de Tabelas

4.1	Configurações de deslocamento de ADC . . . . .	47
-----	--	----



# Lista de Figuras

2.1	Estruturas cristalinas dos metais: a) body-centered cubic (bcc); b) face-centered cubic (fcc); c) hexagonal close packed (hcp); Fonte: Adaptado de [5] . . . . .	7
2.2	Deformação plástica em um cristal devido a uma tensão de cisalhamento: a) antes da deformação; b) deformação por deslizamento; Fonte: Adaptado de [5] . . . . .	8
2.3	Vista superior de um extensômetro . . . . .	11
2.4	Resistência de um RTD entre -200°C até 850°C Fonte: Adaptado de [19] . . . . .	14
2.5	Arquiteturas ponte de <i>Wheatstone</i> . . . . .	16
2.6	Comparação entre sensores com compensação de 2, 3 e 4 quatro fios. Fonte: Adaptado de [23]. . . . .	18
2.7	Sistema de aquisição de dados . . . . .	19
2.8	Componentes de um sistema de aquisição de dados . . . . .	20
2.9	Multiplexador Fonte: Adaptado de [26]. . . . .	21
2.10	Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados. Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	22
2.11	Arquiteturas amplificadoras com amplificadores operacionais . . . . .	23
2.12	Circuito de configuração do ganho programável. Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	24
2.13	Amplificador de instrumentação. Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	25
2.14	Saída de tensão de diferentes tipos de termopares. Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	27
2.15	Coefficientes Seebeck Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	28
2.16	Sample and Hold . . . . .	28

3.1	Matriz e etapas de deformação de uma chapa metálica em V Fonte: Adaptado de [7]. . . . .	33
3.2	Partes constituintes de um molde Fonte: Adaptado de [7]. . . . .	34
3.3	Problemas no processo de estampagem metálica. Fonte: Adaptado de [29].	35
3.4	Diagrama do sistema completo proposto . . . . .	39
4.1	Diagrama de blocos ZSSC 4151. Fonte: Adaptado de [31]. . . . .	43
4.2	Esquemático Analog Front End (AFE). Fonte: Adaptado de: [31]. . . . .	44
4.3	Tabela de ganhos do Programmable Gain Amplifier (PGA). Fonte: Adaptado de [31]. . . . .	45
4.4	Exemplos de deslocamento do ADC com uma entrada de 2.5V . . . . .	47
4.5	Processos executados pelo ZSSC 4151. Fonte: Apadtado de [31]. . . . .	49
4.6	Placa de aquisição de dados ZSSC 4151 . . . . .	51
4.7	Tela inicial ZSSC 4151 . . . . .	52
4.8	Tela de configuração de tarefas . . . . .	53
4.9	Aba de configuração. . . . .	54
4.10	Aba para calibração do sensor. . . . .	54
4.11	Command Console . . . . .	55
5.1	Circuito equivalente da ponte de <i>Wheatstone</i> com extensômetro de $120\Omega$ . .	57
5.2	Resultado da amplificação utilizando um extensômetro de $120\Omega$ . . . . .	58
5.3	Diagrama esquemático do circuito implementado para realização do teste de do ZSSC 4151 . . . . .	59
5.4	Diagrama de blocos em LabVIEW para condicionamento e gravação dos dados adquiridos. . . . .	60
5.5	Calibração da PT100 . . . . .	61
5.6	Saída de tensão do ZSSC amplificação do PT100 . . . . .	62
5.7	Variação temporal das medidas realizadas . . . . .	63
5.8	Variação da temperatura . . . . .	63
5.9	Sistema completo implementado em Laboratório . . . . .	65





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Nas cadeias de produção atuais, rigorosas técnicas de controle de qualidade tem se tornado uma importante ferramenta no processo de fabricação. Na estampagem metálica não é diferente. A indústria automobilística é umas das áreas que mais usufrui desta técnica e é uma das áreas na qual, o rigor e qualidade das peças produzidas é muito alto [1].

A estampagem metálica é um processo de fabricação que se obtém uma determinada forma e tamanho de chapas metálicas, na qual, o material é submetido a uma deformação plástica através da aplicação de uma força de tração, compressão, flexão, força de cisalhamento ou uma combinação destas [2]. Já o processo da injeção plástica baseia-se no fato de que, um polímero é transportado por uma estrutura helicoidal e aquecido durante esse processo, ao final do caminho o plástico aquecido e viscoso é injetado no molde da peça final e resfriado, obtendo o formato desejado.

Peças de metal feitas pelo processo de estampagem metálica possuem uma grande variedade de formatos e tamanhos. Variando desde pequenas peças que possuem somente uma dobra para peças da fuselagem de um avião, por exemplo [3].

Dados de deformação, como pressão e temperatura, das superfícies metálicas estampadas são utilizadas para identificar problemas na produção e também áreas críticas nas

quais o nível de tensão aplicado pode ser categorizado como seguro, marginal ou defeituoso.

Os métodos mais comuns utilizados para obter dados de deformação em processos de estampagem metálica basicamente consistem em medir a extensão da deformação do metal nas áreas onde foram aplicadas uma tensão de deformação. Esse é um dos motivos da importância de um bom método de aquisição de dados que seja rápido e automatizado, afim de se obter dados de pressão e temperatura de maneira rápida, confiável e segura [1].

Na capítulo 1.2 são apresentados os objetivos do presente trabalho.

## 1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo a sensorização o desenvolvimento de um módulo de condicionamento de sinal, reconfigurável, que possa ser aplicado em um sistema de aquisição de dados para medição de resistência e obtenção de grandezas físicas como pressão e temperatura em superfícies metálicas finas, como é o caso da estampagem metálica e injeção plástica.

Sendo os objetivos específicos:

- Configuração simplificada do amplificador por meio do Software de apoio;
- Amplificação e tratamento dos sinais medidos;
- Desenvolvimento de um método simplificado para ajuste e calibração do amplificador para diferentes sensores no local de aplicação;
- Obtenção de um ponte de medida intermediário do fenômeno adquirido a partir da reta de calibração pelo ZSSC 4151;

## 1.3 Estrutura do Documento

O presente documento está distribuído em 6 capítulos, sendo que no capítulo 1 é feita uma introdução ao problema em questão e são definidos os objetivos para o trabalho. O

capítulo 2 contém uma breve revisão da literatura de algumas técnicas existentes para o monitoramento do processo de estampagem metálica, um enquadramento de sensores comerciais para monitoramento de pressão e temperatura, como os extensômetros e PT100. Já o capítulo 3 e 4 tem como foco a descrição do problema e uma proposta de solução. Por fim, o capítulo 5 e 6 apresentam os resultados de testes efetuados e as conclusões do trabalho desenvolvido juntamente com ideias de trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Estado da arte

Neste capítulo será apresentado o estado da arte do presente documento. Âmbito, conceitos, tecnologias e revisão da literatura serão abordados afim de contextualizar o leitor com o tema proposto.

Antes de mais nada, para compreender o processo de estampagem metálica é necessário entender um pouco o comportamento da estrutura dos metais quando submetidos a uma força externa, para que haja uma maior percepção do processo de estampagem metálica.

### 2.1 A estrutura dos metais

#### 2.1.1 A estrutura cristalina dos metais

Marco significativo na história da sociedade, os metais fazem parte de uma importante evolução tecnológica da humanidade. Alargando progressivamente o horizonte de utilização, abrangendo ligas de metais nobres e menos nobres, estão presentes nos mais diversos fins, seja em utilitários, ferramentas, utensílios, armas, objetos decorativos, carros etc. Sua utilização foi, e é, tão importante que períodos antigos foram denominados a partir do material neles predominantemente utilizados [4].

A utilização de peças metálicas nos dias atuais é imprescindível, porém, antes de continuarmos, vamos responder algumas perguntas a respeito do comportamento dos metais.

Como por exemplo, por que alguns metais são sólidos? Por que alguns metais são dúcteis? Por que metais são bons condutores de energia elétrica? O que acontece com a sua estrutura cristalina de um metal quando uma força é aplicada sobre ele? Essas perguntas podem ser respondidas ao analisarmos a estrutura atômica e ligação metálica dos átomos que formam a estrutura cristalina.

Em geral, o processamento (dopagem) é usado para controlar as estruturas dos metais, essa estrutura determina as propriedades do material. Tal manipulação pode ser usada para controlar e prever o comportamento e o desempenho dos metais em vários processos de fabricação. Ou seja, é de vital importância entender a estrutura dos metais para prever e avaliar suas propriedades [5].

A característica essencial que distingue a estrutura de um metal de um não-metal é a sua arquitetura atômica. Quando os metais se solidificam a partir do estado fundido, os átomos se organizam em uma estrutura cristalina, na qual preenchem todos os espaços vazios e imperfeições encontradas, criando assim, forças de ligação que mantêm a estrutura ligada e firme.

Um metal puro é constituído por átomos de um único tipo, que se encontram regularmente distribuídos num determinado retículo cristalino [4]. Metais possuem elétrons livres, que podem se mover de um átomo a outro. A existência desses elétrons livres e a sua movimentação acarreta uma série de consequências para as suas propriedades físicas, como por exemplo, a ductilidade ou a fragilidade de um material. Quanto mais elétrons livres o metal tiver, mais dúctil ele será. Isso se deve ao fato de que os metais têm uma energia de ionização relativamente baixa, o que faz com que os elétrons na camada de valência sejam "perdidos" com mais facilidade. Os metais adotam uma gigante estrutura metálica, onde, os elétrons da sua camada de valência podem ser reunidos em um mar de elétrons livres [5] [6].

A existência desses elétrons livres e a sua livre movimentação, com limites, acarreta uma série de propriedades físicas aos metais. Como por exemplo, uma das principais características é a de que eles podem conduzir eletricidade e calor. Outro ponto importante diz respeito a sua deformação. Uma leve movimentação dos seus átomos sob uma influência

de uma carga externa gera uma deformação elástica.

Em uma estrutura cristalina, os átomos são arranjados em um arranjo tridimensional chamado treliça. A treliça tem uma configuração que se repete em todas as direções, resultado das forças da ligação química. A repetição do padrão controla algumas propriedades como resistência, ductilidade, densidade, condutividade e formato.

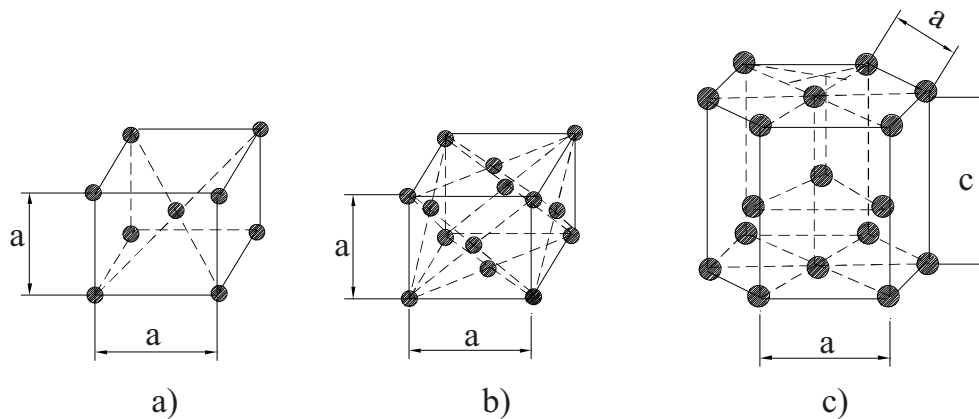


Figura 2.1: Estruturas cristalinas dos metais: a) body-centered cubic (bcc); b) face-centered cubic (fcc); c) hexagonal close packed (hcp);  
Fonte: Adaptado de [5]

A maioria dos metais possui uma das três estruturas cristalinas básicas comuns descritas abaixo:

- cúbica de corpo centrado (bcc, do inglês *body-centered cubic*);
- cúbica de face centrada (fcc, do inglês *face-centered cubic*);
- hexagonal compacta (hcp, do inglês *hexagonal close packed*);

No processo de estampagem metálica, quanto mais frágil for o metal estampado, menor a chance de fissuras. Estruturas metálicas com uma estrutura cristalina mostrada na figura 2.1a), geralmente produzem estruturas metálicas mais fortes e razoavelmente dúcteis, como por exemplo, o ferro.

Estruturas cúbicas de face centrada, mostrado na figura 2.1b), tendem a serem mais "macias" e dúcteis em uma larga faixa de temperatura. Exemplos disso são o cobre e o alumínio.

Já os metais com a estrutura hexagonal compacta, ilustrada na figura 2.1c), tendem a ser relativamente mais quebradiços [5].

### 2.1.2 Forças de deformação

Os elétrons, nas ligações metálicas, estão livres para se moverem em seus íons positivos em uma nuvem de elétrons, na qual com esse movimento, criam uma força elétrica que age para unir os íons. Este movimento dos elétrons, além de transmitir corrente elétrica, também permite a movimentação dos átomos sob a influência de forças externas. Este leve movimento (visto apenas por microscópio) é chamado de deformação elástica. Após a força externa ser removida, as forças internas diminuem, fazendo com que a força elétrica que faz com que os átomos se movam também diminua, permitindo que os átomos retornem a suas posições originais, não deixando nem um sinal de terem sido movidos.

Se muita força externa for aplicada ao material, os átomos podem acabar se movendo para muito longe das suas posições e não conseguem retornar para as sua posição original quando a força é removida. Ou seja, uma deformação permanente é causada ao material, como demonstrado na figura 2.2. Esse tipo de deformação é chamada de deformação plástica.

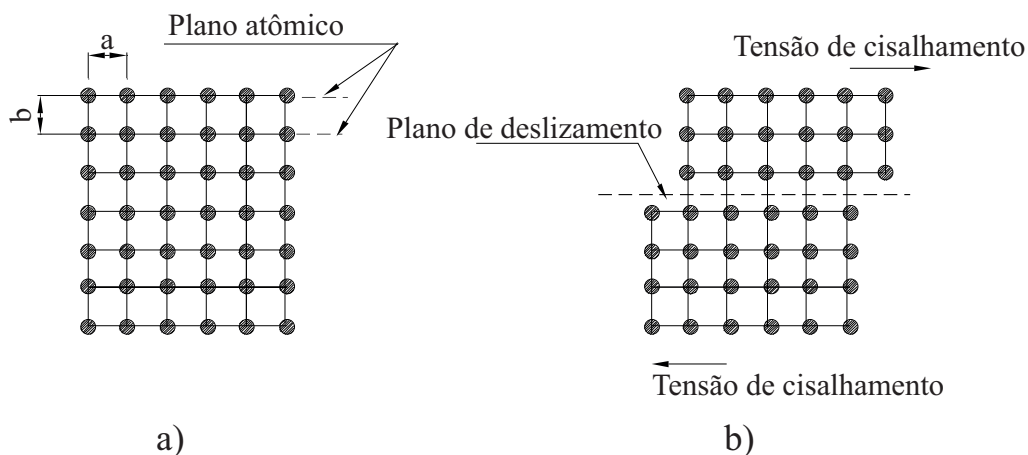


Figura 2.2: Deformação plástica em um cristal devido a uma tensão de cisalhamento: a) antes da deformação; b) deformação por deslizamento;

Fonte: Adaptado de [5]

O monitoramento do processo de estampagem metálica trata exatamente desse aspecto, para que não seja aplicado muita força e não ocorra uma má deformação nas peças estampadas e assim, a qualidade do produto seja máxima. Diferentes técnicas podem ser aplicadas para o monitoramento desse processo, na seção 2.2 é apresentado uma breve revisão da literatura de algumas técnicas existentes.

## 2.2 Técnicas de medição em superfícies finas

Um grande número de estudos tem investigado diagnósticos de falha ou condições de monitoramento de ferramentas de estampagem metálica usando um variado número de sensores, como sensores de força, pressão, elétricos, ópticos e sensores acústicos e de áudio [7].

Shanbhag et al. [7] demonstra que, utilizando sensores acústicos é possível, a partir da faixa de frequência medida durante o processo, saber se uma determinada peça que fora submetida ao processo de estampagem metálica, está sendo desgastada. No trabalho apresentado, foram analisadas peças submetidas ao processo de estampagem e correlacionadas com resultados das medições de sensores acústicos, a fim de avaliar o desgaste mecânico sofrido pelo molde e pela peça. Mahayotsanun et al. [8] realizaram o monitoramento em tempo real do processo de estampagem utilizando sensores de pressão in-situ. O método Thin Plate Splines (TPS) foi utilizado para entender a distribuição de pressão de contato em toda a superfície da placa estampada. Bassiuny et al. [9] propuseram uma técnica híbrida para diagnóstico de falhas de operação no processo de estampagem metálica usando um sensor de pressão, baseada na Decomposição de Modo Empírico (EMD) e na quantização Vetorial por Aprendizagem (LVQ), a EMD é aplicado para extrair os principais recursos dos sinais de deformação. Primeiro o sinal é decomposto por EMD em funções de modo intrínseco (IMF). Finalmente, para identificar as condições defeituosas do processo, a rede de quantização de LVQ é usada como classificador, com o espectro marginal de Hilbert como vetores de entrada.

Um método ótico para a determinação da deformação foi proposto por Carasusán

e Canal (2007) [3], esse método consiste em analisar uma rede de círculos (CGA, do inglês *Circle Grid Analysis*) que são impressos na chapa metálica antes do processo de estampagem ser realizado. O objetivo desse método é medir a deformação de cada círculo, uma vez que, ao mesmo tempo em que a chapa de metal estampada assume a forma final da peça, o padrão da rede é deformado com o material, dessa forma, os círculos são deformados e alongados, obtendo o formato de elipses. Assim, comparando o tamanho original dos círculos com as elipses é possível saber onde a peça teve a maior deformação e também a sua direção, pois o eixo da elipse fica na direção da deformação.

Baqersad e Bharadwaj (2018) [10] propuseram a utilização de extensômetros para a validação de um método na qual prevê forças de deformação em um certo ponto. Utilizando o método dos elementos finitos para determinar as formas de deformação de uma estrutura, é gerada uma matriz de transformação que pode expandir o conjunto de dados para pontos específicos e prever a sua deformação.

Sistemas de aquisição de dados tem se tornado cada vez mais úteis para a aquisição de sinais, seja para monitoramento ou controle. O presente trabalho tem como objetivo a utilização de extensômetros e PT100 para validação da utilização de uma placa de aquisição de dados.

## 2.3 Extensometria

Atualmente os projetos e análises das estruturas utilizam métodos de cálculo que aproximam e avaliam a resistência dos materiais comparados aos carregamentos neles aplicados, porém, esses carregamentos muitas vezes são estimados. Sendo assim, ao longo do tempo, falhas por sobrecarga ou desgaste podem ocorrer nas estruturas devido a má avaliação das forças aplicadas.

É imprescindível que nos dias atuais, o mercado exija projetos reduzam custos, mas ainda assim, prezando pela qualidade. Assim sendo, surgiu a necessidade de uma avaliação mais elaborada das reais condições de carregamento que as peças estão submetidas [11].

O estudo dos materiais sob certas condições de trabalho é muito importante nas pesquisas de engenharia, pois, as propriedades mecânicas dos materiais são influenciadas pela aplicação de forças externas, como foi visto e discutido na seção 2.1. Portanto, na análise das forças, a tensão medida é combinada com outras propriedades do material, de modo a calcular a tensão para uma determinada carga. Com base em fenômenos mecânicos, ópticos[12], acústicos[13] e elétricos[14], existem vários métodos para medir tensão de deformação[15].

Nesse trabalho os fenômenos elétrico e mecânico serão avaliados com a utilização do extensômetro. Definido como um dispositivo sensitivo que varia a sua resistência dependendo da força aplicada, é o método mais frequente para medir a tensão aplicada num objeto envolvendo a engenharia mecânica e a engenharia elétrica [15] [16]. A vista superior de um extensômetro é mostrada na Figura 2.3.

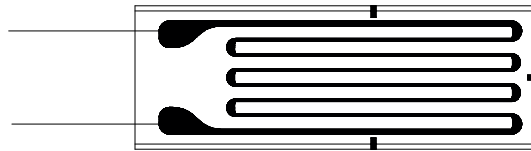


Figura 2.3: Vista superior de um extensômetro

O princípio de funcionamento dos extensômetro normalmente é utilizado para converter força, pressão, tensão, etc., em uma variação da resistência elétrica. Mas, medir uma variação tão pequena, que normalmente é na ordem dos  $m\Omega$  ou até mesmo em  $\mu\Omega$ , com um ohmímetro pode ser muito difícil. Para isso, existem métodos de medição da deformação dos extensômetros [15], como será visto na seção 2.4.

### 2.3.1 Princípio de funcionamento dos extensômetros

O princípio de operação do dispositivo é baseado no fato de que a resistência de um condutor elétrico muda com uma proporção  $\Delta R/R$  se uma força é aplicada, de modo que, o comprimento de uma barra de metal, por exemplo, mude num fator  $\Delta l/l$ . Onde  $\Delta R$  é a variação da resistência e  $\Delta l$  é a variação do comprimento da barra em relação a peça não tensionada.

A variação da resistência de um extensômetro pode ser, portanto, utilizada para mensurar a deformação do material quando conectado a um circuito de medição, como por exemplo, uma ponte de *wheatstone* [17].

Como um extensômetro transforma a deformação numa peça em uma variação da sua resistência elétrica, podemos definir como sendo

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

e a variação na resistência do extensômetro pela equação 2.2

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad (2.2)$$

onde R é a resistência inicial e k é conhecido como fator do extensômetro (*Gage Factor*), que é definido como a mudança da resistência dividida pela deformação e possui valor igual a 2. É um valor característico desse tipo de sensor, dependente da geometria e é calculado experimentalmente.

A deformação de um extensômetro não tem unidade, é definida como uma alteração no comprimento pela unidade de comprimento. Por exemplo, se uma barra de 1 metro é deformada até 1.005m (5mm), a tensão é definida como sendo 5 mili tensão. Então, pela Eq. 2.2, 5m tensão aplicados ao extensômetro com um fator de 2, produz uma alteração da resistência de  $(5 * 2) * 10^{-3}$  ou  $0.01\Omega$ . Extensômetros comerciais normalmente tem um resistência de  $120\Omega$  ou  $350\Omega$ , que são as resistências padrões desse tipo de sensor, porém, há dispositivos que podem ter resistência menor que  $30\Omega$  ou maior do que  $3k\Omega$  [16].

### 2.3.2 Sensor de temperatura PT100

Uma das maneiras mais comuns para medir temperatura em processos industriais é utilizando um RTD (do inglês, *Resistance Temperature Detectors*), nessa família temos o PT100. O PT100 é um sensor resistivo que muda o valor de sua resistência conforme a variação da temperatura. Para medições precisas de temperatura, o PT100 oferece várias vantagens quanto a repetibilidade e estabilidade de medição em um longo período

de tempo[18]. Esse tipo de sensor é muito confiável devido ao material na qual é produzido e também devido a sua precisão, pois, na sua construção, valores de resistência são definidos como padrão, o PT100 por exemplo possui  $100\Omega$  a uma temperatura de  $0^\circ\text{C}$  e  $138,5\Omega$  a uma temperatura de  $100^\circ\text{C}$ . O nome é uma referencia ao material utilizado, que é a platina (PT) que possui uma resistência de  $100\Omega$  a  $0^\circ\text{C}$ .

Se a temperatura muda, a resistência elétrica segue o mesmo padrão, aumentando ou diminuindo, seguindo uma precisa curva característica demonstrada na Figura 2.4. Medindo-se a resistência, a temperatura pode ser calculada de maneira muito exata utilizando equações que modelam tal fenômeno.

A relação entre a variação da resistência do PT100 e a variação da temperatura é descrita pela equação de Callendar-Van Dusen (CVD). A equação 2.3 refere-se ao cálculo da resistência para temperaturas em que  $T < 0$  e a equação 2.4 para resistências em que a temperatura se encontra em  $T > 0$  [19].

$$R_{RTD}(T) = R_0(1 + (AT) + (BT^2) + [(CT^3)(T - 100)]); \quad (2.3)$$

$$R_{RTD}(T) = R_0(1 + (AT) + (BT^2)); \quad (2.4)$$

Os coeficientes da equação de CVD são descritos pela norma IEC-60751.  $R_0$  é o valor da resistência do PT100 a  $0^\circ\text{C}$  e os coeficientes A, B e C são descritos por:

- $A = 3.9083 * 10^{-3}$
- $B = -5.775 * 10^{-7}$
- $C = -4.183 * 10^{-12}$

A variação da resistência do PT100 entre  $-200^\circ\text{C}$  até  $850^\circ\text{C}$  é destacado na Figura 2.4.

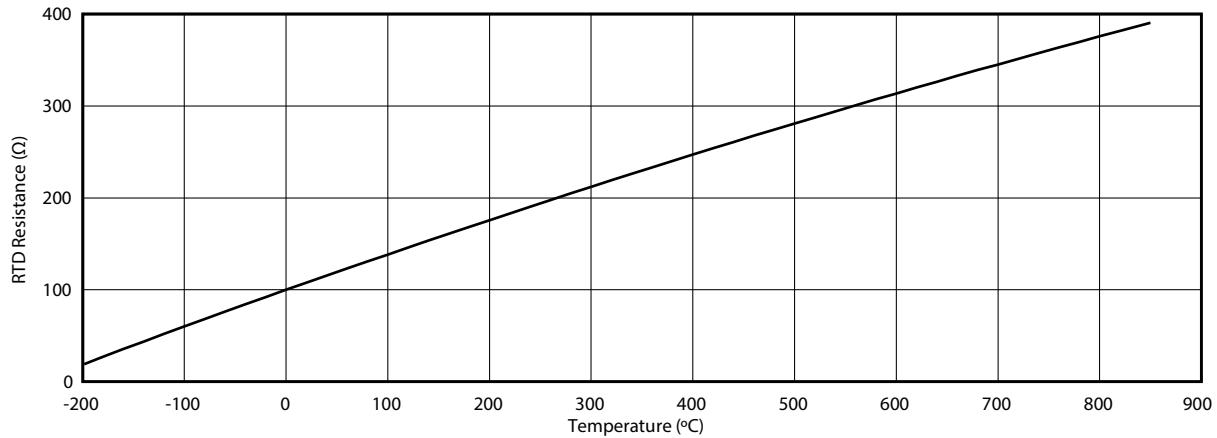


Figura 2.4: Resistência de um RTD entre  $-200^{\circ}\text{C}$  até  $850^{\circ}\text{C}$   
 Fonte: Adaptado de [19]

### 2.3.3 A ponte de *Wheatstone*

Extensômetros são dispositivos fundamentais que funcionam como base para muitos outros tipos de transdutores, incluindo sensores de pressão, carga e torque. São usados extensivamente em testes de estruturas e aplicações de monitoramento. Vários fatores podem afetar a performance dos extensômetros, incluindo problemas com o condicionamento do sinal, ruído eletromagnético, flutuações de temperatura e problemas com a calibração, uma vez que produzem um sinal de tensão muito baixo.[20].

Para realizar uma medida precisa de um strain gauge, circuitos especiais são empregados para medir mudanças extremamente pequenas de resistência. O circuito em ponte de Wheatstone é amplamente utilizado para converter uma micro-tensão em um nível de tensão maior, para que possa ser feita uma segunda amplificação e posterior aquisição desse sinal [16].

Descoberto em 1843 pelo físico Sir Charles Wheatstone, a ponte de Wheatstone, que leva o seu sobrenome, possui quatro resistências, podendo ser fixas ou variáveis, na qual, se todas as resistências forem idênticas ( $R + \Delta R = R_1 = R_2 = R_3$ ), dizemos que a ponte está equilibrada e que  $V_{BR1} = 0V$ . Isso pode ser observado na Figura 2.5c.

Mas, quando há uma variação  $R + \Delta R$  em um dos resistores, ocorre um desequilíbrio na ponte e um valor de tensão diferente de zero é produzido na saída ( $V_{BR1} \neq 0V$ ) [16].

A designação ponte completa é muitas vezes utilizada de maneira incorreta, pois a ponte está sempre completa com resistências fixas e o que muda é a quantidade de extensômetros utilizados na aplicação, podendo ser um extensômetro (Quarter bridge), dois extensômetros (Half bridge) ou quatro extensômetros (Full bridge) [21].

Existem diferentes topologias para a aplicação da ponte *Wheatstone*, dentre elas:

- Full bridge, Figura 2.5a;
- Half bridge, Figura 2.5b;
- Quarter bridge, Figura 2.5c;

### 2.3.4 A compensação de perdas

Ao analisarmos a variação de resistência de sensores como o PT100 e extensômetros, é muito fácil perceber que essa variação é muito pequena. A variação de um RTD por exemplo, é de  $0,385 \Omega/^\circ\text{C}$  e de um extensômetro é na ordem dos  $\mu\Omega$ , o que, para um sistema de instrumentação que trabalha com níveis de tensão baixos (normalmente 3.3V ou 5V) a variação de tensão no sensor torna-se muito baixa.

Pegamos como exemplo o extensômetro seção 2.3.1. O extensômetro é um elemento resistivo, ou seja, se aplicarmos em seus terminais uma tensão de alimentação de 5V, temos um simples circuito resistivo na qual, a resistência é de  $120\Omega$ . Aplicando a lei de Ohm, temos que a corrente é de  $i = V/R$  ou  $i = 5/120A$ , o que dá uma corrente de  $41,67mA$ . Sendo uma variação de resistência de  $0.01\Omega$ , temos uma variação de tensão de  $416,67\mu V$ .

Dessa forma, é notável a necessidade de amplificação desse sinal, precisando assim um circuito de amplificação, como por exemplo a ponte de *Wheatstone* [22].

Os circuitos de ponte podem ser descritos como ohmímetros precisos, simples, sensíveis e convenientes para operar quando, a ponte, a resistência desconhecida (sensor) e o sistema de aquisição estiverem localizadas próximos uns dos outros [16].

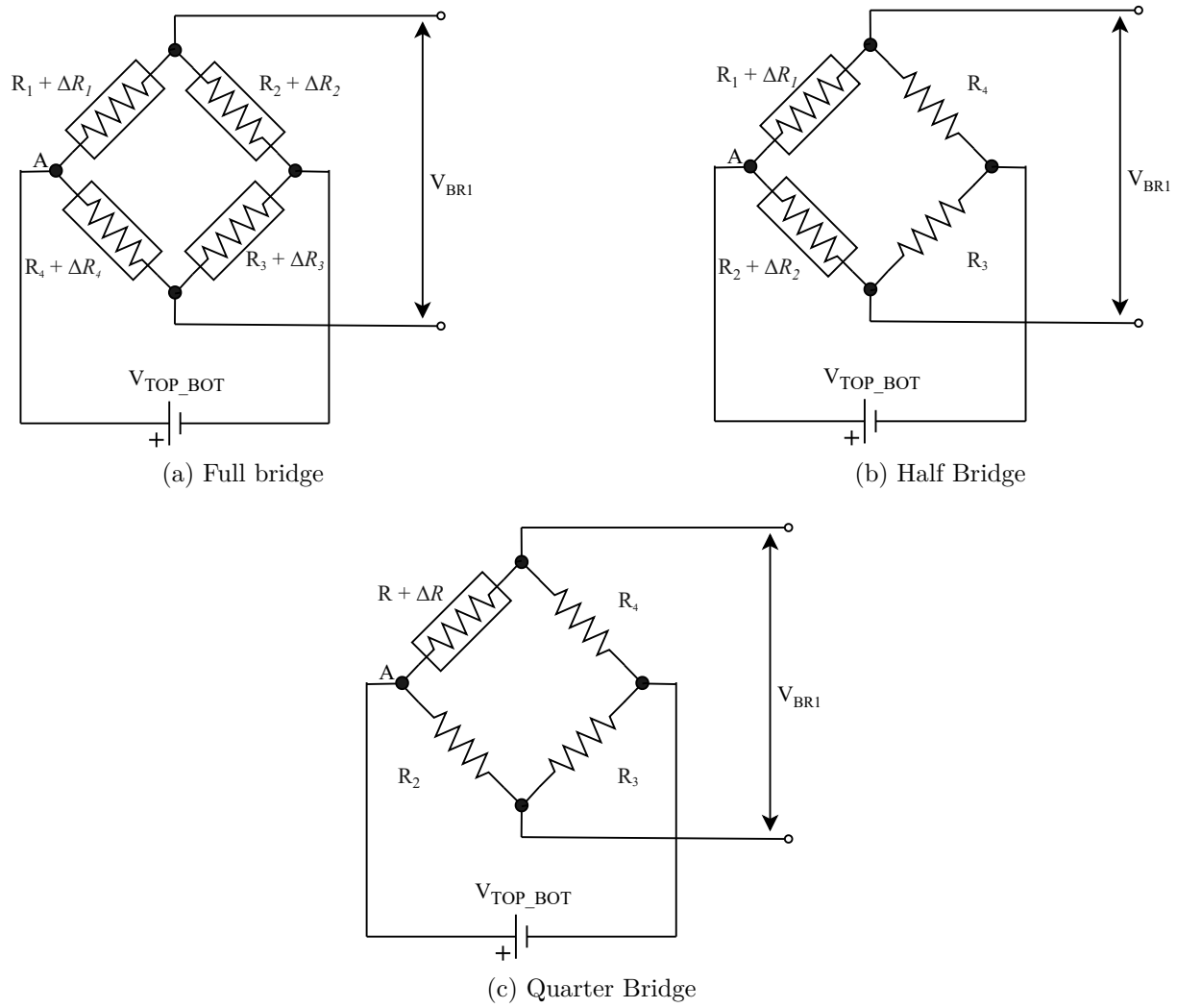


Figura 2.5: Arquiteturas ponte de *Wheatstone*

Tendo em mente a baixa variação da resistência dos sensores e a dificuldade de medição, temos que levar em conta que, um outro problema é gerado quando os sensores estão posicionados muito longe fisicamente do sistema de aquisição: resistências de condução são adicionadas ao circuito de medição, uma vez que, quanto maior for o fio que conecta o sensor ao sistema, maior a resistência intrínseca do condutor que conecta ambas as partes, sendo assim, uma resistência é adicionada ao sistema causando erros de medida e o valor adquirido não é mais confiável, já que o sinal desejado é apenas a variação da resistência no sensor.

Uma maneira de contornar o problema é usar uma conexão Kelvin, um método que conecta os circuitos de excitação e regulador à ponte com quatro fios. Dois fios transportam a corrente de excitação e os outros dois, as linhas sensoriais, medem a tensão de excitação na ponte e não transportam corrente. Como o circuito de condicionamento de sinal tem alta impedância de entrada, pouca corrente flui nos condutores de entrada, portanto, sua resistência não introduz erros significativos. (Veja a Figura 4.18.)

Porém, isso pode ser compensado, pois, para solucionar tal problema, técnicas foram desenvolvidas para tentar eliminar esse erro. Na Figura 2.6 são apresentados três topologias diferentes de sensores com 2, 3 e 4 fios. Os sensores do tipo RTD são os que mais utilizam dessa técnica para compensar a resistência de condução.

Para gerar uma diferença de potencial que possa ser medido, o sensor requer uma corrente de excitação, dependendo do sensor, o nível de tensão pode variar desde dezenas de volts a alguns milivolts. A precisão do sistema de medição não depende apenas dos sensores, mas também dos instrumentos de medição adequados, da configuração do sistema e do tipo de circuito de medição. Dependendo do número de fios, os sensores podem ser usados em circuitos de medição de 2, 3 ou 4 fios.

Em sensores com 2 fios, os fios que o alimentam com a corrente de excitação (I) também são usados para medir a tensão no sensor, com isso, devido a sua baixa variação de resistência, mesmo resistências de condução relativamente baixas, produzem erros de medida altos já que a queda de tensão nos fios será percebida pelo sistema de aquisição. Em sensores com 4 fios, dois deles transportam a corrente de excitação e os outros dois,

são conectados ao circuito de aquisição. Esses, medem a tensão nos sensores, como o circuito de condicionamento de sinal tem alta impedância de entrada, pouca corrente flui nos condutores que estão ligados no sistema de aquisição, portanto, sua resistência não introduz erros de medição, esse tipo de ligação é chamada de conexão Kelvin [16]. Em sensores com 3 fios, o princípio é o mesmo, porém a resistência de um dos fios ainda é medida, reduzindo assim o erro em 50% [23].

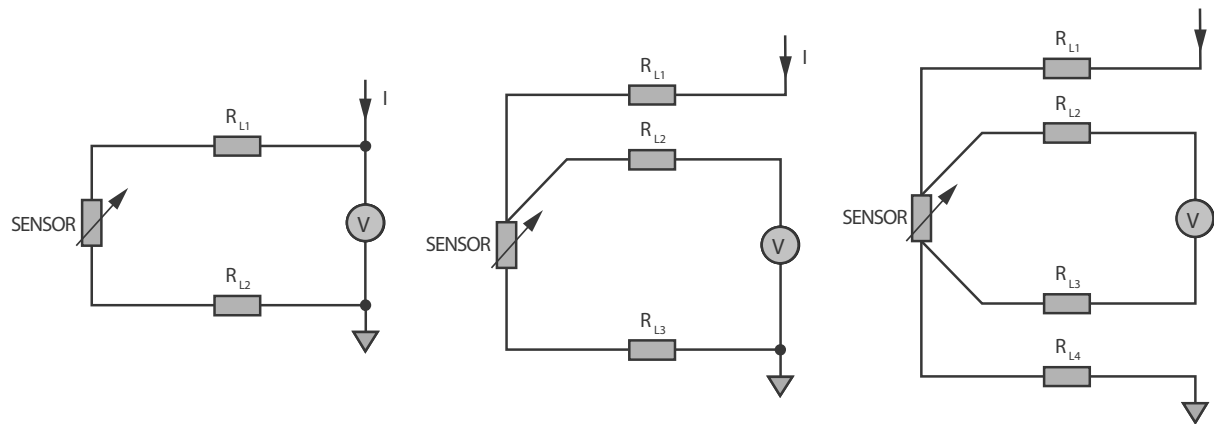


Figura 2.6: Comparação entre sensores com compensação de 2, 3 e 4 quatro fios.  
Fonte: Adaptado de [23].

Assim, o sistema de aquisição de dados deve ser capaz de medir variações de tensão na ordem dos  $mV$  ou  $\mu V$ , possuir uma elevada impedância de entrada e uma boa resolução do conversor Analógico-Digital. Na seção a seguir, é feito um estudo a respeito dos sistemas de aquisição de dados, bem como, uma descrição dos seus componentes e aplicações.

## 2.4 Sistema de aquisição de dados

Muitos dos sistemas de processamento industrial, fábricas, máquinas, equipamentos de teste e veículos consistem em componentes de hardware e software, cujo comportamento segue as leis da física como conhecemos. Esses sistemas baseiam-se em fenômenos mecânicos e elétricos. As quantidades mensuráveis que representam as características de todos os sistemas são chamadas de variáveis. Frequentemente, estamos interessados na posição, magnitude e velocidade dessas variáveis, para isso, usamos instrumentos para medi-las.

Os dispositivos de conversão são chamados transdutores ou sensores, estes, convertem os fenômenos físicos em sinais elétricos para serem medidos com o auxílio de instrumentos eletrônicos. Esses instrumentos são tradicionalmente amperímetros, voltímetros e vários outros medidores. Mas uma crescente necessidade de registrar e preservar esses fenômenos e posteriormente analisá-los, acabou gerando o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados mais robustos [16].

Podemos definir a aquisição de dados (DAQ, *Data Acquisition System*) como o processo de recolha de um fenômeno físico para conseqüente conversão em formato digital. Um sistema DAQ é formado por sensores, hardware de aquisição de dados, na qual inclui a etapa de condicionamento de sinal e conversão digital, e um computador com software programável, como demonstrado na Figura 2.7. Os sinais analógicos são gerados normalmente a partir de sensores/transdutores que convertem parâmetros como temperatura, pressão, umidade, tensão, etc., em sinais elétricos equivalentes. Em comparação com os sistemas tradicionais de medição (sistema analógicos), os sistemas DAQ baseados em computadores exploram a capacidade de processamento digital, produtividade, visualização final (gráfica) e recursos de conectividade. Com isso, temos uma solução de medição mais poderosa, flexível, de melhor custo-benefício e que tem a capacidade de preservar a precisão e a integridade do sinal da medida, fazendo com que tenhamos um sistema de aquisição mais confiável e que mantenha a qualidade do sistema [24] [25].



Figura 2.7: Sistema de aquisição de dados

### 2.4.1 A aquisição de sinal

Sistemas de aquisição de dados diferem de instrumentos de medição com um ou dois canais pois podem coletar e armazenar dados coletados de vários canais de entrada.

Os componentes básicos que são necessários para aquisição e conversão de um sinal analógico para digital são os seguintes:

- Multiplexador analógico;
- Condicionamento de sinal;
- Sample and Hold;
- Conversor analógico para digital;
- Unidade de processamento digital;

A Figura 2.8 demonstra as etapas de aquisição do sinal.

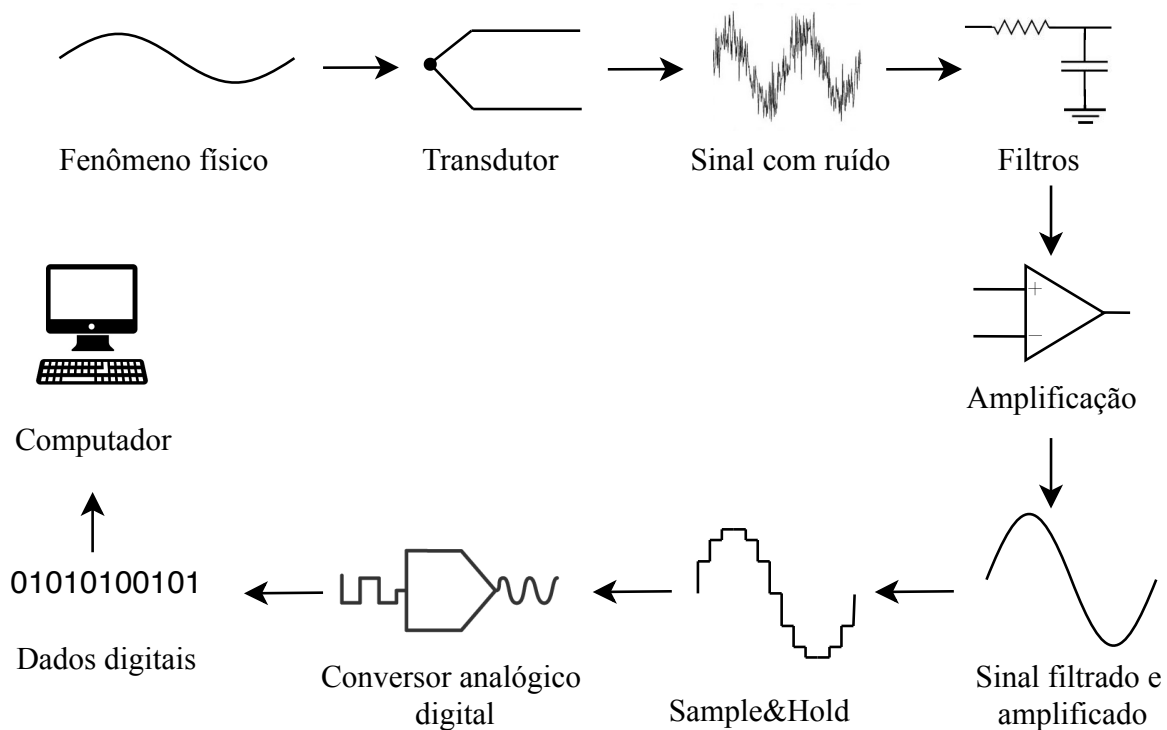


Figura 2.8: Componentes de um sistema de aquisição de dados

### 2.4.2 Multiplexador (MUX)

Os multiplexadores são circuitos que selecionam dados de entrada. Seu princípio de funcionamento pode ser descrito como um circuito lógico que comuta dados a partir de várias entradas em uma única saída. Funcionalmente o multiplexador pode ser representado por uma chave, que conecta a entrada selecionada à saída [26].

A Figura 2.9 apresenta um esquemático de um multiplexador. As portas  $S_0$  e  $S_1$  são as portas de seleção de dados, de acordo com a lógica de seleção, as portas de entrada de dados  $D_0$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$  serão selecionadas e direcionadas para a saída.

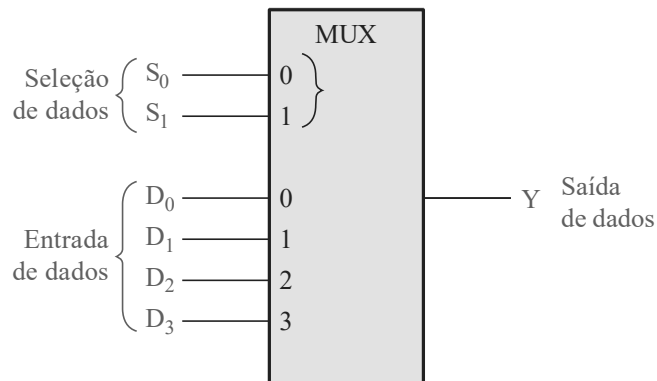


Figura 2.9: Multiplexador  
Fonte: Adaptado de [26].

### 2.4.3 Condicionamento de sinal

O condicionamento do sinais é uma das principais partes de um sistema DAQ, pois esse faz a interface do sensor com o ADC. Normalmente o sinal elétrico fornecido pelo sensor exige algum tipo de tratamento para que possa ser convertido para digital, esse tratamento pode incluir a amplificação, filtragem, conversão, excitação, linearização entre outras técnicas necessárias para tornar o sinal compatível com o hardware de aquisição [27].

A Figura 2.10 ilustra um diagrama de blocos simplificado de um sistema de aquisição de dados, este consiste em um Multiplexador (MUX), de um conversor analógico-digital (ADC) e de um bloco de amplificação de instrumentação (AI), que fica entre o MUX e o ADC e que será o objetivo de discussão desta seção [16].

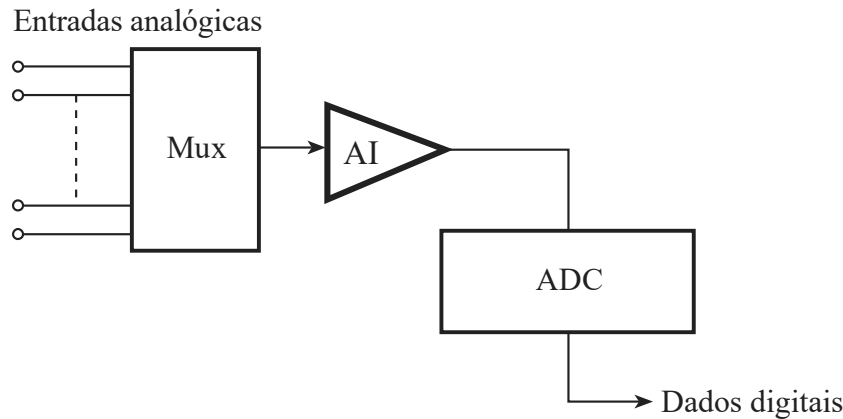


Figura 2.10: Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados.  
Fonte: Adaptado de [16].

Como visto anteriormente, sensores como extensômetros ou termopares, normalmente geram sinais extremamente baixos de tensão, então, para serem diretamente multiplexados ou convertidos para um sinal digital, é necessário aplicar alguma etapa de amplificação. Nas seções seguintes são demonstradas algumas etapas desenvolvidas pela AI.

### Amplificadores Operacionais

A grande maioria dos sistemas DAQ usa diferentes arquiteturas para amplificar o sinal, porém, praticamente todos compreendem em amplificadores operacionais (AMP OPs) integrados, que podem ser configurados para amplificar, atenuar, inverter ou aplicar um *offset*, enfim, os AMP OPs são circuitos versáteis que dependem apenas da aplicação. Empregando alguns resistores e capacitores externos é possível determinar como eles funcionam no sistema. Sua extrema versatilidade faz dele o componente analógico universal para condicionamento de sinais [16].

A Figura 2.11 mostra as configurações mais conhecidas de amplificação utilizando AMP OPs, o amplificador inversor (Fig. 2.11a) e amplificador não-inversor (2.11b). Existe também o amplificador diferencial, que amplifica a tensão diferencial entre os sinais de entrada (Fig. 2.11c).

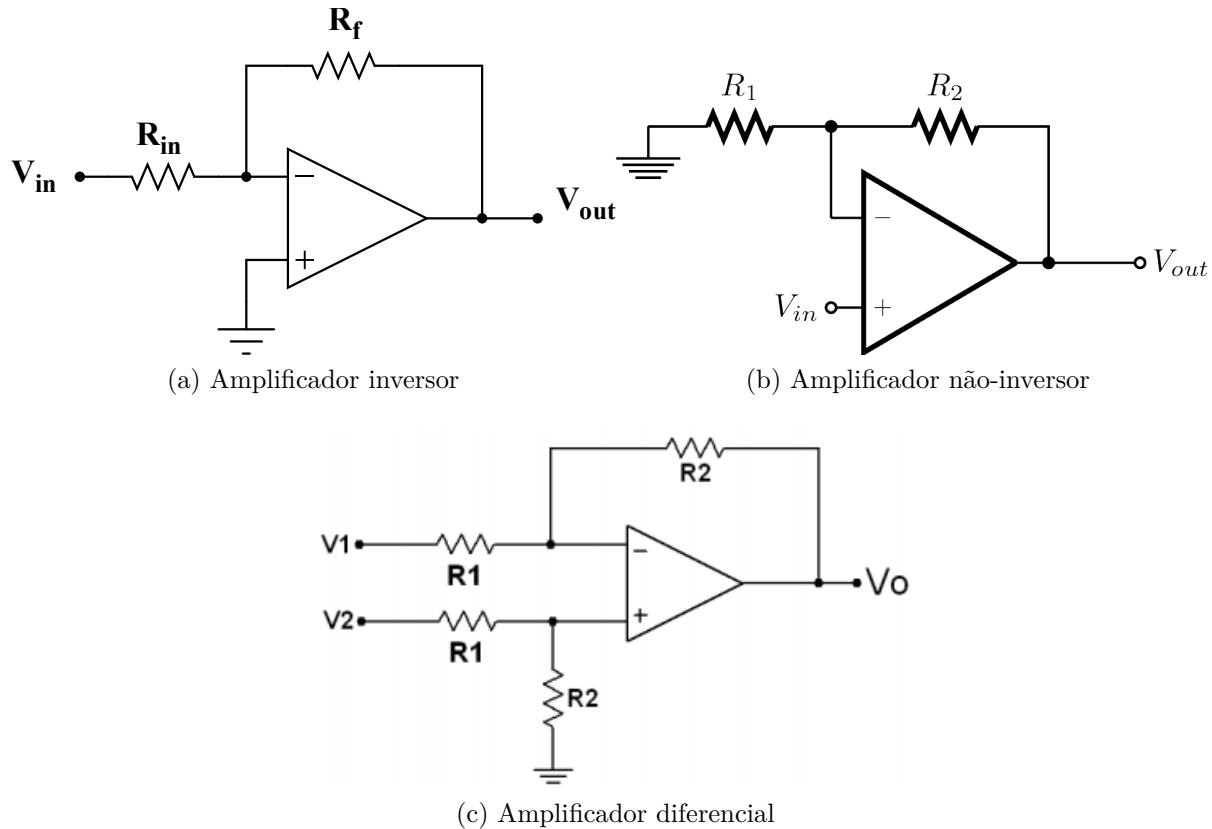


Figura 2.11: Arquiteturas amplificadoras com amplificadores operacionais

### Ganho programável

Normalmente as placas de aquisição de sinal oferecem uma configuração de ajuste de ganho, tornando assim, a placa mais versátil para diferentes aplicações. Esse ganho comumente é chamado de PGA (*Programmable Gain Amplifier*).

O PGA é tipicamente composto por amplificadores operacionais não-inversores que, juntamente com um comutador analógico que são controlados digitalmente, estão conectados a resistores de realimentação, na qual definem o ganho do amplificador. Um sinal lógico ou binário é responsável pelo controle das entradas endereçáveis do comutador analógico para selecionar um determinado resistor para um ganho específico [16], como visto no Figura 2.12.

O ganho é definido pela função de transferência do amplificador não-inversor, sendo a Equação 2.5 a saída amplificada em tensão e a Equação 2.6 o ganho do amplificador.



modo comum. Para que uma aquisição do sinal seja feita com confiabilidade, os amplificadores devem possuir corrente de entrada extremamente baixa, compensação de *offset*, ganho de tensão estável e precisa e alta impedância de entrada e rejeição no modo comum.

Para satisfazer esses requisitos, circuitos especiais foram desenvolvidos, como os amplificadores de instrumentação, mostrado na Figura 2.13.

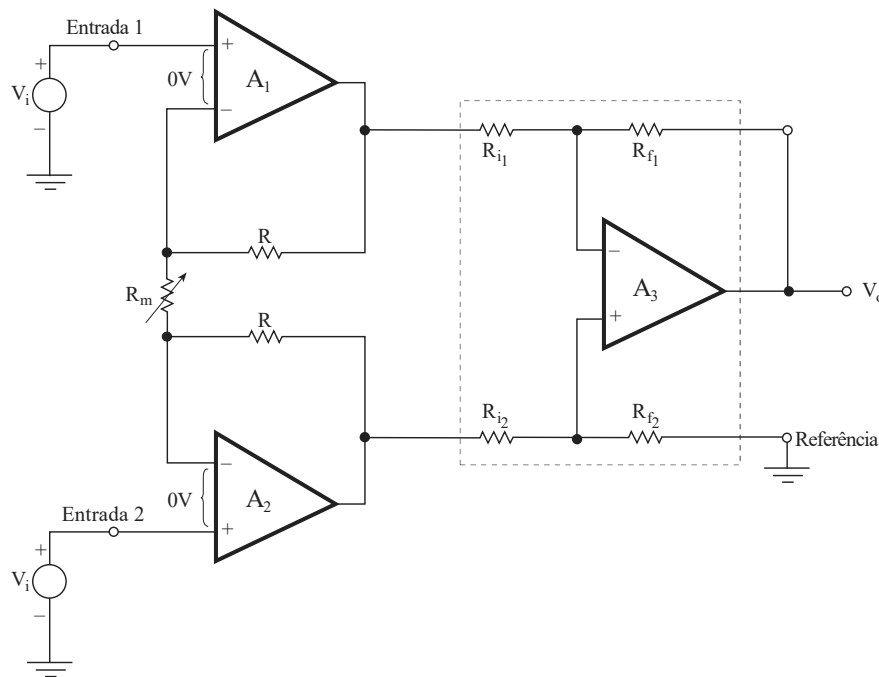


Figura 2.13: Amplificador de instrumentação.

Fonte: Adaptado de [16].

Circuitos que geram sinais, normalmente possuem impedâncias de saída, que, somadas a resistências não ideais de comutadores, geram erros de medição. Porém, a elevada impedância de entrada de amplificador de instrumentação minimiza esse efeito. Esse tipo de circuito possui na entrada de sinal dois amplificadores não inversores, que possuem uma elevada impedância de entrada e, conseqüentemente, devido as características dos AMP OPs, uma corrente de polarização extremamente baixa, dessa forma, um sinal mais preciso é gerado para as entradas do amplificador diferencial.

Esse tipo de circuito é ideal para adicionar a entrada de um ADC, pois, a saída do amplificador de instrumentação possui uma baixa impedância e, sendo que um ADC

baseia-se no fato do carregamento e descarregamento de um capacitor, quanto menor for a impedância de saída da etapa anterior ao ADC, maior será a corrente disponível para efetuar a dinâmica do capacitor, dessa forma, é reduzida a constante de tempo do elemento armazenador [16].

### Filtragem

Em alguns casos, uma filtragem do sinal de entrada é necessária, dessa forma, frequências indesejáveis do sinal podem ser removidas. Existem diferentes tipos de projetos de filtros, que podem ser divididos em tipos, passivos e ativos. Os filtros passivos são circuitos relativamente simples e são constituídos por resistores, capacitores e indutores, porém, geralmente são menos eficazes que os tipos ativos. Os filtros ativos podem fornecer uma ação de filtragem mais agressiva do que os filtros passivos. No entanto, os filtros ativos são mais complexos e também exigem uma fonte de energia para operação. Os filtros Bessel, Butterworth e Chebyshev são projetos comuns de filtros ativos que usam uma combinação de amplificadores operacionais e componentes passivos [28] [16].

### Linearização

Em muitos casos, as funções de transferência de sensores produzem uma saída linear do sinal medido, porém, sensores como os RTD's, possuem uma relação não linear entre a temperatura e a tensão de saída, essa não linearidade é suficientemente grande para que seja exigida uma compensação. Um dispositivo linear traçaria uma linha reta com coeficiente angular de primeira ordem.

Na Figura 2.14 podemos observar um gráfico com várias tensões de saída *versus* temperatura de diferentes tipos de termopares. A tensão de saída de um termopar é baseada no efeito Seebeck, que é a produção de uma diferença de potencial entre duas junções de condutores quando estão a diferentes temperaturas. A Figura 2.15 apresenta a saída do coeficiente Seebeck *versus* temperatura, podemos observar que a saída é claramente não linear. Um dispositivo

Ao analisarmos as curva de saída, podemos perceber que uma constante não é suficiente

para que em toda faixa de temperatura, um determinado tipo de termopar, mantenha a precisão adequada.

Uma das maneira mais comuns para linearizar a tensão de saída de um termopar é por software. Um sistema de aquisição de dados baseado em computador, adquire a tensão de saída dos sensores e aplica um algoritmo para resolver a equação polinomial. A equação que descreve esse comportamento é:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots a_nx^n \quad (2.7)$$

Conforme a ordem do sistema cresce, aumenta-se a precisão da medida, em contrapartida, o tempo de processamento também aumenta. Uma maneira de solucionar isso é diminuir o intervalo de medida e limitar a temperatura, diminuindo assim a ordem do sistema e aumentando o tempo de processamento.

Esse polinômios podem ser aplicados em softwares de computador como também embarcados em circuitos integrados, afim de de constituir um sistema de aquisição de dados [28] [16].

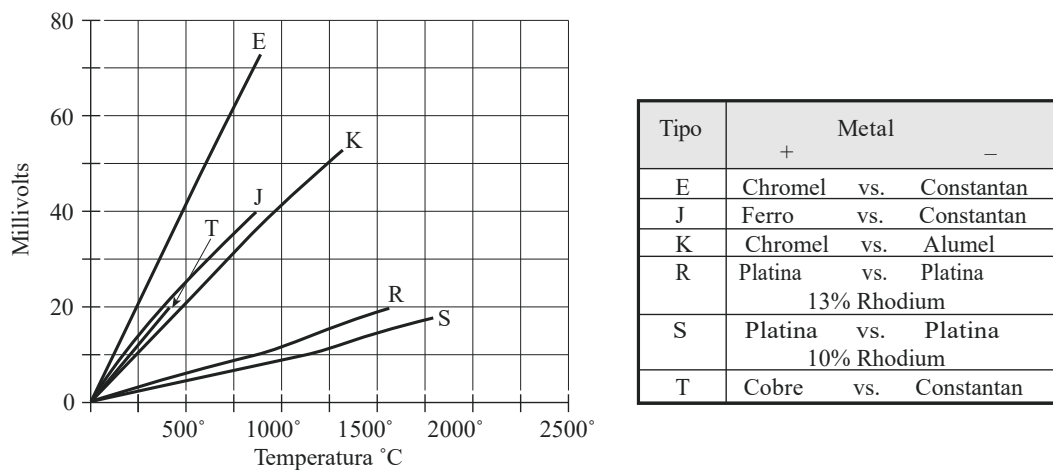


Figura 2.14: Saída de tensão de diferentes tipos de termopares.

Fonte: Adaptado de [16].

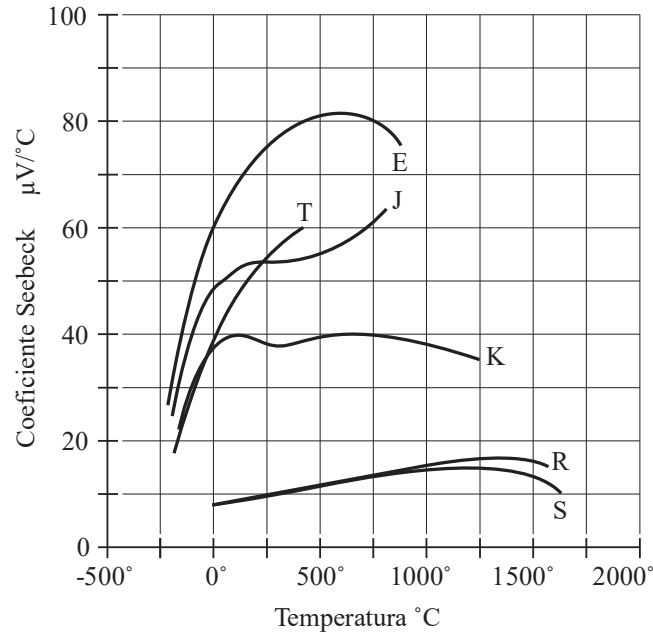


Figura 2.15: Coeficientes Seebeck  
Fonte: Adaptado de [16].

#### 2.4.4 Sample and Hold (S&H)

O ADC é a última etapa no caminho do sinal entre o domínio analógico e o digital, após feito o condicionamento do sinal pela AI, o sinal está finalmente disponível para conversão digital, porém, o ADC não pode digitalizar um nível de tensão variante no tempo, para isso, uma etapa de amostras e retenção (*Sample-and-Hold*) é necessária.

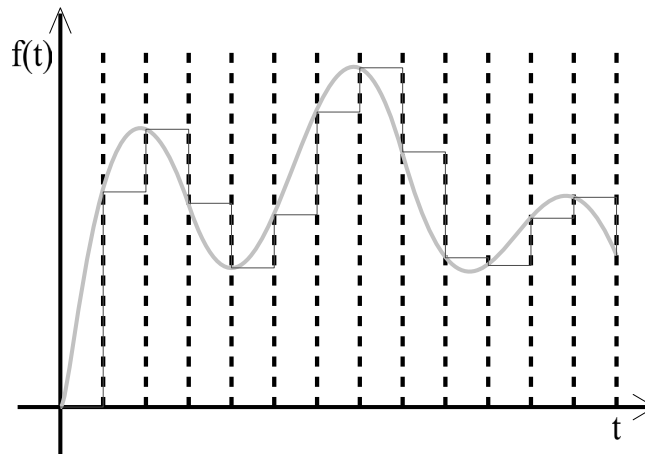


Figura 2.16: Sample and Hold

O princípio de funcionamento do S&H baseia-se no fato de retenção de amostras analógicas. Quando uma amostra é retida, seu valor é mantido até a chegada da próxima amostra, dessa forma, o sinal é amostrado em níveis de tensão, como visto na Figura 2.16.

Alguns ADC's já possuem circuitos internos de amostra e retenção ou usam arquiteturas que emulam a função desse estágio [16].

### 2.4.5 Conversor Analógico-Digital (ADC)

Após a retenção pelo S&H, o sinal por fim está disponível para conversão analógica digital, na qual, gera uma série de estados de saída digitais correspondentes a uma faixa específica de tensões de entrada analógica [28], ou seja, para uma sequência de números binários (0's e 1's), que podem ser utilizado para leitura, monitoramento ou visualização gráfica [16]. Há casos que também é feito um processamento digital por meio de um DSP. Ver seção 2.4.6.

Um conversor A/D ideal deveria aceitar uma faixa infinita de tensões de entrada e digitalizar essa faixa em um número infinito de estados de saída, porém isso é, obviamente, tecnicamente impossível. Felizmente, os fatores que limitam a resolução ADC do mundo real não são tão difíceis de identificar [28].

Quando falamos em conversores analógicos para digitais, devemos sempre ter em mente que os principais parâmetros relativo aos ADC's são a resolução e a velocidade. Normalmente as placas de aquisição de dados possuem resoluções padrão de 8, 10, 12 e 16 bits, enquanto instrumentos independentes podem oferecer resoluções maiores, variando de 18 a 24 bits. Esse número representa o numero de bits da saída que o conversor tem disponível para digitalizar uma tensão de entrada. A resolução pode ser calculada pela Equação 2.8.

$$V_{res} = \frac{V_s}{2^n} \quad (2.8)$$

onde  $V_{res}$  é a tensão de resolução,  $V_s$  é a tensão de alimentação do ADC e  $n$  é o número de bits do ADC. Por exemplo, um conversor de 8 bits tem uma saída de 0000 0000 a 1111

1111 em binário. Isso corresponde a  $2^8$  degraus de saída, em uma faixa de 10V, isso gera uma resolução de 39.06mV ( $10/2^8$ ) por degrau, que pode ser entendida também como a resolução do LSB (Bit Menos Significativo, do inglês *Least Significant Bit*) [28].

Os conversores podem ser unipolares ou bipolares. De maneira geral, a tensão de entrada de um conversor é limitada a tensão de alimentação do mesmo. Em ADC's unipolares, a tensão de alimentação varia tipicamente de 0V a um teto positivo, que na maioria das vezes é 5 ou 10V, já nos casos bipolares, a tensão varia de um valor negativo a um positivo de mesma magnitude, por exemplo -5V a +5V. Existem também os ADC's com deslocamento de zero, que são conversores unipolares, porém, o zero é deslocado para o valor médio da tensão da alimentação. Nesse caso, é possível que valores negativos sejam convertidos pelo ADC. Por exemplo, um ADC de 15 bits com um intervalo de entrada de -5V a +5V e com uma escala real de 32768 ( $2^{15}$ ) contagens possui zero volts corresponde a 16384 contagens.

### 2.4.6 Unidade de processamento digital

Placas de aquisição de dados normalmente já possuem uma unidade de processamento digital (DSP, do inglês *Digital Signal Processor*) incluída, assim, todo o processamento da informação adquirida é feita pela placa, sem necessidade de manipulação externa.

Um DSP é um processador que recebe informações digitalizadas do mundo real, como voz, áudio, vídeo, temperatura ou pressão e as manipula matematicamente. Um DSP é feito para executar funções matemáticas como adição, subtração, multiplicação e divisão de maneira extremamente rápida.

## 2.5 Síntese

Sistemas de aquisição de dados podem ser constituídos de todas essas etapas, vai depender apenas da aplicação, porém, constituir e integrar todas essas etapas manualmente pode se tornar uma tarefa um tanto quanto difícil.

Para contornar esse problema, existem placas de aquisição de dados comerciais, podem ser uma ótima alternativa para esse problema, como a USB 6009 produzida pela National Instruments (NI), é uma placa de aquisição de dados muito versátil, porém, com um valor elevado, devido as inúmeras aplicações de aquisição.

Outra solução é integrar todas essas etapas de aquisição e condicionamento em um único amplificador, que seja específico para uma determinada operação, dessa forma, o custo é reduzido, porém, a gama de aplicações também é reduzida.

Normalmente, os sistemas atuais de aquisição de dados contêm todos os elementos necessários para a aquisição e conversão de dados [25].

Um amplificador que atende esses pré-requisitos é o ZSSC 4151, é um amplificador específico para aplicações em ponte de *Wheatstone*, possui um Analog Front End (AFE) e uma unidade digital, na qual, efetuam as devidas ampliações e correções necessárias. Uma descrição mais detalhada desse amplificador é feita no Capítulo 4. No capítulo 3 é feita uma descrição do problema.



# Capítulo 3

## Proposta de solução

A estampagem de chapas metálicas é uma etapa importante nos processos de fabricação de bens de consumo, é usado para formar desde pequenas tampas de bateria a grandes painéis automotivos com formatos complexos. Nesses processos, ferramentas são necessárias, e estas, podem ter um custo que varia desde 1 a 62 milhões de dólares, dependendo da complexidade das peças a serem formadas [7].

### 3.1 O problema

Na Figura 3.1 podemos ver um molde e sequência de deformação de uma chapa em uma forma relativamente simples.

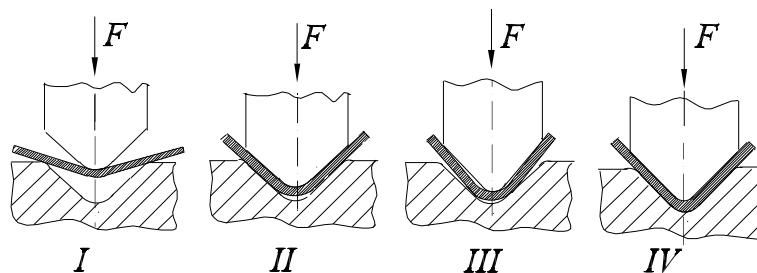


Figura 3.1: Matriz e etapas de deformação de uma chapa metálica em V  
Fonte: Adaptado de [7].

Na Figura 3.2 são demonstradas as partes constituem da ferramenta de estampagem

metálica. Entende-se como molde ou matriz (Die), uma peça fixa na qual, se uma força ( $F$ ) é aplicada em uma chapa metálica e esta é exercida contra o molde através de uma parte móvel (Punch), a chapa tende a ficar com o formato da matriz e, conseqüentemente um formato desejado é estampado na chapa (Workpiece).

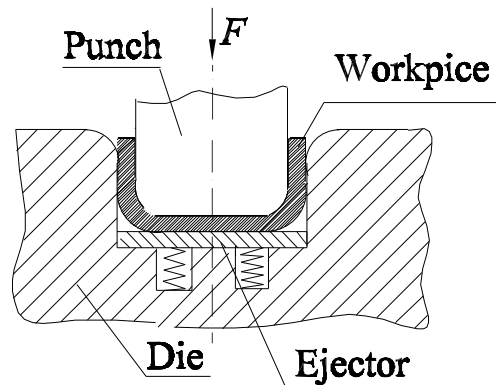


Figura 3.2: Partes constituintes de um molde  
Fonte: Adaptado de [7].

Esse processo só é vantajoso se milhares de peças forem feitas com o mesmo molde, uma vez que o custo ferramental é elevado. Além disso, com o aumento da tecnologia dos metais e com a crescente busca por eficiência, as chapas metálicas estão cada vez ficando cada vez mais resistentes e leves, o que resulta em maiores forças de deformação, maior taxa de desgaste e maior índice de dano às ferramentas de estampagem durante a produção em massa.

A qualidade das peças estampadas é essencial para evitar problemas na montagem e conseqüentemente o desempenho final da peça. Duas principais considerações a respeito das condições de estampagem e qualidade devem ser analisadas, são elas a formabilidade e a precisão dimensional. A formabilidade diz respeito a rugas causadas pelo excesso de força de compressão (*wrinkling*) e rasgos causados pelo excesso de tensão (*tearing*). Já a precisão dimensional diz respeito ao retorno da peça causado pela recuperação elástica (*springback*). Ambos problemas são causados pelo mau dimensionamento da força aplicada nas chapas metálicas [29]. Os principais problemas no processo de estampagem metálica são mostrados na figura 3.3.

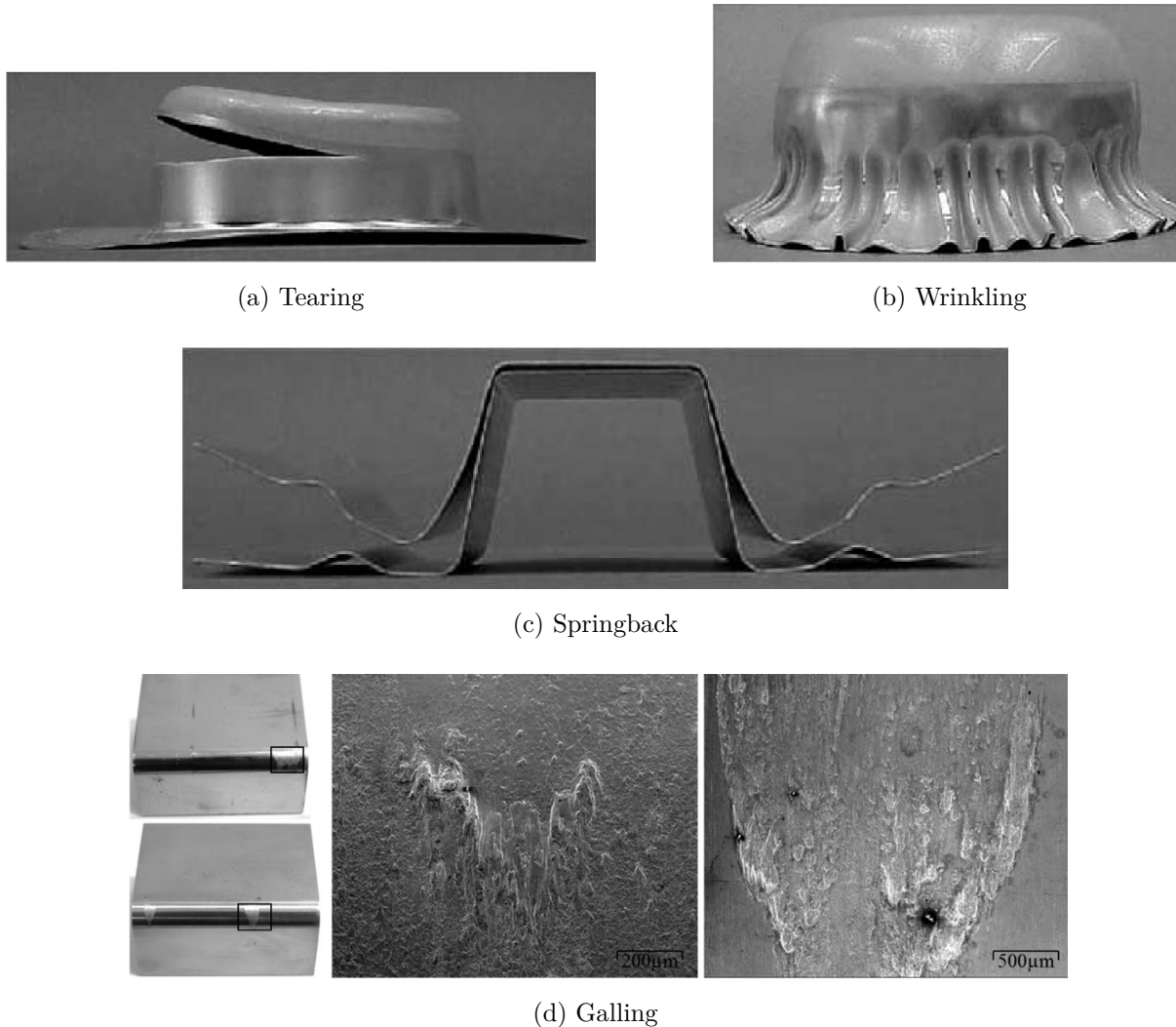


Figura 3.3: Problemas no processo de estampagem metálica.  
Fonte: Adaptado de [29].

O desgaste por atrito (*Galling*), é um dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de estampagem. Esse desgaste é uma forma de dano da superfície estampada e da ferramenta em um nível microscópico, que envolve transferência de resíduos entre as superfícies envolvidas na estampagem (Die, Workpiece e Punch) [7], e conseqüentemente a qualidade do material é prejudicada, podendo causar problemas na montagem final e desempenho do produto [29].

Já a injeção plástica é um processo de fabricação em uma única etapa de peças plásticas que requerem dimensões muito precisas e baixa rugosidade das peças. O alto custo dos moldes, (geralmente acima de 100000 €) e o desgaste de suas cavidades podem limitar a competitividade do processo. A ocorrência de falhas envolve a interrupção da produção, a reparação do molde e até a alteração do material injetado e o restabelecimento dos parâmetros do processo de injeção. Esse problema supõe um custo excessivo e um desperdício de recursos (por exemplo, matéria-prima e energia). Com isso, os custos associados ao desligamento da máquina de injeção podem chegar a 3000 €/dia. Há também outro problema associado ao superaquecimento do plásticos que pode levar à liberação de gases, esses, resultando em uma corrosão local do molde [30].

Devido a natureza estocástica associada ao estágio onde ocorre a iniciação do atrito e conseqüentemente, acúmulo de material [7], o excesso de tensão, o excesso ou falta de compressão e superaquecimento, é necessário um sistema de controle de qualidade das peças produzidas, através do monitoramento automático e em tempo real das condições de operação dos processos de estampagem metálica e injeção plástica, afim de monitorar as condições de força e temperatura nos moldes e ferramentas para que assim, mantenha-se uma elevada taxa de produção e qualidade das peças produzidas, evitando a substituição das ferramentas com elevado custo, manutenções não programadas e má qualidade nas peças produzidas.

## 3.2 O projeto On-Surf

É nesse contexto que se enquadra o projeto On-Surf. O projeto On-Surf é um programa mobilizador que envolve transversalmente empresas nacionais de diferentes setores de atividade e entidades não empresariais do SI&I, num consórcio alargado, em torno do eixo prioritário na Agenda da Inovação Internacional, a Engenharia de Superfícies. Pretende-se desenvolver e aplicar processos de modificação de superfície que promovam soluções avançadas e inovadoras em diferentes setores de atividades, tais como Automobilística,

Aeronáutica, Moldes&Ferramentas, Saúde e Eletrônica; alinhados com os objetivos estratégicos dos Clusters Nacionais: Health Cluster Portugal, EnergyIN, Engineering&Tooling, Mobinov, Produtech, Tice.pt. O projeto envolve empresas posicionadas em toda a cadeia de valor, as modificadoras de superfície, as aplicadoras das soluções e os utilizadores finais.

O projeto On-Surf pretende desenvolver propostas de solução para monitoramento de superfícies, sendo que uma dessas técnicas é a utilização de nanotecnologia para o desenvolvimento de sensores específicos baseados em superfícies finas. Também estuda-se a avaliação e aplicação da utilização da nanotecnologia para transmissão desses dados recolhidos até o sistema de aquisição de dados. Em termos tecnológicos, esse sistema fara a interligação através de nanotecnologia com o sistema de aquisição de dados.

### 3.3 Proposta de solução

O desenvolvimento deste tipo de superfícies com propriedades sensoriais requer uma arquitetura adaptável, uma vez que os sensores utilizados dependem da aplicação na qual o sistema será inserido, ou seja, o sistema deve ser capaz de aceitar qualquer tipo de sensor que seja possível a adaptação no sistema.

Requer também, o estudo de técnicas de condicionamento de sinal em sensores específicos, a caracterização e desenvolvimento de perfis que permitam a reconfiguração de módulo de condicionamento de sinal de acordo com os diversos sensores utilizados. A arquitetura proposta, para sistema de medida pontuais em superfícies finas, apresenta uma estrutura modular escalável, que permite suportar um número variável de pontos de medida de acordo com a necessidade de instrumentação da superfície de trabalho, já que os diferentes moldes variam de tamanho e formato, sendo assim, se para uma determinada aplicação são necessários 20 sensores, o sistema deve ser capaz de adquirir o sinal de todos e, se uma quantidade maior de sensores for requerida, o sistema deve adaptar-se de maneira escalável.

A proposta do sistema é composta por módulos de aquisição de sinal que se encontram ligados por rede ethernet a um concentrador Raspberry Pi, que recolhe a informação de

cada modulo e disponibiliza-a numa base de dados remota. Cada modulo de aquisição é constituído por um ESP32\_POE e pode recolher até 8 pontos de medida de pressão e temperatura. Utiliza como modulo de condicionamento de sinal o ZSSC\_4151 e, através de um Analog Front End (AFE), permite a fácil reconfiguração das funções de condicionamento de sinal e adaptar o sistema a diferentes configurações do sensor. Os sensores utilizados são específicos para trabalhar com superfícies finas baseados em sistemas de filmes finos com propriedades sensoriais - Pressão e Temperatura.

Na Figura 3.4 é descrito uma proposta do sistema completo que será utilizado no projeto. Esse sistema é dividido em quatro etapas, cada um com um enfoque em uma determinada parte do sistema. O primeiro caso de estudo é a etapa de aquisição e condicionamento do sinal, o qual será descrito nesse trabalho e está descrito na parte inferior da imagem. O segundo caso de estudo está destacado ao meio da imagem, esse trabalho foca na aquisição analógica dos dados, identificação, organização, time-stamping e posterior envio dos dados adquiridos para o concentrador, que é o terceiro caso de estudo, é nessa etapa que é feito a recepção dos pacotes de dados, verificação dos dados, sincronismo dos módulos de aquisição e envio para um armazenamento na nuvem, para que seja feita uma visualização dinâmica e final dos dados pelo usuário, que é o quarto caso de estudo.

Como proposta de solução de amplificação dos sinais, será usado o circuito em ponte de *Wheatstone*, citado no Capítulo 2, esse circuito oferece uma pré-amplificação do sinal. Como é constituído apenas por resistores e o sensor, possui uma excelente estabilidade e precisão, já que resistores de precisão podem ser inseridos. Dessa forma, o sinal é disponibilizado para o segundo estágio de amplificação, que será feita pelo amplificador comercial ZSSC 4151, este amplificador é ideal para aplicação deste projeto uma vez que, é facilmente reconfigurado para os diferentes tipos de sensores utilizados. Essa reconfiguração é feita através de uma interface gráfica disponibilizada pelo fabricante e que será descrita com mais detalhes no Capítulo 4.

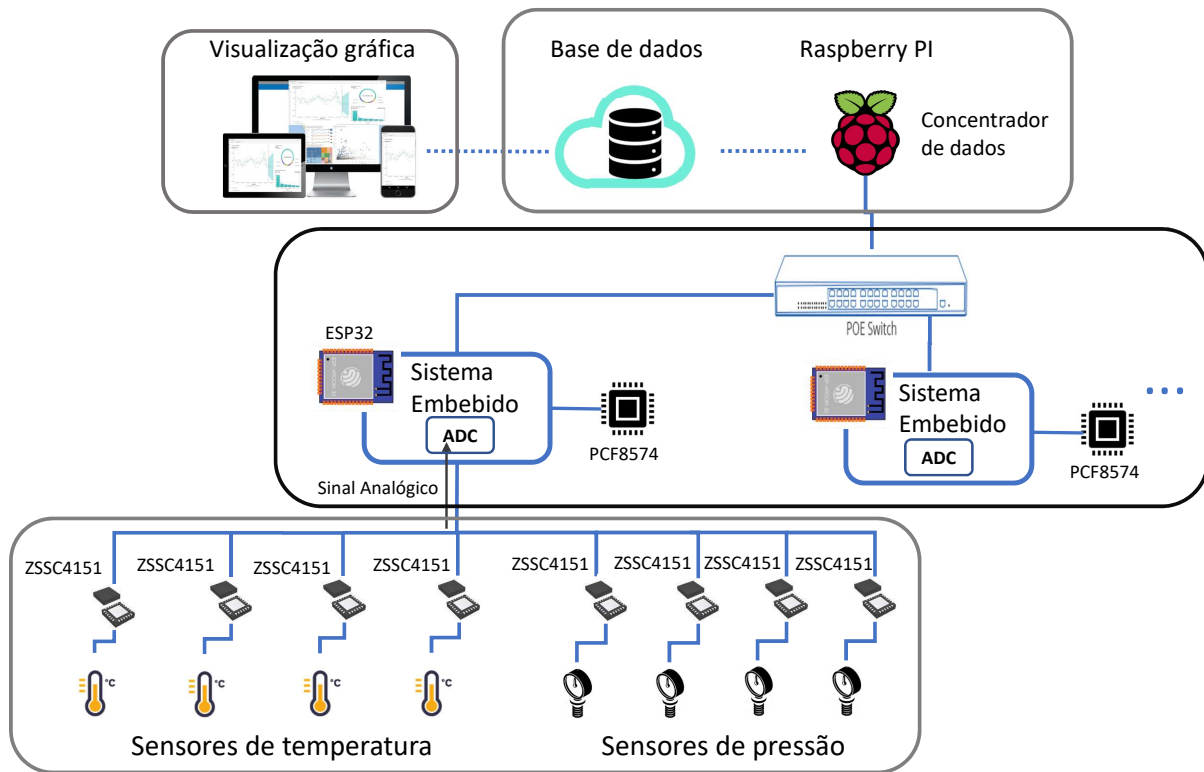


Figura 3.4: Diagrama do sistema completo proposto



# Capítulo 4

## Desenvolvimento

Quando nos referimos a sensores piezoresistivos ou sensores de temperatura, como RTD's, devemos sempre ter em mente que, o sinal que é adquirido desses sensores tem uma amplitude muito baixa, uma vez que a variação de resistência é muito pequena. Para isso, técnicas específicas para a amplificação do sinal são necessárias, como a ponte de *Wheatstone*, vista no Capítulo 2.3.3. Uma segunda amplificação desse sinal é necessária, já que a amplificação feita pela ponte não é suficiente, essa amplificação será feita utilizando o amplificador comercial ZSSC 4151 e será descrito na seção 4.1.

### 4.1 ZSSC 4151

Devido as características dos sensores utilizados, é necessária uma amplificação do sinal gerado em seus terminais, uma vez que este sinal é da ordem de  $\mu V$ , para isso, circuitos especiais devem ser empregados para que o sinal possa ser convertido de maneira confiável, para isso um circuito comumente implementado nessas situações é a ponte de *Wheatstone*, porém, devido a amplitude do sinal gerado ser muito baixa, é necessária uma segunda etapa de amplificação, essa será feita por um amplificador comercial, o ZSSC 4151.

O ZSSC 4151 *Sensor Signal Conditioner* (SSC) é um circuito integrado CMOS de alta precisão, amplificação e correções específicas para sensores em ponte. A compensação digital de Offset, sensibilidade, desvio de temperatura e não linearidade é feita através de

um microcontrolador RISC interno, de 16 bits. Na qual, executa um algoritmo de correção e calibração com valores pré definidos em uma EEPROM. O ZSSC 4151 é ajustável para praticamente todos os tipos de sensores em ponte. Os sinais medidos são disponibilizados de forma analógica na saída e também na porta de comunicação digital, através dos protocolos de comunicação  $I^2C$  e ZACwire™. Para configurar a saída como tensão analógica o ZSSC 4151 deve estar no modo Normal Mode (NM) ou Command Mode (CM) para interface digital. Para essa aplicação o sinal de saída será no formato analógico, pois, é uma recomendação do fabricante e não há documentação sobre os tempos de leitura para o formato de saída digital.

A partir do momento em que o sinal do sensor é gerado, é feita uma pré-amplificação através da ponte e, após isso, o mesmo percorre um determinado caminho percorrendo várias etapas de amplificação e condicionamento através do ZSSC 4151 até ser disponibilizado de maneira analógica para o ESP32-POE, essas etapas são demonstrados na Figura 4.1. Esse caminho é constituído pelo Analog Front End (AFE), a unidade de processamento digital de sinal (CMC, *Calibration Microcontroller*) e por último o estágio de saída (AOUT, *Output stage*). O amplificador também possui um bloco de proteção e gestão de energia e uma interface de comunicação digital por  $I^2C$ . Essas etapas de amplificação serão detalhadas na seção 4.2.

## 4.2 Etapas de amplificação e condicionamento do sinal

Nesta seção será feita uma análise mais detalhada das etapas de amplificação e condicionamento do sinal adquirido pelo amplificador ZSSC 4151, são elas: AFE, Digital Core e interfaces de saída do sinal. Todas as informações foram retiradas da folha de dados disponibilizada pelo fabricante e podem ser encontradas em [31].

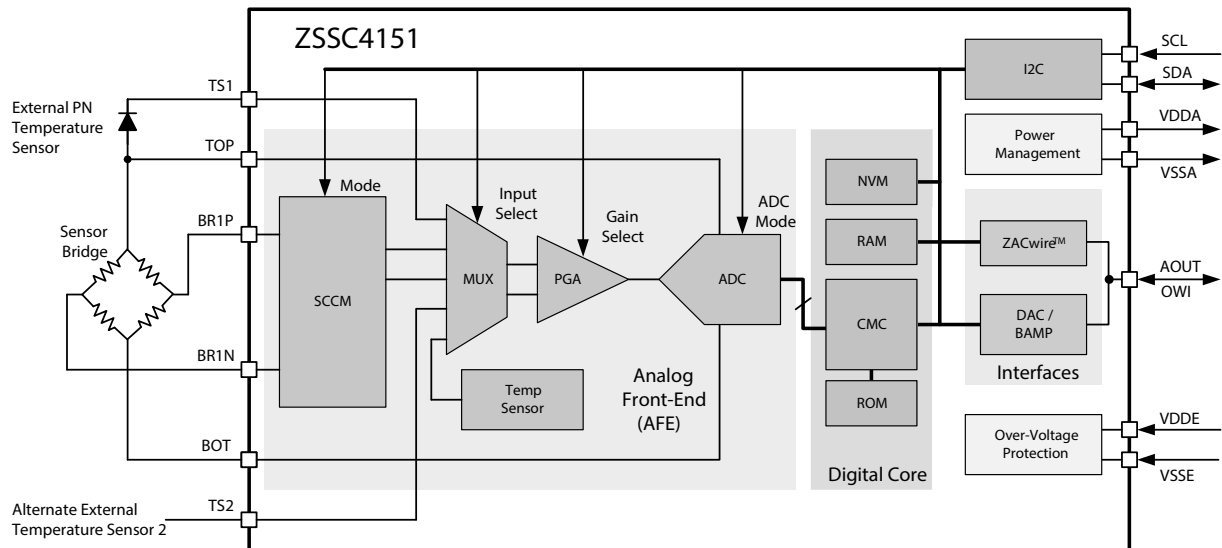


Figura 4.1: Diagrama de blocos ZSSC 4151.

Fonte: Adaptado de [31].

### 4.2.1 AFE - Analog Front End

O *Analog Front End* (AFE) é a etapa onde ocorre a aquisição, ganho analógico do sinal e conversão digital. Esse bloco consiste na verificação do sensor e ajuste do modo comum (SCCM, *Sensor Check and Common Mode*), num multiplexador (MUX, *Multiplexer*), no amplificador de ganho programável (PGA, *Programmable Gain Amplifier*) e no conversor analógico-digital (ADC, *Analog-to-Digital Converter*). Essas etapas são ilustradas no diagrama esquemático da Figura 4.2.

#### Sensor Check and Common Mode (SCCM)

No bloco SCCM é o onde são feitos testes de segurança do amplificador para avaliar as condições de operação do ZSSC. Esse bloco contém um circuito que checa os elementos sensores da ponte e também a arquitetura interna do amplificador. Caso o SCCM detecte alguma anormalidade, por exemplo, um curto-circuito na ligação da ponte, ele abre a aquisição do sinal não ocorre (Figura 4.2), evitando assim danos ao amplificador. Essa checagem é feita através de uma corrente programável. O SCCM também possui um conversor Digital-Analógico (AFEDAC) para fornecer tensões de autoteste do MUX, PGA

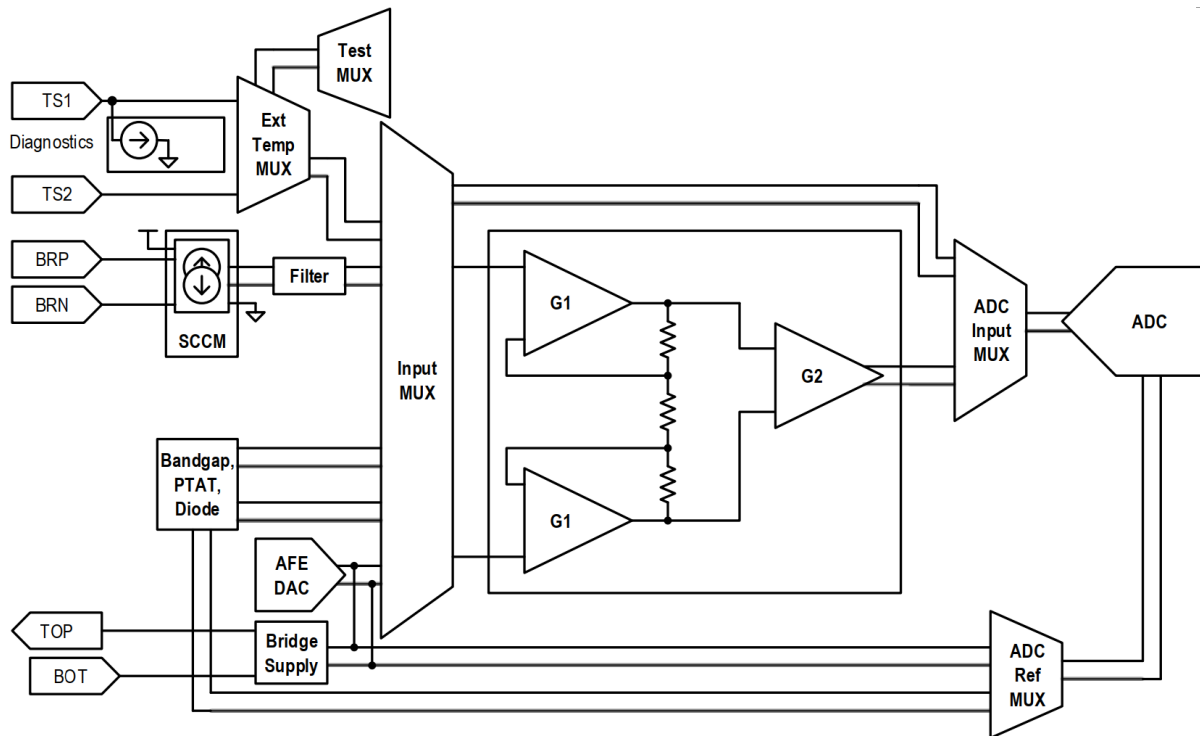


Figura 4.2: Esquemático Analog Front End (AFE).  
Fonte: Adaptado de: [31].

e ADC.

### Multiplexer (MUX)

O multiplexador permite selecionar combinações de entradas para o ZSSC 4151, essas entradas podem ser pinos externos, como a entrada diferencial da ponte de *Wheatstone* (BR1P e BR1N), ou pinos internamente conectados, como o sensor de temperatura integrado (PTAT). O MUX seleciona ambas entradas diferenciais dos sensores, positiva e negativa, além de atribuir as entradas para as tarefas internas de medição em execução no ciclo de medição.

### Programmable Gain Amplifier (PGA)

O ZSSC oferece também uma amplificação do sinal de entrada da ponte. A etapa do PGA é onde é feita a amplificação analógica do sinal adquirido antes que seja inserido

no ADC. É um amplificador de instrumentação, configurável de dois estágios (G1 e G2, Figura 4.2). O ganho pode variar de 1 a 200 e pode ser selecionado através do software de configuração. A tabela 4.3 lista os ganhos analógicos disponíveis do ZSSC.

Option	Gain	First G1 Stage	Second G2 Stage	Maximum Input Span $V_{IN\_SPAN}$ (mV/V)	Input Common Mode Range $V_{IN\_CM}$ (% VDDA)
0	1	1	1.00	800	5 to 95
1	1.4	1	1.56	578	30 to 65
2	2.1	2	1.11	385	30 to 65
3	3.15	2	1.56	254	30 to 65
4	4.3	2	2.21	186	30 to 65
5	6.25	2	3.13	128	30 to 65
6	8.3	8	1.11	96	30 to 65
7	12.6	8	1.56	63	30 to 65
8	17.3	8	2.21	46	30 to 65
9	25.0	8	3.13	32	30 to 65
A	33.2	32	1.11	24	30 to 65
B	50.4	32	1.56	16	30 to 65
C	69.0	32	2.21	12	30 to 65
D	100.0	32	3.13	8	30 to 65
E	138.0	64	2.21	6	30 to 65
F	200.0	64	3.13	4	30 to 65

Figura 4.3: Tabela de ganhos do Programmable Gain Amplifier (PGA).

Fonte: Adaptado de [31].

### Analog-to-Digital Converter (ADC)

A última etapa do caminho do sinal no Analog Front End é o conversor analógico-digital. O ZSSC possui um ADC com resolução configurável de 12 a 18 bits via NVM. Também é possível setar um deslocamento da entrada de sinal (*AdcRngShift*), ambas configurações estão disponíveis para otimizar a aquisição do sinal e ter acesso a uma faixa mais ampla do mesmo. O resultado das conversões ficam armazenados na memória RAM como signed 16-bit (sint16). A conversão do sinal de analógico para digital é feito através da equação 4.1.

$$Z_{ADC} = \left( \frac{Gain * (V_{IN\_DIFF} + V_{OFFSET})}{ADC_{REF}} + AdcRngShift - Zoom \right) * 2^{15+scale} \quad (4.1)$$

Onde

$Z_{ADC}$	Contagens do ADC;
$Gain$	Ganho analógico (1 a 200);
$V_{IN\_DIFF}$	Tensão diferencial de entrada da ponte ( $V_{IN\_DIFF} = V_{BR1P} - V_{BR1N}$ );
$V_{OFFSET}$	Tensão de OFFSET;
$ADC_{REF}$	Tensão de referência do ADC ( $TOP\_BOT$ ou $VDDA\_VSSA$ );
$AdcRngShift$	Deslocamento do ADC 1/16, 1/8, 1/4 ou 1/2;
$Zoom$	Zooming offset: 0, 1/16, 2/16, 3/16, ... 15/16
$scale$	$R_{ADC} - 15$ : 0, 1, 2 ou 3;
$R_{ADC}$	Resolução do ADC, 12 a 18;

O ADC pode ser configurado com resoluções entre 12 e 18 bits, entretanto, quando maior for a resolução do ADC, maior o tempo de conversão. A próxima etapa do caminho do sinal (CMC, *Calibration microcontroller*) possui uma arquitetura de 16 bits, portanto, se uma resolução maior que 15 bits for utilizada, a função Zoom do ADC deve ser utilizada.

O ZSSC também disponibiliza uma ferramenta de compensação de Offset, essa ferramenta deve ser analisada juntamente com o deslocamento do ADC. Se uma determinada configuração de ponte produz um sinal com Offset, pode-se configurar a ferramenta *Auto-zero* (AZ). Essa ferramenta remove o o deslocamento da medida. Caso o AZ seja utilizado, a equação 4.2 modela a conversão do ADC.

$$Z_{ADC} = \left( \frac{Gain * V_{IN\_DIFF}}{ADC_{REF}} + AdcRngShift \right) * 2^{15+scale} \quad (4.2)$$

Quando o sinal já se encontra no domínio digital, pode-se aplicar um ganho e deslocamento digital, que é calculado automaticamente por meio das equações codificadas na ROM, assim fazendo com que a resolução máxima do sinal possa ser atingida após a

calibração.

O valor das contagens e a saída do ADC é utilizado pelo CMC para operações de linearização, compensações e condicionamento digital.

### O deslocamento do ADC

A configuração de deslocamento de faixa do ADC permite que a entrada analógica do ADC seja ajustada para que, juntamente com o ganho PGA, o máximo alcance do sinal seja percebido.

A Tabela 4.1 apresenta as configurações que estão disponíveis para aplicação,

Configuração	adcRngShift	Descrição	$Z_{ADC}$ para uma entrada de 0mV
1/2 to +1/2	1/2	Centrado no ADC	16384 [4000 <sub>HEX</sub> ]
-1/4 to +3/4	1/4	Deslocado +25%	8192 [2000 <sub>HEX</sub> ]
-1/8 to +7/8	1/8	Deslocado +37,5%	4096 [1000 <sub>HEX</sub> ]
-1/16 to +15/16	1/16	Deslocado +43,75%	2048 [0800 <sub>HEX</sub> ]

Tabela 4.1: Configurações de deslocamento de ADC

O ADC do ZSSC 4151 opera no modo diferencial e centralizado, de modo que a tensão de referência pode ser configurada como sendo TOP\_BOT ou VDDA\_VSSA. A tensão de modo comum é definida como  $(CMV \sim VDDA/2)$ . A Figura 4.4 apresenta um exemplo dos efeitos de deslocamento do ADC quando o intervalo de entrada de tensão é de 2.5V e a tensão de referência do conversor é de 5V. Nessa imagem é possível observar o efeito do deslocamento.

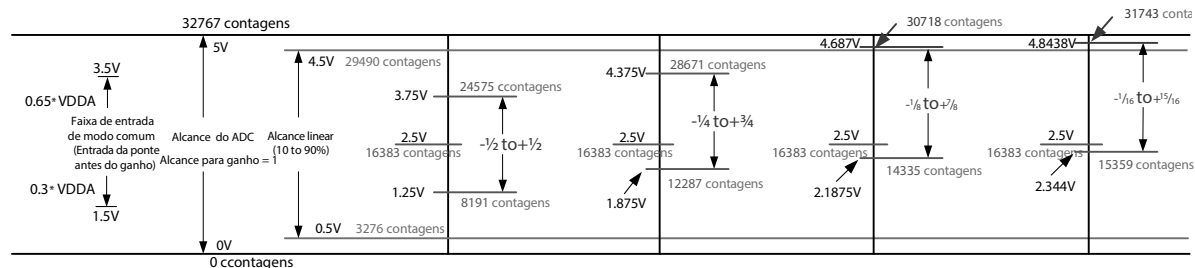


Figura 4.4: Exemplos de deslocamento do ADC com uma entrada de 2.5V

### 4.2.2 Digital Core

Nesse bloco são feitas as compensações digitais do amplificador e a formatação dos dados para a saída analógica ou digital. A próxima seção descreve as etapas de linearização e compensação.

O ZSSC possui um microcontrolador para calibração e processamento digital de sinal (DSP, do inglês *digital signal processor*). É um DSP de 16 bits com uma unidade lógica aritmética (ALU, do inglês *arithmetic logic unit*) de 24 bits.

Através do CMC é possível configurar parâmetros como a seleção de entradas do multiplexador, tarefas de medição da ponte entre outros.

Através da interface gráfica, é possível realizar uma calibração do sensor utilizado, podendo essa ser linear, quadrática ou cúbica. Os coeficientes de calibração são exclusivos para cada módulo sensor. Os coeficientes são determinados durante o processo de calibração e armazenados na memória NVM. Durante a calibração, os dados dos módulos da ponte são coletados em diferentes níveis de excitação.

O princípio de operação do ZSSC é a linearização dos sinais de entrada em consequência dos efeitos da temperatura. Esses efeitos podem ser compensados até a terceira ordem pelas equações de calibração. Neste trabalho, a compensação de temperatura não será feita, uma vez que os testes e validações não sofrem por interferência da mesma. A Figura 4.5 apresenta um diagrama esquemático dos processos executados pelo ZSSC 4151 durante as etapas de condicionamento do sinal.

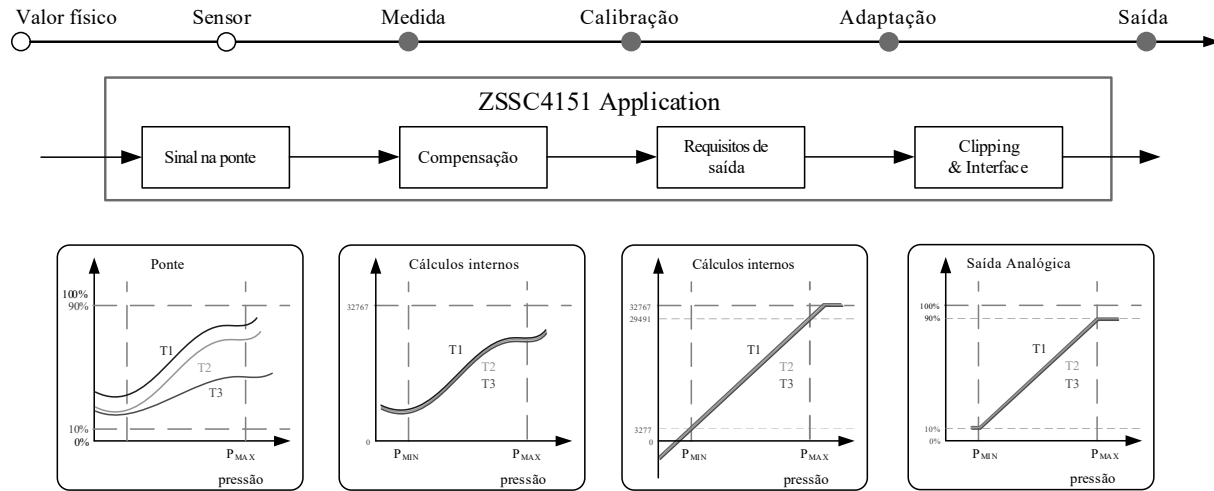


Figura 4.5: Processos executados pelo ZSSC 4151.  
Fonte: Adaptado de [31].

### 4.2.3 Interfaces digitais

Para comunicar-se, o ZSSC possui uma interface digital serial, podendo se comunicar por I<sup>2</sup>C e pelo protocolo ZACwire<sup>TM</sup> OWI.

As interfaces de comunicação permitem a programação do ZSSC 4151, bem como, configuração do seu modo de operação e calibração de suas equações de condicionamento.

O protocolo de comunicação é selecionável. No CM, os protocolos de comunicação I2C e OWI estão disponíveis para comunicação e na NOM, os resultados do condicionamento são atualizados continuamente e disponibilizados para leitura como saída analógica.

Existem dois tipos gerais de solicitações usadas para aceder os dados via SIF do ZSSC4151:

- Ler continuamente os resultados condicionados pela saída analógica ou;
- Ler dados internos (por exemplo, conteúdo de RAM) ou dados de medição;

### 4.2.4 Power management

O ZSSC 4151 possui um sistema de proteção de energia contra sobretensão e tensão reversa. Adicionalmente, possui um sistema de proteção contra transientes externos de

tensão, assim, fazendo com que a alimentação da ponte seja sempre constante além de garantir uma tensão confiável para os circuitos internos. Além disso, existe um regulador interno para 1,8V. Este regulador fornece a tensão para os sistemas digitais, como memórias (NVM, RAM, ROM).

### 4.3 A placa de aquisição de dados

Para os testes e avaliação dos resultado foi utilizado uma placa de teste, juntamente com um software de configuração. A placa ZSSC41xx SSC (*Sensor Signal Conditioning*) é a placa de aquisição de dados da família do ZSSC 4151. Esse kit tem como finalidade a avaliação de módulo de sensor, configuração e calibração para o CI's de condicionamento de sinal.

O kit, desenvolvido pela fabricante ZMDI, hoje pertencendo a Renesas Technology Corporation [32], possui uma placa de comunicação que é conectada ao computador por um cabo USB 2.0 e comunica-se por I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> e OWI (*One Wire Interface*) com o software de configuração, uma placa de avaliação ZSSC41xx SSC e também uma placa de simulação de sensor.

Sendo um kit de testes e avaliação, o mesmo possibilita utilização de um sensor para simulação de dados no lugar de um sensor real, para fins de configuração e demonstração. Como mostrado na Figura 4.6.

O kit também possui a possibilidade de aceder a todas as entradas do amplificador por meio de pinos externos, com isso, também é possível fazer a aquisição do sinal de um sensor real externo.

### 4.4 O software de configuração

Para a configuração da memória e registradores do ZSSC 4151, foi utilizado um software de configuração que também é disponibilizado pela fabricante. Esse software fornece uma interface gráfica de usuário (GUI, *Graphical User Interface*) que facilita a configuração do

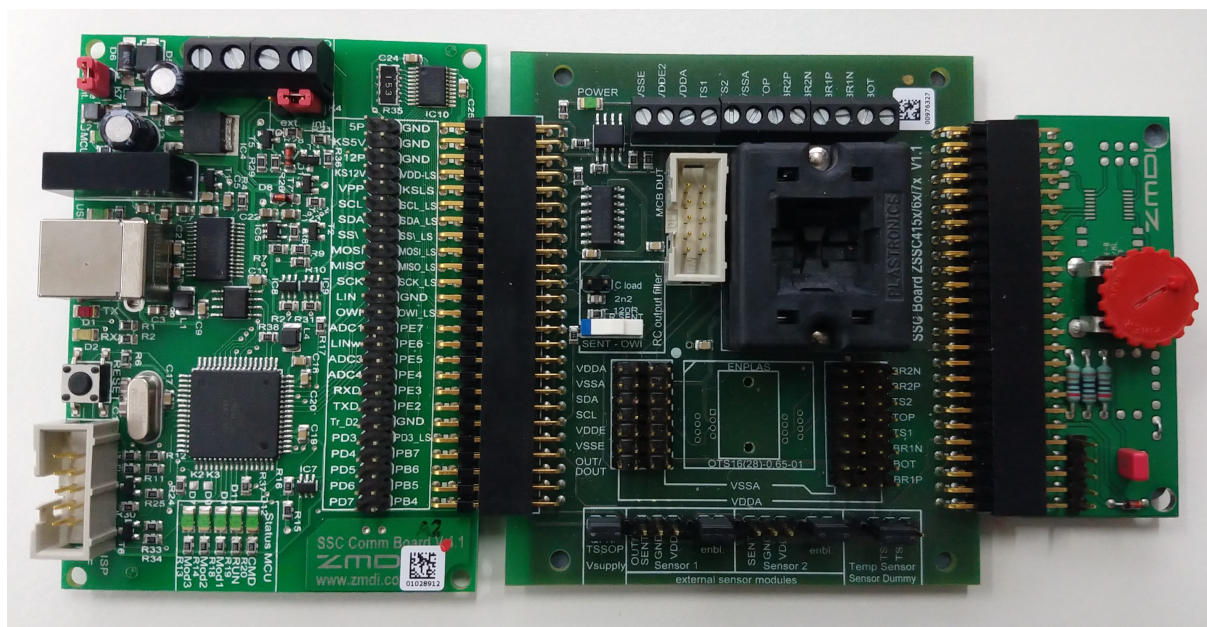


Figura 4.6: Placa de aquisição de dados ZSSC 4151

CI.

Na Figura 4.7 pode-se observar a tela inicial da interface gráfica. A aba *Main* é a aba principal do software, é nessa aba que é feita a visualização e seleção dos dados amplificados. Também é possível observar qual dispositivo escravo está conectado com a interface. Nessa aba também é possível fazer a conexão com o amplificador podendo selecionar o protocolo I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> ou OWI na aba *Connection* e também visualizar qual dispositivo está conectado em *Active devices*.

Na aba *Measurements* (Figura 4.8) são feitas as configurações das tarefas das executadas pelo ZSSC, é nessa aba que são configurados os ganhos (*GainAdjust*), deslocamentos do ADC (*adcRngShift*), seleção das entradas do multiplexador (*muxNSel* e *muxPSel*) entre outras configurações que são padrões para cada tipo de sensor, essas informações estão disponíveis no *Data Sheet* do amplificador.

Na aba *Configure* (Figura 4.9) são feitas configurações referentes ao modo de funcionamento do ZSSC como operação no modo AOUT ou CM, seleção do endereço do dispositivo escravo e também configurações dos componentes do AFE, como tensão de referência e resolução do ADC, tensão de referência do AFEDAC e corrente para testes

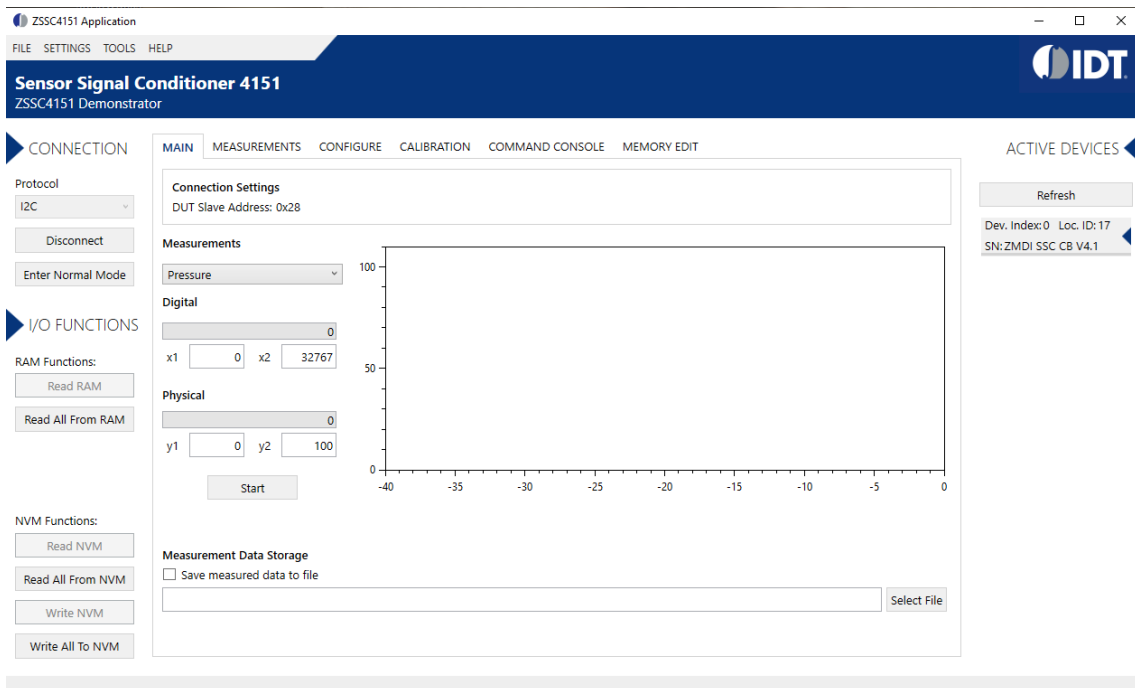


Figura 4.7: Tela inicial ZSSC 4151

do SCCM.

A aba *Calibration* (4.10) é onde é feita a calibração do sensor. O ZSSC 4151 permite fazer calibrações para sensores com não linearidade de até terceira ordem e compensações de temperatura quadráticas. Para fazer uma calibração linear, é necessário adquirir o valor da variável em um ponto P1 e a um ponto P2. A partir desses pontos de calibração, o ZSSC fará a linearização e compensação de temperatura do sinal de entrada. Caso seja necessário, é possível também fazer um *clipping* do sinal de saída, para isso basta determinar um limite superior e inferior da tensão de saída. Para realizar a calibração de um sensor em uma ordem superior, basta apenas obter mais pontos de calibração.

O Command Console (Figura 4.11) é uma ferramenta que oferece a opção para configuração do ZSSC 4151 por linha de comando, dessa forma é possível o acesso a memória interna do ZSSC. O comando para escrever e requisitar acesso na memória é `ow_28003aadd` e para fazer a leitura do registrados que fora requisitado é `or_28003`. O comando funciona da seguinte forma: é necessário primeiro fazer uma requisição de acesso, isso é feito pelo comando `ow` no endereço 28, `aa` descreve o comando da requisição e `dd` o endereço do

The screenshot displays the 'Sensor Signal Conditioner 4151' configuration software. The interface is divided into several sections:

- CONNECTION:** Includes a protocol dropdown set to 'I2C', a 'Disconnect' button, and an 'Enter Normal Mode' button.
- I/O FUNCTIONS:** Contains sections for 'RAM Functions' (Read RAM, Read All From RAM) and 'NVM Functions' (Read NVM, Read All From NVM, Write NVM, Write All To NVM).
- TaskList:** A table listing tasks with columns for No, Name, DataA, and DataB.
 

No	Name	DataA	DataB
0	Task0	0000	0000
1	Task1	0000	0000
2	Task2	0000	0000
3	Task3	0000	0000
4	SCC	3D44	899C
5	SSC	3C1D	8414
6	CMV_1	9C1E	8134
7	CMV_2	1C1E	9074
8	VDDA	5D43	9532
- Configuration Parameters:** A list of settings with dropdown menus and checkboxes.
 

Name	Value	Description
nextIsAux:	MAIN	Next measurement task is auxiliary
modeAZ:	NO_AZ	Enable AZ, sccmCIP or afeMuxinPol
auxAfterAZ:	MAIN	Next task after AZ is auxiliary
enainit:	<input type="checkbox"/>	Enable during Init
enaCycle:	<input type="checkbox"/>	Enable during Cyclic
GainAdjust:	1	Select PGA Gain
adcRngShPol:	<input type="checkbox"/>	ADC Range Shift Polarity
adcRngShift:	-1/16 to +15/16	ADC Range Shift
adcModeSet:	0	ADC Setting Select
TsExtDiode:	<input type="checkbox"/>	TS external Diode
afeBgBfCmSel:	1	AFE Bandgap Buffer Gain Select
muxNSel:	BR1P	Multiplexer Negative Select
muxPSEL:	BR1P	Multiplexer Positive Select
sccmSet:	0	SCCM Setting Select
afeDacSet:	0	AFE DAC Setting Select
- ACTIVE DEVICES:** Includes a 'Refresh' button and device information: Dev. Index: 0, Loc. ID: 17, SN: ZMDI SSC CB V4.1.

Figura 4.8: Tela de configuração de tarefas

registrador. Para fazer uma requisição de leitura dos dados o comando começa com *or* (Order Read) no endereço 28 e especificando o tamanho da palavra.

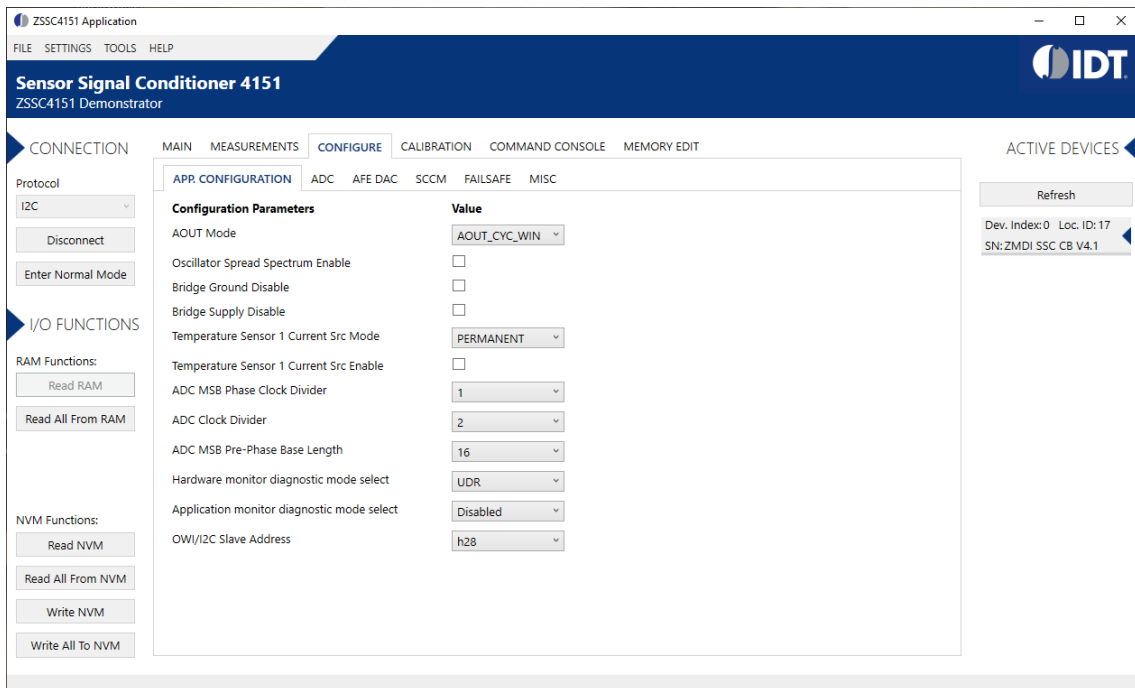


Figura 4.9: Aba de configuração.

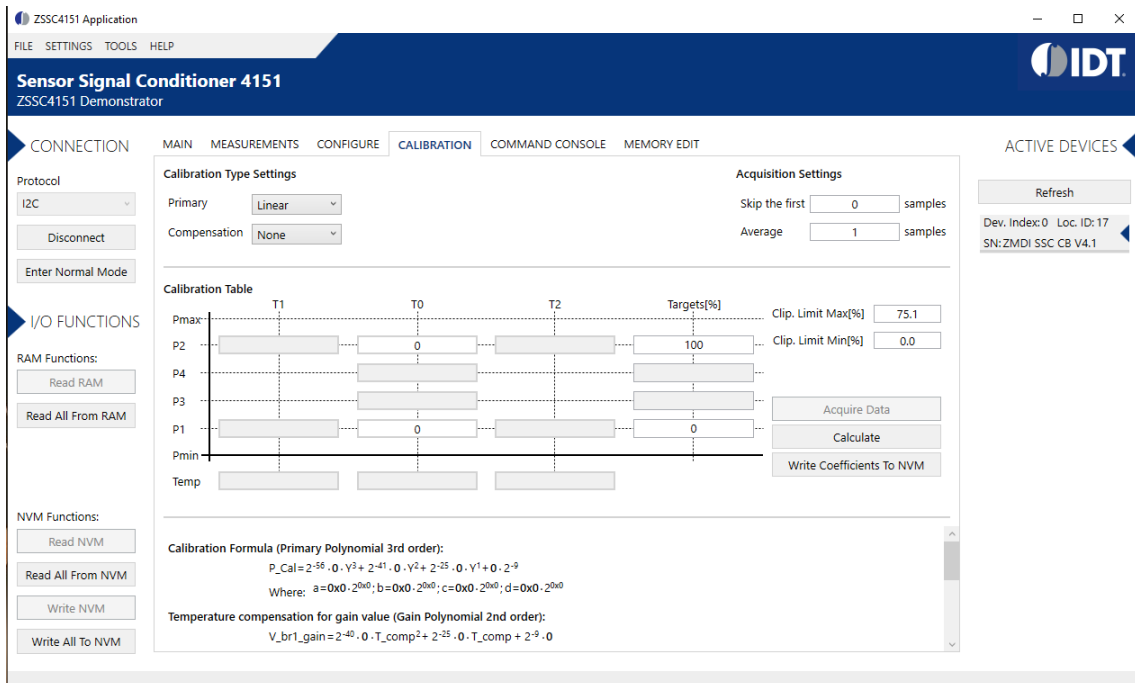


Figura 4.10: Aba para calibração do sensor.

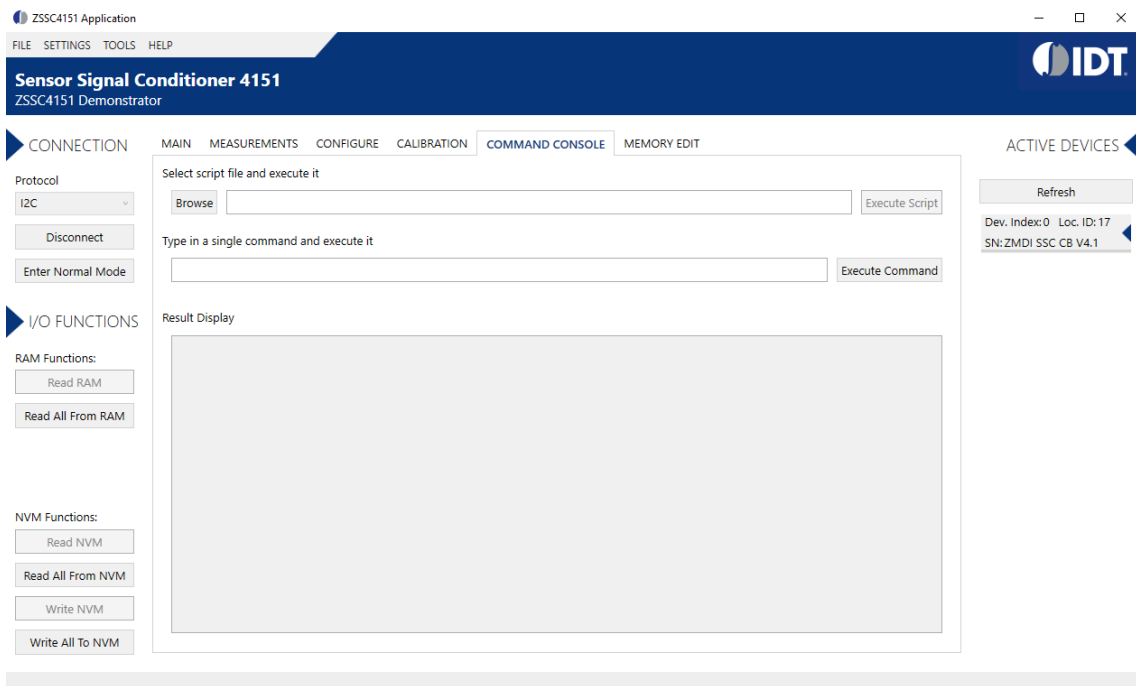


Figura 4.11: Command Console



# Capítulo 5

## Testes/Avaliação

Antes de avaliar a aplicação do amplificador no sistema completo proposto, foram feitos alguns testes para avaliar a precisão e confiabilidade do amplificador escolhido.

O primeiro teste foi feito utilizando um extensômetro em configuração de ponte de *Wheatstone* para avaliar o comportamento do sinal de saída. O circuito equivalente implementado está demonstrado na Figura 5.1.

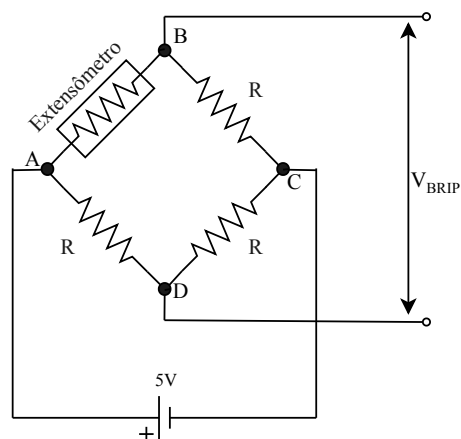


Figura 5.1: Circuito equivalente da ponte de *Wheatstone* com extensômetro de  $120\Omega$ .

Uma ponte de *Wheatstone* equilibrada foi utilizada para esse teste, para balancear a ponte foram utilizados três resistores de precisão  $R = 120\Omega$  e o sensor é um extensômetro de  $120\Omega$ .

A Figura 5.2 apresenta um gráfico da amplificação do sinal do extensômetro. Ao analisarmos o gráfico é possível perceber os picos de força aplicada, esses picos de pressão foram aplicados ao extensômetro através da deformação de uma lâmina de acrílico maleável, simulando a deformação de um metal. Ao analisarmos esse gráfico é possível perceber que o amplificador escolhido possui uma boa aquisição e amplificação do sinal, já que o sinal de saída do extensômetro, como visto em 2.3.1 é na ordem dos  $m\Omega$ .

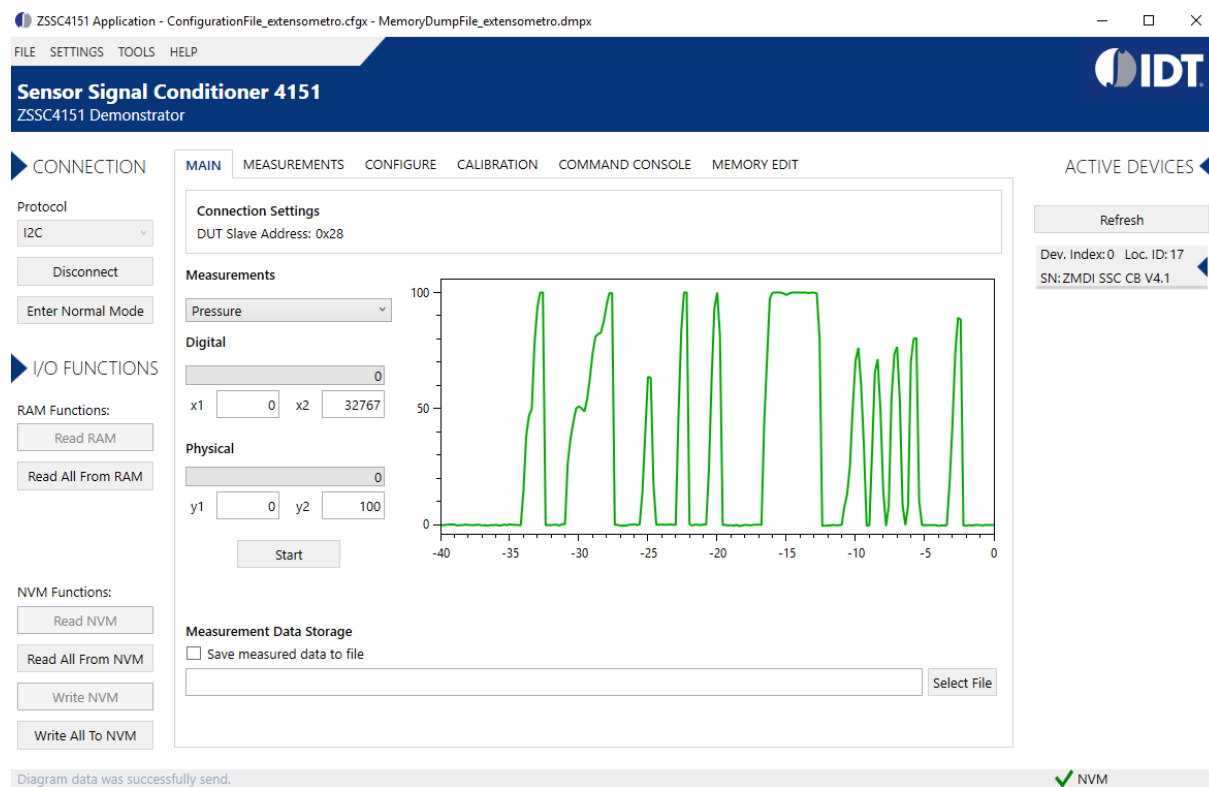


Figura 5.2: Resultado da amplificação utilizando um extensômetro de  $120\Omega$ .

Também foi realizado um teste para analisar a precisão e linearidade da saída analógica do amplificador frente a uma variação muito baixa da tensão na entrada.

Esse teste teve como objetivo efetuar a comparação entre uma variável conhecida, nesse caso a temperatura, e comparar com a tensão de saída do ZSSC 4151. Para medir a temperatura, foi utilizado um sensor AD590 na arquitetura série com um resistor de  $10k\Omega$ . Como o AD590 comporta-se como uma fonte de corrente variando  $1\mu A/^{\circ}C$ , temos uma variação da tensão no resistor de  $10mV/^{\circ}C$ . A figura 5.3 apresenta um diagrama

esquemático do circuito implementado.

Para verificar a variação da tensão na saída analógica do ZSSC foi feita a aquisição e amplificação do sinal de um PT100 de 4 fios. Como um sensor com 4 fios não permite a configuração em ponte de *Wheatstone*, uma ligação diferencial foi feita, seguindo a topologia da placa do sensor de testes disponibilizado pela fabricante e citado em 4.3. Dessa forma 2 dos fios do PT100 foram conectados às extremidades dos resistores de  $120\Omega$  e 2 para entrada do sinal no ZSSC 4151, uma vez que o amplificador possui uma impedância de entrada muito alta, o erro da resistência de condução do PT100 é compensado.

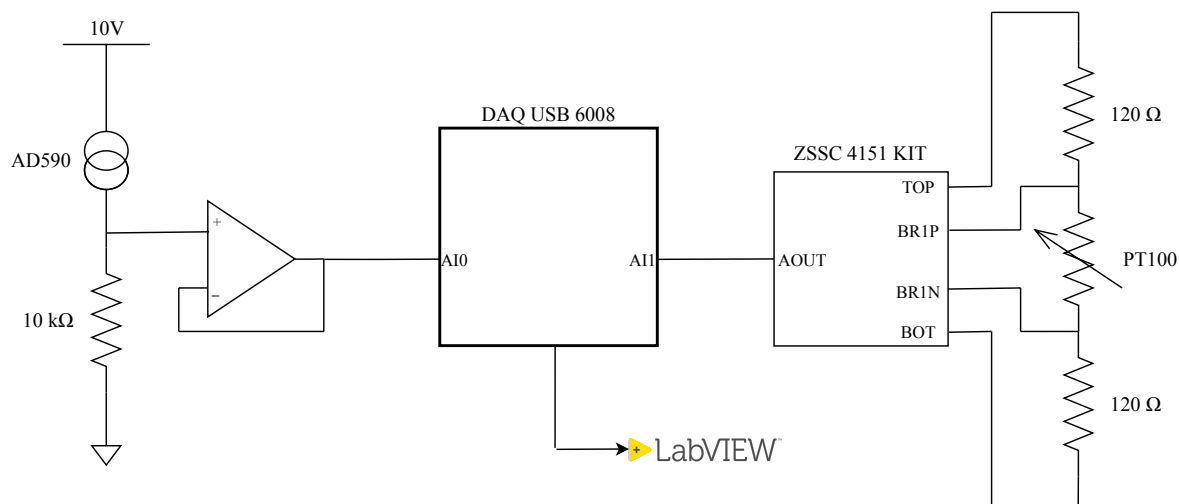


Figura 5.3: Diagrama esquemático do circuito implementado para realização do teste de do ZSSC 4151

Como dito, o AD590 gera uma corrente de acordo com a variação da temperatura, porém, a  $0^{\circ}C$  a corrente é  $273,15\mu A$ , dessa forma, uma tensão de *offset* de  $2,7315V$  é criada. A remoção desse *offset* pode ser feita de maneira analógica, porém, como foi desenvolvido um Instrumento Virtual (VI) em LabVIEW para salvar os dados adquiridos em formato .csv, que é o formato para poder acessar os valores por software de planilhas, o mesmo VI também foi utilizado para remoção do offset de maneira digital. A Figura 5.4 apresenta uma captura da tela do diagrama de blocos utilizado.

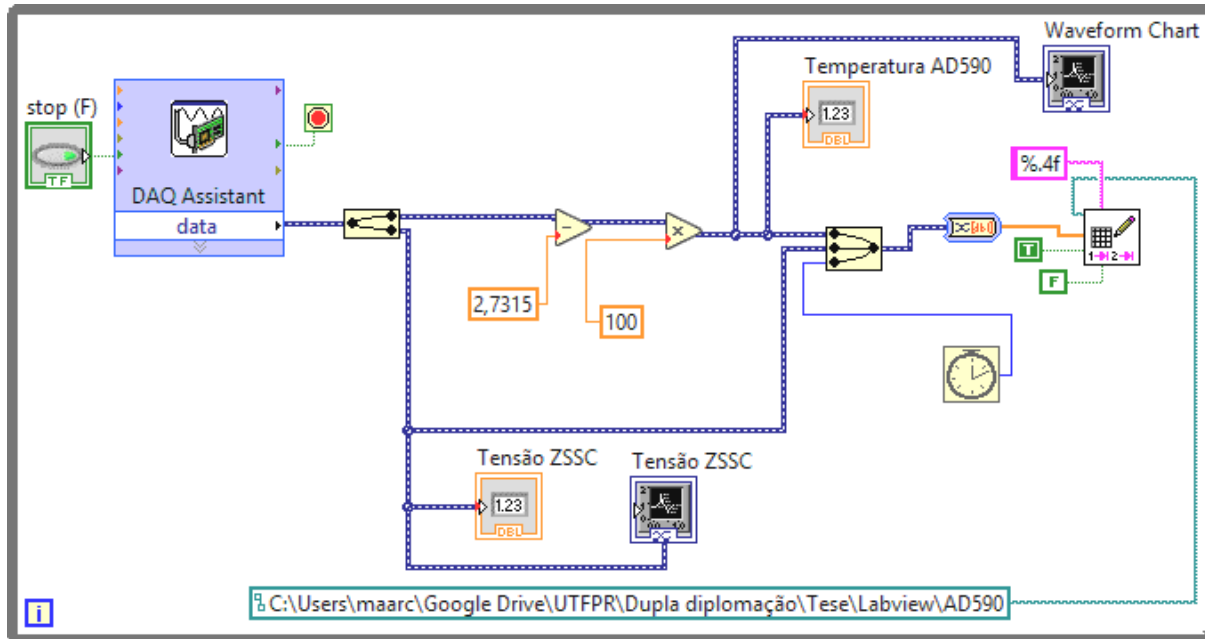


Figura 5.4: Diagrama de blocos em LabVIEW para condicionamento e gravação dos dados adquiridos.

Nesse VI além de retirar a tensão de *offset* do sinal, o mesmo também é multiplicado por um fator de 100, dessa forma temos a temperatura em uma escala de dezena, ou seja, a temperatura real. Outra função desenvolvida por esse VI também é a aplicação de um *timestamp* para cada dado adquirido.

Feito o devido tratamento do sinal do AD590, é necessário fazer a calibração da PT100 no software de configuração, para isso, a calibração foi feita em 2 pontos distintos de temperatura. O ponto P1 foi calibrado com a temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), que resultou em 16243 contagens do ADC e pode ser visto no Figura 5.5. Para a calibração do ponto P2, é necessário que a temperatura (ou qualquer sinal a ser calibrado) esteja no valor máximo de trabalho, para esse teste foi utilizado uma temperatura para calibração de  $110^{\circ}\text{C}$ , que é um valor apropriado para a injeção plástica, uma vez que a temperatura no molde é de aproximadamente  $70^{\circ}\text{C}$ . Para elevar a temperatura até esse valor, foi utilizado uma chapa de aquecimento para soldagem de componentes SMD, dessa forma, foi possível realizar o experimento de uma forma que ambos os sensores estivessem nas mesmas condição de operação.

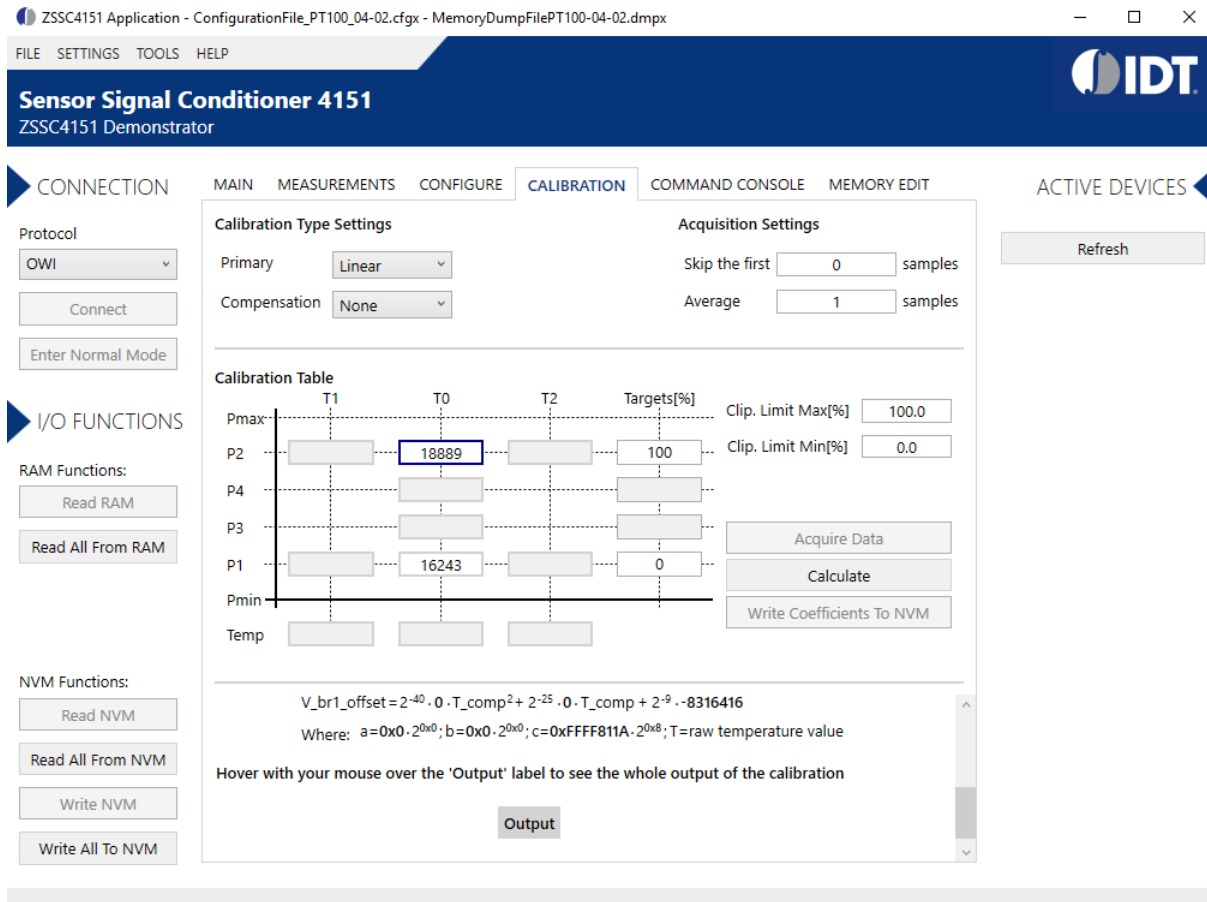


Figura 5.5: Calibração da PT100

A Figura 5.6 mostra a saída em tensão do ZSSC 4151 para uma variação de  $85^{\circ}C$  após a calibração. Ao analisarmos esse gráfico percebemos um claro comportamento linear na tensão da saída, o que era esperado, já que o ZSSC tem como função a linearização do sinal de entrada. Dessa forma, como temos um gráfico linear, podemos facilmente encontrar a equação da reta (Eq. 5.1) que modela esse comportamento:

$$V_{saida} = 0,0526T - 0.7822 \quad (5.1)$$

onde  $V_{saida}$  é a tensão de saída do ZSSC 4151 e  $T$  é a temperatura, que fora adquirida com o sensor AD590 e relacionada com a tensão de saída do ZSSC. Como nosso interesse é no valor da temperatura dependendo do valor da tensão e, nossa variável conhecida é a

tensão de saída, fazendo um algebrismo simples, podemos inferir o valor da temperatura para qualquer ponto dentro da faixa de calibração do ZSSC ( $25^{\circ}C$  a  $110^{\circ}C$ ) a partir da Equação 5.2.

$$T = \frac{V_{saida} + 0,7822}{0.0526} \quad (5.2)$$

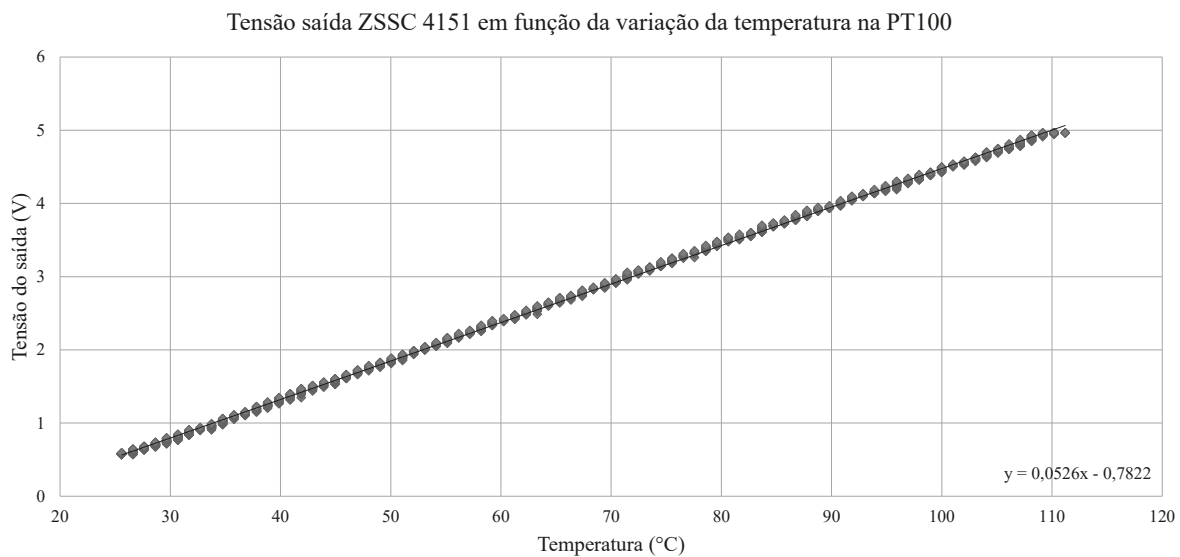


Figura 5.6: Saída de tensão do ZSSC amplificação do PT100

A Figura 5.7 apresenta um gráfico com a variação do tempo de amostragem do *timestamp* de acordo com os pontos de medida. O tempo total da amostragem foi de 243,221 segundos ou 4,053 minutos e a média entre os pontos de medida foi de 0,20001727 segundos.

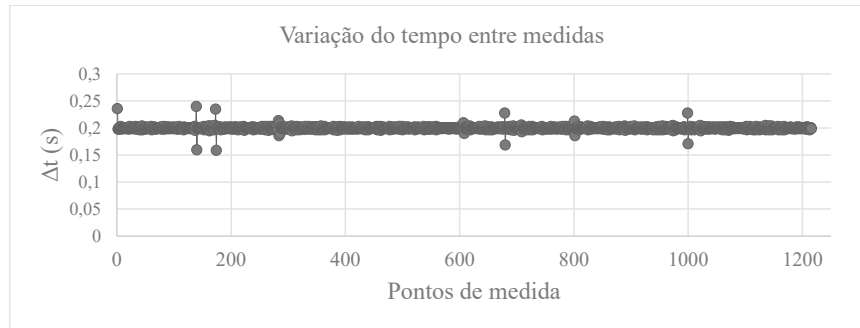


Figura 5.7: Variação temporal das medidas realizadas

A Figura 5.8 apresenta a variação da temperatura ao longo do tempo de acordo com as amostras. Verifica-se que algumas amostras estão fora da média, isso é devido ao ruído. Uma linha de tendência foi traçada para que tenhamos uma média do valor da variação, que foi aproximadamente  $0,7^{\circ}C$ .

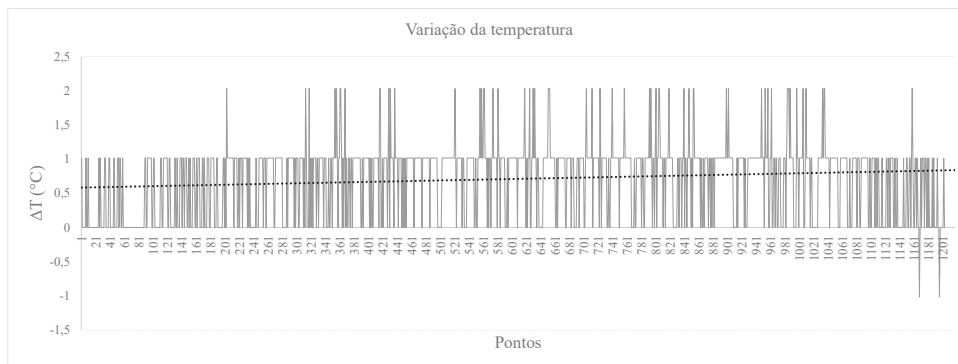


Figura 5.8: Variação da temperatura

Outra maneira de mensurar o valor do sinal medido é através da equação 4.2 que modela o ADC. Ao analisarmos essa equação, percebemos que para fazer as contagens do conversor, há obviamente, uma dependência da tensão de entrada lida nos terminais da ponte de *Wheatstone*. Dessa forma, podemos modelar a tensão de saída da ponte e obter uma equação de tensão de entrada  $V_{IN\_DIFF}$  dependente da resistência do sensor.

De acordo com a Figura 5.1 temos que:

$$V_{BR1P} = e_{AD} - e_{AB} \quad (5.3)$$

na qual,  $e_{AD}$  e  $e_{AB}$  não são nada mais do que um divisor de tensão e, dessa forma:

$$e_{AD} = \frac{R * E}{R + R} \quad (5.4)$$

$$e_{AB} = \frac{R_{ext}E}{R_{ext} + R} \quad (5.5)$$

podemos reduzir a equação 5.4 para:

$$e_{AD} = \frac{E}{2} \quad (5.6)$$

então, a Equação 5.3 torna-se:

$$V_{BR1P} = E \left( \frac{R + R_{ext}}{2(R_{ext} + R)} \right) \quad (5.7)$$

Portanto, substituindo a Equação 5.7 na Equação 4.2, obtemos:

$$R_{ext} = \frac{2^{15}(R * Gain + AdcRngShif) - 2 * Z_{ADC} * R}{2 * Z_{ADC} + 2^{15} * Gain} \quad (5.8)$$

Ao analisarmos a Equação 5.8, percebemos que há uma dependência de parâmetros fixos como o ganho (Gain), a resistência (R) de balanceamento da ponte de *Wheatstone* e o deslocamento do ADC (AdcRngShif), também há uma dependência do número de contagens da saída do ADC, o qual é variável de acordo com a tensão de entrada, dessa forma, com as contagens do ADC, é possível determinar a resistência do sensor da ponte ( $R_{ext}$ ).

Para isso, um teste foi executado com o auxílio de um PT100 de 3 fios, essa escolha foi feita pela possibilidade de aplicação em ponte. Sendo que, o objetivo desse trabalho é a aquisição e o condicionamento de sinais e, posteriormente esse sinal é disponibilizado de forma analógica, não foi desenvolvido um algoritmo para acesso da memória RAM, ou seja, as contagens da conversão do ADC devem ser adquiridas manualmente.

Para o teste, foi feita a medição de temperatura em dois pontos com temperatura

conhecida. Um ponto em  $24^{\circ}\text{C}$  e outro em  $36,5^{\circ}\text{C}$ . O valor das contagens do ADC foram obtidas com o auxílio do *Command Console* através dos comandos *OW\_280032E00* seguido de *OR\_28003* na qual, 2E é o comando para leitura da memória RAM e 00 é o endereço do registrador que contem a informação das contagens. A resposta do comando para  $24^{\circ}\text{C}$  foi de 4723 contagens, que aplicado na Equação 5.8 com um ganho de 3,15 e um deslocamento do ADC de 1/16 obtém-se uma resistência de  $110,15\Omega$ . Comparando esse valor com a tabela de valores de resistência do PT100 (Apêndice B), obtemos uma temperatura de  $26^{\circ}\text{C}$ . Para a temperatura de  $36,5^{\circ}\text{C}$  a resposta foi de 2966 contagens, o que dá uma resistência de  $113,79\Omega$ , comparando com a tabela da PT100, isso dá uma temperatura de aproximadamente  $36^{\circ}\text{C}$ . O erro presente é devido a algumas não idealidades do sistema de aquisição, como por exemplo, as resistências da ponte não são exatamente iguais e também, como foi utilizado um PT100 de 3 fios, há uma resistência de condução parasita da PT100 que é percebida pelo ZSSC4151.

Após esse testes e confirmado que o amplificador escolhido possui uma boa aquisição de sinal e que a saída modela um comportamento perfeitamente linear, foi feita a implementação com o sistema completo e com os outros casos de estudo. Na Figura 5.9 é apresentado a implementação em laboratório de um protótipo do sistema proposto. Na imagem, é possível analisar todas as etapas do sistema.

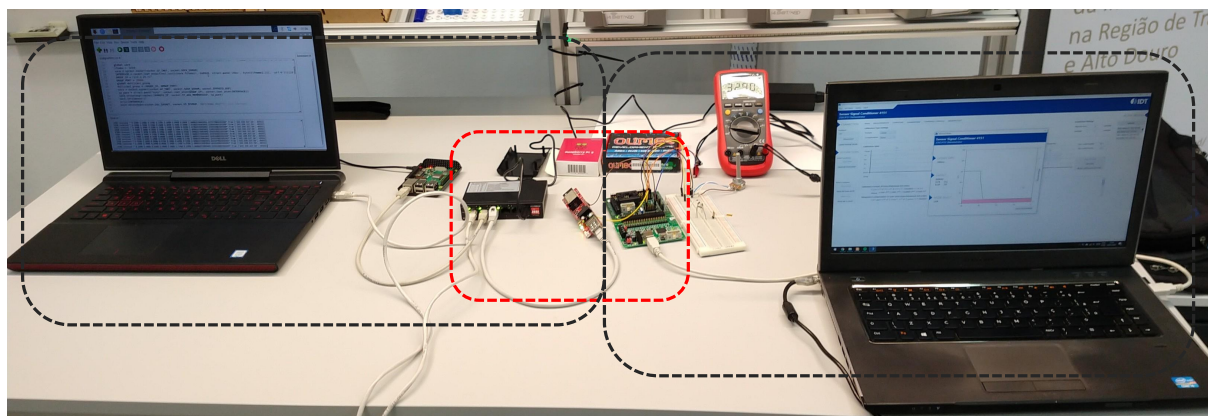


Figura 5.9: Sistema completo implementado em Laboratório

Destacado na direita da figura, está a etapa de aquisição de dados, objeto desse estudo,

pode-se observar o software de configuração e kit de testes conectado ao computador, este, operando no modo Normal Mode, ou seja, a saída do sinal é analógica. Ao centro da imagem, esta a segunda etapa, é essa etapa que faz a aquisição analógica do sinal provido pelo ZSSC 4151 e envia para a terceira etapa, que é o concentrador de dados e está destacada à esquerda da imagem.

# Capítulo 6

## Conclusões

Com a finalização desse trabalho, podemos concluir que o circuito integrado escolhido possui uma excelente aquisição do sinal, visto que sua saída é perfeitamente linear, podemos inferir um valor de qualquer ponto intermediário da reta de calibração entre o valor máximo e mínimo.

Foi possível também, efetuar a configuração de parâmetros essenciais do circuito integrado (como ganho, deslocamento do ADC, resolução) de maneira simplificada com a utilização da interface gráfica disponibilizada. Além de facilitar muito a configuração do amplificador, também é possível, para futuras aplicações *In loco*, desenvolver uma configuração simplificada para diferentes sensores resistivos e com diferentes características.

Outro ponto importante é a calibração do sinal de entrada pelo amplificador. Visto que em ambientes industriais não há muitos recursos, efetuar a calibração do sensor de maneira simples pode se tornar um problema. Dessa forma, o ZSSC 4151 é uma excelente opção para isso, já que possui na interface gráfica uma opção para efetuar a calibração de maneira visual e intuitiva.

Dessa forma, o objetivo principal do trabalho proposto foi concluído e um sistema de aquisição de dados reconfigurável foi concebido. Além disso, foram apresentadas duas possibilidades de conversão dos dados adquiridos, seja pela reta de saída da calibração ou pela equação para determinar a resistência do sensor da ponte.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desse módulo de condicionamento

de sinal para os sensores de baseados em nanotecnologia, dessa forma, observando seu comportamento e dinâmica para com o sistema DAQ proposto. Recomenda-se também o estudo de temporização de leitura da memória do RAM de saída do amplificador afim de utilizar as contagens do ADC para mensurar a resistência do sensor na ponte de *Wheatstone*.

# Bibliografia

- [1] F. Canal, J. G. Mateos e E. Carasusan, “Fast optical inspection of metal forming processes in car industry”, *2005 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 975 - 980, Barcelona, Spain, nov. de 2005.
- [2] S. S. Bobade e T. Y. Badgujar, “A state of art in a sheet metal stamping forming technology - an overview”, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education - IJARIIIE* , pp. 3760 - 3770, nov. de 2017.
- [3] E. Carasusain e F. Canal, “Determination of Strain Paths in Sheet Metal Stamped Pieces: A New Improved Method”, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 2592-2597, Taipei, Taiwan, nov. de 2007.
- [4] P. M. H. Armando Coelho Ferreira da Silva, *Ligas metélicas: Investigação e conservação*, 1st. Porto, Portugal: U.PORTO, 2008, ISBN: 978-972-8932-22-0.
- [5] V. Boljanovic, *Sheet metal forming processes and die design*. Industrial Press, New York: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2004, ISBN: 0-8311-3182-9.
- [6] C. Lim, *Why are metals malleable and ductile?*, <https://www.quora.com/Why-are-metals-malleable-and-ductile>, Fevereiro de 2018.
- [7] V. V. Shanbhag, B. F. Rolfe, N. Arunachalam e M. P. Pereira, “Investigating galling wear behaviour in sheet metal stamping using acoustic emissions”, *Wear*, vol. 414-415, pp. 31–42, nov. de 2018, ISSN: 00431648. DOI: 10.1016/j.wear.2018.07.003.

- [8] N. Mahayotsanun, S. Sah, J. Cao, M. Peshkin, R. X. Gao e C. t. Wang, “Tooling-integrated sensing systems for stamping process monitoring”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, n.º 7-8, pp. 634–644, jun. de 2009, ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.01.009.
- [9] A. M. Bassiuny, X. Li e R. Du, “Fault diagnosis of stamping process based on empirical mode decomposition and learning vector quantization”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, ISSN: 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.06.006.
- [10] J. Baqersad e K. Bharadwaj, “Strain expansion-reduction approach”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 101, pp. 156–167, fev. de 2018, ISSN: 10961216. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.08.023.
- [11] G. D. A. E. P. M. .-.-. GRANTE, *Apostila de Extensometria*, 1st. Santa Catarina, Brasil: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2004.
- [12] E. E. Crisman, J. S. Derov, G. J. Barchard, O. J. Gregory e W. B. Euler, “An optical device for measuring bending strain to 5000 microstrain and compatible with optical fiber installations”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 5, n.º 6, pp. 1321–1326, dez. de 2005, ISSN: 1530437X. DOI: 10.1109/JSEN.2005.858928.
- [13] F. Petersen, H. Kopp, D. Lange, K. Hannemann e M. Urlaub, *Measuring tectonic seafloor deformation and strain-build up with acoustic direct-path ranging*, fev. de 2019. DOI: 10.1016/j.jog.2019.01.002.
- [14] H. B. Motra, J. Hildebrand e A. Dimmig-Osburg, “Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 17, n.º 4, pp. 260–269, dez. de 2014, ISSN: 22150986. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.006.
- [15] J. Manojlović e P. Janković, “BRIDGE MEASURING CIRCUITS IN THE STRAIN GAUGE SENSOR CONFIGURATION”, rel. téc. 1, 2013, pp. 75–84.

- [16] M. Computing Corporation, “Data Acquisition: A reference for DAQ and analog digital Signal conditioning”, rel. téc., 2004.
- [17] “Strain Gauges and loads Cells”, *RS Components Data sheet*, mar. de 1996.
- [18] Z. industrie-elektronik, “Pt100-Temperature-Sensors Type TF101”, rel. téc., 2016, pp. 55–58.
- [19] J. Wu, *A Basic Guide to RTD Measurements*, SBAA275, Texas Instruments Incorporated, jun. de 2018. URL: [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [20] *Engineer’s Guide to Accurate Sensor Measurements*, National Instruments, 2016. URL: [www.ni.com](http://www.ni.com).
- [21] K. Hoffmann, “Appling the wheatstone bridge circuit”, vol. Unico, pp. 1–28,
- [22] *RTD Temperature Transmitter for 2-Wire, 4 to 20-mA Current Loop Systems*, TIDU182A, Texas Instruments Incorporated, dez. de 2014.
- [23] T. Brand, *Simple Realization of a Fully Integrated 4-Wire RTD Temperature Measurement System for High Precision Measurement Applications*, TA21555-8/19, Analog devices, 2019.
- [24] N. Instruments. (). O que é aquisição de dados?, URL: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>. (accessed: 14.11.2019).
- [25] *Principles of Data Acquisition and Conversion*, SBAA051A, Texas Instruments Incorporated, 1994. URL: [www.ti.com](http://www.ti.com).
- [26] T. Floyd, *Sistemas Digitais - Fundamentos e aplicações*, 9<sup>a</sup> ed. Bookman, 2007.
- [27] V. Systems. (). Signal Conditioning Demystified, URL: <https://volersystems.com/blogs/105-signal-conditioning-demystified/>. (accessed: 14.01.2020).
- [28] Keithley, *Data Acquisition and Control Handbook - A Guide to Hardware and Software for Computer-Based Measurement and Control*, 1<sup>a</sup> ed. Keithley Instruments.
- [29] C.-W. Hsu, A. G. Ulsoy e M. Y. Demeri, “Development of process control in sheet metal forming”, *Journal of materials Processing Tecnology*, 2002.

- [30] B. Zabala, X. Fernandez, J. C. Rodriguez, A. López-Ortega, E. Fuentes, R. Bayón, A. Igartua e F. Girot, “Mechanism-based wear models for plastic injection moulds”, *Wear*, vol. 440-441, dez. de 2019, ISSN: 00431648. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203105.
- [31] *ZSSC 4151C Functional Description –Configuration 1313*, Renesas Electronic Corporation, 2019.
- [32] *ZSSC41xx SSC Evaluation Board User Guide*, Integrated Device Technology, IDT, May 13, 2019. URL: <https://www.idt.com/us/en>.

## Apêndice A

Abstract apresentado no VI  
Encontro de Jovens Investigadores  
do Instituto Politécnico de Bragança

# Sistema de aquisição de dados de pressão e temperatura em superfícies finas: uma abordagem On-Surf

**Marcos Bussmann<sup>1,2</sup>; José Carvalho <sup>2,3\*</sup>, José Lima<sup>2,3</sup>, Pedro João Rodrigues<sup>2,3</sup>, Nelson Rodrigues<sup>2,3</sup>, Paulo Leitão<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal

<sup>3</sup>Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal

\*jac@ipb.pt

## Resumo

A estampagem metálica e injeção plástica são técnicas indispensáveis nos processos de fabricação atuais, de tal modo que as empresas precisam otimizar estes processos para ganharem uma vantagem competitiva. Neste sentido, o projeto On-Surf pretende desenvolver e aplicar processos de modificação de superfície que promovam soluções avançadas. O desenvolvimento deste tipo de superfícies com propriedades sensoriais requer uma arquitetura adaptável. Requer ainda o estudo de técnicas de condicionamento de sinal em sensores específicos e a caracterização e desenvolvimento de perfis que permitam a reconfiguração de módulo de condicionamento de sinal de acordo com os diversos sensores utilizados. A arquitetura proposta, para sistema de medida pontuais em superfícies finas, apresenta uma estrutura modular escalável que permite suportar um número variável de pontos de medida de acordo com a necessidades de instrumentação da superfície de trabalho. É composta por módulos de aquisição de sinal que se encontram ligados por rede ethernet a um concentrador Raspberry Pi, que recolhe a informação de cada modulo e disponibiliza-a numa base de dados remota. Cada modulo de aquisição é constituído por um ESP32\_POE e pode recolher até 8 pontos de medida de pressão e temperatura. Utiliza como modulo de condicionamento de sinal o ZSSC\_4151 e, através de um Analog Front End (AFE), permite a fácil reconfiguração das funções de condicionamento de sinal e adaptar o sistema a diferentes configurações do sensor. Os sensores utilizados são específicos para trabalhar com superfícies finas baseados em sistemas de filmes finos com propriedades sensoriais - Pressão e Temperatura.

**Palavras-chave:** On-Surf; modular; escalável; aquisição de dados; timestamping.

**Agradecimentos:** ON-SURF- Mobilizar Competências Tecnológicas em Engenharia de Superfícies Projeto n.º POCI-01-0247-FEDER-024521

# Pressure and temperature data acquisition system in thin surface: On-Surf Approach

**Marcos Bussmann<sup>1,2</sup>; José Carvalho <sup>2,3\*</sup>, José Lima<sup>2,3</sup>, Pedro João Rodrigues<sup>2,3</sup>, Nelson Rodrigues<sup>2,3</sup>, Paulo Leitão<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal

<sup>3</sup>Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, Bragança, Portugal

\*jac@ipb.pt

## Abstract

Metal stamping and plastic injection are indispensable techniques in today's manufacturing processes, so companies need to optimize these manufacturing processes to gain a competitive advantage. In this sense, the On-Surf project intends to develop and apply surface modification processes that promote advanced solutions. The technological development of this type of surface with sensory properties requires an architecture that adapts to this type of application. It also requires the study of signal conditioning techniques in specific sensors and the characterization and development of profiles that allow the reconfiguration of signal conditioning module according to the various sensors used. The proposed architecture for point measurement systems on thin surfaces features a scalable modular structure that allows it to support a varying number of measurement points according to the instrumentation needs of the work surface. It consists of signal acquisition modules that are connected by ethernet to a concentrator. The concentrator is implemented in a Raspberry Pi, which collects the process information and makes it available in a remote database. Each acquisition module consists of an ESP32\_POE and can collect up to eight pressure and temperature measurement points. It uses as signal conditioning module the ZSSC\_4151 Sensor Signal Conditioner (SSC). That consists of the analog front-end (AFE) and a digital signal processing unit that allows easy reconfiguration of signal conditioning functions and adapts the system to different sensor configurations. The sensors used are specific sensors for working with thin surfaces based on thin film systems with sensory properties - Pressure and Temperature.

**Keywords:** On-surf; modular; scalable; data acquisition; timestamping.

**Acknowledgments:** ON-SURF- Mobilizar Competências Tecnológicas em Engenharia de Superfícies Projeto n.º POCI-01-0247-FEDER-024521

## **Apêndice B**

### **Tabela de resistência do PT100**

Tabela Termoresistência PT-100

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C
-200.00	18.52										-200.00
-190.00	22.83	22.40	21.97	21.54	21.11	20.68	20.25	19.82	19.38	18.95	-190.00
-180.00	27.10	26.67	26.24	25.82	25.39	24.97	24.54	24.11	23.68	23.25	-180.00
-170.00	31.34	30.91	30.49	30.07	29.64	29.22	28.80	28.37	27.95	27.52	-170.00
-160.00	35.54	35.12	34.70	34.28	33.86	33.44	33.02	32.60	32.18	31.76	-160.00
-150.00	39.72	39.31	38.89	38.47	38.05	37.64	37.22	36.80	36.38	35.96	-150.00
-140.00	43.88	43.46	43.05	42.63	42.22	41.80	41.39	40.97	40.56	40.14	-140.00
-130.00	48.00	47.59	47.18	46.77	46.36	45.94	45.53	45.12	44.70	44.29	-130.00
-120.00	52.11	51.70	51.29	50.88	50.47	50.06	49.65	49.24	48.83	48.42	-120.00
-110.00	56.19	55.79	55.38	54.97	54.56	54.15	53.75	53.34	52.93	52.52	-110.00
-100.00	60.26	59.85	59.44	59.04	58.63	58.23	57.82	57.41	57.01	56.60	-100.00
-90.00	64.30	63.90	63.49	63.09	62.68	62.28	61.88	61.47	61.07	60.66	-90.00
-80.00	68.33	67.92	67.52	67.12	66.72	66.31	65.91	65.51	65.11	64.70	-80.00
-70.00	72.33	71.93	71.53	71.13	70.73	70.33	69.93	69.53	69.13	68.73	-70.00
-60.00	76.33	75.93	75.53	75.13	74.73	74.33	73.93	73.53	73.13	72.73	-60.00
-50.00	80.31	79.91	79.51	79.11	78.72	78.32	77.92	77.52	77.12	76.73	-50.00
-40.00	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	-40.00
-30.00	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	-30.00
-20.00	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	-20.00
-10.00	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	-10.00
0.00	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	0.00
0.00	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	0.00
10.00	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	10.00
20.00	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	20.00
30.00	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	30.00
40.00	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	40.00
50.00	119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.47	122.86	50.00
60.00	123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69	60.00
70.00	127.08	127.46	127.84	128.22	128.61	128.99	129.37	129.75	130.13	130.52	70.00
80.00	130.90	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.57	133.95	134.33	80.00
90.00	134.71	135.09	135.47	135.85	136.23	136.61	136.99	137.37	137.75	138.13	90.00
100.00	138.51	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.78	141.16	141.54	141.91	100.00
110.00	142.29	142.67	143.05	143.43	143.80	144.18	144.56	144.94	145.31	145.69	110.00
120.00	146.07	146.44	146.82	147.20	147.57	147.95	148.33	148.70	149.08	149.46	120.00
130.00	149.83	150.21	150.58	150.96	151.33	151.71	152.08	152.46	152.83	153.21	130.00
140.00	153.58	153.96	154.33	154.71	155.08	155.46	155.83	156.20	156.58	156.95	140.00
150.00	157.33	157.70	158.07	158.45	158.82	159.19	159.56	159.94	160.31	160.68	150.00
160.00	161.05	161.43	161.80	162.17	162.54	162.91	163.29	163.66	164.03	164.40	160.00
170.00	164.77	165.14	165.51	165.89	166.26	166.63	167.00	167.37	167.74	168.11	170.00
180.00	168.48	168.85	169.22	169.59	169.96	170.33	170.70	171.07	171.43	171.80	180.00
190.00	172.17	172.54	172.91	173.28	173.65	174.02	174.38	174.75	175.12	175.49	190.00
200.00	175.86	176.22	176.59	176.96	177.33	177.69	178.06	178.43	178.79	179.16	200.00
210.00	179.53	179.89	180.26	180.63	180.99	181.36	181.72	182.09	182.46	182.82	210.00
220.00	183.19	183.55	183.92	184.28	184.65	185.01	185.38	185.74	186.11	186.47	220.00
230.00	186.84	187.20	187.56	187.93	188.29	188.66	189.02	189.38	189.75	190.11	230.00
240.00	190.47	190.84	191.20	191.56	191.92	192.29	192.65	193.01	193.37	193.74	240.00
250.00	194.10	194.46	194.82	195.18	195.55	195.91	196.27	196.63	196.99	197.35	250.00
260.00	197.71	198.07	198.43	198.79	199.15	199.51	199.87	200.23	200.59	200.95	260.00
270.00	201.31	201.67	202.03	202.39	202.75	203.11	203.47	203.83	204.19	204.55	270.00
280.00	204.90	205.26	205.62	205.98	206.34	206.70	207.05	207.41	207.77	208.13	280.00
290.00	208.48	208.84	209.20	209.56	209.91	210.27	210.63	210.98	211.34	211.70	290.00
300.00	212.05	212.41	212.76	213.12	213.48	213.83	214.19	214.54	214.90	215.25	300.00
310.00	215.61	215.96	216.32	216.67	217.03	217.38	217.74	218.09	218.44	218.80	310.00
320.00	219.15	219.51	219.86	220.21	220.57	220.92	221.27	221.63	221.98	222.33	320.00

