

## ELABORAÇÃO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE BAIXO CUSTO PARA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÕES

Luis Paulo Brasil de Souza, luisbrasil55@gmail.com<sup>1</sup>.  
Marcell Landry Negrão Gomes, mlandry.ng@gmail.com<sup>1</sup>.  
Carolina de Oliveira Contente, carolinacontente@hotmail.com<sup>1</sup>.  
Bruno Gomes Dutra, brunodutra@ufpa.br<sup>2</sup>.  
Filipe Renan Benicio da Silva, Frbs.eng@gmail.com<sup>1</sup>.  
Leonardo Dantas Rodrigues, leo45dr@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Mecânica Aplicada, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA,

<sup>2</sup>Laboratório de Controle e Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA.

**Resumo:** A extensometria está presente na análise estrutural em diferentes setores como a construção civil, indústria naval, aeronáutica e mecânica. Utilizando ferramentas de hardware-livre e software-livre, ou seja, sem a necessidade de licenças para utilização, este trabalho objetiva apresentar uma alternativa aos métodos comerciais e tradicionais de aquisição de sinais de deformação, utilizando uma célula de carga disposta em  $\frac{1}{4}$  de ponte de Wheatstone, um módulo de aquisição de sinais HX711, conectado a uma placa Arduino e visualização dos dados por uma interface gráfica desenvolvida em linguagem de programação Python, sendo possível visualizar em tempo real os dados de deformação e armazená-los. Com o armazenamento dos dados de deformações no ponto de análise, é possível a criação de um banco de dados para leitura do histórico de carregamento dos pontos estudados. O sistema foi calibrado utilizando dois extensômetros fixados em lados opostos de uma barra chata de aço, um deles conectado a um circuito do módulo de aquisição HX711 e o outro conectado a um aquisitor de sinais comercial. Desta maneira ao aplicar um esforço de flexão na barra o extensômetro 1, conectado ao circuito, era comprimido (transmitindo sinais negativos) enquanto o extensômetro 2, conectado ao aquisitor comercial, era tracionado (transmitindo sinais positivos), sendo assim os valores em módulo deveriam ser iguais ou aproximadamente iguais. Após os testes, observou-se que o sistema de aquisição proposto apresentou resultados satisfatórios nas situações de carregamento estático ou de baixa frequência.

**Palavras-chave:** Extensometria, Deformação, Aquisição de dados.

### 1. INTRODUÇÃO

Em projetos e análises estruturais a avaliação da resistência mecânica de um material ou estrutura é essencial. Os parâmetros necessários para monitorar o comportamento de uma estrutura submetida a um carregamento são usualmente obtidos por meio de transdutores, que traduzem a resposta mecânica aos carregamentos através de sinais elétricos para equipamentos destinados ao seu condicionamento. O extensômetro é um exemplo de sensor utilizado para este propósito.

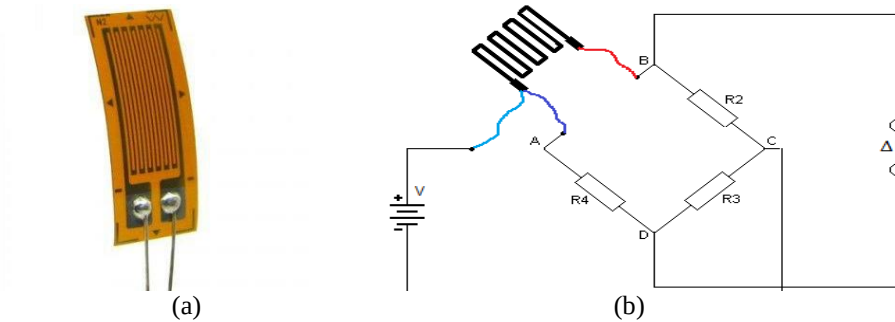
Segundo Freire (2017) os extensômetros de resistência elétrica (EREs, do inglês electrical resistance strain-gauges) são sensores que consistem de fios condutores finos que acusam variações no seu comprimento sempre que o corpo é tracionado ou comprimido. O material condutor presente no extensômetro altera sua resistência de acordo com a deformação pontual da superfície em que está colado, gerando dessa maneira uma variação de resistência elétrica, esta variação do sinal elétrico é interpretada pela placa de aquisição, transformando os valores de tensão em deformação (Autocore Robótica, s.d.).

As deformações ocorridas em uma estrutura podem ser medidas pelo extensômetro, todavia esta informação não é automaticamente organizada para o usuário ou projetista, é imprescindível o uso de um sistema de medição para transformar os dados obtidos em informações entendíveis.

O objetivo deste trabalho é construir um sistema de aquisição de dados de deformação de baixo custo utilizando a plataforma Arduino, que é uma plataforma de código aberto, usada constantemente para a construção e programação de eletrônicos, recebendo e enviando informações para os dispositivos por meio de uma porta serial ou pela internet; e fazer um programa em Python para a arquivar e visualizar os dados de deformação.

## 2. EXTENSOMETRIA

Neste trabalho utilizou-se a ligação de extensômetros em  $\frac{1}{4}$  de ponte de Wheatstone, com a utilização de três fios, sendo que a função do terceiro fio é atenuar os efeitos de temperatura sobre o extensômetro. A resistência do terceiro fio é ligada em série com a fonte de alimentação, reduzindo a tensão efetiva de excitação da ponte. Freire (2009) afirma que a variação da temperatura não influencia a saída  $\Delta E$  da ponte de Wheatstone. A Fig 1 (a) ilustra um extensômetro e a Fig 1 (b) ilustra o sistema de ligação em  $\frac{1}{4}$  de ponte a 3 fios.



**Figura 1. (a) Sensor de deformação, extensômetro; (b) Ponte de Wheatstone em  $\frac{1}{4}$ .**

No esquema de ligação por três fios em ponte de Wheatstone, a variação da resistência é dada por:

$$\Delta E \cong \frac{V \cdot K}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_{ERE}}{R_{ERE}} \right) \quad (1)$$

Sendo  $\Delta E$  a variação de tensão na saída da ponte de Wheatstone,  $V$  a tensão de alimentação da fonte,  $K$  é o fator de calibração do ERE,  $R_{ERE}$  a resistência do ERE e  $\Delta R_{ERE}$  a variação de resistência do ERE.

## 3. CADEIA DE MEDIÇÃO

A deformação sofrida pelos extensômetros é geralmente pequena e pode apresentar sinais não desejáveis (ruídos), utiliza-se então um módulo condicionador de sinais que consiste em circuito capaz de amplificar, filtrar e converter digitalmente o sinal analógico proveniente do extensômetro para um sinal digital. Deste modo, a cadeia de medição é basicamente composta pelo sensor de deformação, condicionador de sinais, processamento e aquisição dos sinais digitais. Como ilustrado na Fig 2.



**Figura 2. Sistema de medição esquematizado (National Instruments, 2017).**

De acordo com a Fig 2, a cadeia de medição de deformação de baixo custo é composta pelos sensores de deformação colados na barra, o sistema de condicionamento de sinal que é formado pelo módulo amplificador e conversor de sinais HX711, que comunica o sensor com o microcontrolador, amplificando os sinais e rejeitando frequências provenientes da rede elétrica (50 Hz/60 Hz), por sua vez o Arduino uno apresenta ainda 14 pinos digitais de entrada/saída, onde 6 deles podem ser utilizados como saídas PWM; 6 entradas analógicas, o microcontrolador ATMEGA 328, componente responsável por receber e/ou transmitir os comandos para o circuito. Na Figura 3 é mostrado a cadeia de medição de baixo custo.

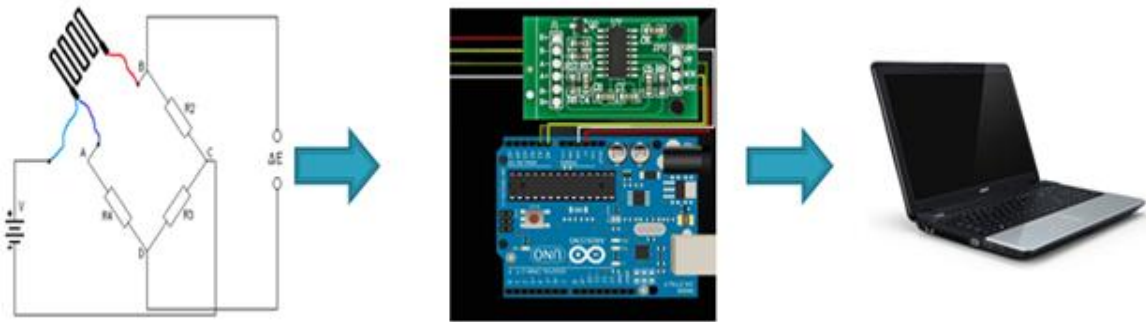


Figura 3. Sistema de medição esquematizado (National Instruments, 2017).

#### 4. CALIBRAÇÃO

Para calibrar um sistema é necessário um medidor padrão, logo se escolheu o aquisitor comercial da *Micro-Measurements* (fabricante). Foram colados dois extensômetros em uma barra chata de aço, posteriormente engastada em uma de suas extremidades. Com os dois extensômetros colados em sentidos opostos da viga, como mostrado na Fig 3, e como resposta a um carregamento vertical os sensores responderão com magnitude de deformação iguais e sinais contrários, isto se deve ao fato que mediante um esforço vertical na extremidade não engastada da viga um extensômetro seria tracionado (transmitindo valores positivos) enquanto o outro comprimido (transmitindo valores negativos).

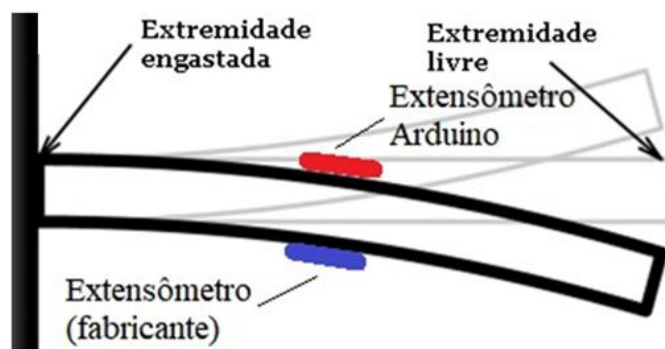


Figura 3. Representação do sistema submetido ao carregamento oscilante, adaptado de (Wikipédia, 2017)

#### 5. FILTRAGEM ATIVA DE RUÍDO COM FILTRO DE KALMAN

A medição dos dados providos do sensor Extensômetro é bem ruidosa e a utilização de filtros de média móvel elimina esse problema, porém quanto maior as amostras do filtro, mas lenta é a resposta do mesmo, sendo uma resposta com atraso proporcional a ordem do filtro. Para solucionar esse problema utiliza-se nesse trabalho filtro de Kalman, pois é um processo recursivo para solucionar problemas lineares relacionados à filtragem de dados discretos em tempo real.

O filtro de Kalman é um estimador para o problema gaussiano linear quadrático. Para Façanha (2013) tal problema consiste na estimação dos estados instantâneos de um sistema linear dinâmico perturbado por ruído gaussiano branco por meio de medições linearmente relacionadas aos estados e também contaminadas por ruído branco. Segundo Diniz (2008) o ganho do filtro de Kalman  $K(k)$  tem como objetivo, filtrar erros de estimação e ruído, de forma que a variável de estado consiga a melhor correção possível, reduzindo o erro quadrático médio.

Segundo Betti (2012) o filtro de Kalman é um procedimento aplicável quando os modelos estão escritos sob a forma espaço-estado. Utiliza-se nesse trabalho o modelo de séries temporais auto regressivo de média móvel (ARMA).

As equações do filtro de Kalman podem ser divididas em dois grupos distintos, sendo equações de atualização do tempo e equações de atualização da medição. Estes dois grupos de equações funcionam conjuntamente como um sistema de retroalimentação. As equações de atualização do tempo são responsáveis pelo avanço das variáveis de estado e das covariâncias no tempo para se obter as estimativas anteriores (a priori) para o próximo instante.

De acordo com Cruz (2013) as equações de atualização das medições são responsáveis pela retroalimentação, ou seja, incorporam uma nova informação da variável observável nas estimativas anteriores para obter um ganho na estimação posterior. As equações de atualização do tempo são denominadas equações de previsão e as equações de atualização das medições são denominadas equações de correção. A Figura 4 a seguir representa uma forma

esquemática das equações de atualização temporal e atualização de medição em forma de algoritmo para implementação.

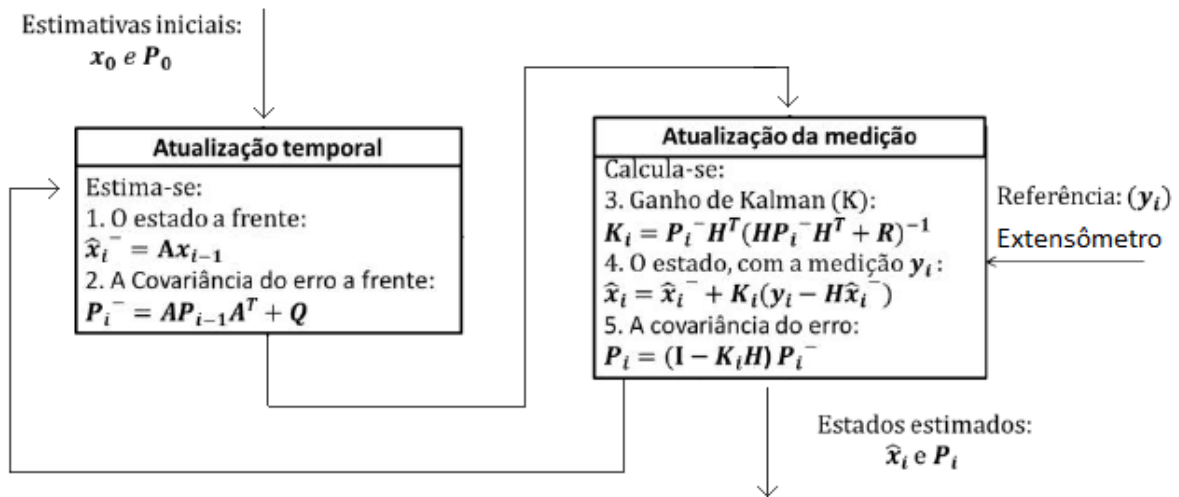


Figura 4. Algoritmo filtro de Kalman (Cruz, 2013)

Tem-se que  $\hat{x}_i^-$  é a estimativa a priori do vetor  $\hat{x}_i$ ,  $P$  é a matriz de covariância do erro,  $K$  é o ganho de Kalman,  $Q$  é a matriz de covariância do ruído de processo e  $R$  é a matriz de covariância do ruído de medição. Para  $x_0$  e  $P_0$  foram dados valores nulos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No primeiro teste foi colocado um objeto de 300g na ponta não engastada da viga. O resultado pode ser visualizado na Fig 5, onde se compara o monitor de resultados do Arduino com o do aquisitor comercial.

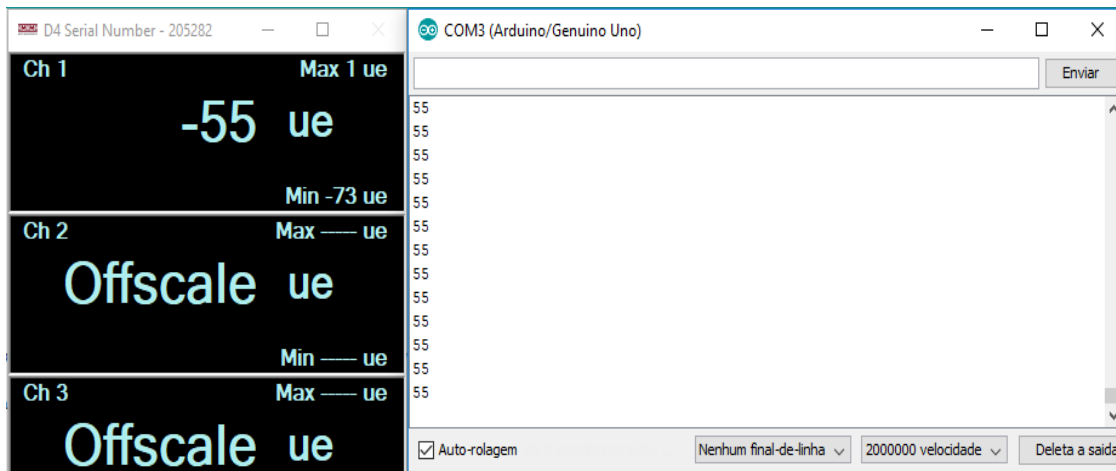
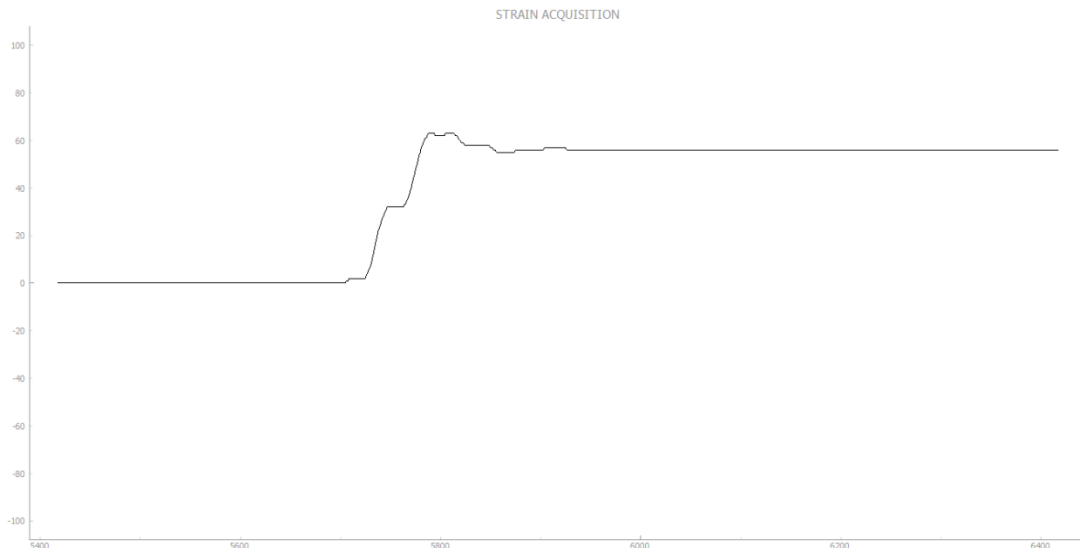


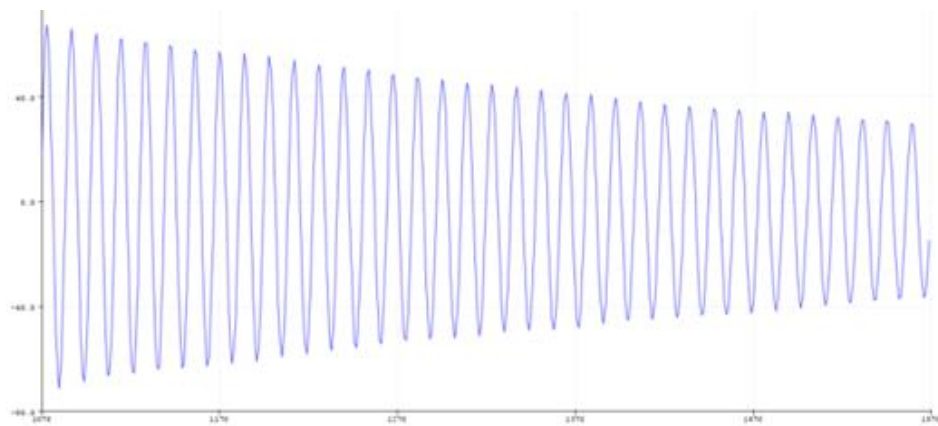
Figura 5. Comparação dos dados obtidos.

O valor de deformação variou de  $54\mu\text{e}$  a  $58\mu\text{e}$ , possuindo um valor final estável de  $55\mu\text{e}$ , o mesmo valor obtido pelo aquisitor comercial. A taxa de aquisição do módulo HX711 foi definida em 80 Hz enquanto o aquisitor comercial apresenta uma taxa de 8 Hz, logo o número de amostras transmitidas ao microcontrolador é muito mais alta, possibilitando a aquisição de uma maior taxa de amostragem. Além dos resultados presentes no monitor do Arduino o usuário pode visualizar um gráfico, programado com a linguagem Python, em tempo real à aquisição, como mostra a Fig 6.



**Figura 6. Gráfico plotado em tempo real.**

O Arduino também apresenta uma tela com plotagem gráfica, porém não é possível modificar alguns parâmetros, como por exemplo, a escala do gráfico, mantendo sempre o padrão de auto-escala. Na Figura 7 observa-se um exemplo de medição a uma resposta a um impulso.



**Figura 7. Resposta ao impulso [5].**

O software para visualização do gráfico foi programado para mostrar sempre os 50 últimos dados aquisitados pelo sistema, deste modo a abscissa do gráfico se renova melhorando a exibição dos dados automaticamente. A Figura 8 apresenta o código desenvolvido.

```

aquisicao_serial = conexao.readline() #leitura dos dados da porta serial

dataArray = aquisicao_serial
try:
    deform = float(dataArray[:-2])
except:
    deform = 0

deformArray.append(deform) #Vetor com os dados aquisitados

plt.cla()
plt.plot(deformArray)
plt.ylim(-150, 150)
plt.pause(.00001)
count = count + 1

if(count>50):
    deformArray.pop(0) #Quando atinge 50 dados, apaga-se o primeiro
                    #mantendo sempre os últimos 50 dados para visualização

```

**Figura 8. Algoritmo de adequação do eixo das abcissas do gráfico.**

O programa permite salvar dados em formato de texto, com o algoritmo presente na Fig 9. O usuário escolhe o número de pontos desejado e ao final o arquivo é gerado, possibilitando um banco de dados para posterior visualização e tratamento destes sinais.

```

userInput = input()

numPoints = 1000                                #Número de pontos desejável

while(1):

    if userInput == 1:                            #Digitar "1" para iniciar a aquisição
        ini = time.time()
        for i in range(0, numPoints):

            data=open('data_extensômetro.txt', 'a+b') #Abre um arquivo
            aquisicao_serial = conexao.readline()

            print(aquisicao_serial)

            data.write(aquisicao_serial)            #Início do salvamento

            data.close                             #Fecha o arquivo após o término da contagem

        fim = time.time()
        break

    print "tempo de aquisição: ", fim-ini

conexao.close()

```

**Figura 9. Algoritmo para salvar os dados em arquivo de texto.**

## 7. CONCLUSÃO

O sistema de medição proposto atende de forma satisfatória medições estáticas ou em baixas frequências, o que justifica seu uso em situações onde predominam estas características. A estabilidade do sistema é um parâmetro que ainda está sendo constantemente estudado visando igualar ainda mais os valores obtidos pelo equipamento proposto com os valores do equipamento comercial. Quando a estabilidade total do sistema for alcançada, com projetos de filtros analógicos e/ou digitais, espera-se aplicar o sistema em diferentes estruturas como edifícios, pontes, máquinas de pequeno, grande e médio porte, entre outros.

Uma vantagem já analisada é em relação ao baixo custo do sistema. Priorizando o uso de plataformas livres, nas quais é dispensável a utilização de licenças, o custo para o seu desenvolvimento torna-se menor em comparação aos equipamentos comerciais e há diversos materiais de apoio na internet, divulgados por desenvolvedores e projetistas ao redor do mundo.

## 8. AGRADECIMENTOS

- Fundação Amazônica de Amparo a Estudos e Pesquisa – FAPESPA;
- Instituto de Tecnologia/UFPA - ITEC;
- Programa de Pós-graduação de Engenharia Mecânica – PPGEM;
- Núcleo Avançado de Análise de Tensões – NAAT.

## 9. REFERÊNCIAS

- Autocore Robótica. Janeiro de 2017. Disponível em <https://www.autocorerobotica.com.br/strain-gauge-extensometro-de-resistencia-eletrica>. Acesso em 15 de Julho de 2017.
- Betti, V. A. Estudos teóricos na estimação em processos K-factor garma via modelo de espaço de estudos utilizando filtro de Kalman. 2012.
- Cruz, S. M. "Implementação de um filtro de Kalman estendido em arquiteturas reconfiguráveis aplicado ao problema de localização de robôs móveis." 2013.
- Diniz, P. S. R (2008). Adaptative Filtering Algorithm and Pratical Implementation. In: Springer Science+Business Media, LLC.
- Freire, J. L. F. "Extensômetros de Resistência Elétrica." Maio de 2009. Departamento de Engenharia Mecânica - PUC Rio. Disponível em <<http://edaet.usuarios.rdc.puc-rio.br/>>. Acesso em 15 de Julho de 2017.
- Wikipédia - Modelo de Viga de Euler-Bernoulli. Disponível em <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_de\\_viga\\_de\\_Euler-Bernoulli](https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_viga_de_Euler-Bernoulli)>. Acesso em Outubro de 2017.
- National Instruments. Disponível em <<http://www.ni.com/white-paper/10630/pt/>>. Acesso em Outubro de 2017.
- S. Façanha, T., ANDRÉ L. Carneiro, JOSÉ. TC FILHO. "Filtro de kalman via programação quadrática.", Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2013.

## 10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

### DEVELOPMENT OF LOW COST DATA ACQUISITION SYSTEM FOR DEFORMATIONS MEASUREMENT

Luis Paulo Brasil de Souza, luisbrasil55@gmail.com<sup>1</sup>.

Marcell Landry Negrão Gomes, mlandry.ng@gmail.com<sup>1</sup>.

Carolina de Oliveira Contente, carolinacontente@hotmail.com<sup>1</sup>.

Bruno Gomes Dutra, brunodutra@ufpa.br<sup>2</sup>.

Filipe Renan Benicio da Silva, Frbs.eng@gmail.com<sup>1</sup>.

Leonardo Dantas Rodrigues, leo45dr@gmail.com<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Laboratório de Mecânica Aplicada, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA,

<sup>2</sup> Laboratório de Controle e Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA.

**Abstract.** *Extensometry is present in structural analysis in different sectors such as civil construction, naval industry, aeronautics and mechanics. Using hardware-free and software-free tools, that is, without the need for licenses to use, this work aims to present an alternative to commercial and traditional methods of acquiring deformation signals, using a load cell arranged in  $\frac{1}{4}$  of a bridge of Wheatstone, a signal acquisition module HX711, connected to an Arduino board and visualization of the data by a graphical interface developed in Python programming language, being possible to visualize and store in real time the deformation data. By storing deformation data at the analysis point, it is possible to create a database to read the loading history of the studied points. The system was calibrated using two strain gauges fixed on opposite sides of a flat steel bar, one connected to one circuit of the HX711 acquisition module and the other connected to a commercial signal receiver. This way, when applying a flexion strain on the bar, the strain gauge 1, connected to the circuit, was compressed (transmitting negative signals) while the extensometer 2, connected to the commercial data receiver, was pulled (transmitting positive signals), so the values in module be equal or approximately equal. After the tests, it was observed that the proposed acquisition system presented satisfactory results in situations of static or low frequency loading.*

**Keywords:** *Extensometry, Deformation, Data Acquisition*