



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Colegiado do curso de Engenharia de
Controle e Automação - CECAU



Thomás Vargas Barsante e Pinto

Sistema de aquisição e processamento de dados com compensação de temperatura para uma célula de carga

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2018

Thomás Vargas Barsante e Pinto

**Sistema de aquisição e processamento de dados com compensação
de temperatura para uma célula de carga**

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. Alan Kardek Rêgo Segundo, Dr.

Ouro Preto, 2018

P659s

Pinto, Thomás Vargas Barsante e.

Sistema de aquisição e processamento de dados com compensação de temperatura para uma célula de carga [manuscrito] / Thomás Vargas Barsante e Pinto. - 2018.

41f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Transdutores. 2. Dispositivos eletromecânicos. 3. Modelagem gráfica (Estatística). I. Rêgo Segundo, Alan Kardek. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

Monografia defendida e aprovada, em 31 de janeiro de 2018, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Professor Convidado



Prof. Dr. Gustavo Medeiros Freitas – Professor Convidado

Agradecimentos

Agradeço imensamente a várias pessoas que fizeram parte desta caminhada e contribuíram para esta conclusão.

Mas primeiro agradeço a Deus pela direção e força durante toda a minha caminhada pela graduação e vida.

Agradeço a minha família, que é a base de tudo, por seu meu suporte em todos os momentos, sejam eles difíceis ou não. À minha namorada Rogéria, por ser companheira, me incentivar e estar comigo sempre.

Agradeço ao professor Alan, meu orientador, por ter me dado a oportunidade de trabalhar junto a ele e por seus ensinamentos. Aos meus colegas e amigos por me ajudarem neste trabalho, em especial Vinícius, Marcelo e Érica.

Agradeço ao professor Magno Silvério Campos do DEPRO, pela imensa ajuda nas análises estatísticas dos dados coletados.

Aos professores por além de formarem meu conhecimento como engenheiro, foram importantes na minha formação pessoal. À UFOP por tornar realidade o sonho da graduação, por me proporcionar grandes amizades e momentos inesquecíveis. E ao ITV pelo grande auxílio técnico neste trabalho.

Resumo

As balanças foram desenvolvidas e usadas por diversos povos em tempos antigos, períodos nos quais eram usadas principalmente para pesar minerais. Tais sistemas de pesagem e suas aplicações evoluíram ao longo dos tempos, culminando nas células de carga. Hoje, elas dominam e são o padrão de toda a indústria de pesagem, seja em qualquer ramo, químico, aeronáutico, alimentício, mecânico, e vários outros. Neste trabalho é proposto um sistema de pesagem de baixo custo baseado em uma célula de carga de ponto único com compensação de temperatura via software. O sistema desenvolvido é constituído por uma grande gama de componentes eletrônicos, como microcontrolador PIC, filtros capacitivos e circuitos integrados. Modelos para compensação de temperatura foram gerados a partir dos dados coletados em ensaios realizados em uma câmara climática. O modelo que mais se ajustou ao sistema foi comparado com os resultados de medição de uma célula de carga industrial. Os resultados mostraram que o sistema desenvolvido neste trabalho teve um REQM cerca de 50% melhor, comparado ao sistema usando uma célula de carga industrial.

Palavras-chaves: Célula de carga, temperatura, sistema supervisorio, modelagem estatística.

Abstract

Scales were developed and used by several peoples in ancient times, periods in which they were used mainly to weight minerals. Such weighing systems and their applications have enhanced over time, culminating in the load cells. Today, they dominate and trend the entire weighing industry, no matter the branch, whether chemical, aeronautical, food, mechanical, and several others. This work proposes a low-cost weighing system based on a single point load cell with temperature compensation via software. The developed system consists on a wide range of electronic components, such as PIC microcontroller, capacitive filters, and integrated circuits. Models for temperature compensation were generated from the data collected in tests carried out in a climate chamber. The model that best fitted the system was compared to the measured results of an industrial load cell. The results revealed that the system developed in this project obtained a RMSE value about 50% better compared to the system using an industrial load cell.

Keywords: Load cell, temperature, supervisory system, statistical modeling.

Lista de ilustrações

Figura 1	Modelos de células de carga presentes no mercado.	13
Figura 2	Representação de uma strain gauge.	14
Figura 3	Representação de uma Ponte de Wheatstone formada por quatro strain gauges.	15
Figura 4	Diagrama de conexão do AD620 usado neste trabalho.	17
Figura 5	Diagrama de conexão do AD620 usado neste trabalho.	18
Figura 6	Foto da câmara climática usada no experimento.	19
Figura 7	LM35 com pinagem correspondente.	20
Figura 8	Imagem do circuito de pesagem desenvolvido.	22
Figura 9	(a) Esquemático da placa de ganho desenhado pelo software Proteus; (b) Desenho 3D da placa de ganho.	23
Figura 10	Célula de carga de ponto único usada neste trabalho.	25
Figura 11	Montagem mecânica da célula de carga de baixo custo ligada ao sistema.	26
Figura 12	Célula de carga industrial utilizada neste trabalho.	26
Figura 13	Montagem mecânica da célula de carga industria ligada ao sistema.	27
Figura 14	Tela inicial do sistema supervisorio usado neste trabalho.	28
Figura 15	Tela de dados coletados do sistema supervisorio usado neste trabalho.	28
Figura 16	Gráfico de linha ajustada para modelos na subida (a) descida (b) e subida/descida (c);	33
Figura 17	Relação entre valores de massa medidas com massa testadas para modelos sem compensação de temperatura (a) e modelos com compensação de temperatura (b) para as etapas de subida, descida e subida/descida respectivamente.	35
Figura 18	Gráfico de linha ajustada para análise de equivalência entre modelos;	37

Lista de tabelas

Tabela 1	Valores do coeficiente de correlação de Pearson para os testes realizados durante o experimento I.	31
Tabela 2	Valores do coeficiente de correlação de Pearson para os testes realizados durante o experimento II.	32
Tabela 3	Valor em % da histerese em peso para as células de carga.	32
Tabela 4	Valor em % da histerese em temperatura para as células de carga. . . .	36
Tabela 5	Comparação dos parâmetros de qualidade para as duas células de carga.	37

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivo geral	11
1.1.1	Objetivos específicos	11
1.2	Organização do trabalho	12
2	Revisão Bibliográfica	13
2.1	Teoria	13
2.2	Materiais	15
2.2.1	Células de carga	15
2.2.1.1	Células de carga de ponto único	16
2.2.2	Microcontrolador	16
2.2.2.1	Microcontrolador PIC	17
2.2.3	AD620	18
2.2.4	Câmara climática	18
2.2.5	LM35	19
2.2.6	Visual Studio	20
2.2.7	Proteus	20
2.2.8	Xbee - XCTU	21
3	Metodologia	22
3.1	Circuito eletrônico	22
3.1.1	Circuito de condicionamento de sinais	22
3.2	Funcionamento do sistema	24
3.3	Experimentos	24
3.3.1	Considerações gerais	24
3.3.2	Experimento I - Célula de carga de baixo custo	25
3.3.3	Experimento II - Célula de carga industrial	26
3.4	Supervisório	27
3.5	Análise de dados	28
3.5.1	Correlação de Pearson	29
3.5.2	Histerese	29
3.5.3	Regressão linear múltipla	29
3.5.4	Parâmetros	30
4	Resultados e discussão	31
4.1	Correlação entre variáveis	31

4.2	Histerese em peso	32
4.3	Ajuste de modelos matemáticos	32
4.3.1	Modelos à temperatura de referência para experimento I	32
4.3.2	Modelos finais com compensação de temperatura para experimento I	33
4.3.3	Modelo para experimento II	34
4.4	Histerese de temperatura	36
4.5	Comparações	36
4.5.1	Comparação de modelos finais do experimento I	36
4.5.2	Comparação de Células de Carga	36
5	Conclusão	38
	Referências	39

1 Introdução

Um sistema de pesagem é um equipamento no qual ao se depositar um objeto, retorna ao usuário um valor referente à massa daquele objeto, popularmente chamado de “peso”. A criação de instrumentos que pudessem quantificar ou rotular um determinado elemento surgiram à medida que a civilização passou a requerer uma maior organização, quando tornou-se necessário ao homem viver em comunidade, compartilhar e trocar elementos.

Os primeiros registros de uma balança desenvolvida pelo homem é datado de milênios antes de Cristo. É reconhecido que os egípcios possuíam um sistema rudimentar de balança, usado principalmente para pesagem de minerais preciosos. A primeira balança funcionava segundo um princípio de equilíbrio de braços iguais, nos quais bandejas eram suspensas por cabos localizados nas extremidades de uma viga (ANDRADE, 2015).

Com o avanço da civilização e a expansão tecnológica, os sistemas de pesagem melhoraram, se tornando cada vez mais precisos e confiáveis. Atualmente, as células de carga detém o posto de principal dispositivo para pesagem de objetos. Elas apresentam alto desempenho, com alta precisão de medida, além de uma alta confiabilidade. São usadas para medição de força, seja por tração ou compressão. Devido a todas essas características, possuem uma alta variedade de aplicações, como por exemplo em silos, tanques, balanças, prensas, pontes rolantes, entre muitas outras. Cada aplicação requer uma diferente célula de carga que carrega algumas particularidades que a torna ideal para uma determinada situação. Pode-se citar alguns modelos como por exemplo, tipo S, Viga de flexão, ponto único, *shear beam*, entre outros.

Uma aplicação bastante peculiar e interessante para um sistema de pesagem, e que tem grande importância para este trabalho, é a determinação do teor de umidade de uma determinada amostra, seja de solo, minério, ou qualquer outro material. O método que se utiliza desta abordagem é chamado Método Gravimétrico. Por indicar medidas exatas e absolutas, esse é justamente o método padrão para determinação de umidade. Ele se baseia no cálculo da diferença de massa entre uma amostra inicial úmida e esta mesma amostra seca. Mais precisamente, no início é feita uma pesagem da amostra inicial úmida, ela é então aquecida por 24 horas a uma temperatura de 105°C, quando o processo de secagem finaliza, a amostra final também é pesada. Os dados são posteriormente usados para cálculo do teor de umidade (PATIL; ZOPE; PATIL, 2015).

Um setor que necessita avidamente por meios de mensuração de umidade é a

mineração. O acúmulo de água no minério onera o custo de produção e transporte, além de comprometer o processo de estoque do minério. Logo, é muito importante ter conhecimento do teor de umidade do minério nas atividades mineradoras. O método gravimétrico é então uma excelente prática que pode ser aplicada neste meio.

Os sistemas de pesagem, de acordo com sua aplicação e do local onde são instalados, estão sujeitos a qualquer tipo de intempéries. Fatores externos que podem levar o sistema a erros ocorrem de diversas formas diferentes, como despreparo do operador, falhas na tensão e frequência da rede elétrica, e condições ambientais (umidade, pressão atmosférica e temperatura).

A temperatura é uma grande fonte de interferência em sistemas, principalmente aqueles compostos por circuitos eletrônicos. O fenômeno de dilatação térmica é descrito como a variação das dimensões de um corpo devido a variação de temperatura. Essa alteração nas dimensões gera por consequência uma mudança no peso e volume do corpo. Isso se torna então determinante, principalmente em um sistema de pesagem, por influenciar diretamente no parâmetro medido pelo sistema, o “peso”. Visto isso, é importante que a interferência da temperatura seja atenuada de alguma forma.

Este trabalho foi desenvolvido em paralelo ao projeto realizado pelo mestrando Vinícius Nunes Lage em parceria com o Instituto Tecnológico da Vale (ITV), que visa desenvolver um sensor de umidade para minério. O intuito é integrar o sistema desenvolvido neste trabalho como ferramenta de calibração do sensor de umidade, uma vez que por meio desse sistema é possível realizar medições online sem necessidade de retirar as amostras de dentro da câmara climática.

1.1 Objetivo geral

A finalidade deste trabalho é desenvolver um sistema de pesagem, de baixo custo, por meio de uma célula de carga do tipo *single point*. Além disso, busca-se gerar e aplicar ao sistema um modelo de compensação de temperatura via software. Por fim, este sistema será comparado com uma célula de carga do tipo *sealed beam*, já reconhecida e comercializada no mercado, de forma a atestar sua qualidade.

1.1.1 Objetivos específicos

- Aprimorar o projeto do circuito eletrônico de aquisição, conversão e processamento de sinais;
- Desenvolver uma placa de circuito impresso (PCI) para aprimoramento do sistema;
- Testar o sistema de pesagem através de uma série de experimentos;

- Organizar, analisar e modelar os dados encontrados de forma a gerar um modelo de compensação de temperatura;
- Realizar a mesma bateria de experimento na célula de carga industrial;
- Comparar os resultados obtidos nos dois experimentos e validar a qualidade do sistema de pesagem desenvolvido;

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho é formado por 5 capítulos, além da Introdução.

O Capítulo 2 consiste em uma breve mas concisa revisão bibliográfica sobre o tema tratado. Faz alusão a trabalhos que abordam o mesmo tema, e que serviram como base para a contemplação deste. Além disso, expõe os materiais utilizados neste trabalho em mais detalhes. Cada equipamento é separadamente apontado e explicado, de forma a esclarecer ao máximo seu papel no transcorrer deste projeto

O Capítulo 3 detalha a metodologia utilizada no trabalho, desde a construção mecânica do circuito até a explicação de como foram realizados os testes.

No Capítulo 4, os resultados finais são apresentados, bem como toda uma análise estatística aplicada aos eles e por fim um discussão acerca da qualidade dos mesmos.

Por fim, no Capítulo 5, é exposta uma conclusão relativa a tudo que foi apresentado neste estudo, bem como sugestões para trabalho futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Teoria

Nos dias atuais, as células de carga são consideradas o principal elemento em um sistema de pesagem. Basicamente, estas transformam uma carga aplicada a ela em um sinal que será, então, convertido e analisado. Dentre a grande variedade de equipamentos disponíveis no mercado, a que tem mais destaque e, conseqüentemente, é mais frequentemente usada são as células de carga resistivas (PAČNIK; NOVAK, 2010). Esses equipamentos possuem em seu interior um material resistivo, comumente *strain gauges*. Esse material é deformado devido a aplicação de uma força alterando assim sua resistência, por conseqüência um sinal elétrico proporcional à força é emitido pela célula de carga (LEE et al., 2016). Pode-se citar alguns tipos de células de carga resistivas, como: Bending beam, canister, de ponto único, S-beam. Cada uma com particularidades que as diferenciam, tornando-as mais apropriadas para diferentes aplicações. A Figura 1 expõe algumas células de carga existentes no mercado citadas anteriormente.



Figura 1 – Modelos de células de carga presentes no mercado.

Fonte: (INTRUMENTS, 2017)

Strain gauges são mais especificamente sensores que medem a deformação do corpo ao qual estão alocadas em razão de uma carga aplicada ao mesmo. Seu funcionamento se

baseia na relação física entre a resistência do material do sensor e seu comprimento e área (LIAO; LO, 2014). A Figura 2 mostra a representação de uma *strain gauge*.

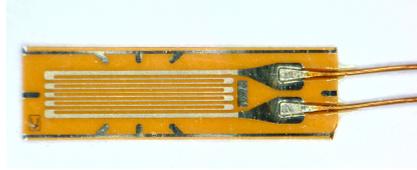


Figura 2 – Representação de uma strain gauge.

Fonte: (CHANG, 2017)

As *strain gauges* de uma célula de carga resistiva são usualmente ligadas entre si em uma configuração de Ponte de Wheatstone, como mostra a Figura 3. Este tipo de ligação é ideal para se mensurar variações de resistências. A tensão de saída desta configuração obedece a Equação 2.1.

$$V_o = \frac{R_1 R_3 + R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i \quad (2.1)$$

Em que:

- V_o = Tensão de saída;
- V_i = Tensão de entrada;
- R_1, R_2, R_3, R_4 = Resistências (strain gauges);

As resistências são escolhidas de forma que a Equação 2.2 seja verdadeira.

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2.2)$$

Essa relação se mantém verdadeira enquanto nenhuma força é aplicada à célula de carga, por consequência a tensão de saída (V_o) é zero. Neste momento, diz-se que a ponte está balanceada. Quando uma força é aplicada, uma ou mais resistências sofrem alteração, gerando um ΔR_i . Então a ponte fica desbalanceada e a tensão de saída se torna diferente de zero, proporcional à sensibilidade do equipamento (ARAUJO et al., 2012).

As células de carga também se diferenciam quanto a algumas de suas especificações, principalmente no que tange a capacidade máxima suportada. Um mesmo tipo de célula de carga pode ser capaz de mensurar um objeto de uma unidade de quilo até centenas de quilos. Essa disparidade gera uma variação nos valores comerciais de cada equipamento. Sendo assim, muitas vezes é necessário recorrer a sistemas de baixo custo, mas que apresentem uma desempenho de alta qualidade (PAČNIK; NOVAK, 2010; ZWIJZE et al., 1999).

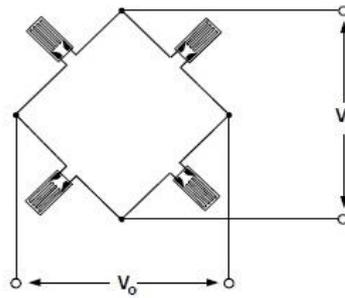


Figura 3 – Representação de uma Ponte de Wheatstone formada por quatro strain gauges.

Fonte: (ARAUJO et al., 2012)

Assim como qualquer outro dispositivo desenvolvido, células de carga precisam ser atestadas quanto à qualidade antes de serem comercializadas. Um equipamento bastante útil para testes de qualidade de produtos são as câmaras climáticas. Elas possibilitam ao usuário simular uma condição climática totalmente controlável. O principal intuito do uso desses equipamentos em projetos é aferir a qualidade e usabilidade dos produtos em teste nas mais variadas condições ambientes. Visto isso, é mais que natural que diversas pesquisas utilizam câmaras climáticas como instrumento de metodologia (BRIONIZIO, 2006)

Todos os sensores e circuitos eletrônicos estão sujeitos a interferências externas, não esperadas, como por exemplo a temperatura (BURNOS; GAJDA, 2016). As interferências levam o sistema a erros. Esse fator afeta negativamente um sistema de pesagem principalmente, devido às pequenas deformações físicas que acarreta nos componentes do circuito, na célula de carga em si e no objeto em teste (ZHANG et al., 2013). Um erro típico causado não só pela temperatura, mas também por outros fatores, é a histerese (MAKABE; KOHASHI, 2004). Especificamente para um sistema de pesagem, a histerese pode ser definida como a diferença de leituras da célula de carga para uma mesma massa em duas situações distintas: o aumento gradual de carga e o decréscimo gradual de carga (PAČNIK; NOVAK, 2010).

2.2 Materiais

2.2.1 Células de carga

As células de carga podem variar quanto ao tipo de sinal de saída fornecido. Os três principais tipos são apresentados a seguir:

- **Células de carga resistivas:** O modo de conversão da força aplicada à célula de carga em tensão de saída a torna peculiar. O método se baseia na variação de resistên-

cia de um elemento resistivo, comumente strain gauges, em relação a força exercida. A resistência desse elemento é proporcional à razão L/A (comprimento/área). Este tipo de célula de carga é o mais usado. Dentro desse grupo, os tipos mais comuns são: tipo S, bending beam, viga de flexão, canister, entre outros.

- **Células de carga hidráulicas:** Esses tipos de mecanismos atuam baseados em princípios hidráulicos. Quando uma força é aplicada sobre o pistão da célula, ele se move e ocasiona um movimento do diafragma da célula, que por sua vez aumenta a pressão do fluido confinado internamente no mecanismo. Essa variação de pressão é proporcional à carga. Dessa forma, é possível mensurar a massa aplicada.

As células de carga hidráulicas são amplamente usadas em ambiente de risco, principalmente por não possuírem componentes eletrônicos, bem como por apresentarem aspecto robusto e desempenho seguro (PAČNIK; NOVAK, 2010; ZWIJZE et al., 1999).

- **Células de carga pneumáticas:**

Geralmente é mais exata que a hidráulica, sendo composta por várias câmaras de amortecimento para pesagem. É usada principalmente para pesagem de pequenas massas em ambientes necessariamente limpos e higienizados.

2.2.1.1 Células de carga de ponto único

Este tipo de célula de carga se enquadra dentro do grupo de células resistivas. Como já foi explicado, seu funcionamento se baseia na variação da resistência de um elemento resistivo, comumente uma *strain gauge*. Assim como equipamentos similares, esse tipo de célula de carga também apresenta alta robustez, alta precisão e confiabilidade.

Diferentemente das demais células de carga desta categoria, as células de carga de ponto único possuem uma característica peculiar e extremamente interessante para aplicações nas quais a precisão de medições é importante. As leituras são insensíveis à posição do objeto na plataforma de pesagem. Por causa disso, são amplamente utilizadas individualmente em balanças, máquinas de empacotamento, pesagem de transportadoras, além de estudos científicos, como nos projetos desenvolvidos por Fitzgerald et al. (2015), Lee et al. (2016) e Choi et al. (2009).

2.2.2 Microcontrolador

Os microcontroladores são considerados como um dos grandes adventos da revolução computacional, junto com o próprio computador de mesa. Atualmente, encontram-se em qualquer aparelho eletrônico, seja em carros, computadores, brinquedos, televisões ou outros. Esse pequeno dispositivo tem uma capacidade de processamento muito grande, oferece ao usuário variados recursos, ampliando sua área de aplicação, além de ser de

baixo custo e fácil de ser implementado em circuito devido justamente às suas dimensões reduzidas

2.2.2.1 Microcontrolador PIC

Dentre os diversos tipos de microcontroladores existentes no mercado, destaca-se o Microchip PIC. Ele apresenta baixo custo, inúmeras funcionalidade inclusas, alto desempenho, além de uma ampla variedade de tutoriais e suportes técnicos disponíveis gratuitamente. Tudo isso ajudou a consolidar o PIC como o melhor e mais conhecido microcontrolador dentre todos (SANCHEZ; CANTON, 2006).

O microcontrolador PIC escolhido para este trabalho foi o PIC18F25K80. Esse dispositivo de 8 bits apresenta alta performance, aliado a um consumo de energia bastante reduzido.

Algumas características do instrumento são listadas a seguir:

- Tensão de operação: 1,8V ~ 5,5V;
- Conversor analógico-digital de 12 bits;
- 4 módulos *Capture/ Compare / PWM*;
- 2 módulos USART avançados;
- Alta economia de energia no modo *sleep*;

A pinagem do equipamento pode ser vista na Figura 4.

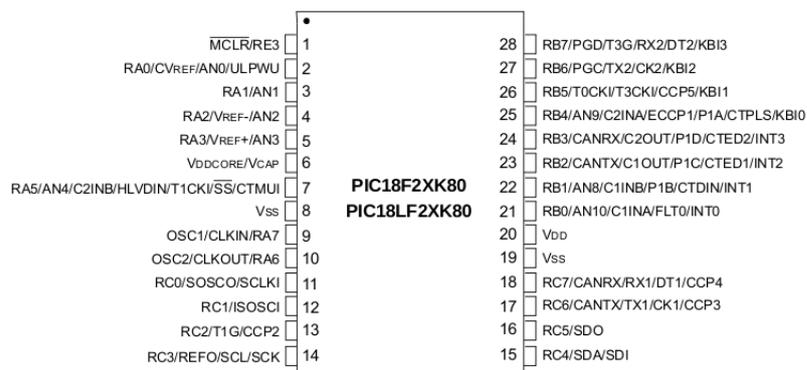


Figura 4 – Diagrama de conexão do AD620 usado neste trabalho.

(DEVICES, 2011)

Dentre as características do microcontrolador apresentadas, talvez a mais essencial ao projeto foi a resolução do conversor AD. O conversor do dispositivo é de 12 bits,

portanto uma tensão de até 5V pode ser representada por até 4096 pontos, garantindo uma maior exatidão nas leituras.

2.2.3 AD620

O AD620 é um amplificador de baixo custo e alta precisão, e também oferece boa compensação, alta imunidade a ruídos, baixa corrente de operação e baixo consumo de energia, tornando-o ideal para aplicações que requerem precisão, como sensores de peso, e também para aplicações médicas, como monitoramento de ECG (DEVICES, 2011). Isto se comprova pelos diversos estudos encontrados na literatura que se utilizam deste amplificador e reiteram sua qualidade (DEVICES, 2011; LEE et al., 2016; CHOI et al., 2009). A representação do seu diagrama de conexão pode ser visto na Figura 5.

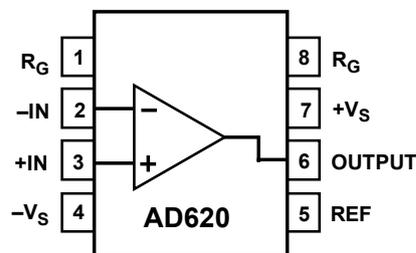


Figura 5 – Diagrama de conexão do AD620 usado neste trabalho.

(DEVICES, 2011)

O cálculo do ganho gerado pelo amplificador é bastante simples e gira em torno de um único resistor. Tal resistor se configura como a impedância imposta entre os pinos 1 e 8 do AD620. A Equação 2.3 demonstra o cálculo do ganho do dispositivo.

$$G = \frac{49,9k}{R_g} + 1 \quad (2.3)$$

Em que:

- G = ganho desejado;
- R_g = Resistor entre pinos 1 e 8, Ω ;

2.2.4 Câmara climática

Câmaras climáticas são equipamentos capazes de simular em seu interior diferentes condições climáticas para testes. Nela, variáveis como umidade, temperatura, velocidade do vento, irradiação, vácuo, névoa, entre outras, são controladas pelo manipulador, de forma a possibilitar o seu manuseio de qualquer forma necessária (BRIONIZIO, 2006).

Sua aplicação é de extrema importância no campo científico e industrial. Antes de ser posto no mercado, todo e qualquer produto deve antes ser testado sob as condições climáticas as quais ele possivelmente será submetido. Dessa forma, é possível de antemão, detectar alguma falha ou comportamento tendencioso, além de avaliar o desempenho próprio do produto (CÂNDIDO, 2006).

Neste trabalho, foi usada a câmara climática KPK200 desenvolvida pela empresa Feutron Klimasimulation GmbH, que pode ser vista na Figura 6. Este equipamento permite um controle da temperatura e umidade. Ela possui um microprocessador embutido, sendo possível programá-la de forma a atender as exigências do experimento.



Figura 6 – Foto da câmara climática usada no experimento.

(DRESDEN, 2017)

2.2.5 LM35

O LM35 é um circuito integrado (CI) de alta precisão, caracterizado por ter sua saída linearmente proporcional à temperatura em grau Celsius. Mais especificamente, são 10mV de tensão para cada grau Celsius de temperatura. Esta é uma grande vantagem em relação a outros sensores similares que tem resposta referente a temperatura em Kelvin, não há necessidade do usuário fazer a conversão para Celsius.

Além disso, não requer calibração prévia, apresenta baixo custo, alta confiabilidade e fácil método de medição (LIU et al., 2011). Um desenho do sensor pode ser visto na Figura 7.

Destacam-se alguns de seus parâmetros.

- Tensão de trabalho: 4V ~ 30V;
- Tensão de saída: +6V ~ 1V;

- Faixa de medição: $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$;
- Corrente de operação: menos de $133\mu\text{A}$;
- Precisão (a 25°C): $0,5^{\circ}\text{C}$;

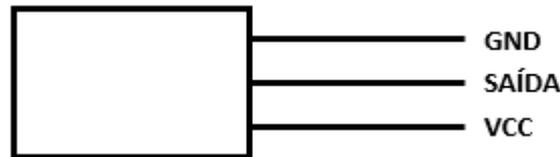


Figura 7 – LM35 com pinagem correspondente.

2.2.6 Visual Studio

O Visual Studio é uma ferramenta desenvolvida pela Microsoft que incorpora os mais recentes avanços da empresa. Com um suporte para programação em diversas linguagens, como por exemplo C, C++, C-Sharp, Java, Visual Basic e NET Framework, os usuários podem criar incontáveis e diferentes aplicações (JOHNSON, 2012).

A partir deste software, foi criado um sistema supervisorio no qual todos os dados provenientes da célula de carga e do circuito são armazenados e exibidos ao usuário. Além disso, o supervisorio também tem a função de dar o primeiro tratamento nos dados da célula. Cada amostragem de dado exibida, na verdade é a média de 40 dados colhidos. Isto reduz o surgimento de outliers, ou seja, pontos de valores muito fora da curva, que apresentarão resultado insatisfatório e que serão descartados posteriormente. Todos os dados são armazenados em um banco de dados, que pode ser exportado para a ferramenta Excel para tratamento.

2.2.7 Proteus

O Proteus VSM é a ferramenta para simulação de dispositivos embutidos e eletrônica mais difundida e usada na engenharia pelo mundo. Com uma interface bastante amigável, simples de se aprender, este software é usado por desde engenheiros formandos quanto por pessoas iniciantes na área (ELECTRONICS, 2017).

Dentre suas inúmeras ferramentas, destaca-se claramente, a possibilidade de realizar simulações de circuitos com microcontroladores de maneira fiel à realidade. Isso proporciona ao usuário maior garantia de que seu sistema está adequado antes de ser confeccionado em uma placa de circuito impresso (PCI). Isto reduz falhas no circuito, tempo de confecção e

componentes usados na placa. No que tange a elaboração de PCI's, o Proteus ainda possui uma ótima integração entre seu ambiente ISIS, onde é feito o esquemático do circuito, e o ambiente ARES, que transforma o esquemático na forma de um layout de PCI.

Todos os circuitos usados neste projeto foram previamente desenhados, analisados e simulados no Proteus através da sua ferramenta ISIS. Uma vez finalizados todos os testes, foram desenhados os layouts referentes a cada circuito no ARES. Nele, tomou-se um cuidado especial com o roteamento, por razões de funcionalidade e segurança do sistema. O desenho em formato .bitmap da PCI é então exportado ao software ARTICAM, de onde será feito o mapeamento, que propiciará à CNC os dados para a confecção final da PCI.

2.2.8 Xbee - XCTU

O Xbee é um sistema completo, formado por gateways, adaptadores e software criado para possibilitar uma interação sem fio entre diversos componentes e implementações. Eles contemplam uma vasta gama de protocolos e frequências nas quais podem trabalhar, como por exemplo ZigBee, Thread, Wi-Fi, 802.15.4, Digi Mesh, e outros (DIGI, 2017).

Módulos Xbee são amplamente difundidos dentro da área de comunicação sem fio, devido a sua alta portabilidade, baixo custo, tamanho reduzido, baixa manutenção e baixo consumo. Através deles se criam redes sem fio, que são a combinação de sensores e protocolos de comunicação sem fio que garantem uma troca de informações segura (BOONSAWAT et al., 2010).

O XCTU é uma aplicação multiplataforma que garante uma interação simples e intuitiva entre um computador e os módulos Digi RF. Por meio de um interface gráfica amigável, o usuário tem acesso a várias ferramentas e informações, como por exemplo, uma visão da rede formada pelo módulos Xbee, bem como a força do sinal em cada nó. É possível configurar ainda cada dispositivo da rede e uma série de outras funcionalidades.

3 Metodologia

3.1 Circuito eletrônico

O circuito eletrônico desenvolvido usa como base um sistema criado por Segundo et al. (2015). Dele, foram utilizados o projeto de alimentação do circuito, o firmware do microcontrolador PIC e o sistema de envio de dados via Xbee para um supervisor.

Acrescentado a isso, elaborou-se um circuito de coleta e tratamento de sinal, chamado de placa de ganho. Ele tem a função de receber os valores enviados pela célula de carga, filtrá-los e condicioná-los de uma forma que o microcontrolador os reconheça e seja capaz de manipulá-los. O circuito completo é mostrado na Figura 8.

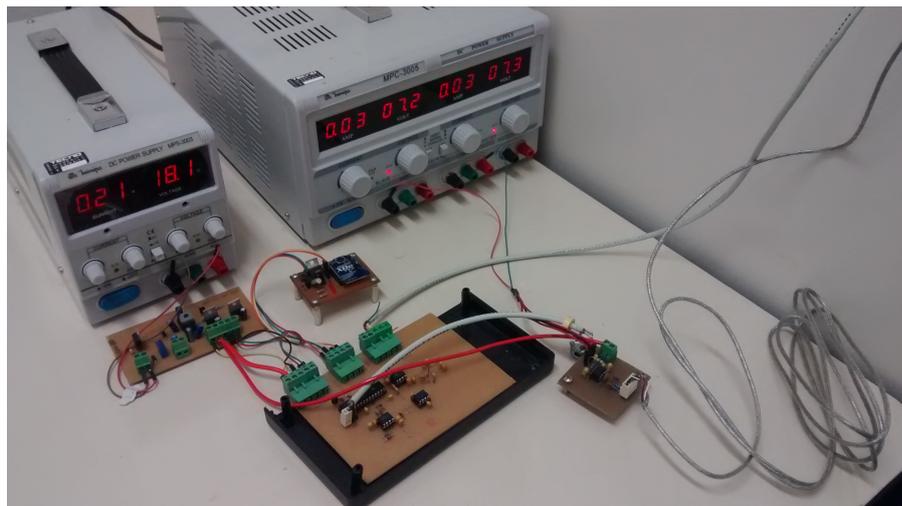


Figura 8 – Imagem do circuito de pesagem desenvolvido.

3.1.1 Circuito de condicionamento de sinais

A Figura 9a apresenta o esquemático do circuito completo que compõe a placa de ganho. Este circuito foi desenvolvido no software Proteus. Uma vez finalizado o esquemático, é possível gerar uma imagem em 3D do circuito em placa impressa, como mostra a Figura 9b.

Analisando o circuito apresentado na Figura 9a, identifica-se alguns pontos específicos importantes para o bom funcionamento do sistema. Foram inseridos filtros passa baixa (circuito RC) nas entradas de sinais do amplificador. Sua função é eliminar quaisquer

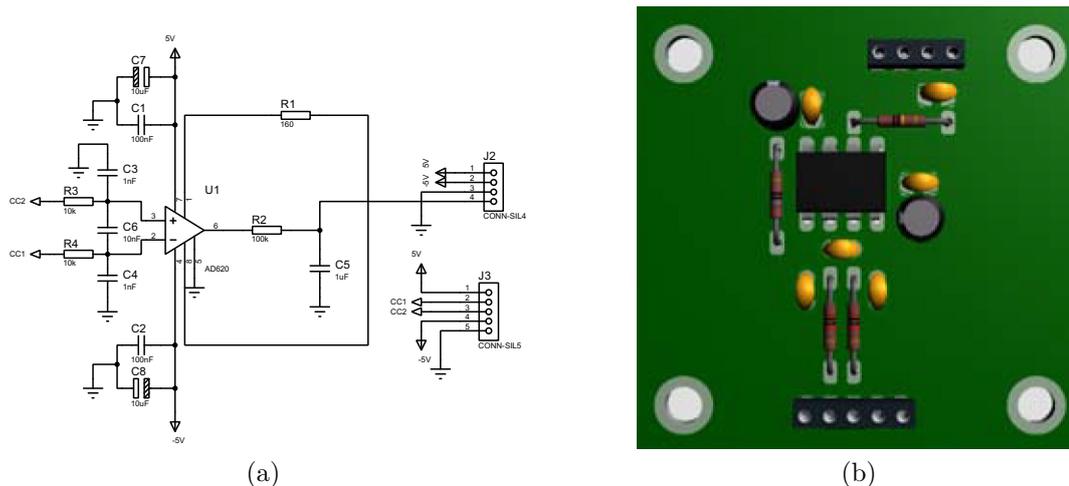


Figura 9 – (a) Esquemático da placa de ganho desenhado pelo software Proteus; (b) Desenho 3D da placa de ganho.

ruídos RF comuns a circuitos eletrônicos que distorcem as leituras (DEVICES, 2011). Essa técnica garante que sinais de alta frequência sejam filtrados. Dada a configuração dos capacitores usados, sinais de frequência acima de 757Hz foram filtradas.

Todo circuito eletrônico está suscetível a interferências, que possuem várias fontes. Devido à grande densidade de componentes, é esperado que interferências eletromagnéticas (EMI) e outros tipos de ruídos sejam emitidos por alguns dispositivos e afetem outros (SU; SAPATNEKAR; NASSIF, 2003; ALAELDINE et al., 2008). Um componente que apresenta alto fator de poluição para o circuito são as fontes chaveadas, que durante o chaveamento, geram ruídos. Alguns estudos ainda dizem que os CI's são as principais fontes de ruídos (LABUSSIÈRE-DORGAN et al., 2008). Devido a esse problema recorrente, foi inserido ao circuito capacitores de desacoplamento, uma importante técnica para redução de interferência proveniente das fontes. Diversos estudos preveem técnicas de determinar o tamanho e a posições desses em um circuito, umas vez que são determinantes. Também chamados de Decaps, os capacitores de desacoplamento devem ser postos o mais próximo possível do circuito integrado (FAN et al., 2001; GU; EOM; KIM, 2009).

Por fim, ainda como ferramenta para atenuação de ruídos e interferências, foram postos duas peças *ferrite bead* nos cabos de transmissão de sinal, uma no cabo da célula de carga para a placa de ganho e outra da placa de ganho para o microcontrolador. Optou-se por este componente por ser reconhecidamente eficiente na atenuação de EMI (PARKER, 1992).

3.2 Funcionamento do sistema

O funcionamento do sistema é bastante simples, apesar de abranger uma série de componentes que trabalham individualmente de forma complexa.

O sinal analógico proveniente da célula de carga é bastante pequeno, na casa dos mV, e para que o PIC possa lê-los é preciso aplicar um ganho a esse sinal. O componente escolhido para este propósito foi o AD620. O seu cálculo de ganho é bastante simples, como já foi apresentado na Equação 2.3.

Este sinal então amplificado, é transmitido para o PIC, onde será tratado. Após isso, os dados serão enviados a um supervisor através de um módulo Xbee. A taxa de transmissão de dados é pré-determinada pelo usuário antes de se iniciar os testes via software. O supervisor então é encarregado de organizar e exibir os dados ao usuário. Existe também uma função do supervisor de exportar os dados armazenados para que seja feita a análise adequada.

3.3 Experimentos

A parte prática deste trabalho foi dividida em duas etapas: a primeira consiste nos testes aplicados à célula de carga de baixo custo e a segundo à célula de carga industrial. Ambas seguiram o mesmo roteiro de testes, com apenas algumas particularidades entre elas.

3.3.1 Considerações gerais

Antes de cada teste, o circuito foi cuidadosamente checado quanto a qualquer mal funcionamento. A célula de carga, junto ao LM35, foram colocados no interior da câmara climática e essa era programada. Só então, dava-se início aos experimentos.

Foram usadas cinco massas padrões como referência de testes, 0g, 100g, 200g, 300g (as massas de 100g e 200g combinadas), e 500g. Uma vez que cada massa era disposta sobre a célula de carga, as medições eram iniciadas.

O ambiente no qual a célula de carga estava inserido era controlável. O equipamento utilizado possibilitava a manipulação de dois fatores, temperatura e umidade. Para este trabalho, apenas a temperatura foi considerada. A programação usada buscou expor o equipamento a uma grande faixa de temperatura, visando avaliar sua resposta para as distintas condições.

A programação da câmara climática se deu da seguinte forma: a temperatura inicial foi estabelecida como sendo 10°C, a temperatura então se elevava em degraus de 2,5°C até atingir o máximo de 57,5°C. Cada degrau se mantinha constante por 20 minutos. Uma vez

finalizada a etapa de incremento da temperatura, dava-se início ao processo de decaimento, no qual a temperatura decrescia na mesma proporção até alcançar o limite de 10°C. Os dados eram coletados a cada 10 segundos.

3.3.2 Experimento I - Célula de carga de baixo custo

Nesta parte do experimento, foi usada uma célula de carga de ponto único, modulo FGL de capacidade até 5kg produzida pela FEFA SENSORES, conforme pode ser visto na Figura 10. O preço deste equipamento foi de aproximadamente R\$ 80,00.

Um resistor de 57 Ω foi usado para ajuste de ganho, proporcionando um ganho de aproximadamente 868. Com o auxílio de um multímetro, verificou-se a tensão recebida pelo circuito proveniente da célula de carga para cada massa, após ser aplicado o ganho.

Considerando os dois extremos, quando a célula de carga estava a vazio, uma tensão de cerca de 0,8V era mandado ao circuito, já com a maior massa, 500g, lia-se uma tensão de aproximadamente 3,25V.



Figura 10 – Célula de carga de ponto único usada neste trabalho.

(SENSORES, 2015)

Algumas especificações técnicas da célula de carga são apresentadas a seguir:

- Material do equipamento: Alumínio anodizado;
- Sensibilidade: 2.0 ± 0.1 mV/V;
- Máxima tensão: 15V;
- Capacidade máxima: 5Kg;
- Impedância de entrada: $410 \pm 30 \Omega$
- Impedância de saída: $350 \pm 03 \Omega$

A Figura 11 mostra a montagem da célula de carga sob uma base já inserida no interior da câmara climática. Nesta mesma figura, identifica-se o LM35 usado para a aferição da temperatura a cada medição do sistema.



Figura 11 – Montagem mecânica da célula de carga de baixo custo ligada ao sistema.

3.3.3 Experimento II - Célula de carga industrial

Neste experimento, usou-se um resistor de ganho de 18Ω . Este valor foi escolhido para que nesta etapa, a faixa de tensão aplicada pela célula de carga fosse semelhante à etapa anterior. Para a célula de carga a vazio, a tensão lida após o ganho ser aplicado era aproximadamente $0,2V$, já para a massa de $500g$, a tensão era cerca de $2,39V$.

A célula de carga escolhida para esta parte do trabalho foi uma LCEC-50 do tipo Minibeam fabricada pela empresa OMEGA, custando R\$ 1900,00. Uma imagem da célula de carga é apresentada na Figura 12 . Esse equipamento possui alta robustez, precisão e repetibilidade, além de já incluir internamente uma compensação de temperatura nas suas leituras.



Figura 12 – Célula de carga industrial utilizada neste trabalho.

(OMEGA, 2017)

Algumas especificações técnicas da célula de carga são apresentadas a seguir:

- Material do equipamento: Alumínio anodizado;

- Sensibilidade: 3.0 mV/V;
- Compensação premium de temperatura: 0,0008%/°F;
- Máxima tensão: 15V;
- Capacidade máxima: ~23Kg;
- Impedância de entrada: $350 \pm 50 \Omega$
- Impedância de saída: $350 \pm 03 \Omega$

A Figura 13 expõe a montagem mecânica usando a célula de carga industrial para o experimento II.



Figura 13 – Montagem mecânica da célula de carga industrial ligada ao sistema.

3.4 Supervisório

A criação de um sistema supervisório único para a aplicação não foi o objetivo deste trabalho. Tendo isso em vista, foi utilizado o sistema supervisório desenvolvido por Segundo et al. (2015). A Figura 14 mostra a tela inicial. De todos os recursos disponíveis, foram empregadas as ferramentas para estabelecer a comunicação com o módulo Xbee, os campos para inserção de modelos e além é claro os botões para controle da aquisição de dados.

O campo para inserção de modelos é indispensável para este trabalho. Afinal, uma vez que se tenha definido o modelo final para compensação de temperatura do sistema, é através desta função que tal modelo será aplicado ao programa. E assim, o dado que será entregue ao usuário passará não mais a ser um sinal de conversão AD como inicialmente, mas sim, um valor em unidade de peso.

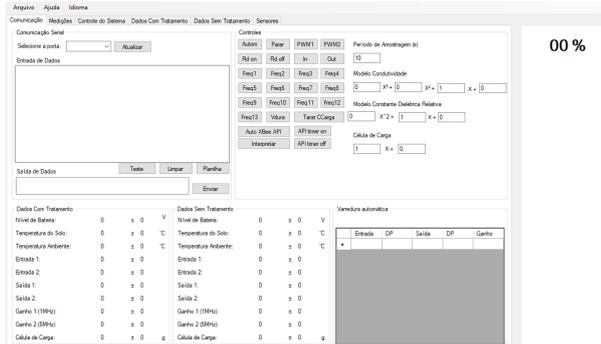


Figura 14 – Tela inicial do sistema supervisorio usado neste trabalho.

Já a Figura 15 mostra a tela do supervisorio que expõe todos os dados coletados. Cada “pacote de dados” que chega ao supervisorio é separado em diversas informações que são então armazenadas. Para o presente trabalho, as informações pertinentes eram principalmente as referentes à temperatura e sinal da célula de carga. Vale ressaltar que ainda nesta tela, o botão “Exportar” permite o envio dos dados para um arquivo Excel, o qual posteriormente é manipulado para analise.

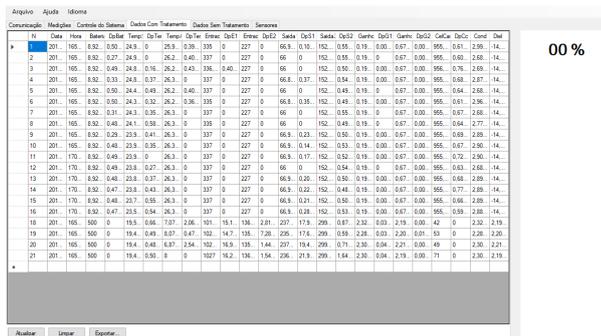


Figura 15 – Tela de dados coletados do sistema supervisorio usado neste trabalho.

3.5 Análise de dados

Segundo Simmons, Nelson e Simonsohn (2011), análises estatísticas indevidas representam muitas vezes informações insatisfatórias como significantes, configurando os resultados como falsos positivos. Tendo isso em vista, teve-se um extremo cuidado com a análise estatística de forma a extrair o máximo das informações e chegar a conclusões condizentes com a realidade dos resultados. Afinal, foram coletados milhares de dados.

A seguir, são expostos os métodos e ferramentas estatísticas usadas na manipulação dos dados obtidos neste trabalho.

3.5.1 Correlação de Pearson

Um coeficiente de correlação indica o quão forte é a relação linear entre duas variáveis, bem como a direção dessa relação. Dentre os métodos de correlação, destaca-se o método de correlação de momento de produto de Pearson, ou simplesmente, método de Pearson. Esta técnica avalia especificamente a relação linear entre duas variáveis contínuas.

3.5.2 Histerese

A porcentagem (%) de histerese para cada uma das células de carga usadas neste trabalho foi mensurada por meio de um método analítico. Para o teste, foram considerados apenas os valores referentes à temperatura de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, a mesma temperatura usada na calibração do sistema, para os modelos de Subida e Descida concomitantemente.

Os valores foram gerados através do método analítico baseado na Equação 3.1 e Equação 3.2.

$$X_m = \left(\frac{X_{max} - X_{min}}{2} \right) + X_{min} \quad (3.1)$$

$$H_{\%} = \left| \frac{Y_{md} - Y_{ms}}{Y_{max} - Y_{min}} \right| * 100\% \quad (3.2)$$

- X_m = Valor de X médio;
- X_{max} = Valor de X máximo;
- X_{min} = Valor de X mínimo;
- $H_{\%}$ = Valor da histerese;
- Y_{md} = Valor de Y em X_m para modelo de descida;
- Y_{ms} = Valor de Y em X_m para modelo de subida;
- Y_{max} = Valor de X máximo;
- Y_{min} = Valor de X mínimo;

3.5.3 Regressão linear múltipla

Uma regressão linear múltipla (RLM) é necessária quando mais de uma variável é preditora de um processo. Ela então avalia as relações lineares entre as variáveis predictoras e a variável resposta. Ainda é possível prever como determinadas combinações de variáveis irá afetar o sistema como um todo.

3.5.4 Parâmetros

O R^2 representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Um R^2 alto, próximo ou igual a 1, indica que o modelo se adequa bem aos dados e garante mais confiabilidade. No entanto, tal parâmetro deve ser analisado com cuidado, uma vez que ele é suscetível ao tamanho da amostra analisada. Uma aumento no número de dados aumentará o valor de R^2 , dando uma falsa impressão de melhora do modelo, mesmo que isso não se comprove na prática. Para sanar essa deficiência, usa-se o R^2 ajustado, $R^2(aj)$, pois ele agrega o número de elementos ao modelo de forma a deixá-lo mais correto.

O parâmetro Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) por sua vez, indica a diferença média entre os valores gerados e os valores reais. Ou seja, o quão errado o modelo está em média, na unidade da própria resposta. Logo, quanto menor este valor, mais preciso é o modelo.

E o coeficiente angular da reta gerada pela regressão linear entre variáveis também é usada como parâmetro de comparação entre modelos. Quanto mais próximo de 1, melhor a equação.

4 Resultados e discussão

Os dados foram separados em três diferentes categorias para testes: a primeira composta pelos dados coletados durante o processo de subida da temperatura; a segunda referentes aos dados coletados no processo de descida da temperatura; e uma terceira categoria considerando as duas anteriores combinadas. As categorias foram respectivamente nominadas de Subida, Descida e Subida/Descida.

A separação foi realizada de forma a avaliar se o modelo final gerado seria insensível ou não a direção de mudança da temperatura, em outras palavras, se o fenômeno de histerese é relevante ou não ao sistema.

4.1 Correlação entre variáveis

A Tabela 1, mostra os valores do coeficiente da correlação de Pearson (ρ) para cada categoria e para cada uma das diferentes massas testadas no circuito do experimento I, levando-se em conta as variáveis: "Temperatura" e "Sinal do Sistema". Como pode ser observado, todos os valores se encontram próximos de -1. O valor negativo indica uma relação inversa de direção de crescimento, isto é, enquanto uma variável cresce, a outra decresce. No entanto, o que é mais pertinente para este trabalho, é o fato dos valores estarem próximos de $|1|$, pois como era esperado, percebe-se a existência de uma relação forte entre as duas variáveis, uma vez que são dados coletados em um mesmo momento pelos sensores, e não há nenhuma forma de compensação inicial.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de correlação de Pearson para os testes realizados durante o experimento I.

Correlação de Pearson - ρ					
	0g	100g	200g	300g	500g
Subida	-0,799	-0,960	-0,990	-0,986	-0,977
Descida	-0,726	-0,980	-0,994	-0,981	-0,966
Subida/Descida	-0,758	-0,969	-0,991	-0,980	-0,889

Já na Tabela 2, que aponta os valores do coeficiente de Pearson para os testes no experimento II, a situação é a inversa, os valores de ρ são próximos de 0, indicando uma relação fraca, quase inexistente entre as duas variáveis. O que também era esperado, visto que esta célula de carga possui compensação interna de temperatura.

Tabela 2 – Valores do coeficiente de correlação de Pearson para os testes realizados durante o experimento II.

Correlação de Pearson - ρ					
	0g	100g	200g	300g	500g
Subida	0,171	0,100	-0,110	-0,890	-0,012
Descida	0,138	0,142	0,748	-0,059	-0,307
Subida/Descida	0,133	0,168	-0,283	-0,496	-0,198

4.2 Histerese em peso

A princípio, buscou-se garantir a presença ou não da histerese no sistema, pois, a partir da resposta dessa questão, a escolha para elaboração e uso dos modelos de compensação de temperatura seria feita.

É importante frisar que, esta primeira análise avalia a histerese em relação à massa, ou seja, se o sistema mede de forma diferente a massa quando ela aumenta ou diminui.

Os resultados são apresentados na tabela Tabela 3.

Tabela 3 – Valor em % da histerese em peso para as células de carga.

	Histerese (%)
CC de baixo custo	0,0617
CC industrial	0,0275

Pela análise da Tabela 3, vê-se que os valores de histerese para o peso de ambas as células são muito pequenos e, por consequência, foram desprezados.

4.3 Ajuste de modelos matemáticos

4.3.1 Modelos à temperatura de referência para experimento I

Os primeiros modelos foram gerados levando-se em conta os dados à $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$. A temperatura de 20°C é a temperatura referência de calibração na metrologia dimensional. Tais modelos geraram resultados ainda sensíveis à variação de temperatura, no entanto, servem de orientação para o desenvolvimento do modelo final, com compensação de temperatura.

A princípio, esperava-se que a relação entre as variáveis fosse linear, no entanto, por meio de técnicas de software, percebeu-se que a relação que mais se adequava ao modelo era polinomial, levando a modelos da ordem de segundo grau. A Figura 16 mostra a linha de tendência do modelo de cada uma das categorias testadas.

A Equação 4.1, Equação 4.2 e Equação 4.3 representam respectivamente, os modelos referentes à Figura 16a, Figura 16b, Figura 16c.

$$Y = -135,1 + 0,2510X - 0,000008X^2 \quad (4.1)$$

$$Y = -122,1 + 0,2352X - 0,000003X^2 \quad (4.2)$$

$$Y = -134,3 + 0,2507X - 0,000008X^2 \quad (4.3)$$

Em que:

- Y = Massa medida;
- X = Sinal da célula de carga à temperatura de $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$;

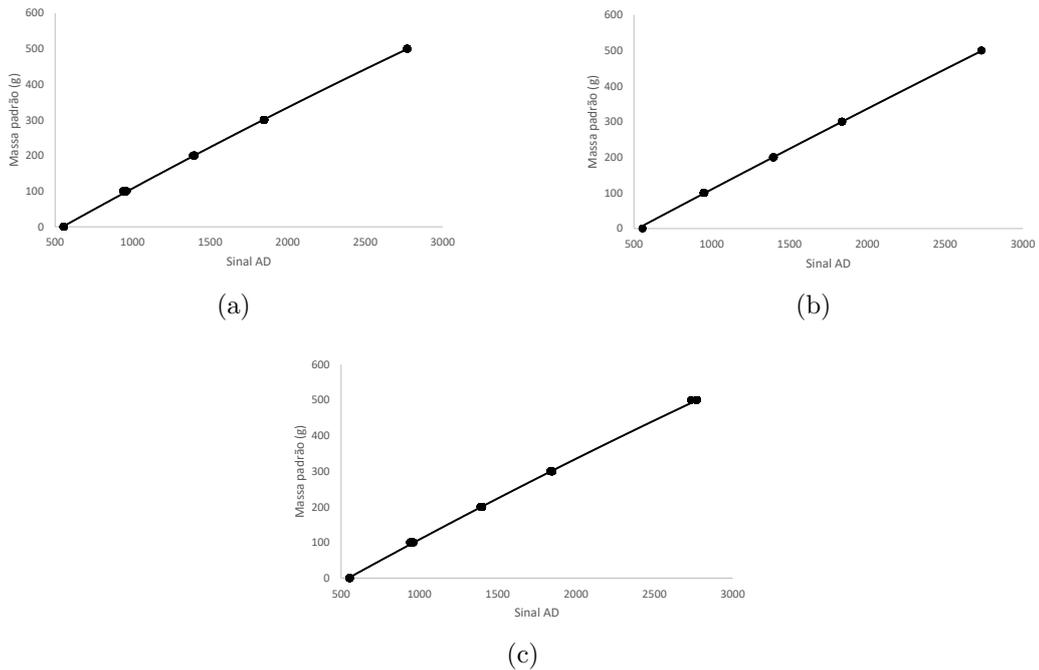


Figura 16 – Gráfico de linha ajustada para modelos na subida (a) descida (b) e subida/descida (c);

4.3.2 Modelos finais com compensação de temperatura para experimento I

A partir dos modelos iniciais já se tinha resultados em unidades de peso. Mas a interferência da temperatura ainda é presente nesses modelos. De forma a eliminá-la, aplicou-se uma ferramenta que realiza uma RLM, em que se tem a temperatura e os valores

gerados pelo modelo inicial como variáveis independentes. Diferente do primeiro modelo, insere-se os dados da temperatura de forma que o modelo seja capaz de, a partir do valor desta variável, compensá-la levando-se em conta a referência de 20°C por meio do modelo inicial.

A Equação 4.4, Equação 4.5 e Equação 4.6 representam os modelos finais gerados pela RLM para as categorias de Subida, Descida e Subida/Descida respectivamente.

$$Y = -6,9160 + 0,42606X_1 + 0,997509X_2 \quad (4.4)$$

$$Y = -8,6798 + 0,37516X_1 + 0,999863X_2 \quad (4.5)$$

$$Y = -7,0669 + 0,40420X_1 + 1,00107X_2 \quad (4.6)$$

Em que:

- Y = Massa medida;
- X_1 = Temperatura;
- X_2 = Resposta do modelo inicial;

Tanto os modelos iniciais quanto os finais têm como resposta valores em unidade de peso. O que os difere é a compensação de temperatura implícita aos modelos finais. Visto isso, é esperado que os resultados obtidos pelos modelos iniciais não apresentem alta precisão, devido à interferência de temperatura. Já os resultados dos modelos finais devem apresentar uma acurácia melhor, uma vez que são imunes à mudança da mesma. A Figura 17, mostra uma comparação de resultados para todas as temperaturas analisadas no experimento em cada etapa, considerando os modelos iniciais e finais.

Como visto na Figura 17a, os resultados para os modelos iniciais são mais dispersos sobre um ponto, por causa da falta de compensação de temperatura. Também é nítido a melhora da acurácia nos resultados obtidos pelos modelos finais, os marcadores dos gráficos praticamente se confundem devido a alta repetibilidade dos dados.

4.3.3 Modelo para experimento II

Os testes realizados neste experimento foram uma reprodução do primeiro experimento, tendo como única diferença, a célula de carga utilizada.

Visto isso, aplicou-se as mesmas técnicas de software para a obtenção dos modelos, que são expressos na Equação 4.7, Equação 4.8 e Equação 4.9.

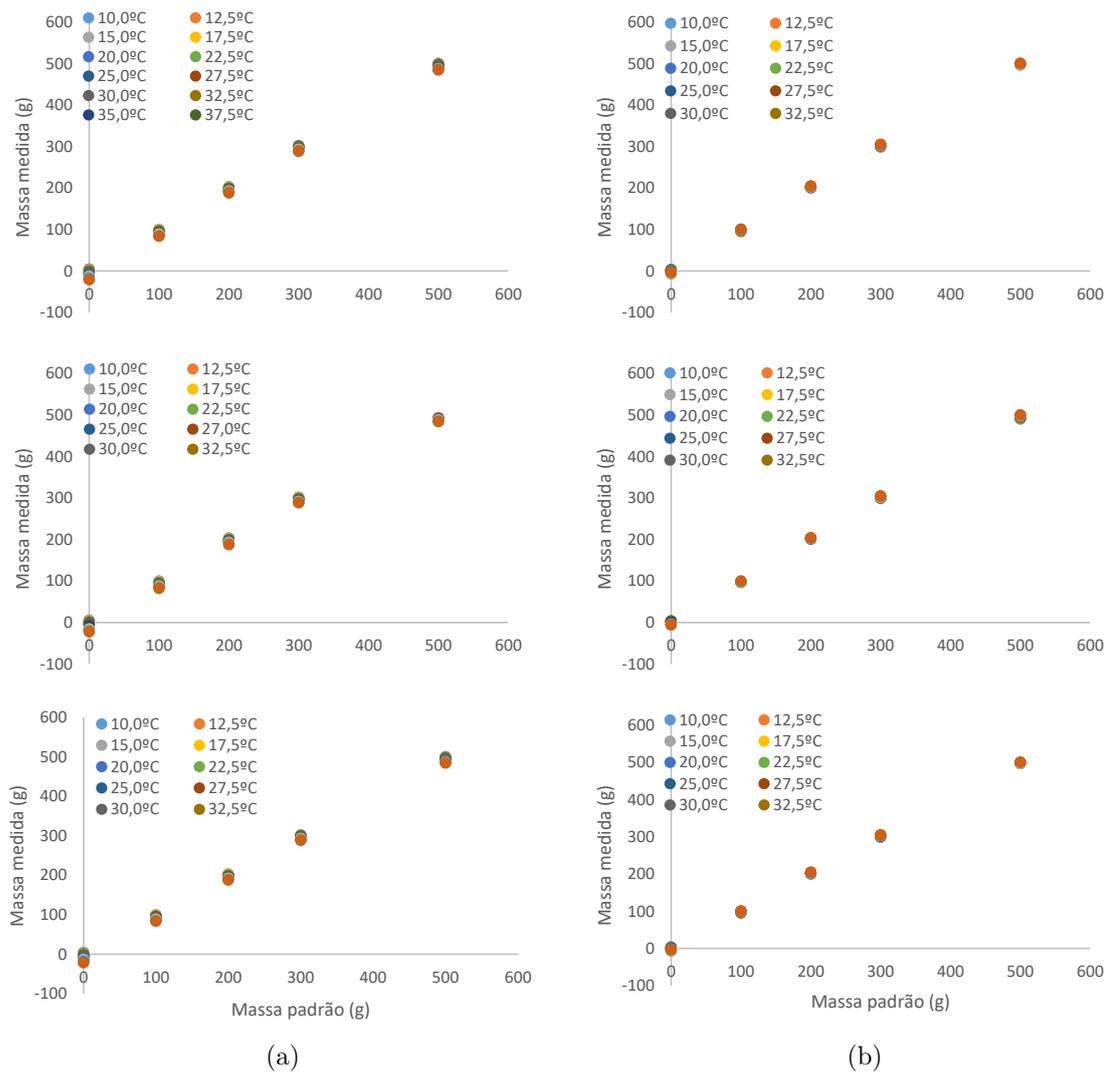


Figura 17 – Relação entre valores de massa medidas com massa testadas para modelos sem compensação de temperatura (a) e modelos com compensação de temperatura (b) para as etapas de subida, descida e subida/descida respectivamente.

$$Y = 0,494 + 0,08861X_1 + 1,00643X_2 \quad (4.7)$$

$$Y = -5,778 + 0,08393X_1 + 0,01103X_2 \quad (4.8)$$

$$Y = -2,069 + 0,05202X_1 + 1,00960X_2 \quad (4.9)$$

Em que:

- Y = Massa medida;
- X_1 = Temperatura;

- X_2 = Resposta do modelo inicial;

4.4 Histerese de temperatura

O mesmo método analítico apresentado anteriormente foi usado novamente, agora nos dados provenientes dos modelos finais. O objetivo foi identificar se a mudança de temperatura alterava o modelo de leitura do sistema.

A Tabela 4 apresenta os resultados da histerese em % para as duas células de carga. Ambos os resultados são pequenos, e novamente, o efeito da histerese é negligenciado.

Tabela 4 – Valor em % da histerese em temperatura para as células de carga.

	Histerese (%)
CC de baixo custo	0,2037
CC industrial	0,1374

4.5 Comparações

4.5.1 Comparação de modelos finais do experimento I

O intuito desta comparação é identificar qual modelo é mais apropriado ao sistema. Para tal, foram plotados três gráficos. Em cada um, é feita uma correlação entre dois modelos, e gerada uma linha de tendência com interseção no ponto zero. A partir disto, avalia-se o coeficiente angular das retas obtidas.

Todos os coeficiente angulares têm valor próximo de 1, assim como o valor de R^2 , como mostra a Figura 18.

Este fato comprova a equivalência dos modelos, ou seja, apesar de não serem idênticos na estrutura, são equivalentes nos resultados. Portanto, qualquer um dos três modelos pode ser empregado pelo sistema.

Logo, optou-se pelo modelo apresentado na Equação 4.6, referente à categoria Subida/Descida.

4.5.2 Comparação de Células de Carga

Uma vez escolhido o modelo do experimento I para o sistema, ele foi comparado com o modelo do experimento II referente à mesma categoria, representado pela Equação 4.9. O intuito é atestar a qualidade do sistema para as diferentes células de carga.

A Tabela 5 expõe três parâmetros de qualidade que foram comparados entre os dois modelos.

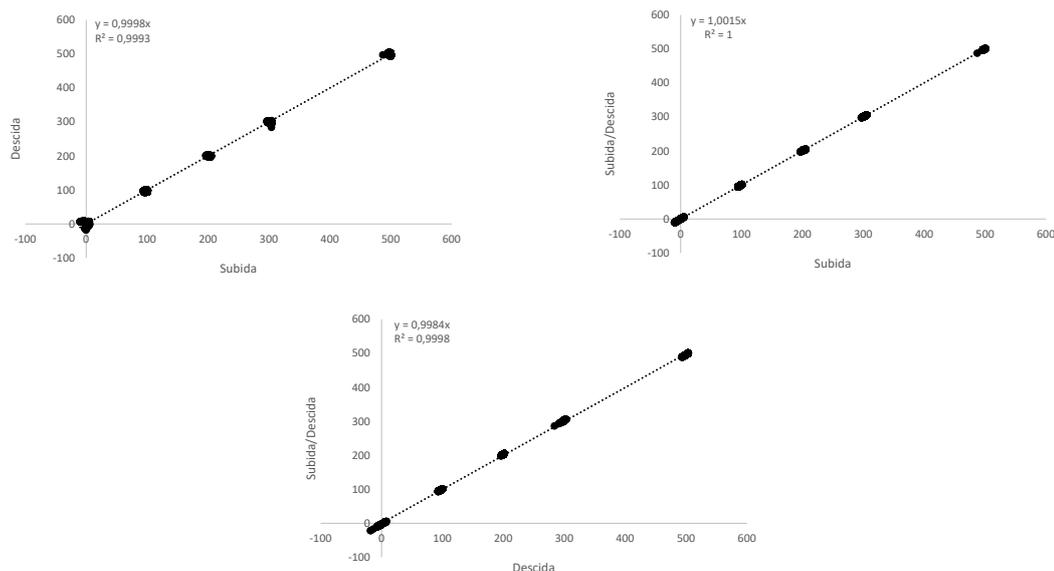


Figura 18 – Gráfico de linha ajustada para análise de equivalência entre modelos;

Tabela 5 – Comparação dos parâmetros de qualidade para as duas células de carga.

	Modelo Subida/Descida	
	CC de baixo custo	CC industrial
$R^2(aj)$	0,9993	0,9974
REQM	4,4721	8,4261
Coef. linear	1,0000	0,9973

Ambos os parâmetros $R^2(aj)$ apresentam valores muito altos, revelando que os dois modelos se ajustam muito bem aos dados, cerca de 100% dos resultados podem ser explicados pelos dados retirados da célula de carga. O $R^2(aj)$ do modelo do experimento II apresenta um resultado inferior apenas na terceira casa decimal do valor, o que torna essa diferença não muito considerável.

O coeficiente linear da reta com interseção em zero das duas células de carga apresentaram resultados muito satisfatórios. O valor da célula de carga de baixo custo é levemente melhor se comparada ao resultado da outra célula de carga. Sendo assim, ambas apresentam um desempenho neste quesito bem semelhante.

Já o parâmetro REQM, que indica a raiz da média do quadrado do erro do modelo, apresenta uma discrepância significativa entre os modelos. O valor do parâmetro do modelo do experimento I é cerca de 50% menor se comparado ao parâmetro do segundo modelo, ou seja, o sistema desenvolvida erra bem menos vezes do que a célula industrial. Esta evolução é bastante considerável ao sistema.

5 Conclusão

Foi desenvolvido neste trabalho um sistema de pesagem que atendeu a todos os requisitos estabelecidos. Apresenta baixo custo por ser composto apenas por dispositivos e equipamentos de preço inferior. E ao final, minimizou-se a influência da temperatura nas leituras do sistema, leituras estas que indicam uma alta precisão e repetibilidade. Uma comparação do sistema proposto com os resultados obtidos por um sistema envolvendo uma célula de carga industrial, de preço cerca de 23 vezes maior, mostrou uma diminuição de cerca de 50% no erro das leituras. Isso atesta a qualidade do sistema proposto, bem como garante um potencial de aplicabilidade em atividades pertinentes.

Além disso, é interessante frisar que as medições são realizadas online e que não há necessidade de se retirar as amostras de dentro da câmara climática durante a pesagem. Dessa forma, o sistema desenvolvido neste trabalho se mostra um excelente mecanismo para calibragem de outros sensores de umidade.

O objetivo de desenvolvimento deste trabalho foi alcançado. No entanto, aprimoramentos podem ser estabelecidos de forma a ampliar sua qualidade.

Sugere-se criar um supervisor próprio para o sistema. Apesar do programa usado neste trabalho ter sido excelente, atendido a todas as necessidades, elaborar um supervisor que será exclusivo ao sistema proposto garante uma singularidade ao projeto. O supervisor pode ser produzido no Visual Studio, com uma interface simples, amigável e objetiva.

Os circuitos de alimentação, tratamento e envio dos dados da célula de carga atualmente possuem dimensões grandes para circuito eletrônicos. Uma prática interessante seria diminuir essas dimensões ou até mesmo compactar estes circuito em apenas um, tornando o sistema completo mais condensado além de facilitar a instalação do mesmo. Esta compactação dos circuitos é importante principalmente quando se pensa em aplicações industriais, onde busca-se sempre otimizar a ocupação dos espaços.

Referências

- ALAEELDINE, A.; LACRAMPE, N.; BOYER, A.; PERDRIAU, R.; CAIGNET, F.; RAMDANI, M.; SICARD, E.; DRISSI, M. Comparison among emission and susceptibility reduction techniques for electromagnetic interference in digital integrated circuits. **Microelectronics Journal**, 2008. Elsevier, v. 39, n. 12, p. 1728–1735, 2008. Citado na página 23.
- ANDRADE, F. d. **Projeto e construção de uma célula de carga para fins didáticos**. [S.l.], 2015. Citado na página 10.
- ARAUJO, T. R. de; SILVA, J. A.; RODRIGUES, D. de S.; RIBEIRO, M. V. F.; JUNIOR, P. C. G. Metodologia de projeto de célula de carga de geometria “s” para medição estática de empuxo de motores de foguete. 2012. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- BOONSAWAT, V.; EKCHAMANONTA, J.; BUMRUNGKHET, K.; KITTIPIYAKUL, S. Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring. In: **the second conference on application research and development (ECTI-CARD 2010), Chon Buri, Thailand**. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 21.
- BRIONIZIO, J. D. **Análise Crítica das Metodologias de Avaliação de Temperatura e Umidade em Câmaras Climáticas e Térmicas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia de Produção, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- BURNOS, P.; GAJDA, J. Thermal property analysis of axle load sensors for weighing vehicles in weigh-in-motion system. **Sensors**, 2016. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 12, p. 2143, 2016. Citado na página 15.
- CÂNDIDO, C. Ventilação natural e conforto térmico em climas quentes. 2006. 2006. Disponível em: <[http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes-/relatorios/_pesquisa/Topicos Avan\ccados em Conforto T\'ermico](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes-/relatorios/_pesquisa/Topicos%20Avan%20ccados%20em%20Conforto%20T%27ermico)>. Citado na página 19.
- CHANG, C.-Y. Study on the correlation between humidity and material strains in separable micro humidity sensor design. **Sensors**, 2017. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 5, p. 1066, 2017. Citado na página 14.
- CHOI, B. H.; CHUNG, G. S.; LEE, J.-S.; JEONG, D.-U.; PARK, K. S. Slow-wave sleep estimation on a load-cell-installed bed: a non-constrained method. **Physiological measurement**, 2009. IOP Publishing, v. 30, n. 11, p. 1163, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.
- DEVICES, A. Low cost, low power instrumentation amplifier—ad620—datasheet, 2004. **Revision G**, 2011. 2011. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 23.
- DIGI. **Digi Xbee Ecosystem™**. 2017. Citado na página 21.

- DRESDEN, T. **KLIMAPRÜFKAMMER FEUTRON GMBH KPK 600**. 2017. Citado na página 19.
- ELECTRONICS, L. **A Global Standard in Education**. 2017. Citado na página 20.
- FAN, J.; DREWNIK, J. L.; KNIGHTEN, J. L.; SMITH, N. W.; ORLANDI, A.; DOREN, T. P. V.; HUBING, T. H.; DUBROFF, R. E. Quantifying smt decoupling capacitor placement in dc power-bus design for multilayer pcbs. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2001. IEEE, v. 43, n. 4, p. 588–599, 2001. Citado na página 23.
- FITZGERALD, D. W.; MURPHY, F. E.; WRIGHT, W. M.; WHELAN, P. M.; POPOVICI, E. M. Design and development of a smart weighing scale for beehive monitoring. In: IEEE. **Signals and Systems Conference (ISSC), 2015 26th Irish**. [S.l.], 2015. p. 1–6. Citado na página 16.
- GU, J.; EOM, H.; KIM, C. H. On-chip supply noise regulation using a low-power digital switched decoupling capacitor circuit. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 2009. IEEE, v. 44, n. 6, p. 1765–1775, 2009. Citado na página 23.
- INTRUMENTS, U. i. P. **Introduction to Load Cells**. 2017. Citado na página 13.
- JOHNSON, B. **Professional visual studio 2012**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 20.
- LABUSSIÈRE-DORGAN, C.; BENDHIA, S.; SICARD, E.; TAO, J.; QUARESMA, H. J.; LOCHOT, C.; VRIGNON, B. Modeling the electromagnetic emission of a microcontroller using a single model. **IEEE transactions on Electromagnetic compatibility**, 2008. IEEE, v. 50, n. 1, p. 22–34, 2008. Citado na página 23.
- LEE, W. K.; YOON, H.; HAN, C.; JOO, K. M.; PARK, K. S. Physiological signal monitoring bed for infants based on load-cell sensors. **Sensors**, 2016. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 3, p. 409, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 16 e 18.
- LIAO, K.-H.; LO, C.-Y. Thermoresistive strain sensor and positioning method for roll-to-roll processes. **Sensors**, 2014. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 5, p. 8082–8095, 2014. Citado na página 14.
- LIU, C.; REN, W.; ZHANG, B.; LV, C. The application of soil temperature measurement by lm35 temperature sensors. In: IEEE. **Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on**. [S.l.], 2011. v. 4, p. 1825–1828. Citado na página 19.
- MAKABE, M.; KOHASHI, T. Practical creep and hysteresis error compensation method for load cell. In: IEEE. **SICE 2004 Annual Conference**. [S.l.], 2004. v. 1, p. 77–83. Citado na página 15.
- OMEGA, S. I. T. **Minibeam Load Cells**. 2017. Citado na página 26.
- PAČNIK, R.; NOVAK, F. A high-sensitivity hydraulic load cell for small kitchen appliances. **Sensors**, 2010. Molecular Diversity Preservation International, v. 10, n. 9, p. 8452–8465, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 15 e 16.

- PARKER, R. G. **Spilt ferrite bead case for flat cable**. [S.l.]: Google Patents, 1992. US Patent 5,095,296. Citado na página 23.
- PATIL, I. N.; ZOPE, H.; PATIL, S. Development of low cost tdr system for soil moisture measurement. **Development**, 2015. v. 2, n. 3, 2015. Citado na página 10.
- SANCHEZ, J.; CANTON, M. P. **Microcontroller programming: the microchip PIC**. [S.l.]: CRC Press, 2006. Citado na página 17.
- SEGUNDO, A. K. R.; MARTINS, J. H.; MONTEIRO, P. M. d. B.; OLIVEIRA, R. A. de; FREITAS, G. M. A novel low-cost instrumentation system for measuring the water content and apparent electrical conductivity of soils. **Sensors**, 2015. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, n. 10, p. 25546–25563, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.
- SENSORES, F. **Célula de Carga Tipo Single Point**. [S.l.], 2015. Citado na página 25.
- SIMMONS, J. P.; NELSON, L. D.; SIMONSOHN, U. False-positive psychology: Undisclosed flexibility in data collection and analysis allows presenting anything as significant. **Psychological science**, 2011. Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 22, n. 11, p. 1359–1366, 2011. Citado na página 28.
- SU, H.; SAPATNEKAR, S. S.; NASSIF, S. R. Optimal decoupling capacitor sizing and placement for standard-cell layout designs. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, 2003. IEEE, v. 22, n. 4, p. 428–436, 2003. Citado na página 23.
- ZHANG, H.; JIA, J.; WANG, N.; HU, X.; TU, S.-T.; ZHOU, S.; WANG, Z. Development of on-line monitoring systems for high temperature components in power plants. **Sensors**, 2013. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 11, p. 15504–15512, 2013. Citado na página 15.
- ZWIJZE, R. A.; WIEGERINK, R. J.; KRIJNEN, G. J.; LAMMERINK, T. S.; ELWENSPOEK, M. Low creep and hysteresis load cell based on a force-to-fluid pressure transformation. **Sensors and actuators A: Physical**, 1999. Elsevier, v. 78, n. 2, p. 74–80, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.