

PROTÓTIPO DE UMA BALANÇA SUSPensa DIGITAL A SENSOR INDUTIVO

Bruno Allan Galvão dos Santos (University of California, Riverside - UCR e Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Eletrônica).

E-mail: brunoallang@gmail.com

Adriano Rech (Budapest University of Technology and Economics - BME e Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Eletrônica).

E-mail: adriano-rech@hotmail.com

Max Mauro Dias Santos (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Eletrônica).

E-mail: maxsantos@utfpr.edu.br

Sergio Luiz Stevan Junior (Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Ponta Grossa, Departamento Acadêmico de Eletrônica).

E-mail: sstevanjr@utfpr.edu.br

Resumo: Balanças suspensas utilizam o alongamento de uma mola proporcional a um peso como princípio de medição da massa de objetos. A indicação do peso normalmente é realizada analogicamente através de um ponteiro. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma balança suspensa digital eletrônica utilizando um sensor indutivo como monitor do alongamento da mola. É apresentado o circuito de condicionamento de sinal desenvolvido, seguido de um microcontrolador utilizado para processamento dos sinais amostrados e exibição da medição em display. São descritas as etapas utilizadas para definição da faixa de trabalho da balança assim como os princípios utilizados no microcontrolador para a criação da lógica de programação para o processamento do sinal amostrado. A balança desenvolvida opera entre 7,0 e 200,0 g e apresentou um erro de medição igual a $\pm 7,0$ g. Os resultados práticos da utilização do princípio do sensor indutivo aliado à variação de tensão conforme variações de massa demonstram que este sistema pode ser eficiente e proporcionar uma qualidade de medição satisfatória.

Palavras-chave: Balança Suspensa, Balança Digital, Sensor Indutivo, Aquisição de sinais, Microcontrolador.

PROTOTYPE OF A DIGITAL HANGING SCALE BASED ON INDUCTIVE SENSOR

Abstract: Hanging scales using the proportional stretching of springs as a principle of measuring the mass of objects. The weighting process is usually performed and displayed analogically by a pointer. This paper presents the development of a digital hanging scale based on inductive sensor to monitor the stretching of the spring. A developed signal conditioning circuit is presented as well as the microcontroller used for processing the sampled signals and the display to present the measure. Are also shown the steps used to define the working range of the scale as well as the principles used to create the logic programming for processing the sampled signal in the microcontroller. The developed scale works between 7.0 and 200.0 g and had a measurement error equal to ± 7.0 g. The results of the practical use of the principle of inductive sensor coupled to the voltage variation as mass variations demonstrate that the system can be efficient and provide a satisfactory measurement quality.

Keywords: Hanging Scale, Digital Scale, Inductive Sensor, Signal Acquisition, Microcontroller.

1. INTRODUÇÃO

A balança é um dos instrumentos de medida mais antigos que se tem conhecimento. No decorrer de sua história, esta evoluiu para diversos sistemas de pesagem desde o uso de dois pratos - onde se colocava pesos padrão em um dos pratos e se estabelecia o valor de massa através do equilíbrio de um travessão, passando por técnicas completamente mecânicas, que transformavam a deformação de uma mola devido a um peso em uma escala visual - até

sistemas eletrônicos modernos, onde são utilizadas células de carga. Atualmente as balanças eletrônicas comerciais, em sua grande maioria, utilizam sistema de célula de carga. A balança recebe a compressão de um determinado corpo, a célula de carga transforma a energia mecânica recebida em sinais elétricos, os quais passam por circuitos de condicionamento e posteriormente são tratados digitalmente em um sistema microcontrolado, que então exibe um valor quantizado da massa em um visor.

Alternativamente à célula de carga, pode-se utilizar um sensor indutivo. Genericamente, este sensor é um dispositivo eletrônico capaz de detectar a aproximação ou movimento de um objeto metálico sem o contato com o mesmo (LIMA, 2008). Basicamente, o sensor indutivo trabalha com o princípio da indução eletromagnética. Quando um objeto metálico entra em seu campo magnético, pequenas correntes são induzidas na superfície do objeto. Este objeto provoca interferência sobre o campo magnético do sensor, alterando a amplitude da tensão (LIMA, 2008). Dentre as aplicações dos sensores indutivos tem-se: máquinas operatrizes, injetoras plásticas, linhas transportadoras, indústria automobilística, detector de metal entre outras (WEG, 2012).

Neste contexto, a aplicação de um peso induz proporcionalmente a extensão da mola que altera o fluxo magnético no sensor indutivo, o qual pode ser verificado através de um sinal elétrico. Este sinal pode ser tratado digitalmente em um sistema microcontrolado, de modo a convertê-lo em um número que possa quantificar o peso inserido na balança.

Inserido neste panorama, este trabalho apresenta uma balança suspensa digital que utiliza a deformação de uma mola em conjunto com um sensor indutivo para medição eletrônica da massa de corpos.

2. DESENVOLVIMENTO

Primeiramente é apresentado um descritivo da estrutura mecânica da balança e o detalhamento da construção do sensor indutivo. Na sequência são descritos o princípio de funcionamento do sistema e os circuitos eletrônicos utilizados para condicionamento de sinal.

2.1 Estrutura mecânica

A Figura 1 apresenta a estrutura mecânica do projeto. Conforme indicado, o sistema que realizará a medição é composto por um tubo de PVC que abriga em seu interior uma mola, as chapas de aço silício, limitadores de posição das chapas e o regulador de tensão da mola.

Em torno do tubo de PVC encontram-se os enrolamentos de fio de cobre envernizado utilizados para confecção do sensor indutivo. Chapas de aço silício unidas são utilizadas como entreferro móvel do sensor, e se movimentam no interior do tubo para dentro ou para fora do enrolamento de acordo com a força (peso) que o objeto no prato aplica para baixo. O objetivo do núcleo móvel é concentrar as linhas de força da bobina e aumentar a indutância do sensor com sua presença. Foram utilizadas chapas de aço silício para o entreferro devido a esse material possuir excelentes propriedades ferromagnéticas, características estas que podem ser verificadas através de gráficos com curvas de magnetização de materiais ferromagnéticos típicos (TORO, 1994). Tal fato justifica a grande utilização do aço silício como material a ser empregado em núcleos de transformadores, geradores de potência entre outros (BOHN, 2004).

Desta forma, o deslocamento da extremidade da mola é transferido por um fio de polietileno trançado para um entreferro ferromagnético. O movimento deste entreferro altera a indutância

na bobina fixa. Com o movimento do núcleo vertical para baixo (para dentro da bobina), a indutância da bobina aumenta.

Um prato é utilizado como base para outros objetos a serem medidos é preso à extremidade inferior do entreferro do sensor indutivo, através de um fio de polietileno trançado. Na outra extremidade (superior) do entreferro é presa a mola. Esta manterá o conjunto suspenso e garantirá o deslocamento do sistema prato-núcleo.

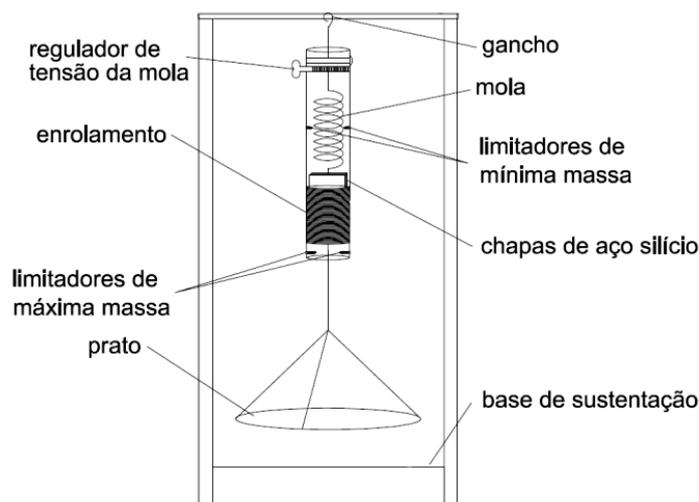


Figura 1 – Estrutura mecânica do projeto.

De acordo com a lei de Hooke, a deformação causada pela força exercida sobre um corpo é tal que a força é igual ao deslocamento da massa a partir do seu ponto de equilíbrio vezes a característica constante da mola que sofrerá a deformação (GONÇALVES, 2008). Assim foi possível caracterizar a mola de tração utilizada. Ao submeter um objeto de massa igual a 520,0g (ou seja, $F = 5,09964$ N) a mola sofreu deslocamento (Δl) de 0,075 m. Aplicando estes valores na expressão definida pela lei de Hooke, tem-se que a constante elástica da mola (k) é igual 67,9952 N/m, ou seja, aproximadamente 68,0 N/m.

Uma base de sustentação em madeira foi construída para garantir a estabilidade do sistema. No topo desta, o gancho de apoio é pendurado e ao longo do corpo do tubo PVC são colocadas abraçadeiras. Estas ações buscam evitar erros de medição, pois o sistema se torna menos sujeito a vibração.

2.2 Confeção do indutor

Segundo MSPC (2013), a equação sugerida para cálculo de bobina de várias camadas sem núcleo magnético é definida simplificada por:

$$N^2 = \frac{L * (6a + 9c + 10h)}{0.8 * a^2} \quad (1)$$

Onde “N” indica o número de voltas, “L” indica a indutância (uH), “a” indica o raio médio (pol.), “c” indica o comprimento (pol.) e “h” indica a espessura da bobina (pol.).

O enrolamento do sensor desenvolvido possui 646 voltas de fio envernizado tipo AWG 22. O tubo onde o fio envernizado foi enrolado possui diâmetro de 25 mm e um comprimento de 90

mm. Utilizando a equação (1) e considerando as características do indutor desenvolvido, a indutância teórica do indutor L deverá ser de 2,82012 mH.

Através da utilização de uma Ponte RLC Digital modelo Gwinstek LCR-819, foi realizada a medição desta indutância para validar o cálculo. O valor registrado pela Ponte RLC foi de 2,9787 mH sem material magnético no interior da bobina, ou seja, aproximadamente 5,6% maior que o cálculo teórico devido à equação (1) ser a forma aproximada para bobina de várias camadas sem núcleo magnético. Já com as chapas de aço silício no interior da bobina, o valor encontrado foi de 29,193 mH.

2.3 Princípio de funcionamento

O objeto a ser medido provoca uma variação na posição do prato e essa variação é controlada pela mola. Como o prato está conectado as chapas de aço silício, estas também sofrem deslocamento.

Inicialmente as chapas se encontraram completamente no exterior do enrolamento. À medida que o prato recebe o corpo a ser medido, este provoca o deslocamento das chapas no sentido para dentro do enrolamento. Este deslocamento muda a amplitude da forma de onda gerada no enrolamento. Isto ocorre porque, ao adicionar o material ferromagnético (chapas de silício) no interior da bobina desenvolvida, esta passa a concentrar melhor e com maior intensidade as linhas de campo magnético.

Para garantir a confiabilidade nas medições foram instalados limitadores na posição de máxima e de mínima massa. O sistema também abriga um regulador de tensão da mola, para fins de ajuste e calibração.

2.4 Fluxo do sinal de medição e circuito eletrônico

A Figura 2 apresenta o fluxo do sinal de medição no sistema.

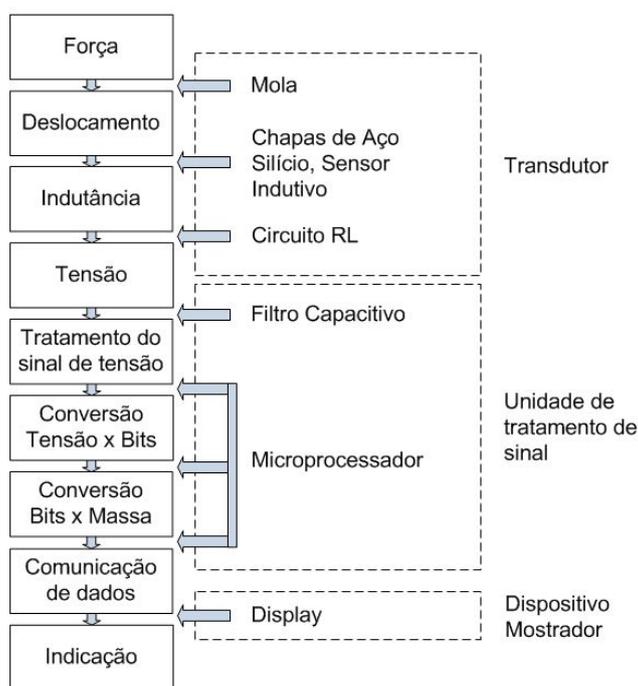


Figura 2 – Fluxo do sinal de medição no sistema.

O circuito eletrônico projetado necessita de uma fonte gerando as seguintes tensões contínuas: 15V, -15V e 5V. Um oscilador senoidal foi implementado e projetado utilizando um amplificador operacional LM741. Este oscilador foi baseado em Pertence (2007) com adaptações. Este oscilador gera uma tensão de pico de 11,04V (+5,52V à -5,52V) com frequência de 1723 Hz. Este sinal é submetido a um buffer para isolar estágios e reforçar a corrente. A Figura 3 apresenta o circuito desenvolvido do oscilador senoidal e buffer.

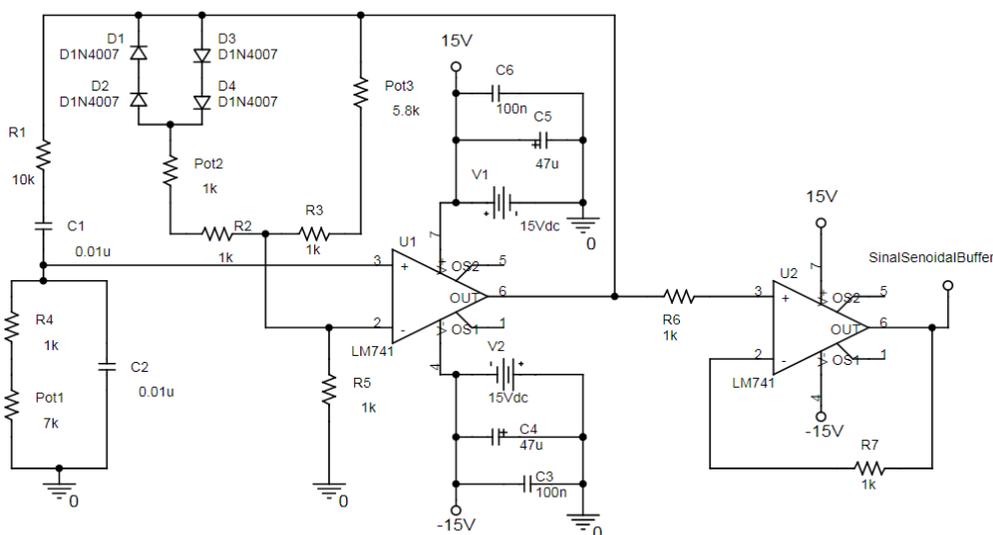


Figura 3 – Circuito oscilador senoidal e *buffer*.

Para quantificar a variação de indutância ocorrida no sensor indutivo desenvolvido (bobina), foi desenvolvido um circuito de um retificador e um filtro passa-baixa, conforme apresentado na Figura 4. Para este circuito, quanto maior a massa do objeto, maior será a amplitude da tensão sob o indutor e menor será a tensão sob o resistor do circuito divisor de tensão RL. O sensor projetado, conforme citado anteriormente, varia sua indutância de 2,9787 mH a 29,193 mH. Isto corresponde respectivamente a 0% e 100% da inserção do componente ferro magnético no interior da bobina.

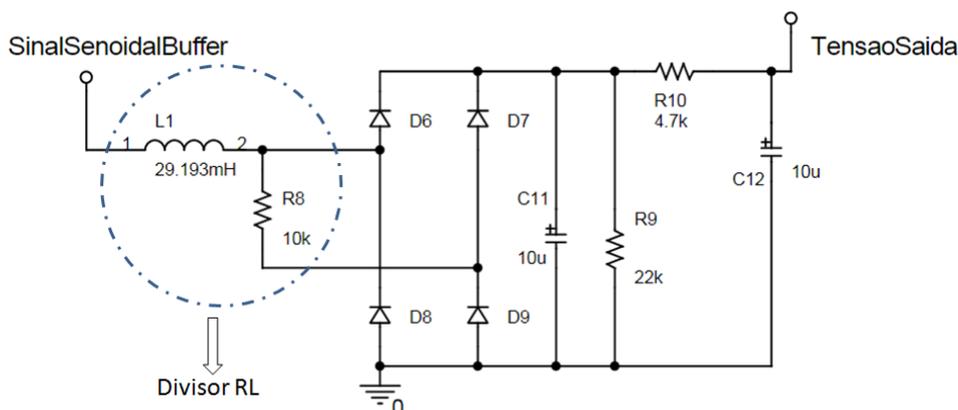


Figura 4 – Implementação do sensor indutivo (bobina), retificador e filtro passa-baixa.

Mede-se, então, a tensão sob o resistor no divisor de tensão RL. Este sinal de onda senoidal é retificado e filtrado para se aproximar de um sinal de corrente contínua (CC). Na sequência ao filtro do retificador é aplicado um filtro passa-baixas para reduzir ruídos. Devido ao sinal esperado na saída ser idealmente de frequência zero (ou seja, sinal contínuo) qualquer frequência apresentada pode ser considerada como indesejada. Logo, um filtro passa-baixas com frequência de corte tendendo a zero seria ideal para a aplicação. Por questões práticas de

implementação, foi escolhido utilizar um filtro com frequência de corte de 3,38Hz que atende o nível de filtragem desejado. As primeiras medições deste sinal retificado e filtrado variaram dentro de uma faixa de 2,73 a 4,48V de acordo com a variação da indutância do sensor projetado. Esta faixa é compatível com o nível de tensão solicitado pelo conversor A/D do microprocessador utilizado, o PIC 16F877A. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos do circuito eletrônico.

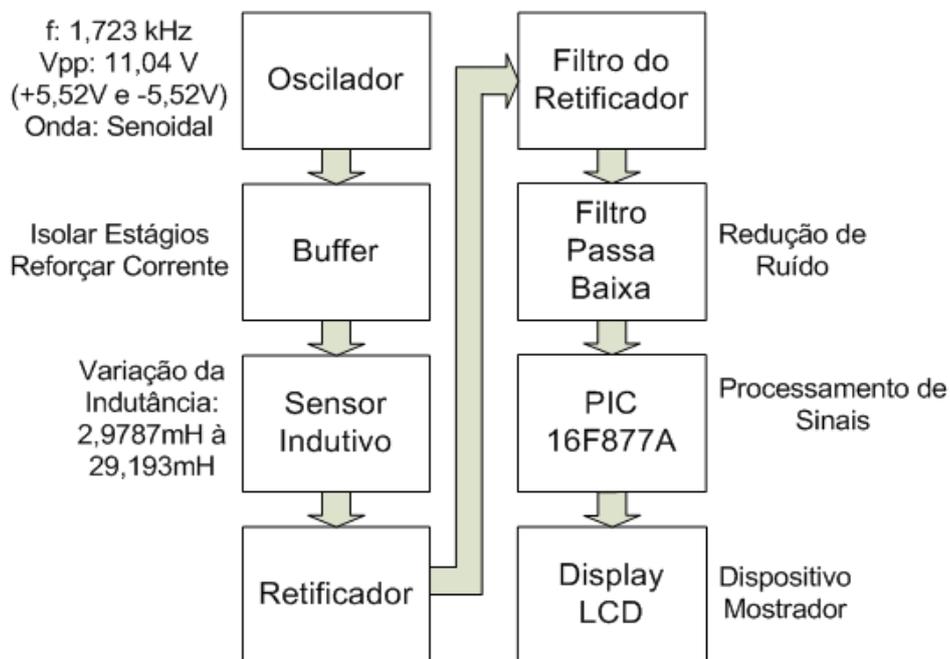


Figura 5 – Diagrama de blocos do circuito eletrônico.

Logo, o princípio utilizado resultará em um sistema que responde a variação de massa da seguinte forma: quanto maior a massa do objeto, maior será a porção de chapas de aço silício no interior da bobina e maior será a indutância resultante; desta forma, maior será a amplitude de tensão sobre a bobina presente no circuito divisor de tensão RL submetido a uma tensão alternada.

3. MEDIÇÕES REALIZADAS

Neste tópico são descritos os passos utilizados para caracterizar a balança tais como histerese, zona morta, *range* de trabalho, erro máximo e precisão. Na sequência é descrito a implantação em um microcontrolador viabilizando, assim, a indicação de massa em um display LCD.

Os pesos utilizados nas medições são provenientes da associação de materiais de fácil acesso (denominados pesos não padrão) e pesos padrão. Em relação aos pesos não padrão, foram realizadas pesagens de CDs, DVDs e moedas em balanças de precisão e registrado os valores em gramas com duas casas decimais. Em todas as etapas a seguir foram também consideradas marca e modelo de cada CD e DVD, pois foi verificada certa variação de peso entre modelos diferentes. A utilização de CDs, DVDs e moedas foi adotada porque facilita a obtenção de um pequeno passo de medição. Em relação aos pesos padrão, foi utilizado o conjunto de pesos padrão da Festo cujas massas são de 500, 200, 100, 50 e 20 gramas.

Para caracterizar as medições, o processo foi dividido em cinco etapas, abaixo descritas em subtítulos.

3.1 Primeira etapa: verificação das características iniciais da balança

Na primeira etapa, a faixa de medição utilizada foi de 15,04 g a 520,00 g, pois esta faixa apresentou as seguintes características: a menor quantidade de massa que causa variação de tensão na saída do circuito eletrônico desenvolvido; e o maior deslocamento da mola até chegar próximo dos limitadores de máxima massa (vide Figura 1). Foram criados dois grupos de medições: um com pesos não padrão e outro com pesos padrão. Os resultados são apresentados na Figura 6.

Através da implementação de duas linhas de tendência polinomial de 6ª ordem aplicadas no gráfico da Figura 6, foi possível afirmar que as medições que utilizaram pesos não padrão se aproximam claramente da medição com pesos padrão. Logo, conclui-se que os testes que serão realizados na sequência podem ser feitos com os pesos não padrão sem grandes perdas de aproximação. A medição com pesos não padrão irá facilitar as medições subsequentes, pois propicia menores acréscimos de peso a cada passo de medição que os disponibilizados pelos pesos padrão, tornando assim a aquisição de dados com maior quantidade de pontos nos gráficos.

Através da Figura 6 também foi possível realizar a primeira restrição da faixa de trabalho da balança seguindo duas características principais: a escolha de uma região com maior linearidade; a escolha de uma região fora da faixa onde um pequeno acréscimo de tensão resulte em uma variação muito grande de massa na conversão de tensão para massa. Desta forma, consideram-se as regiões adjacentes como zonas indesejadas de medição, chamadas de zonas mortas.

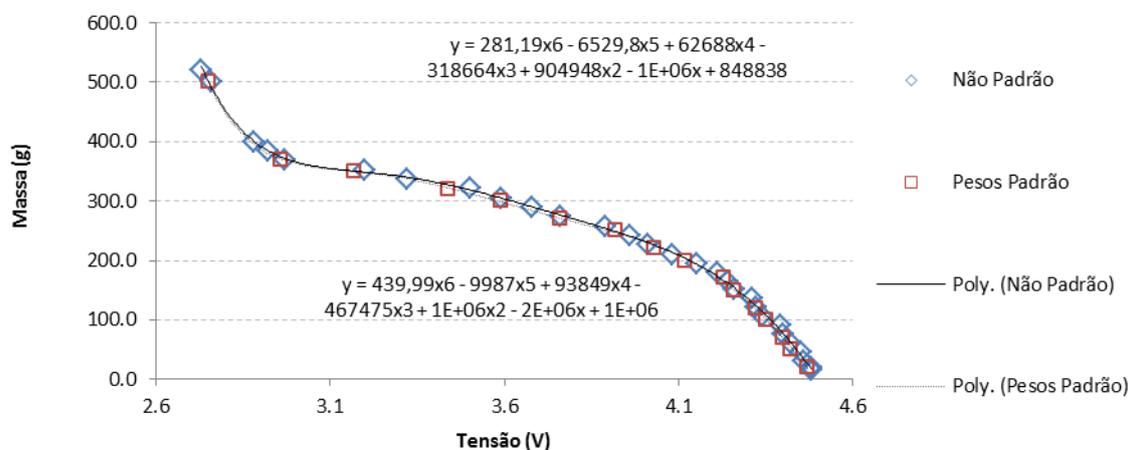


Figura 6 – Diferença de medição entre Pesos não padrão e Pesos padrão.

Desta forma, esta primeira etapa resultou na redução da faixa de trabalho de 15,04g a 520,00g para 30,08g a 368,72g.

3.2 Segunda etapa: análise das primeiras medições

Tendo reduzido a faixa de trabalho na etapa anterior, nesta segunda etapa foram realizadas dez medições para cada passo de medição. Com isso foi possível obter a média e redução da incidência de erros. Através da equação do desvio padrão foi verificado o grau de dispersão das medições. A Figura 7 demonstra o desvio padrão das medidas obtidas de acordo com a variação da massa do corpo.

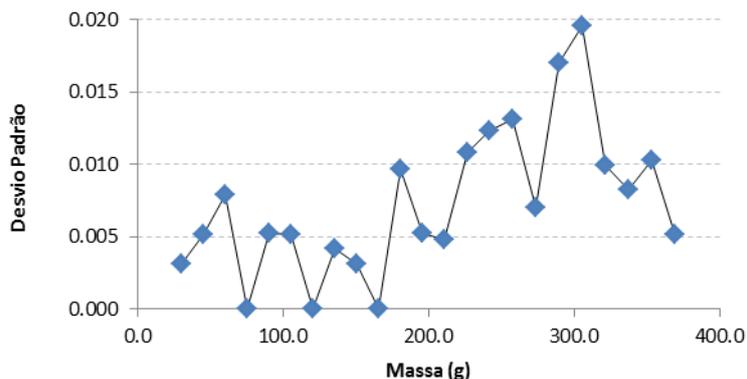


Figura 7 – Desvio padrão das medições.

Buscando um menor desvio padrão global das medições e uma maior precisão da balança, foi delimitada uma faixa de trabalho ainda mais restrita em que o desvio padrão máximo é de aproximadamente 0,013 g. Desta forma, foi decidido restringir a faixa de trabalho de 30,08 g a 368,72 g para 45,12 g a 257,92 g.

Dentro desta nova faixa de trabalho da balança, foi também verificado se o sistema da balança suspensa digital com sensor indutivo possui influência significativa do efeito da histerese sob a mola e o sistema. A histerese consiste na máxima diferença entre os valores medidos de uma mesma grandeza quando se percorre a escala do instrumento nos sentidos ascendente e descendente (PINHEIRO, 2013). A histerese é resultado de efeitos magnéticos, mas também pode ter contribuições de atrito mecânico, deformação elástica e, em menor quantidade, de efeitos térmicos.

Figura 8 demonstra o efeito de histerese sob o sistema. Esta verificação foi realizada através da média de dez medições realizadas durante o acréscimo de peso e dez medições realizadas durante o decréscimo de peso sobre o prato.

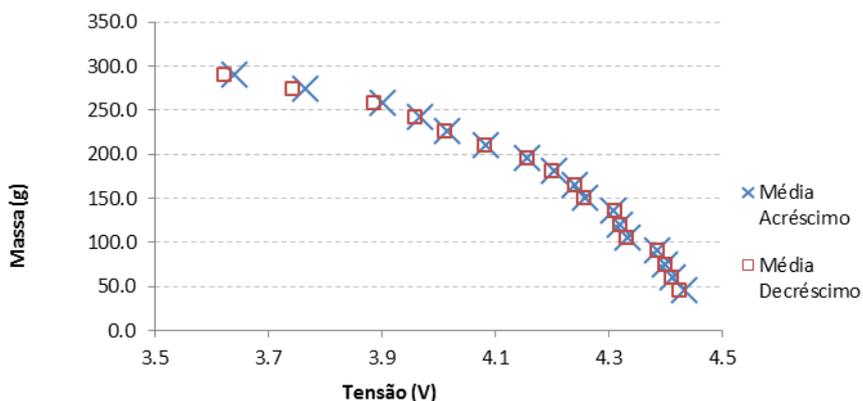


Figura 8 – Efeito de histerese sob o sistema.

Através da Figura 8 é possível verificar que o efeito da histerese sob a mola e o fio de polietileno trançado influencia na medição principalmente nos pesos acima de 257,92 g (fim de escala). Conclui-se que a variação de tensão gerada na saída do circuito eletrônico para pesos acima de 257,92 g pode ser ligeiramente diferente caso esteja sendo realizado incremento ou decréscimo de peso na balança. Desta forma, novamente é justificada a exclusão da faixa de trabalho acima de 257,92 g para minimizar possíveis erros causados pelo efeito da histerese.

3.3 Terceira etapa: Equacionamento da curva de massa em relação à tensão

Na terceira etapa foi verificado como utilizar a informação proveniente das medições anteriores para que o microcontrolador reconheça a tensão de entrada analógica, converta em uma Representação em Decimal dos Bits (RDB) do conversor Analógico Digital (A/D) e, na sequência, converta em massa para exibição no display. Dois métodos para obtenção da equação da curva que representará a variação da tensão de saída do circuito eletrônico em relação à massa colocada no prato foram utilizados: linha de tendência polinomial de 6ª ordem e linearidade por partes. O gráfico das medições com suas respectivas linhas de tendência são mostrados nas figuras 9 e 10.

Através destes gráficos foi verificado que, para uma melhor precisão do protótipo, o método de linearização por partes melhor representa o sistema. A aproximação de um polinômio de 6ª ordem falha neste caso em descrever o comportamento de alguns pontos que ficam ligeiramente fora desta linha de tendência. Logo, a figura 9 representa maior aproximação do valor real da medida. Pelo método de linearização por partes, quatorze equações lineares foram calculadas para representar as retas presentes na Figura 9 a fim de utilizá-las para implementação no microcontrolador. Os cálculos do coeficiente angular e do coeficiente linear das quatorze retas foram realizados através do uso de planilha eletrônica considerando quinze casas após a vírgula a fim da obtenção de maior precisão.

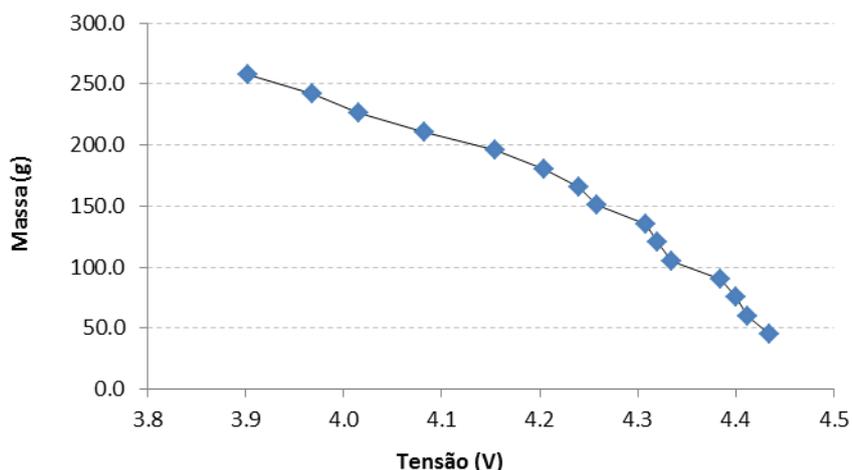


Figura 9 – Relação entre a massa e sua conversão para tensão elétrica, linha de tendência linear por partes.

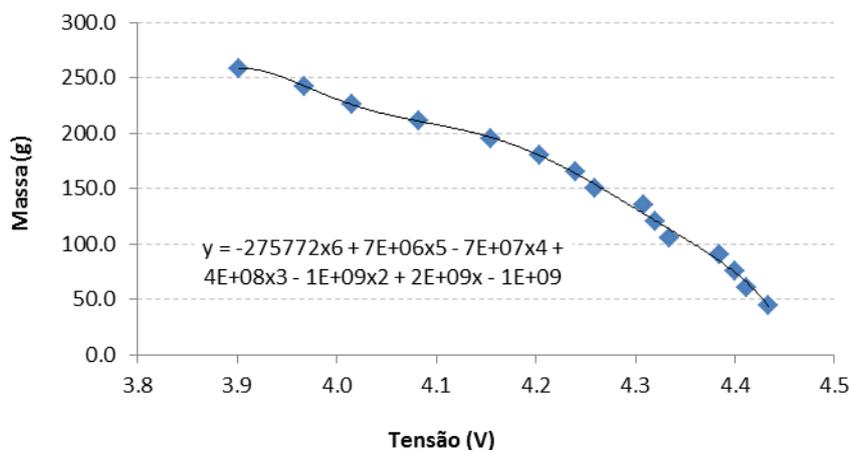


Figura 10 – Relação entre a massa e sua conversão para tensão elétrica, linha de tendência polinomial de 6ª ordem.

3.4 Quarta etapa: Equacionamento da curva da RDB do conversor A/D em relação à tensão

Delimitado a faixa de trabalho da balança em 0,0g a 200,0g, faz-se necessário escalonar os bits utilizados pelo conversor A/D do PIC 16F877A (10 bits, 1024 valores) dentro da faixa de tensão de trabalho da balança (3,902 a 4,434V). Caso este procedimento não seja feito, se perderia em precisão já que o escalonamento dos 10 bits do conversor A/D acabaria sendo distribuídos em uma faixa maior (0,0 a 5,0V) que não é totalmente utilizada pela balança.

O procedimento de ajuste da faixa de trabalho do conversor A/D é feito através da utilização de duas tensões de referência conectadas ao PIC (entradas VREF+ e VREF-). Uma pequena margem de tensão acima do máximo e abaixo do mínimo da faixa de trabalho do sensor é adicionada para que o microprocessador reconheça quando a balança apresentar valores fora da faixa de medição. As tensões de referência escolhidas para o A/D de 10 bits foram de 3,8 a 4,5V. A escolha de tensões de referência com apenas uma casa depois da vírgula facilita a configuração do circuito eletrônico que irá fornecer este sinal de referência. Pode-se implementar este circuito com a utilização de regulador ajustável de tensão, como por exemplo, o CI LM317. A Figura 11 apresenta relação entre a tensão elétrica e sua conversão para RDB. O passo obtido foi de aproximadamente 0,000684V/valor em decimal dos bits do conversor A/D.

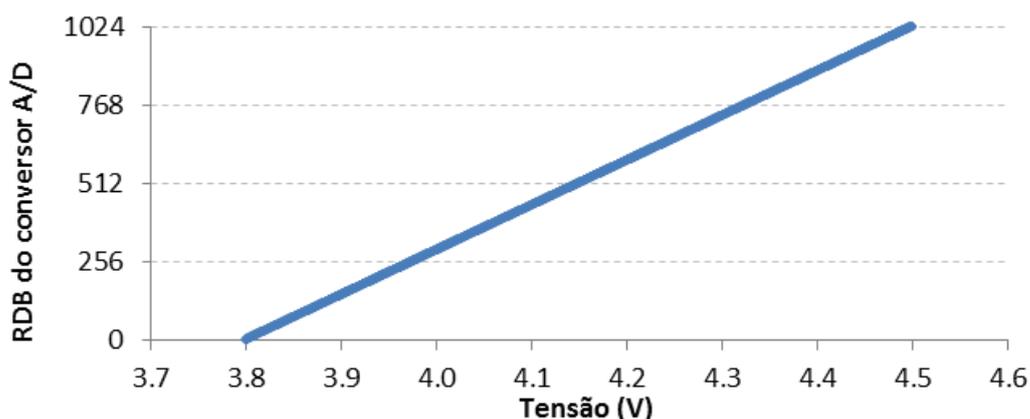


Figura 11 – Relação entre tensão elétrica e sua conversão para a RDB do conversor A/D.

A fim de obter uma faixa mais plausível para a utilização final do usuário, foi decidido acrescentar uma tara de 50,0g à medição. Desta forma, a faixa de medição adequada passa a ser de 0,0g a 200,0g.

Além destes procedimentos, também se faz necessário verificar o limite de sensibilidade do instrumento de medição, ou seja, a quantidade mínima detectável. Através dos experimentos realizados foi verificado que o sensor possui limite de sensibilidade de 7,0 g. Este fator influencia a delimitação da faixa de medição da balança desenvolvida. Logo, tem-se que a faixa de medição da balança passa a ser de 7,0 a 200,0 g.

Desta forma, a zona morta inferior foi definida para valores menores que 7,0 g e a zona morta superior foi definida para valores maiores que 200,0 g.

3.5 Quinta etapa: Implementação no Microcontrolador PIC 16F877A.

Com base na figura 11 e nas quatorze retas apresentadas na Figura 9, foram geradas outras quatorze retas para realizar a conversão da representação em decimal dos 10 bits do conversor A/D para a massa. A Figura 12 demonstra esta conversão com a inclusão da tara. Conforme

esperado, o gráfico da Figura 12 gerado com estes procedimentos segue a forma de onda do gráfico da Figura 9, validando assim a conversão. A diferença entre as duas figuras está no deslocamento da curva para baixo devido à inclusão da tara de 50,0 g. Nota-se que, nas faixas de 927 a 1024 e de 0 a 150, os valores utilizados para a RDB do conversor A/D não pertencem à curva. Valores que extrapolam estas faixas de bits são incluídos apenas para indicação de medição fora da região de trabalho do sensor, conforme descrito anteriormente.

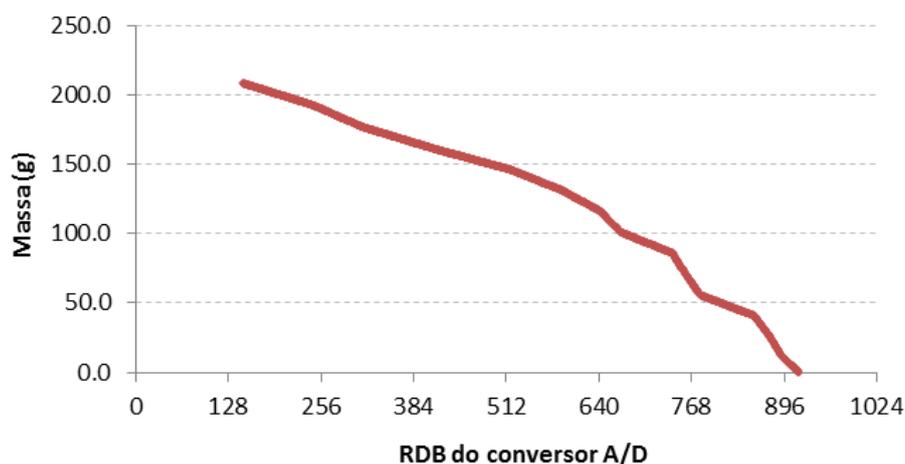


Figura 12 – Relação entre RDB do conversor A/D e sua conversão para exibição da massa no display.

Verifica-se que pouco depois de alcançar o valor de aproximadamente 900 na RDB do conversor A/D, a massa exibida no display começa a se tornar negativa. Este valor apenas será indicado no display para auxiliar a calibração da tara de 50,0g. A balança foi desenvolvida de tal forma a medir estes valores negativos com único objetivo de auxiliar a calibração, pois as medições dentro desta faixa (entre -5,0g e 6,9g) são consideradas pertencentes à zona morta inferior da balança. Uma pequena zona morta superior da balança (entre 200,1 a 208,0g) é também utilizada para aferição da balança quando for utilizado peso padrão de 200,0g.

Até o presente momento já foi desenvolvida a programação por completo para o microcontrolador PIC 16F877A em linguagem C para realizar a leitura e processamento do sinal de entrada e atuar na saída (display) segundo as quatorze retas descritas anteriormente e segundo a obtenção das médias de dez medições, conforme descrito neste trabalho. As simulações do processamento do sinal pelo microcontrolador PIC foram realizadas com a utilização dos softwares *PCWHD Compiler Version 4.093* e *Proteus ISIS Professional Release 7.7 SP2*.

Um filtro digital do tipo SMA (*Simple Moving Average* - média móvel simples) de dez pontos foi também implementado no PIC, fazendo com que o microcontrolador realize dez medições antes de consultar as quatorze retas salvas em sua programação. Esta técnica de *smoothing* auxilia a medição, pois de certa forma suaviza o sinal, reduzindo assim as componentes de ruído que possam estar presentes. Os resultados dos testes e das simulações têm sido satisfatórios e vêm alcançando os resultados esperados.

4. CARACTERIZAÇÃO DA BALANÇA INDUTIVA DESENVOLVIDA

A Tabela 1 apresenta as características finais da balança ainda sem a implementação do microcontrolador. Uma margem de segurança foi adicionada para que as futuras utilizações da balança permaneçam de acordo com as características e limitações da balança desenvolvida.

Tabela 1 – Características finais da balança suspensa digital a sensor indutivo (considerando tara de 50,0 g).

Parâmetros	Valor
Faixa de medida (g)	7,0 a 200,0
Limite de sensibilidade (g)	7,0
Zona Morta Inferior (g)	Massa < 7,0
Zona Morta Superior (g)	Massa > 200,0
Erro Máximo (g)	+/- 7,0
Desvio padrão (g)	0,018
Tempo de estabilização (s)	5,0
Tara fixa (g)	50,0
Unidade de Pesagem	Gramas
Modos de Aplicação	Medição de massa
Características	Pesagem por variação de tensão em divisor de tensão RL durante deslocamento de material ferromagnético em indutor
Alimentação requerida (V)	15, -15 e 5

A Tabela 2 apresenta a relação entre massa, tensão e RDB. As duas primeiras linhas da Tabela 2 apresentam valores negativos no display com objetivo de auxiliar calibração da tara de 50,0g conforme descrito anteriormente. As quatorze retas calculadas são distribuídas nas faixas de trabalho de número 2 a 4 (ver Tabela 2), incluindo a faixa de trabalho número 3 que corresponde faixa confiável utilizada para medição final do usuário (zona com menor não-linearidade obtida experimentalmente). As faixas de número 1 e 5 estão fora dos limites de medição do protótipo (*out of range*).

Tabela 2 – Relação entre massa, tensão e RDB da balança suspensa digital a sensor indutivo. (considerando tara de 50,0g).

Nº	Faixa de trabalho	Massa (g)	Tensão (V) *	RDB
1	Fora dos limites de medição	< - 5,0	Tensão > 4,43369	De 928 a 1023
2	Zona Morta Inferior	De - 5,0 a 6,9	De 4,41592 a 4,43369	De 901 a 927
3	Dentro dos limites de medição (região confiável)	De 7,0 a 200,0	De 3,93300 a 4,41523	De 195 a 900
4	Zona Morta Superior	De 200,1 a 208,0	De 3,90254 a 3,93232	De 150 a 194
5	Fora dos limites de medição	> 208,0	Tensão < 3,90254	De 0 a 149

* O passo obtido foi de aproximadamente 0,000684V/valor em decimal dos bits do conversor A/D.

A Figura 13 apresenta exemplos da indicação em display das seis regiões apresentadas na Tabela 2.



Figura 13 – Exemplos da indicação em display das seis regiões apresentadas na Tabela 2 (simulação).

As imagens constituintes da Figura 13 foram geradas através da submissão de tensão nos pinos do conversor A/D do PIC por simulação. A indicação do caractere “X” após a palavra Grams (Gramas, em português) no visor LCD indica utilização das faixas de zona morta do sensor (faixas de número 2 e 4). Estas faixas (2 e 4) não são recomendadas para utilização

final do usuário (exceto para calibração da tara) porque estão fora da faixa de trabalho confiável do sensor (faixa de número 3).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos foi possível verificar que a utilização do princípio de sensor indutivo como sistema de medição de massa pode ser bastante eficaz e proporcionar uma medição precisa. Após todos os testes, a faixa de medição balança ficou definida entre 7,0 e 200,0 g, faixa esta que apresentou erro de medição igual a $\pm 7,0$ g e desvio padrão de 0,018 g. Do ponto de vista prático, sugerem-se duas propostas de melhorias podem otimizar o desempenho do sistema e a faixa de operação da balança:

a) um tratamento de sinal mais desenvolvido: o alargamento da faixa de tensão utilizada atualmente (entre 3,8 a 4,5V) para o escalonamento dos 1024 RDB do conversor A/D resultará no aumento do passo atual (0,000684V/RDB do conversor A/D), resultando assim em maior imunidade a ruídos;

b) a implementação na prática do microcontrolador: a utilização de um filtro digital do tipo *Simple Moving Average* (SMA) desenvolvido em linguagem C pelos autores reduz os ruídos presentes no sinal e aumenta a confiabilidade da medição.

Espera-se que este trabalho incite futuras investigações nessa área buscando melhorias nos pontos críticos encontrados, ainda que o estado da arte no quesito medição de massa envolva usualmente células de carga resistiva. Uma balança suspensa digital com uso do princípio do sensor indutivo pode ser bastante precisa e confiável, uma vez que seja feito um estudo bastante profundo nos seus componentes mecânicos e emprego de circuitos que proporcionem menor incidência de erros.

REFERÊNCIAS

BOHN, F; GÜNDEL, A; SEVERINO A. M.; LANDGRAF, F. J. G; SOMMER, R. L. *Propriedades magnéticas de aços elétricos de grão não orientado*. XVI Congresso Brasileiro de Engenharia, e Ciência dos Materiais. Disponível em: <<<http://www.pmt.usp.br/academic/landgraf/>>>, 2004.

GONÇALVES, W. J. *Laboratório de Física - notas de aula*. Universidade Castelo Branco, 2008. Disponível em: <<http://ucbweb.castelobranco.br/webcaf/arquivos/Laboratorio_de_Fisica.pdf>>, 2008.

LIMA, H.L. *Sensores Indutivos*. UFRN. Disponível em: <<<http://www.dee.ufrn.br/~luciano/arquivos/>>>, 2008.

MSPC, I. T. *Bobinas*. Disponível em: <<<http://www.mspc.eng.br/eletrn/bobina100.shtml>>>, 2013.

PERTENCE JÚNIOR, A. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

PINHEIRO, P. C. C. *Noções gerais sobre metrologia*. UFMG. Disponível em: <<<http://www.demec.ufmg.br>>>, 2007.

TORO, V. D. *Fundamentos de máquinas elétricas*. 1ªed. LTC. Rio de Janeiro: 1994.

WEG Indústrias S.A. *Sensores Industriais*. Disponível em: <<www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Controls/Sensores-Industriais/Sensores-Indutivos>>,2012.