



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO - CEC AU



PEDRO ALCÂNTARA COSTA

DESENVOLVIMENTO DE UMA BALANÇA DE BAIXO CUSTO COM COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA E INTERFACE IOT

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2023

PEDRO ALCÂNTARA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BALANÇA DE BAIXO CUSTO COM
COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA E INTERFACE IOT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C837d Costa, Pedro Alcantara.

Desenvolvimento de uma balança de baixo custo com compensação de temperatura e interface IoT. [manuscrito] / Pedro Alcantara Costa. - 2023.

52 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Alan Segundo.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Transdutores - Célula de carga. 2. Eletrônica - Instrumentação. 3. Internet das Coisas (IoT). 4. Aquisição de dados. I. Segundo, Alan. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Pedro Alcântara Costa

Desenvolvimento de uma Balança de Baixo Custo com Compensação de Temperatura e Interface IoT

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 12 de maio de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundos – Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Me. Thomás Vargas Barsante e Pinto – Convidado (Instituto Tecnológico Vale)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/05/2023, às 13:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0523954** e o código CRC **C4D5A8E5**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.006148/2023-40

SEI nº 0523954

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

*The most difficult thing is the decision to act,
the rest is merely tenacity. - Amelia Earhart.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte e apoio incondicional.

À Renata que não só acreditou em mim, mas também me deu todo o apoio possível para que eu pudesse alcançar meus sonhos. Você não tem ideia da força que me dá! Te amo muito mesmo!

À república Kamikaze, por me fazer parte da família. Em especial ao Abc, Rubinho Decote, Jamal, SEUFLOR, Inocente, Figurante, Dilminha, Donatello e Mc.Lovin.

E por último, mas não menos especial, ao orientador Alan Kardek, por me incentivar e auxiliar no desenvolvimento deste TCC.

“Matéria é a parte accidental.” (Oliver Lodge)

RESUMO

Este trabalho visa explorar o uso de extensômetros em aplicações IoT e fornecer uma visão abrangente dos desafios e soluções associadas ao seu uso. O projeto teve como foco o uso de extensômetros na medição de massa e uma forma de compensar os efeitos causados pelas variações de temperatura. Também foi examinado o papel dos sistemas de aquisição de dados na coleta e armazenamento de dados com aplicação do campo emergente da IoT, além dos protocolos e ferramentas usados nessas redes, incluindo MQTT, Node-RED e Mosquitto. Ao longo deste trabalho, foram desenvolvidos 4 sistemas de pesagem baseados em hardware de baixo custo e fácil acessibilidade. O protótipo com melhor relação custo benefício foi integrado a um sistema de aquisição de dados com conectividade IoT e, posteriormente, a um compensador térmico. Os resultados dos 4 sistemas apresentaram o coeficiente de determinação próximo a 1 e, o compensador térmico teve uma redução do erro de aproximadamente 0,43 %. Foi possível projetar um sistema de medição de dados de baixo custo, flexível, que fornece conectividade *wireless* e menos robusto que os dispositivos industriais de características operacionais semelhantes, mas com o valor de mercado 9 vezes inferior a um instrumento industrial de ponta.

Palavras-chaves: Célula de carga. Instrumentação eletrônica. Aquisição de dados. IoT.

ABSTRACT

This paper aims to explore the use of strain gauges in IoT applications and provide a comprehensive overview of the challenges and solutions associated with their use. The project focused on the use of strain gauges in mass measurement and a way to compensate for the effects caused by temperature variations. The role of data acquisition systems in collecting and storing data with application of the emerging field of IoT was also examined, as well as the protocols and tools used in these networks, including MQTT, Node-RED, and Mosquitto. Throughout this work, 4 low-cost and easily accessible hardware-based weighing systems were developed. The most cost-effective prototype was integrated with a data acquisition system with IoT connectivity and then with a thermal compensator. The results of the 4 systems presented the coefficient of determination close to 1 and, the thermal compensator had an error reduction of approximately 0.43 %. It was possible to design a low cost, flexible data measurement system that provides *wireless* connectivity and less robust than industrial devices of similar operational characteristics, but with the market value 9 times lower than a high-end industrial instrument.

Key-words: Load cell. Electronic instrumentation. Data acquisition. IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama representativo de um sistema de medição.	18
Figura 2 – Representação de uma ponte de Wheatstones completa.	21
Figura 3 – Representação dos efeitos sofridos por uma ponte de Wheatstones.	22
Figura 4 – Representação de um filtro passa baixa.	23
Figura 5 – Representação de um filtro passa alta.	23
Figura 6 – Representação de um filtro passagem de banda e rejeição de band.	23
Figura 7 – Representação do efeito de <i>aliasing</i>	25
Figura 8 – Representação de uma arquitetura basica de um protocolo MQTT.	26
Figura 9 – Dimensional da célula de carga modelo FGL de 5 kg	29
Figura 10 – Representação da célula de carga modelo FGL de 5 kg	30
Figura 11 – Dimensional da célula de carga de 50 kg.	31
Figura 12 – Representação da célula de carga de 50 kg	31
Figura 13 – Representação do módulo amplificador HX711.	32
Figura 14 – Representação do módulo amplificador ADS1230.	33
Figura 15 – Opções disponíveis na célula de carga ADS1230	33
Figura 16 – Representação do sensor de temperatura LM35.	34
Figura 17 – Representações das portas/configurações do NodeMCU ESP8266.	35
Figura 18 – Diagrama elétrico do protótipo A.	36
Figura 19 – Diagrama elétrico do protótipo B.	36
Figura 20 – Diagrama elétrico do protótipo C.	37
Figura 21 – Diagrama elétrico do protótipo D.	37
Figura 22 – Fluxograma do <i>looping</i> de conexão implementada no NodeMCU ESP8266.	39
Figura 23 – Arquitetura utilizada para realizar a conexão com o <i>broker</i>	39
Figura 24 – Resultado da célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo ADS1230.	41
Figura 25 – Resultado da célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo HX711.	42
Figura 26 – Resultado do conjunto de 4 células de carga de 50 kg junto ao módulo ADS1230.	42
Figura 27 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.	43
Figura 28 – Fluxo de programação visual produzido no Node-RED.	45
Figura 29 – Resultado da interface gráfica produzida no Node-RED.	45
Figura 30 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.	46
Figura 31 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.	46
Figura 32 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.	47
Figura 33 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.	47
Figura 34 – Protótipo posicionado dentro da câmara térmica.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação da célula de carga modelo de FGL de 5 kg.	30
Tabela 2 – Especificação da célula de carga de 50 kg	31
Tabela 3 – Especificação do conversor HX711	32
Tabela 4 – Especificação do conversor ADS1230	33
Tabela 5 – Especificação do sensor de temperatura LM35	34
Tabela 6 – Especificação do NodeMCU ESP8266	35
Tabela 7 – Tabela de preços dos componentes adquiridos.	44
Tabela 8 – Resultado do custo de cada protótipo.	44
Tabela 9 – Resultado referente à melhoria provocada pelo compensador de temperatura.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AP	<i>Access Point</i>
Bit	<i>Binary digit</i>
DAQ	<i>Data Acquisition System</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
STA	<i>Station</i>
SSL	<i>Secure Socket Layer</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
VDC	<i>Voltage Direct Current</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Delta
Ω	Ohm
$M\Omega$	Megaohm
μA	Microampère
kg	Kilograma
g	Grama
mV	Milivolts
V	Volts
$^{\circ}C$	Graus Celsius
k	Graus Kelvin
mm	Milimetro
Hz	Hertz
R	Resistência elétrica
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	17
1.1.2	<i>Objetivo específicos</i>	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Sistema de Medição	18
2.1.1	<i>Transdutores</i>	18
2.1.1.1	Célula de carga	19
2.1.1.2	<i>Strain Gauge</i>	19
2.1.1.3	Efeitos térmicos em <i>Strain Gauges</i>	20
2.1.1.4	Ponte de <i>Wheatstone</i>	20
2.1.2	<i>Condicionamento de sinais</i>	22
2.1.2.1	Filtros eletrônicos	22
2.1.2.2	Conversor analógico-digital	24
2.1.3	<i>Mostrador e/ou Registrador</i>	25
2.2	Internet das Coisas	25
2.2.1	<i>MQTT</i>	26
2.2.2	<i>Mosquitto</i>	27
2.2.3	<i>Node-RED</i>	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Células de carga 5 kg	29
3.2	Células de carga 50 kg	30
3.3	Módulo HX711	31
3.4	Módulo ADS1230	32
3.5	Sensor de temperatura LM35	34
3.6	ESP8266 NodeMCU 1.0	34
3.7	Metodologia	35
3.7.1	<i>Desenvolvimento das balanças e comparação</i>	35
3.7.2	<i>Aplicação dos conceitos de conectividade IoT no protótipo</i>	38
3.7.3	<i>Compensador de térmico</i>	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	Desenvolvimento das balanças e comparação	41
4.2	Aplicação dos conceitos de conectividade e IoT no protótipo	45

4.3	Compensador de térmico	46
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A coleta, análise e interpretação de dados desempenham um papel vital no sucesso de inúmeros projetos industriais e de pesquisa. A capacidade de monitorar e medir parâmetros físicos com precisão é essencial em muitos campos, incluindo ciência dos materiais, engenharia estrutural e monitoramento ambiental. Nesse cenário, os extensômetros, ou *Strain gauges*, destacam-se como um dos sensores mais utilizados para medir força, pressão e deformação em diversas aplicações, com a vantagem de serem capazes de detectar pequenas mudanças na deformação (LEE et al., 2016).

Uma das maiores barreiras ligadas ao uso de extensômetros é sua suscetibilidade a mudanças de temperatura, que podem levar a erros de medição. Todavia, várias técnicas de compensação térmica podem ser usadas para superar esse problema, minimizando os efeitos das mudanças de temperatura no processo de medição. Ferramentas, como transdutores de temperatura e sistemas ativos de controle de temperatura, podem ser empregadas para combater este fenômeno.

Estas mesmas mudanças de temperatura interferem no funcionamento ideal de uma balança, que prevê que a relação entre a carga aplicada e o resultado seja exata (BERG, 1996). Uma alternativa para contornar este problema é o uso de transdutores de temperatura, que conseguem detectar variações térmicas e fornecer informações para compensar os erros causados por estas alterações (LIU et al., 2011).

Os dados gerados pelos extensômetros e outros sensores podem ser coletados e registrados por sistemas de aquisição de dados (ou *Data Acquisition Systems* - DAQs), um componente essencial no processo de medição. Os DAQs podem ser projetados para lidar com diferentes tipos de sinais, taxas de amostragem e resolução de dados.

A Internet das Coisas (ou *Internet of Things* - IoT) é um conceito que ganhou considerável atenção nos últimos anos. A IoT utiliza os dispositivos, como sensores, atuadores e controladores para formar uma rede que os conecta entre si e com a internet, permitindo que dados descentralizados sejam compartilhados, aumentando a robustez do sistema sem necessitar de uma estrutura mais cara.

O MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) é um protocolo que pode ser utilizado para facilitar a comunicação entre os dispositivos nas redes IoT. Por ser leve e eficiente, torna-se a escolha ideal para dispositivos com recursos limitados, como sensores (KIM et al., 2019).

O Mosquitto é uma opção de broker MQTT de código aberto, que pode ser utilizado para gerenciar e rotear mensagens MQTT em redes IoT. Já o Node-RED é uma ferramenta de programação visual de código aberto, frequentemente utilizada em aplicações IoT. Ela permite que os usuários criem fluxos de trabalho e aplicativos que se conectam a vários dispositivos e

serviços. Esta ferramenta possibilita o gerenciamento de fluxos de dados entre vários sensores, sistemas de aquisição de dados e outros dispositivos (MACHESO et al., 2021).

Apesar das melhorias geradas pelo contínuo desenvolvimento das tecnologias e diminuição de custos, ainda é necessária uma quantia significativa de capital para adquirir um sistema de medição completo aplicado ao conceito de IoT. Diante desse cenário, os pequenos empreendedores encontram dificuldades para adquirir um sistema de medição, baseado em IoT, adequado às suas necessidades, uma vez que um sistema personalizado, que se ajuste às necessidades do cliente, é extremamente caro (BI; XU; WANG, 2014).

Algumas possíveis aplicações para uso de extensômetros por pequenas empresas envolvem o monitoramento da pressão em tubulações ou o torque aplicado a um eixo rotativo; a medição de força em pequenos equipamentos, como ferramentas manuais ou máquinas em pequena escala, nas quais o uso de sensores de força industrial pode ser muito caro ou volumoso; ou até mesmo na otimização e validação de protótipos, visando o planejamento de soluções industriais mais custosas (HOFFMANN et al., 1989).

Geralmente, os extensômetros podem ser uma solução econômica e flexível para pequenas empresas em vários setores, fornecendo soluções de medição personalizadas e eficientes que podem não ser viáveis utilizando soluções industriais de ponta.

O foco deste trabalho é o uso de extensômetros na medição de massa e formas de compensar os efeitos causados pelas mudanças de temperatura nestes dispositivos. Para cobrir a necessidade de coletar e armazenar os dados gerados pelos extensômetros, é examinado o papel dos DAQs. Como uma possível forma de transmitir os dados adquiridos pelo sistema de medição, optou-se avaliar o campo emergente da IoT e os protocolos e ferramentas usados nestas redes, incluindo MQTT, Node-RED e Mosquitto. Por meio dessa exploração, é possível fornecer uma visão abrangente dos desafios e soluções associados ao uso de extensômetros e outros sensores em aplicações de IoT.

Buscou-se aplicar e avaliar as tecnologias e conceitos supracitados em diversas combinações e ambientes, com o intuito de projetar um sistema de medição de dados de baixo custo, capaz de fornecer a conectividade que o mundo de hoje exige e concorrer com dispositivos industriais com capacidades operacionais semelhantes. Com esta abordagem, as pequenas empresas podem beneficiar do poder da aquisição de dados e da IoT sem os custos proibitivos das soluções industriais tradicionais.

Este trabalho pretende dar continuidade ao sistema de pesagem desenvolvido por Pinto e Segundo (2019), de baixo custo, por meio de uma célula de carga do tipo *single point*. O autor gerou e aplicou um modelo de compensação de temperatura via software ao sistema. Nesse sentido, a principal contribuição deste trabalho é a implementação do conceito IoT ao sistema, facilitando a integração de projetos por meio de uma estrutura simplificada e de fácil acesso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma balança de baixo custo com compensação de temperatura e interface IoT.

1.1.2 Objetivo específicos

- Avaliar as possíveis combinações que podem ser desenvolvidas a partir dos equipamentos adquiridos.
- Adicionar um sensor de temperatura para realizar a compensação térmica e integrar essa compensação via software.
- Realizar a integração do sistema idealizado junto a um sistema de aquisição de dados online, por meio de um modulo Wi-Fi.
- Realizar comparação entre o protótipo desenvolvido ao longo deste trabalho e equipamentos industriais comercializados na atualidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho, como a teoria de um sistema de medição e princípios básicos sobre internet das coisas.

2.1 Sistema de Medição

A aquisição de dados é o processo de mensurar fenômenos físicos, como temperatura, voltagem, corrente elétrica, deformação e pressão, massa, vibração, entre outros, e registrá-los de alguma maneira. Diferentemente dos métodos arcaicos de armazenar dados, como gráficos em papel, a aquisição de dados se baseia na conversão de sinais analógicos para o domínio digital e, posteriormente historiar esses dados em mídia digital, como uma unidade de disco rígido.

O principal objetivo desse sistema é adquirir, transcrever a grandeza física a ser medida em um sinal fácil de interpretar, e historiar os dados. Entretanto, ele também deve ser capaz de analisar graficamente suas variáveis armazenadas e, em alguns casos, também possuem alguma funcionalidade com capacidade analítica incorporada. Segundo [Jr. e Sousa \(2008\)](#), os sistemas de medição são formados a partir de quatro elementos fundamentais; sensores/transdutores, condicionadores de sinal e um computador capaz de realizar a gravação e análise dos dados, conforme é possível visualizar no diagrama esquemático representado pela Figura 1.

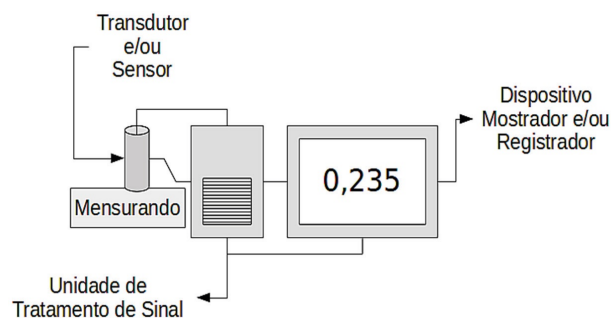


Figura 1 – Diagrama representativo de um sistema de medição.

Fonte: Adaptado de [Jr. e Sousa \(2008\)](#)

2.1.1 Transdutores

Os sensores chamados transdutores são os responsáveis por transformar um elemento físico, como a pressão, em um sinal eletrônico, passível de ser dimensionado. Neste trabalho o principal sensor estudado é uma célula de carga e suas tecnologias referentes.

2.1.1.1 Célula de carga

Normalmente, uma célula de carga corresponde a um transdutor que converte uma força física em um sinal elétrico. Esse tipo de instrumentação pode ser encontrado em uma infinidade de aparelhos e em praticamente todas as áreas do conhecimento.

“É surpreendente quantas aplicações requerem medições de peso.” ...” O peso desempenha um papel essencial na indústria porque bens de consumo são vendidos principalmente por peso” – [Schmidt \(2023\)](#)

Há inúmeras variações da tecnologia de célula de carga, podendo ser encontradas em versões pneumáticas, hidráulicas e eletroeletrônicas, que por consumirem pouca energia acabam sendo ideais para aplicações remotas.

Neste trabalho, a célula de carga analisada é baseada em *Strain Gauges* ou extensômetros. Atualmente, esse tipo de instrumento de medição é o mais utilizado ao redor do mundo ([PAČNIK; NOVAK, 2010](#)). Sua versatilidade, baixo custo, ampla faixa de medição e alta precisão são algumas das qualidades que fizeram essa ferramenta ser tão disseminada em seu ramo. Soma-se a isso, alguns modelos como este empregam um sensor de temperatura para inserir o parâmetro nos cálculos do pós-processamento, tendo em vista que esses objetos de medição são afetados pelas condições ambiente ([LIU et al., 2011](#)).

2.1.1.2 *Strain Gauge*

As células de carga baseadas em *Strain Gauges* consistem em componentes mecânicos nos quais os extensômetros são fixados. Este elemento mecânico, normalmente produzido a partir de uma liga metálica, é projetado para possuir enorme resistência, mas também necessita possuir pequeno grau de elasticidade. Ao aplicar carga sobre esse elemento metálico, o mesmo deve sofrer uma pequena deformação elástica e retornar a seu formato inicial após remoção da força implicada sobre ele. Essa microdeformação elástica é mensurada com o auxílio de uma *Strain Gauges*, viabilizando assim a estimativa da força imposta sobre a célula de carga.

O princípio de funcionamento dos *Strain Gauges* consiste na variação da resistência decorrente da deformação elástica ([LIAO; LO, 2014](#)). Normalmente, tais sensores são constituídos por condutores elétricos dispostos em um padrão de grade (ideal para maximizar os efeitos da deformação do fio) e fixados em um filme isolante. Ao tensionar o filme, ele e seu condutor se tornam mais longos e mais finos, aumentando assim a resistência do condutor. O inverso ocorre quando o filme é contraído, ambos ficam mais curtos e mais grossos, diminuindo assim a resistência elétrica no fio. Tendo isso em vista, uma deformação no sensor prove uma variação linear na resistência elétrica, o que, por conseguinte, gera uma variação na corrente elétrica passível de ser detectada com o auxílio de um amplificador.

Os *Strain Gauges* são fixados em um corpo de prova para detectar qualquer deformação imposta sobre o corpo. Normalmente, os *Strain Gauges* são fixados em grupos de quatro sensores com as malhas de medição alinhadas conforme a força aplicada, formando assim a configuração de ponte completa ou circuito de ponte de *Wheastone* (Figura 2).

2.1.1.3 Efeitos térmicos em *Strain Gauges*

Qualquer material exposto a uma variação de temperatura acaba sofrendo modificações em suas propriedades físicas, expandindo em resposta ao calor e contraindo ao frio. Tal fenômeno, também se aplica aos *Strain Gauges*, variando suas dimensões físicas e por consequência suas propriedades elétricas, mais especificamente a resistência dos fios. Logo, para oferecer precisão adequada em uma vasta faixa de temperatura é necessária a utilização de um compensador térmico. Este pode ser integrado ao hardware do sensor, com a adição de resistência que varia com a temperatura de forma inversa aos extensômetros, ou em software, com adição da temperatura nas equações afim determinar a carga em um componente.

O efeito do coeficiente térmico pode ser descrito de acordo com a equação 2.1, na qual ΔT é a variação de temperatura, ΔR é a variação da resistência elétrica e α é a corresponde ao coeficiente térmico do sistema.

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Se isolarmos a variável α , obtemos a equação 2.2.

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (2.2)$$

Na qual R ou Rf corresponde ao último valor amostrado no intervalo ΔR .

2.1.1.4 Ponte de *Wheatstone*

A ponte de *Wheatstone* foi inventada por Samuel Hunter Christie e disseminada pelo cientista Charles Wheatstones, responsável também por inúmeras contribuições para o estudo de circuitos elétricos. Tal ponte, é utilizada em diversos equipamentos de medição, inclusive em células de carga. A ponte de *Wheatstone* pode ser utilizada de diversas maneiras para conseguir determinar uma resistência elétrica, como utilizando uma resistência conhecida para comparação ou determinar a alteração relativa de uma resistência. O segundo método é amplamente utilizado junto aos sensores de *Strain Gauges*, permitindo que pequenas mudanças na resistência do extensômetros possam ser medidas com altíssima precisão (BOYES, 2009).

Uma ponte de *Wheatstone* é composta por quatro elementos resistivos, distribuídos em um padrão semelhante a um losango, podendo ser montada em três configurações: um quarto de

ponte, meia ponte e ponte completa. Neste trabalho, daremos foco à ponte completa, na qual todos os elementos resistivos são ativos (Figura 2).

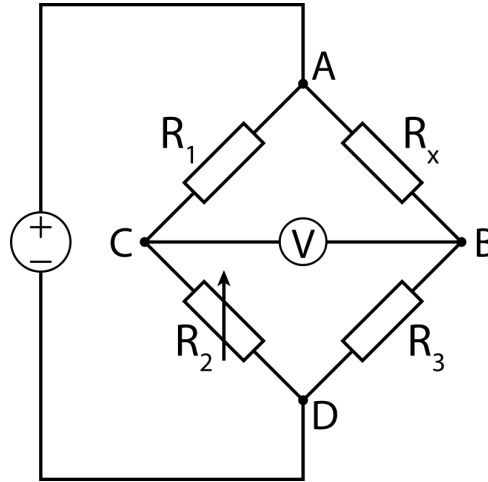


Figura 2 – Representação de uma ponte de Wheatstones completa.

Caso uma tensão V_S seja utilizada para alimentar o circuito nos pontos A e D, essa tensão é distribuída entre os dois ramos $R_1 \rightarrow R_2$ e $R_x \rightarrow R_3$, formando assim um divisor de tensão entre os dois ramos. A diferença de tensão entre o ponto C e B pode ser calculada com o auxílio da equação 2.3.

$$V_0 = V_S \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_3 + R_x} \right) \quad (2.3)$$

Vale ressaltar que a resistência de cada *Strain Gauges* varia em ΔR ao ser submetido a uma deformação, resultando na seguinte equação 2.4.

$$V_0 = V_S \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_x + \Delta R_x}{R_3 + \Delta R_3 + R_x + \Delta R_x} \right) \quad (2.4)$$

De acordo com Hoffmann et al. (1989), caso suponhamos que R_1 e R_2 são iguais e R_3 é igual a R_x , realizando algumas simplificações chegamos na seguinte equação 2.5.

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_x}{R_x} \right) \quad (2.5)$$

Substituindo a equação 2.6 na equação 2.5, encontramos a equação 2.7, no qual k é o fator do *Strain Gauges* e ε é a tensão efetiva no ponto de medição.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (2.6)$$

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.7)$$

Vale ressaltar que, dependendo da orientação física dos *Strain Gauges* há influência na equação de diferentes formas (Hoffmann et al. (1989)). Neste trabalho em questão podemos assumir que a equação resultante é a equação 2.8.

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{V_0}{V_S} \quad (2.8)$$

Na qual metade dos extensômetros sofre contração e a outra metade sofre expansão, como representado na Figura 3.

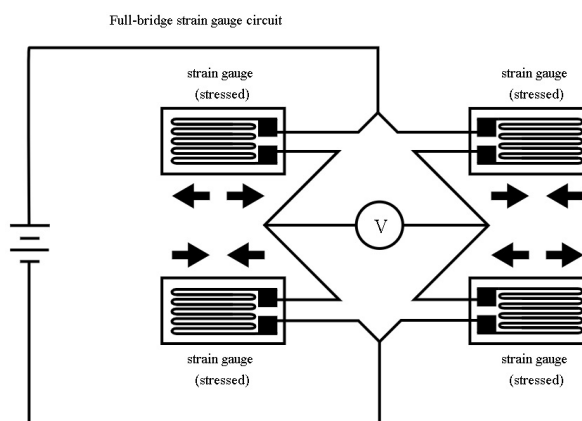


Figura 3 – Representação dos efeitos sofridos por uma ponte de Wheatstones.

2.1.2 Condicionamento de sinais

O condicionamento de sinais é empregado em aplicações de sensoriamento, nas quais é necessário preparar os sinais emitidos pelos sensores para serem abstraídos por uma máquina. Os condicionadores de sinais devem realizar a normalização elementar da saída do sensor com o intuito de assegurar a linearidade e fidelidade aos fenômenos observados, e realizar a digitalização dos sinais.

2.1.2.1 Filtros eletrônicos

Qualquer tipo de sensor que tenta medir um fenômeno externo pode ser afetado por interferências elétricas, magnéticas ou ruídos. Tais distúrbios podem ser causados por diversos fatores, como campo magnéticos e diferença de potencial entre o sistema medição e o corpo de teste. Assim sendo, é fundamental a utilização de filtros em hardware ou em software para minimizar as interferências no sinal e melhorar a resolução do sinal como um todo.

Os filtros de hardware podem ser definidos em basicamente três segmentos: filtro passa-baixa (Figura 4), o qual impede a passagem de sinais superiores a uma determinada frequência; passa-alta (Figura 5), que permite a passagem de sinais acima de uma determinada frequência; e passagem de banda e rejeição de banda (Figura 6), que respectivamente, permitem ou interrompem a passagem de frequências entre duas faixas.

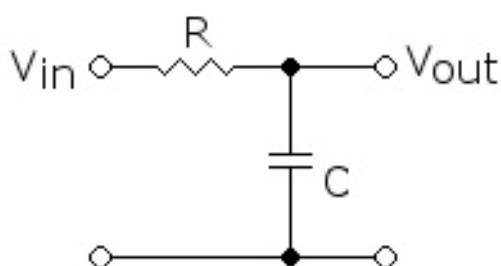


Figura 4 – Representação de um filtro passa baixa.

Fonte: [Cavalcante, Tavoraro e Molisani \(2011\)](#)

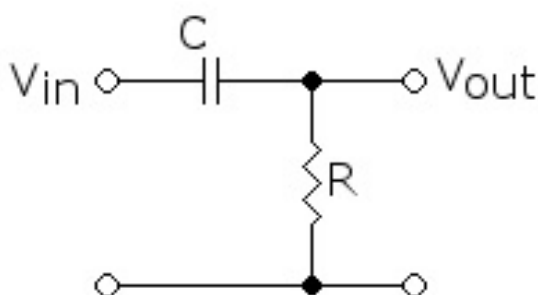


Figura 5 – Representação de um filtro passa alta.

Fonte: [Cavalcante, Tavoraro e Molisani \(2011\)](#)

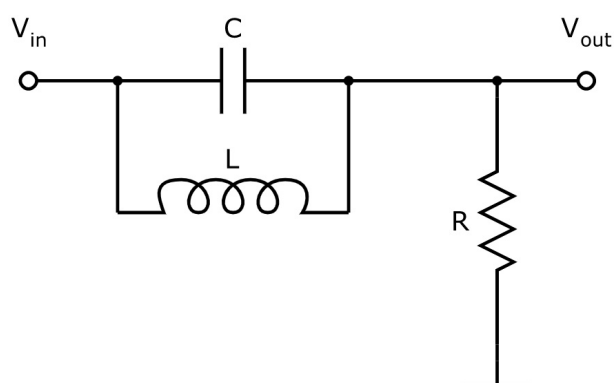


Figura 6 – Representação de um filtro passagem de banda e rejeição de band.

Fonte: [Wikipedia \(2021\)](#)

Também é possível utilizar filtros em software no pós-processamento para tornar a resposta de um sinal mais suave, e também aplicar em dados já coletados. Um dos filtros mais comuns e de fácil aplicação é o filtro de média móvel, representado pela equação 2.9. Ele é ideal para ser empregado em situações em que os ruídos apresentam um comportamento aleatório de alta amplitude e de curta duração, mas oferece um baixo desempenho quando é necessário separar bandas de frequência de um sinal ([LIMITED, 2020](#)).

$$y[i] = \frac{1}{k} \sum_{i=n-k+1}^n x_i \quad (2.9)$$

Em que:

- y = Média móvel;
- n = Número de períodos na média móvel;
- x = Valor dos dados;
- k = Intervalo de amostras móvel;

2.1.2.2 Conversor analógico-digital

Os conversores analógico-digitais (ou *Analog-to-Digital Converteres* - ADCs) têm o intuito de abstrair uma fonte de entrada analógica em uma série de valores digitais, respectivos a leitura do sensor, para que esses possam ser exibidos, armazenados e quantificados, posteriormente, pelo mostrador/sistemas de aquisição de dados.

Atualmente, existe uma infinidade de ADCs disponíveis no mercado, de diversos preços e funcionalidades. As principais características que devem ser avaliadas ao selecionar um conversor são: quantidade de canal, resolução e a taxa de amostragem.

A quantidade de canais de um conversor pode ser simplificada em dois grupos: multiplexados e canal único. Os conversores multiplexados possuem o benefício de converter vários sinais do domínio analógico para o digital simultaneamente, mas devido ao compartilhamento de um recurso comum para várias leituras, a taxa de amostragem acaba ficando devassada. Já o conversor de canal único tem uma limitação na quantidade de sinais que consegue abstrair, mas proporciona uma taxa de amostragem mais rápida.

Os ADCs podem ser encontrados em, principalmente, três resoluções: 8, 16 e 24 bits. Os conversores de 8 bits, com uma resolução de uma parte em 256, consistem em um sistema antigo e, atualmente, pouco utilizado. Os sistemas de 24 bits, com uma resolução de uma parte em 16.777.216, já são considerados como padrão entre a maioria dos sistemas de aquisição de dados. Já os conversores de 16 bits, com uma resolução de uma parte em 65.536, são considerados de resolução mínima para sinais em geral, mas estão caindo em desuso devido à disponibilidade de conversores com maiores resoluções (SMITH, 2020).

A taxa na qual os sinais são convertidos é chamada de taxa de amostragem. De acordo com o teorema de Nyquist, a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, duas vezes superior à frequência máxima alcançada pelo sinal analógico, para que a série digital amostrada apresente uma fidelidade referente ao evento analógico. Caso a frequência de amostragem seja inferior à frequência de Nyquist é possível observar o efeito *aliasing* (Figura 7), em que um sinal falso, representado pela linha em azul, de menor frequência é registrado devido o baixo número de

amostras mensuradas do sinal original, representado pela linha vermelha, de frequência superior (DOEBELIN, 1998).

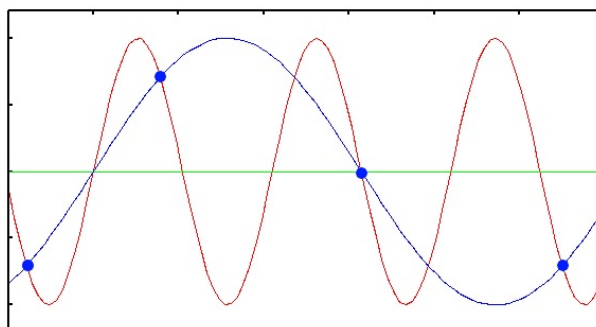


Figura 7 – Representação do efeito de *aliasing*.

Fonte: [Imaging](#) (n.d.)

2.1.3 Mostrador e/ou Registrador

A interface homem máquina na qual é disponibilizada o sinal digital, pode ser composta por um sistema mais simples, em que é possível apenas a visualização de dados em tempo real; ou pode ser aparatada com inúmeras ferramentas para auxiliar na análise de dados, armazenamento e transferência dados em diferentes formatos para diversos clientes.

A funcionalidade mais crítica de todo sistema de aquisição de dados é a capacidade de disponibilizar dados em tempo real, simultaneamente ao armazenamento de dados. Soma-se a isso, os inúmeros recursos dedicados para auxiliar na análise gráfica, como a aplicação de fórmula, filtragem, estatística, análise no domínio do tempo e frequência são características que endossam a funcionalidade da feramente como um todo.

Os sistemas de aquisição de dados da atualidade, geralmente são aplicados juntos a um historiador capaz de armazenar os dados amostrados em um banco de dados e, posteriormente, quando necessário, disponibilizar os dados armazenados para futuras consultas e análises.

Outra funcionalidade que é fundamental para o sistema de aquisição de dados é a capacidade de exportar dados para softwares de terceiros, em uma ampla variedade de formatos, podendo ser uma comunicação dinâmica ou passiva.

2.2 Internet das Coisas

A internet das coisas retrata um complexo de objetos físicos aparatados com sensores e outras tecnologias, destinadas a estabelecer a comunicação entre outros dispositivos e sistemas pela internet. A aplicação da tecnologia da IoT no meio industrial, principalmente nos campos de sensoriamento e controle e conectividade, são amplamente utilizadas para gerar *insights* visibilidade e fornecer uma análise preditiva alimentada por inteligências artificiais. A transfor-

mação massiva na indústria de manufatura, impulsionada pela IoT ficou conhecida como quarta revolução industrial ou indústria 4.0.

A indústria 4.0 é formada por um conglomerado de conceitos que, dentre eles, ganham destaque dois conceitos fundamentais que abordam a utilização da internet das coisas, a fábrica inteligente e o sistema cyber-físico.

As fábricas inteligentes são formadas por manufaturas com uma vasta utilização de sensores, atuadores e sistemas autônomos. Essas fábricas também devem ser automatizadas por uma rede de comunicação máquina a máquina com controle sem fio para receberem tal classificação. Já o conceito de sistemas cyber-físicos, surge no momento em que as representações física e digital não se diferenciam de forma clara nos níveis de produção e produto (LASI et al., 2014).

As ferramentas utilizadas para aplicar o conceito de internet das coisas neste trabalho foram: o protocolo de comunicação MQTT, o *broker* Eclipse Mosquitto e a API (Application Programming Interface) Node-RED.

2.2.1 MQTT

O MQTT (*“Message Queuing Telemetry Transport”*) é um dos protocolos dominantes no mercado de internet das coisas devido a comunicação com baixo consumo de banda, baixo consumo de memória e baixa necessidade processamento (Neri (2019)). Tal protocolo, utiliza a comunicação TCP/IP para estabelecer uma comunicação máquina a máquina, capaz de transportar grande volume de dados e suportar vários níveis de criticidade de serviço.

O sistema MQTT possui dois agentes fundamentais para efetuar a comunicação por mensagens: o cliente, encarregado por fazer postagens ou *“Publish”* e requisições ou *“Subscribe”*; e o *broker*, encarregado de realizar a administração dos dados que serão recebidos e encaminhados por seus devidos clientes (Mishra e Kertesz (2020)). A Figura 8 ilustra a arquitetura de um protocolo MQTT.

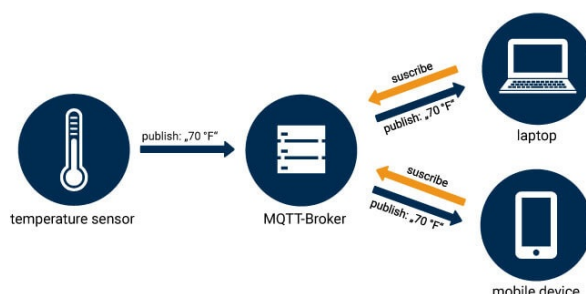


Figura 8 – Representação de uma arquitetura básica de um protocolo MQTT.

Fonte: Tomov (2021)

Na Figura 8 é possível ver o MQTT-Broker, o servidor intermediário da comunicação. Nessa configuração todos os dados são armazenados e processados nesse ator principal. Cada

informação é registrada em um tópico diferente, e para acessar essa informação basta solicitar os dados armazenados em seu respectivo tópico. Vale ressaltar, que é possível criar uma arquitetura com mais de um *broker*, na qual os dados coletados serão compartilhados entre eles de acordo com o tópico requisitado por cada cliente.

Os clientes MQTT podem executar dois comandos: “*Publish*” e “*Subscribe*”. Caso o cliente realize uma postagem, o mesmo informa ao *broker* em qual tópico a informação deve ser armazenada e seu conteúdo. A partir disso, caso um cliente deseje requisitar uma informação, ele deve informar ao *broker* de qual tópico é a informação a ser recebida e registrada, e cabe ao *broker*, a partir deste momento, sempre transmitir as informações desse tópico para todos os clientes inscritos naquele tópico. Um cliente pode escolher em qual função atuar, sendo possível exercer ambas as funções simultaneamente.

Embora o protocolo MQTT forneça uma maneira leve e eficiente de transmitir dados em redes IoT, ele requer ferramentas e tecnologias adicionais para gerenciar mensagens e ajudar os desenvolvedores a usar o protocolo com mais eficiência. Uma dessas ferramentas é o Mosquitto, um *broker* de código aberto, amplamente utilizado em aplicações IoT e, conhecido por sua escalabilidade e confiabilidade, que implementa o protocolo MQTT.

Outra ferramenta muito popular usada com o MQTT é o Node-RED, uma ferramenta de programação baseada em fluxo de código aberto que permite aos usuários criar fluxos de trabalho para aplicativos IoT. O Node-RED fornece uma interface gráfica ao usuário, que simplifica o processo de criação e implantação de aplicativos IoT. Possui uma grande comunidade de usuários e uma ampla variedade de nós que podem ser usados com o MQTT.

2.2.2 Mosquitto

O Eclipse Mosquitto é um *message broker* de software livre, que implementa o protocolo MQTT, projetado para ser fácil de configurar e usar, tornando-o a escolha ideal para aplicações de IoT. Conforme observado em um artigo publicado pela The Journal of Open Source Software, o Mosquitto destina-se ao uso em todas as situações em que há necessidade de mensagens leves, principalmente em dispositivos restritos com recursos limitados (Light (2017)).

O Mosquitto fornece vários recursos que o tornam uma escolha popular para aplicativos de IoT. Um de seus benefícios são os mecanismos de segurança, como TLS (*Transport Layer Security*), SSL (*Secure Socket Layer*) e autenticação de usuário com senha. Estes recursos de segurança garantem que os dados trocados entre os dispositivos e o intermediário de mensagens sejam seguros e protegidos.

O Mosquitto também oferece suporte a várias opções de conexão, incluindo conexões persistentes, que permitem que os clientes se reconectem automaticamente se a conexão for perdida. Esse recurso garante que as mensagens não sejam perdidas em caso de problemas temporários de conectividade.

Além dos recursos citados, o Mosquitto também fornece suporte para bridging, o que permite a comunicação entre diferentes MQTT-*broker* e fornece a capacidade de operar como um *Broker* autônomo ou como uma fonte de dados para outros *Brokers* ([Eclipse Foundation, 2013](#)). Esse recurso o torna uma ferramenta versátil para criar soluções personalizadas de IoT.

2.2.3 Node-RED

O Node-RED é uma ferramenta de programação visual que ganhou popularidade nos últimos anos, devido à sua capacidade de simplificar o desenvolvimento de fluxos de trabalho complexos de IoT. A ferramenta foi projetada para fornecer uma interface amigável para conectar vários dispositivos e serviços IoT, e criar aplicativos IoT poderosos com codificação mínima ([HAGINO, 2021](#)).

O Node-RED usa um modelo de programação baseado em fluxo, onde os nós representam as funções e as conexões entre eles representam o fluxo de dados. Node-RED permite que o programador desenvolva seus projetos a partir de nós pré-construídos ou crie nós personalizados. Soma-se a isso, sua capacidade de suportar uma ampla gama de dispositivos, serviços e outras plataformas de código aberto ([HAGINO, 2021](#)), permite que os desenvolvedores criem aplicativos IoT poderosos sobre uma infraestrutura existente, reduzindo o tempo e o custo de desenvolvimento.

O Node-RED também oferece suporte a uma ampla variedade de ferramentas de visualização e análise de dados, tornando-o uma ferramenta ideal para a criação de aplicativos IoT orientados a dados. Esse recurso permite que os desenvolvedores criem aplicativos robustos, orientados a dados sem a necessidade de escrever códigos complexos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho realizado por [Pinto e Segundo \(2019\)](#) tem foco na criação de um sistema de pesagem de baixo custo tendo em vista a aplicação na determinação da umidade de amostras de minério. Este trabalho não é limitado a esta aplicação. Para isso, buscou-se criar uma plataforma que permita diversos tipos de aplicação, exigindo apenas a alteração da célula de carga tendo em vista o requisito de cada projeto.

Os materiais selecionados para o desenvolvimento deste trabalho consistem nas células de carga de modelo viga de flexão de 5 kg e plaina de 50 kg, os módulos conversores para sensor de massa HX711 e o ADS1230, o sensor de temperatura LM35, e a placa de desenvolvimento Wi-Fi ESP8266 NodeMCU 1.0 (ESP-12 Module).

Tais equipamentos foram selecionados devido à alta disponibilidade no mercado nacional, baixo custo e por possuírem um desempenho adequado aos requisitos do trabalho em questão.

3.1 Células de carga 5 kg

Os sensores de deformação são ferramentas importantes para a realização de medição de grandezas mecânicas, podendo estas serem causadas por pressão e tensão. O sensor de 5 kg (Figura 9, 10 e Tabela 1), do tipo *single point*, utiliza uma ponte completa de *Wheastone* para transformar a variação de resistência elétrica dos quatro extensômetros em variação de diferença de potencial elétrico. A ponte inteira, normalmente, oferece maior sensibilidade a pequenas variações e, por consequência, é a configuração mais apropriada para célula de carga. Vale ressaltar que, a tensão do sinal desta célula de carga é extremamente baixa, fazendo necessária a utilização de um amplificador para possibilitar a leitura dos dados. A grande vantagem é que este dispositivo possui fácil integração com as plataformas de prototipagem mais comuns, entre elas: Arduino, PIC, ARM, AVR.

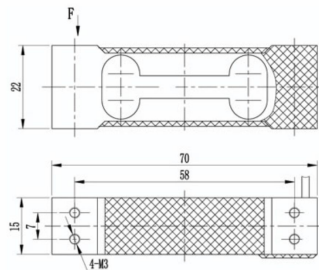


Figura 9 – Dimensional da célula de carga modelo FGL de 5 kg



Figura 10 – Representação da célula de carga modelo FGL de 5 kg

Tabela 1 – Especificação da célula de carga modelo de FGL de 5 kg.

Especificações	
Carga nominal	5 kg
Potência nominal de saída	1,0 mV/V $\pm$ 0,15 mV/V
Tensão de operação	3 ~12 VDC
Impedância de entrada	410 $\pm$ 30 Ω
Impedância de saída	350 $\pm$ 3 Ω
Isolamento	>2000 M Ω
Faixa de compensação de temperatura	-10 °C a 40 °C
Faixa de temperatura de operação	-20 °C a 60 °C
Sobrecarga permitida	<120% da carga nominal
Carga de ruptura	>150% da carga nominal
Classe de proteção	IP65
Material	liga de alumínio
Massa	31 g
Ligação do fios	Vermelho (+), Preto (-), Verde (Sinal+), Branco (Sinal-).

3.2 Células de carga 50 kg

A célula de carga de 50 kg (Figura 11, 12 e Tabela 2) utiliza meia ponte de *Wheastone* para realizar as medições, entretanto, essa célula de carga foi utilizada em um conjunto de 4 sensores, formando uma ponte completa e aumentado a sensibilidade da balança. Outra consequência positiva de usar a ponte completa é maior compensação a distúrbios térmicos, visto que, distúrbios como a variação de temperatura possuem o mesmo efeito em todos os quatro extensômetros, simultaneamente, minimizando o desbalanceamento da ponte completa. Similar ao sensor anterior, este dispositivo também é facilmente integrado a principais plataformas de prototipagem do mercado e também necessita de um amplificador para possibilitar a comunicação com o microcontrolador. Vale ressaltar que, devido a alta capacidade nominal da combinação desses instrumentos, é esperada baixa performance para pequenas cargas, devido a menor resolução dessa combinação.

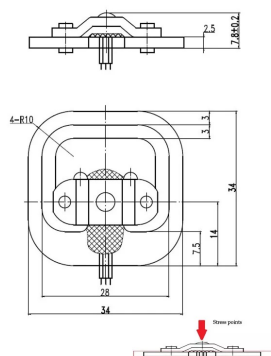


Figura 11 – Dimensional da célula de carga de 50 kg.



Figura 12 – Representação da célula de carga de 50 kg

Tabela 2 – Especificação da célula de carga de 50 kg

Especificações	
Carga nominal	50 kg
Potência nominal de saída	$1,0 \pm 0,1 \text{ mV} / \text{V}$
Tensão de operação	$5 \sim 8 \text{ VDC}$
Impedância de entrada	$1000 \pm 20 \% \Omega$
Impedância de saída	$1000 \pm 10 \% \Omega$
Isolamento	$\geq 2000 \text{ M}\Omega$
Faixa de temperatura de operação	$-20 \sim 65 ^\circ \text{C}$
Sobrecarga permitida	$< 120 \% \text{ da carga nominal}$
Carga de ruptura	$> 150 \% \text{ da carga nominal}$
Classe de proteção	IP65
Material	liga de alumínio
Massa	20 g
Ligação do fios:	vermelho (sinal), branco (-), preto (+).

3.3 Módulo HX711

Os ADCs consistem em uma parte fundamental para a aquisição de dados deste projeto. O módulo HX711 (Figura 13 e Tabela 3) de 24 bits é comumente utilizado para realizar a conexão entre os *Strain Gauges* e os microcontroladores, devido a seu baixo custo, praticidade e acessibilidade. Tal equipamento possui um módulo ADC de 24 bits e entradas diferenciais de alto

ganho que, permite a leitura de uma vasta gama de sensores de tração e compressão. Ademais, o microcontrolador estabelece a comunicação com a célula de carga através do protocolo UART (*Universal asynchronous receiver/transmitter*), que é um protocolo de dados em série comumente utilizado. Contudo, em alguns casos, este protocolo tem sido substituído por tecnologias mais recentes tais como SPI, I2C, USB, e Ethernet.

Vale ressaltar que, o multiplexador de entrada seleciona uma das duas entradas para o amplificador de ganho de baixo ruído. O canal 1 ou “A” é capaz de ser programado para um ganho de 128 ou 64, o equivalente a variação da tensão de entrada de $\pm 20\text{mV}$ ou $\pm 40\text{mV}$, na devida ordem, quando uma fonte de 5V é conectada ao pino de alimentação do chip. Já o canal 2 ou “B” possui ganho único de 32. Soma-se a isso, o regulador de alimentação embarcado no chip HX711 elimina a demanda por um regulador de alimentação externo.

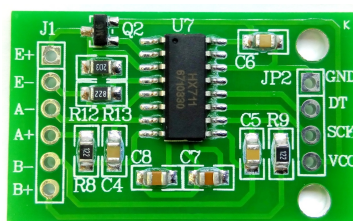


Figura 13 – Representação do módulo amplificador HX711.

Tabela 3 – Especificação do conversor HX711

Especificações	
Tensão de operação	4,8 ~ 5,5 VDC
Corrente de operação	1,6 mA
Temperatura de operação	-20 ~ 85 °C
Interface	UART
Dimensão	29 x 17 x 4 mm

3.4 Módulo ADS1230

Apesar do módulo ADS1230 (Figura 14, 15 e Tabela 4) ser uma opção mais custosa, o mesmo apresenta uma solução mais flexível para medição de células de carga com alta resolução e precisão. Este módulo possui todas as ferramentas para realizar a medição de carga de maneira eficiente, como amplificador de sinal, filtro de ruídos e um ADC de 20 bits. Vale ressaltar que, a comunicação do microcontrolador com a célula de carga é realizada por meio de um barramento SPI, facilitando a integração de múltiplas células de carga em um único protótipo. Aliado a isso, esta célula de carga pode operar com duas velocidades de amostragens: 10 Hz e 80 Hz. A primeira frequência, 10 Hz, de amostragem é a mais indicada em relação a supressão de ruídos, conseguindo maior resolução medidas. Já a segunda frequência, 80 Hz acaba perdendo um pouco da resolução do sinal em troca de uma alta faixa de amostragem. Ademais, o amplificador de

sinais integrado neste chip oferece duas opções de ganho, sendo elas 64 ou 128, a depender das necessidades de cada projeto.

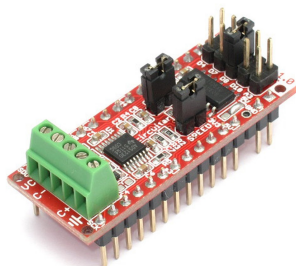


Figura 14 – Representação do módulo amplificador ADS1230.

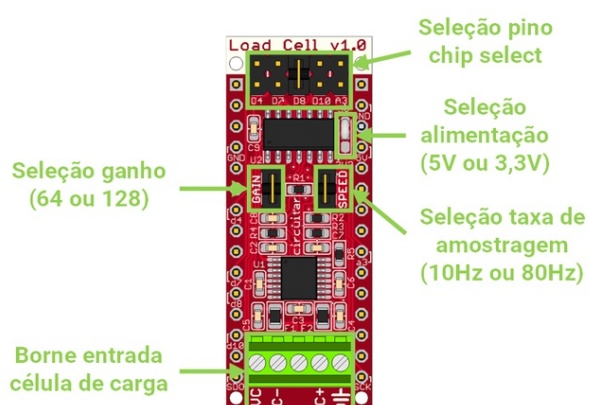


Figura 15 – Opções disponíveis na célula de carga ADS1230

Tabela 4 – Especificação do conversor ADS1230

Especificações	
Tensão de operação	4,5 ~ 5 VDC ou 3,3 VDC
Corrente de operação	1,5 mA
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C
Interface	SPI

3.5 Sensor de temperatura LM35

O sensor de temperatura LM35 (Figura 16 e Tabela 5) possui inúmeras conveniências, como fato da tensão de saída ser linearmente proporcional à temperatura em graus celsius, de não requerer calibração ou ajuste externo para fornecer precisões de típicas de $\pm \frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$ em temperatura ambiente e, $\pm \frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$ em uma faixa de operação de -55°C a 150°C , tornando a integração do sensor a qualquer sistema extremamente fácil. Somado a isso, o consumo de energia de $60\text{ }\mu\text{A}$ reduz o autoaquecimento do sensor, impedindo o aquecimento do ar parado ao redor do sensor superior a $0,1^{\circ}\text{C}$.



Figura 16 – Representação do sensor de temperatura LM35.

Tabela 5 – Especificação do sensor de temperatura LM35

Especificações	
Tensão de operação	4 V a 30 V
Corrente de operação	$<60\text{ }\mu\text{A}$
Fator de Escala Linear:	$+10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$
Temperatura de operação	-55°C a 150°C
Auto aquecimento	$0,08^{\circ}\text{C}$ em ar parado

3.6 ESP8266 NodeMCU 1.0

O módulo de conexão Wi-Fi ESP8266 (Figura 17 e Tabela 6) oferece diversas vantagens para seus usuários, como baixíssimo consumo de energia para operação, dimensões compactas, e desempenho ideal para aplicações em projetos os quais envolvem a Internet das Coisas. O recurso de Wi-Fi implementado no chip é completo e independente, ou seja, pode ser utilizado independentemente ou como escravo de uma Unidade de Controle Multiponto central. Vale ressaltar que, o *cache* de alta velocidade integrado melhora o desempenho do sistema como um todo e otimiza o uso de memória. Aliado a isso, o processador de 32 bits da L106 Diamond da Tensilica embarcados no chip possibilita que este seja utilizado como um adaptador Wi-Fi para qualquer projeto de microcontrolador, ou pode ser utilizado como um sistema *stand-alone* com seus sensores e outros dispositivos externos. Ademais, a ampla diversidade de conhecimento facilmente encontrado, e o suporte de algumas plataformas como a *Smart Connectivity Platform*, tornam este módulo em uma escolha muito atraente para qualquer criador.

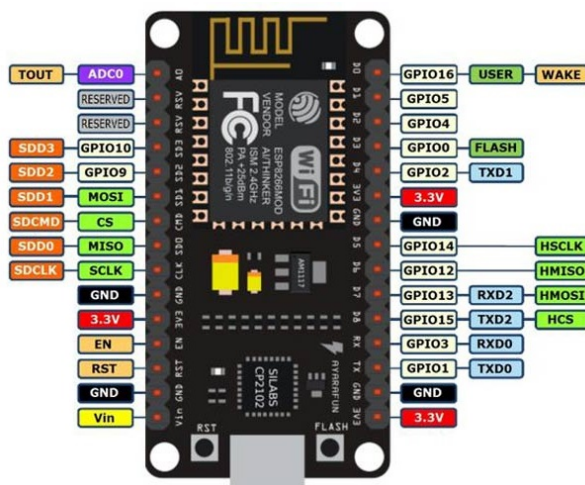


Figura 17 – Representações das portas/configurações do NodeMCU ESP8266.

Tabela 6 – Especificação do NodeMCU ESP8266

Especificações

Wireless padrão 802.11 b/g/n

Antena embutida

Modos de operação STA/AP/STA+AP

Suporta 5 conexões TCP/IP

Portas GPIO 11

GPIO com funções de PWM, I2C, SPI, etc

Tensão de operação 4,5 ~9 VDC

Taxa de transferência 110-460800 bps

Suporta Upgrade remoto de firmware

Conversor analógico digital (ADC)

Temperatura de operação -20 °C a 75 °C

Dimensões 49 x 25,5 x 7 mm

3.7 Metodologia

A metodologia deste trabalho contempla as etapas percorridas para o desenvolvimento de uma balança com compensação térmica, integrada a um sistema de aquisição de dados. Tal desenvolvimento pode ser dividido em 3 etapas: a primeira possuiu o viés de prototipar a balança, e validar seus resultados por meio de uma série de testes de bancada; a segunda consiste na integração da balança desenvolvida utilizado o conceito de IoT; e, por fim, a terceira etapa envolveu o desenvolvimento de um compensador térmico em software o sistema.

3.7.1 Desenvolvimento das balanças e comparação

O desenvolvimento desta etapa inicia-se com a fabricação de alguns protótipos e uma avaliação minuciosa para determinar quais combinações oferecem a melhor resposta e o menor custo de produção. A partir do conceito supracitado, e dos matérias abordados no capítulo anterior, foram geradas 4 combinações de sistema de pesagem, sendo elas:

- A: formada a partir da célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo ADS1230, representado pelo esquemático da Figura 18.

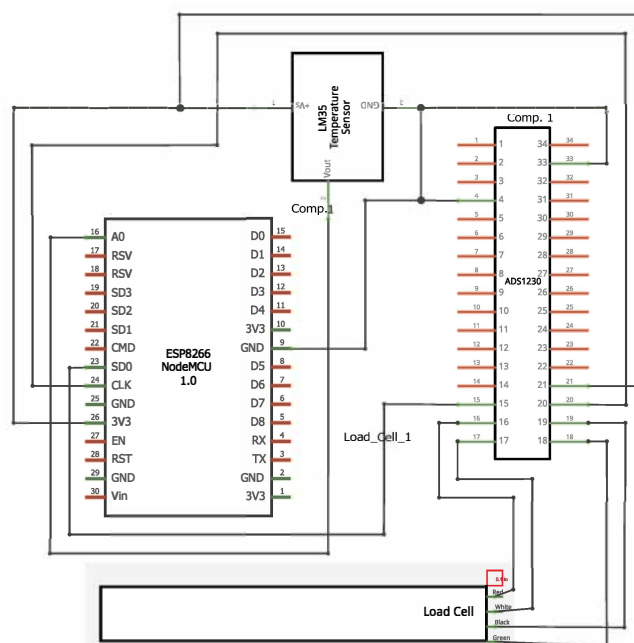


Figura 18 – Diagrama elétrico do protótipo A.

- B: formada pela célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo HX711, representado pelo esquemático da Figura 19.

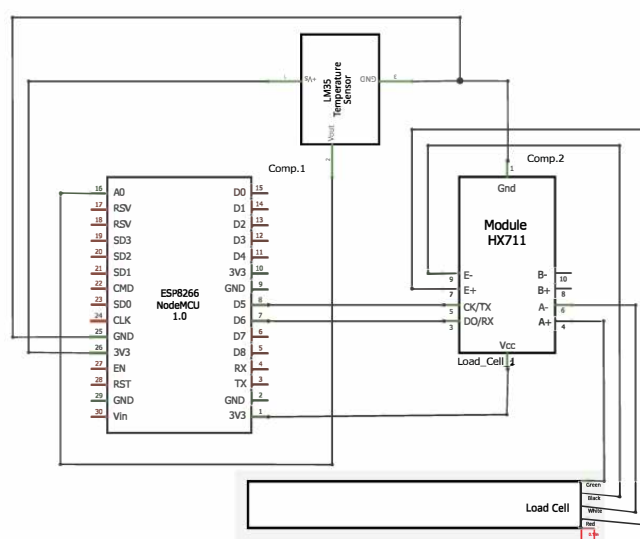


Figura 19 – Diagrama elétrico do protótipo B.

- C: formada pelo conjunto de 4 células de carga de 50 kg junto ao módulo ADS1230, representado pelo esquemático da Figura 20.

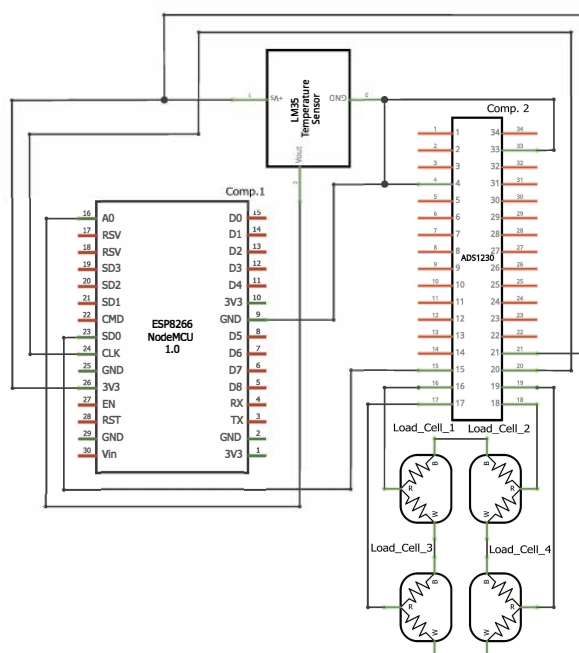


Figura 20 – Diagrama elétrico do protótipo C.

- D: formada pelo conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711, representado pelo esquemático da Figura 21.

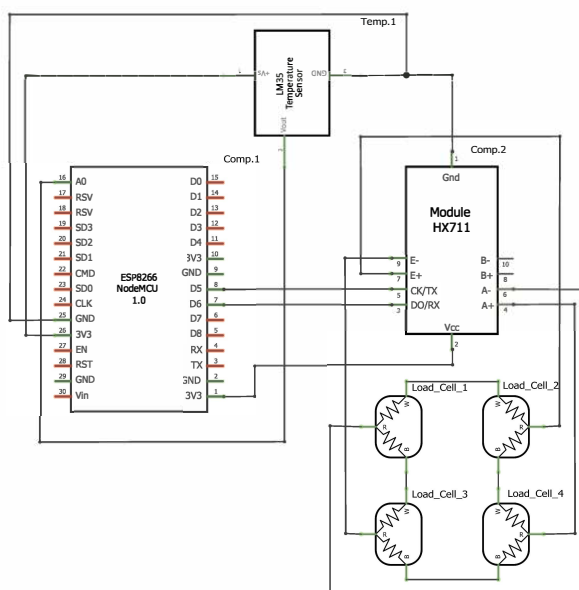


Figura 21 – Diagrama elétrico do protótipo D.

A partir dos protótipos concluídos, foram realizadas uma série de pesagens para determinar o modelo de calibração de cada célula de carga. As pesagens ocorreram com auxílio de cinco massas padrão: 100g, 200g, 500g, 1000g e 2000g. Para obter mais pontos na curva resposta da balança, foram utilizadas diversas combinações de carga.

Cada carga foi pesada 30 vezes com um intervalo de tempo de aproximadamente de 3 segundos entre as pesagens. Após isso, a média das amostragens foi calculada e utilizada para definir a curva resposta da carga.

Vale ressaltar que o principal parâmetro utilizado para representar a porcentagem de variação explicada pela resposta do modelo foi o coeficiente de determinação - R^2 , que pode variar de 0 a 1. Um valor próximo ou igual a 1 indica que a equação do modelo possui boa confiabilidade e garante maior exatidão nas medidas, já um valor próximo ou igual a 0 indica uma equação com baixa fidelidade ao modelo e provém um alto grau de incerteza nas medições.

3.7.2 Aplicação dos conceitos de conectividade IoT no protótipo

O NodeMCU ESP8266 possui um módulo Wi-Fi que facilita a conectividade do protótipo desenvolvido e integração dos conceitos IoT. Para realizar essa conexão, foram estabelecidas duas prioridades: conectar ao Wi-Fi e realizar a conexão com o *broker* MQTT. Algumas bibliotecas foram utilizadas para facilitar a comunicação com o *broker*, sendo elas: Async MQTT Client Library e ESPAsyncTCP library¹. Ao utilizar essas bibliotecas juntas é possível utilizar o protocolo MQTT e TCP de forma assíncrona em um NodeMCU-ESP8266, facilitando a comunicação com o servidor.

A conexão com o Wi-Fi e o MQTT-*broker* foi implementada de acordo com o fluxograma da Figura 22, com o intuito de garantir a conectividade com o servidor.

O Node-RED oferece uma interface que facilita o desenvolvimento de novos projetos, através da integração com o Mosquitto. Com estes dois softwares previamente instalados e configurados foi projetado um fluxo de três nós : o primeiro nó, ou nó de entrada, recebe a mensagem postada pelo NodeMCU ESP8266; o segundo nó, ou nó de saída, publica uma mensagem para a interface gráfica do Node-RED; enquanto o terceiro nó, ou nó de depuração, exibe o objeto da mensagem no console de depuração do Node-RED (Figura 23).

¹ Async MQTT Client: <https://github.com/marvinroger/async-mqtt-client>
ESPAsyncTCP: <https://github.com/me-no-dev/ESPAsyncTCP>

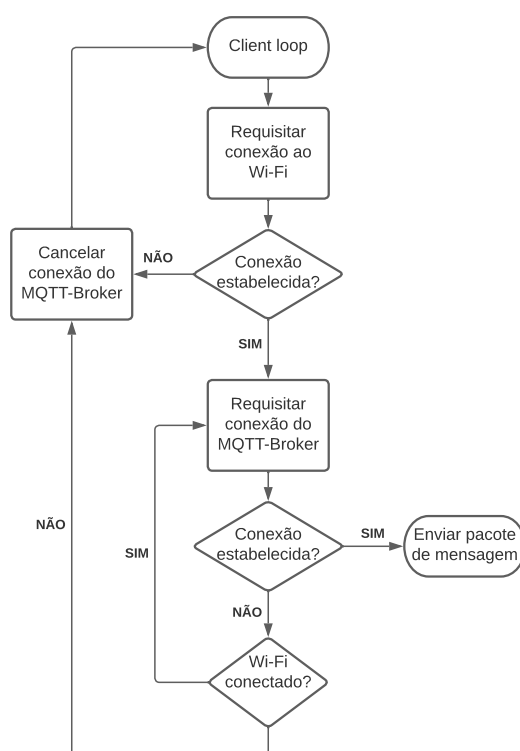


Figura 22 – Fluxograma do *looping* de conexão implementada no NodeMCU ESP8266.

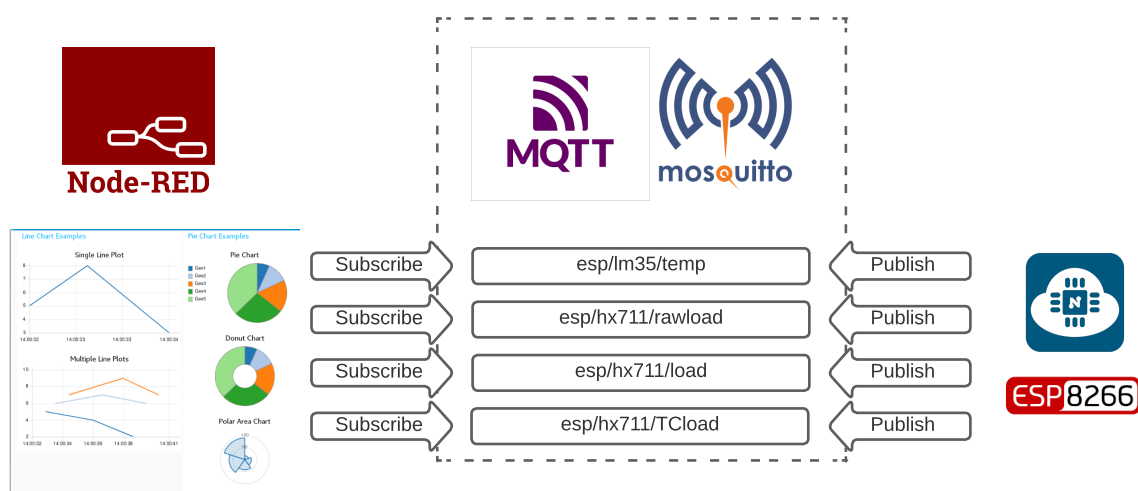


Figura 23 – Arquitetura utilizada para realizar a conexão com o *broker*.

3.7.3 Compensador de térmico

A etapa para o desenvolvimento do compensador térmico constitui na última parte deste trabalho. Antes de cada experimento, o protótipo foi inserido em uma câmara térmica foi averiguada por qualquer incoerência no sistema, com essa condição cumprida, foi dado início aos testes.

Os experimentos foram realizados com três cargas diferentes: 100 g, 500 g e 2000 g. Após a aplicação da correção, uma quarta carga fora do intervalo do experimento e abaixo da carga nominal do equipamento foi selecionada, resultando em uma massa de 3800 g, com o intuito de validar o compensador térmico com diferentes cargas.

A câmara térmica utilizada foi inicialmente programada para alcançar uma temperatura de 20°C, e o protótipo foi deixado dentro desta até suas leituras de cargas estabilizarem. Após isso, o protótipo foi calibrado sem carga e, posteriormente, a carga foi disposta sobre a balança, para, então, dar início às medições.

Os ajustes de temperatura da câmara térmica foram feitos manualmente. O ciclo idealizado era constituído por 6 pontos de medição na seguinte ordem: 20 °C, -10.00 °C, 3.33 °C, 16.66 °C, 29.99 °C e, por fim, retornando a 20 °C. Os limites inferior e superior desta faixa térmica foram escolhidos com base nas temperaturas de operação dos equipamentos, respeitando o limite operacional do protótipo. Em seguida, foram determinados dois valores equidistantes entre este intervalo, resultando no ciclo descrito acima. É importante mencionar que, os pontos de temperatura foram mantidos até alcançar a estabilidade térmica, ou seja, a temperatura foi mantida até que a resposta da saída do protótipo se estabilizasse.

Vale ressaltar que, após o teste de validação da correção térmica compararam os erros dos resultados encontrados para verificar se ocorreu uma melhoria nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados ao realizar os testes de bancada, assim como a metodologia, foram divididos em 3 partes, na qual a primeira corresponde a uma análise dos protótipos desenvolvidos e seus resultados; a segunda corresponde a uma análise da interface gráfica gerada pelo Node-RED e a terceira parte corresponde ao resultado encontrado após utilizar a aplicação térmica.

4.1 Desenvolvimento das balanças e comparação

Ao realizar a bateria de testes, com temperatura ambiente em aproximadamente 24 °C, com os protótipos A, B, C e D foi possível encontrar as curvas representadas nas Figuras 24, 25, 26 e 27.



Figura 24 – Resultado da célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo ADS1230.

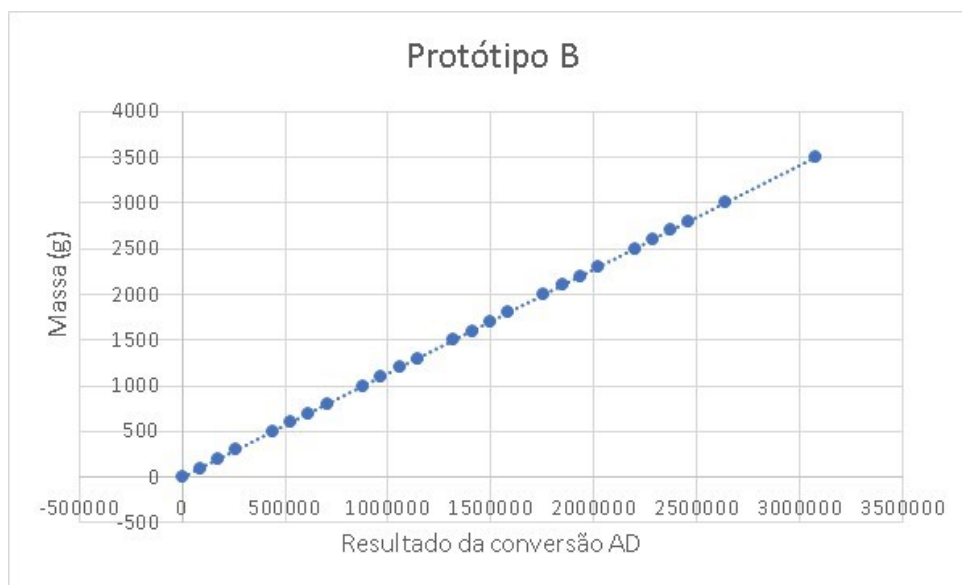


Figura 25 – Resultado da célula de carga de 5 kg operando junto ao módulo HX711.

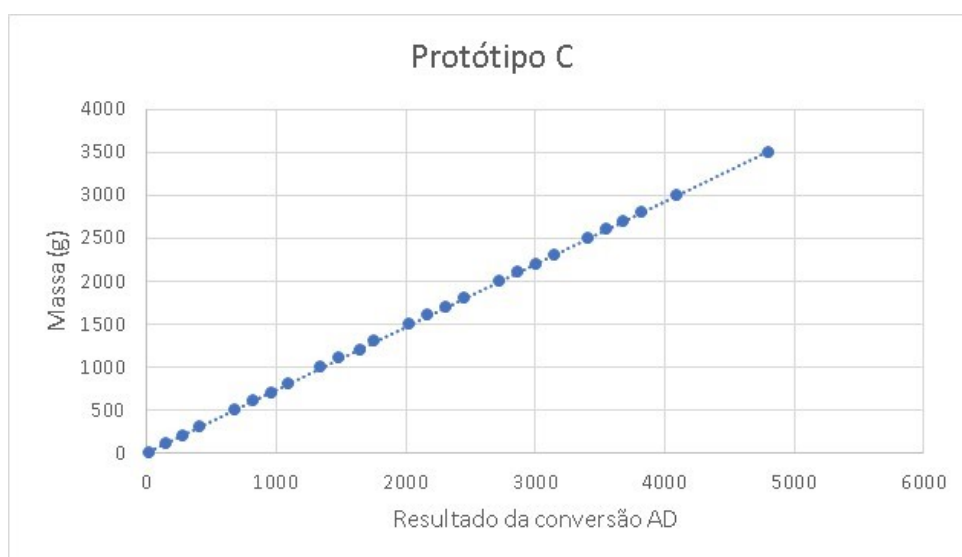


Figura 26 – Resultado do conjunto de 4 células de carga de 50 kg junto ao módulo ADS1230.

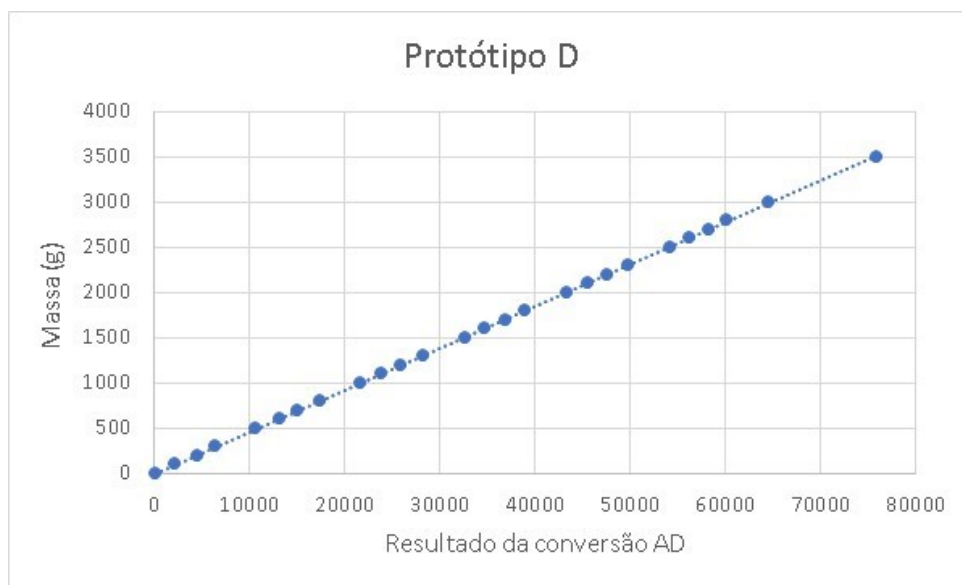


Figura 27 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.

Por meio de regressão linear, foram obtidos os seguintes modelos de calibração para cada uma das quatro configurações A, B, C e D, respectivamente:

$$Y = 0,0179 \cdot X + 5,9365 \quad (4.1)$$

$$Y = 0,0101 \cdot X + 7,0184 \quad (4.2)$$

$$Y = 0,7322 \cdot X + 3,0080 \quad (4.3)$$

$$Y = 0,0464 \cdot X - 7,3397 \quad (4.4)$$

Em que y é a massa estimada pelo modelo (kg) e x é o resultado do conversor analógico digital.

Os coeficientes de determinação de cada modelo são apresentados a seguir:

$$R_A^2 = 1,0000 \quad (4.5)$$

$$R_B^2 = 1,0000 \quad (4.6)$$

$$R_C^2 = 0,9999 \quad (4.7)$$

$$R_D^2 = 1,0000 \quad (4.8)$$

Como é possível observar, os coeficientes de determinação encontrados acabaram sendo muito próximos de 1, indicando um bom desempenho para todos os protótipos, apesar de suas diferenças mecânicas. Logo, deve-se avaliar outros atributos, como custo, faixa de medição e acessibilidade, para auxiliar a escolha do protótipo final.

O custo é um dos principais fatores determinantes em qualquer projeto. Nesse sentido, apesar de os protótipos terem apresentados resultados semelhantes, o preço final de cada configuração é bastante diferente.. Para comparar o custo de cada projeto primeiro é necessário avaliar o valor de cada componente utilizado, como descrito na Tabela 7. Em seguida, apresenta-se o valor final de cada protótipo, na Tabela 8.

Tabela 7 – Tabela de preços dos componentes adquiridos.

Item	Nome	Valor/Uni.	Uni.	Total	Site	Acesso em
1	Célula de Carga FGL de 05 kg - Sensor de Peso	R\$ 270,00	1	R\$ 270,00	https://www.fefa.com.br/celula-de-carga-modelo-fgl-capacidade-5kg-10kg-20kg-40kg-50kg-100kg-200kg-250kg	05/03/2023
2	Célula De Carga Fina 50 kg - Sensor de Peso	R\$ 14,00	4	R\$ 56,00	https://shopee.com.br/C%C3%A9lula-de-carga-50kg-i.656752919.14839385361	05/03/2023
3	Módulo Conversor 24bit HX711 p/ Célula De Carga	R\$ 7,19	1	R\$ 7,19	https://www.baudaeletronica.com.br/modulo-conversor-hx711-para-sensor-de-peso.html	05/03/2023
4	Nanoshield LoadCell – Conversor ADS1230 p/ células de carga	R\$ 84,90	1	R\$ 84,90	https://www.eletroshields.com.br/nanoshield-loadcell-conversor-ads1230-p-celulas-de-carga	05/03/2023
5	NodeMCU ESP8266-12 V2	R\$ 49,90	1	R\$ 49,90	https://www.robocore.net/wifi/nodemcu-esp8266-12-v2	05/03/2023

Tabela 8 – Resultado do custo de cada protótipo.

Protótipo	Valor
A	R\$ 404,80
B	R\$ 327,09
C	R\$ 190,80
D	R\$ 113,09

Posto isso, é possível verificar que os menores custos foram atribuídos aos protótipos C e D. Vale ressaltar que, além do modelo D apresentar menor custo entre os dois, o mesmo acaba sendo mais acessível tendo em vista que as células de carga de 50 kg e os conversores HX711 são amplamente difundidas no mercado e por conseguinte acabam possuindo maior quantidade de documentação publicada tornando-os mais amigáveis para o desenvolvimento de projetos.

4.2 Aplicação dos conceitos de conectividade e IoT no protótipo

A simplicidade oferecida pelo Node-RED facilitou o desenvolvimento da interface gráfica deste trabalho. Bastou realizar a seleção dos tópicos desejados e projetá-los no formato de gráfico e valores numéricos, como observado no fluxograma da Figura 28, resultando na interface gráfica representada pela Figura 29.

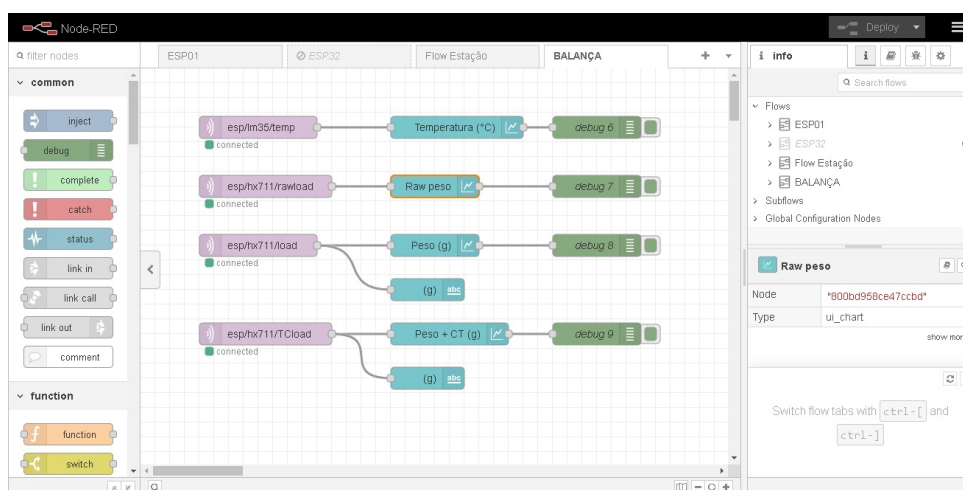


Figura 28 – Fluxo de programação visual produzido no Node-RED.



Figura 29 – Resultado da interface gráfica produzida no Node-RED.

4.3 Compensador de térmico

Ao realizar a bancada de testes, a falta de precisão e acurácia da câmara térmica dificultou a execução do experimento, resultando um ciclo de aquecimento/resfriamento na seguinte ordem de temperatura: 20 °C, 5 °C, 17 °C, 29 °C, 35 °C e 20 °C. Soma-se a isso, os valores encontrados no intervalo de temperatura de 17 °C não foram consistentes e acabaram sendo descartados da análise final.

Após realizar a bancada de testes na câmara térmica, com as cargas de 100g, 500g e 2000g, foram obtidos os dados apresentados nas Figuras 30, 31 e 32.

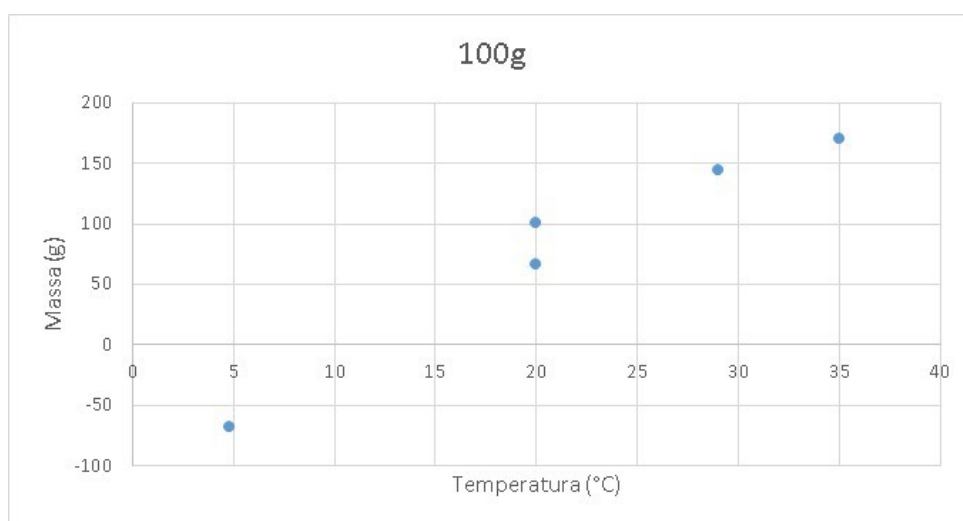


Figura 30 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.

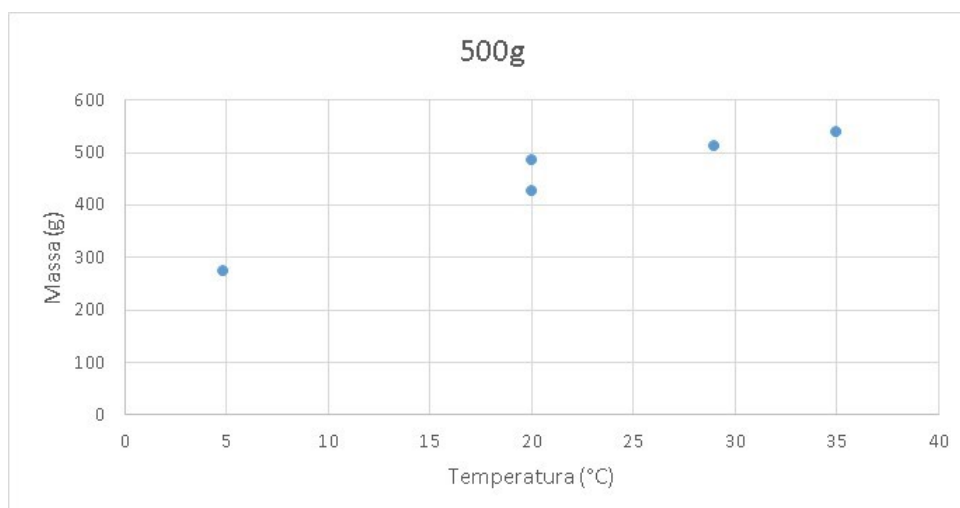


Figura 31 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.

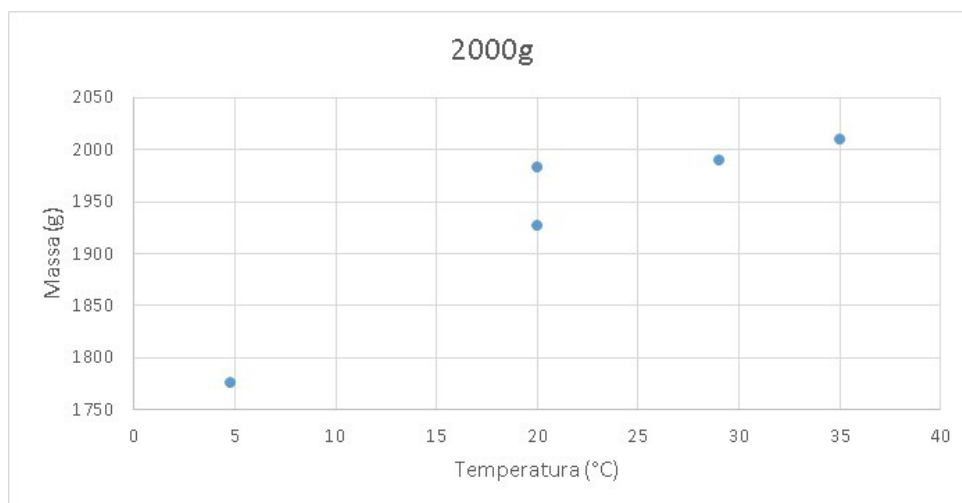


Figura 32 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.

Com os dados amostrados e aplicando o princípio da compensação térmica, apresentado na Seção 2.1.1.3, foi possível chegar em um coeficiente de temperatura aproximado de 0,00417 1/K. Após incluir a compensação no código do microcontrolador e realizar um novo teste com uma carga de 3800g, obteve-se o gráfico da Figura 33.

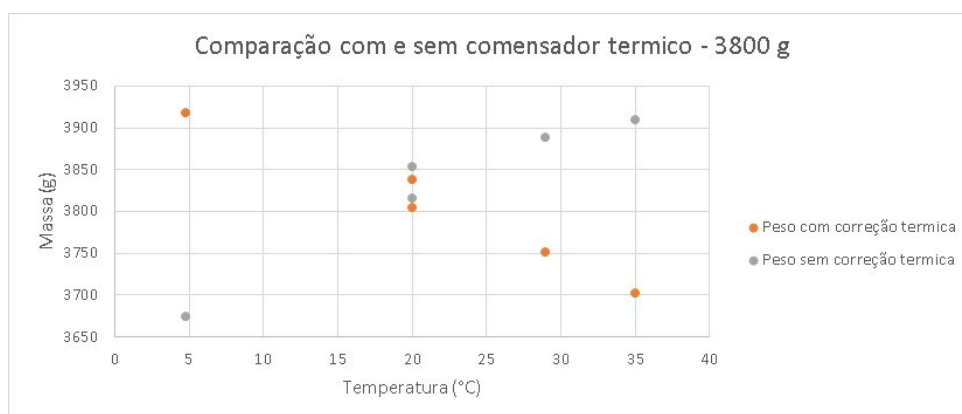


Figura 33 – Resultado do conjunto de 4 células de cargas de 50 kg junto ao módulo HX711.

Apesar da dificuldade de visualizar a pequena melhoria das respostas por meio do gráfico, isso se torna mais clara ao analisar os valores apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado referente à melhoria provocada pelo compensador de temperatura.

Temperatura (°C)	Erro Absoluto (g)	Erro Relativo (%)	Erro Absoluto com Compensador (g)	Erro Relativo com Compensador(%)
20	+52,82	1,39	+38,10	1,00
5	-126,13	3,32	+118,06	3,11
29	+88,41	2,33	-49,16	1,29
35	+109,26	2,88	-98,58	2,59
20	+14,73	0,39	+4,49	0,12

Através do observado na Figura 33 e representado na Tabela 9, podemos observar que ao aplicar a correção térmica é temos uma inversão da tendência de subida dos dados, que passam de crescentes para decrescentes, indicando que ocorreu uma correção indevida do sistema. Soma-se a isso, o erro inicial deste experimento foi maior do que o erro encontrado na calibração do sistema. Não foi possível determinar a causa deste erro, mas uma possível hipótese é que houve influência da vibração da câmara térmica em que o protótipo foi inserido (Figura 34).



Figura 34 – Protótipo posicionado dentro da câmara térmica.

5 CONCLUSÃO

Depois de realizar extensa pesquisa e experimentação, foi possível concluir que o sistema de pesagem proposto pode ser uma opção melhor para projetos e negócios de pequena escala do que algumas soluções industriais de ponta. Em muitos casos, as soluções industriais são caras e inflexíveis, tornando-as menos práticas para projetos de pequena escala que exigem soluções customizadas. Além disso, as soluções com conectividade *wireless* costumam ser ainda mais caras do que as soluções industriais cabeadas, limitando ainda mais sua aplicabilidade.

Por meio do uso de um sistema de aquisição de dados personalizados, projetos e empresas de pequena escala podem criar soluções customizadas e econômicas, usando componentes facilmente disponíveis, como microcontroladores, amplificadores e medidores de tensão. Esses sistemas podem ser facilmente modificados e adaptados para atender às necessidades específicas de um negócio, fornecendo uma solução de medição flexível e com bom custo benefício.

Vale ressaltar que, os sistemas de medição industrial são fornecidos por uma vasta quantidade de empresas e, podem ser encontrados com diversas especificações e valores. Assim sendo, uma das formas utilizadas para facilitar a comparação de custo entre produtos é dividir o preço pela quantidade de canais de um sistema, ou seja, usando o modelo preço por canal. Segundo [Smith \(2020\)](#), normalmente os preços encontrados no mercado podem variar de R\$ 1.000,00 até R\$ 10.000,00 por canal, sendo que o modelo mais caro custa aproximadamente 9 vezes mais do que o valor proposto para o desenvolvimento do protótipo desenvolvido neste trabalho.

Portanto, foi possível concluir que o objetivo deste trabalho foi alcançado, entretanto alguns tópicos apresentam potencial para melhor desenvolvimento. É possível, por exemplo, aplicar um teste de carga que envolva toda carga nominal da balança, ou ainda utilizar uma câmara térmica de maior precisão que permita o desenvolvimento do projeto com maior refino e controle. Além disso, é possível acrescentar um banco de dados capaz de realizar o armazenamento de dados junto ao princípio de IoT. Por fim, vale ressaltar que o elevado custo de um equipamento personalizado não consiste apenas no preço dos materiais, mas também na mão-de-obra requerida para o desenvolvimento, validação e instalação do sistema idealizado.

REFERÊNCIAS

- BERG, C. *The fundamentals of weighing technology*. Germany: Sartorius AG, 1996. 59 p. Citado na página 15.
- BI, Z.; XU, L. D.; WANG, C. Internet of things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014. v. 10, n. 2, p. 1537–1546, 2014. Citado na página 16.
- BOYES, W. *Instrumentation reference book*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2009. Citado na página 20.
- BURNOS, P.; GAJDA, J. Thermal property analysis of axle load sensors for weighing vehicles in weigh-in-motion system. *Sensors*, 2016. MDPI, v. 16, n. 12, p. 2143, 2016. Nenhuma citação no texto.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Physics with arduino for beginners. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2011. SciELO Brasil, v. 33, p. 4503–4503, 2011. Citado na página 23.
- DINH, N. T.; KANOUN, O. Temperature-compensated force/pressure sensor based on multi-walled carbon nanotube epoxy composites. *Sensors*, 2015. MDPI, v. 15, n. 5, p. 11133–11150, 2015. Nenhuma citação no texto.
- DOEBELIN, E. *System dynamics: modeling, analysis, simulation, design*. [S.l.]: CRC Press, 1998. Citado na página 25.
- Eclipse Foundation. *Mosquitto*. 2013. <https://www.eclipse.org/proposals/technology/mosquitto/>. Accessed em: 28/02/2023. Citado na página 28.
- HAGINO, T. *Practical Node-RED Programming: Learn powerful visual programming techniques and best practices for the web and IoT*. [S.l.]: Packt Publishing Ltd, 2021. Citado na página 28.
- HOFFMANN, K. et al. *An introduction to measurements using strain gages*. [S.l.], 1989. Citado 3 vezes nas páginas 16, 21 e 22.
- IMAGING, S. V. *Aliasing*. n.d. <https://svi.nl/AliasingArtifacts>. [Accessed on 03/03/23]. Citado na página 25.
- JR., A. A. G.; SOUSA, A. R. de. *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2008. Citado na página 18.
- JUNIOR, J.; SEGUNDO, A. K. R. Sistema de aquisição de dados de extensometria aplicado a um tambor descascador de toras de madeira. 2019. 2019. Nenhuma citação no texto.
- KIM, G. et al. An mqtt-based context-aware autonomous system in onem2m architecture. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019. IEEE, v. 6, n. 5, p. 8519–8528, 2019. Citado na página 15.
- LASI, H. et al. *Industry 4.0. Business & information systems engineering*, 2014. Springer, v. 6, p. 239–242, 2014. Citado na página 26.

LEE, W. K. et al. Physiological signal monitoring bed for infants based on load-cell sensors. *Sensors*, 2016. MDPI, v. 16, n. 3, p. 409, 2016. Citado na página 15.

LIAO, K.-H.; LO, C.-Y. Thermoresistive strain sensor and positioning method for roll-to-roll processes. *Sensors*, 2014. Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 14, n. 5, p. 8082–8095, 2014. Citado na página 19.

LIGHT, R. A. Mosquitto: server and client implementation of the mqtt protocol. *Journal of Open Source Software*, 2017. v. 2, n. 13, p. 265, 2017. Citado na página 27.

LIMITED, N. E. I. *Three Methods to Filter Noisy Arduino Measurements*. [S.l.]: Meguno Link, 2020. <https://www.megunolink.com/articles/coding/3-methods-filter-noisy-arduino-measurements/>. Acessado em: 01/03/2023. Citado na página 23.

LIU, C. et al. The application of soil temperature measurement by lm35 temperature sensors. In: IEEE. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. [S.l.], 2011. v. 4, p. 1825–1828. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.

MACHESO, P. et al. Design of esp8266 smart home using mqtt and node-red. In: IEEE. *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*. [S.l.], 2021. p. 502–505. Citado na página 16.

MISHRA, B.; KERTESZ, A. The use of mqtt in m2m and iot systems: A survey. *IEEE Access*, 2020. IEEE, v. 8, p. 201071–201086, 2020. Citado na página 26.

NERI, M. L. e. G. B. R. *MQTT*. 2019. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/mqtt/>. Acesso em: 25.02.2023. Citado na página 26.

PAČNIK, R.; NOVAK, F. A high-sensitivity hydraulic load cell for small kitchen appliances. *Sensors*, 2010. Molecular Diversity Preservation International (MDPI), v. 10, n. 9, p. 8452–8465, 2010. Citado na página 19.

PINTO, T. V. B.; SEGUNDO, A. K. R. Sistema de aquisição e processamento de dados com compensação de temperatura para uma célula de carga. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 29.

SCHMIDT, S. *Então... Como uma célula de carga realmente trabalha?* 2023. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>. Acesso em: 25.02.2023. Citado na página 19.

SMITH, G. M. *O que é Aquisição de Dados - DAQ ou DAS?* 2020. Disponível em: <https://dewesoft.com/br/aquisicao-de-dados/o-que-e-aquisicao-de-dados>. Acesso em: 10.03.2023. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 49.

TOMOV, K. *Learn How to Use The MQTT Protocol in Delphi With This Library*. Embarcadero. 2021. Disponível em: <https://blogs.embarcadero.com/learn-how-to-use-the-mqtt-protocol-in-delphi-with-this-library/>. Acesso em: 03/03/2023. Citado na página 26.

Wikipedia. *Filtro rejeita-faixa*. 2021. https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_rejeita-faixa. Accessed: 03/03/23. Citado na página 23.