

COMPARAÇÃO DE EXTENSÔMETROS E ACELERÔMETROS PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM VIGAS FLEXÍVEIS SUJEITAS A PERTURBAÇÃO EXTERNA

Gabriel da Silva Lima, limagabriel@ufrn.edu.br¹

Diego Rolim Porto, dporto@ufrn.edu.br¹

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br¹

Wallace Moreira Bessa, wmbessa@ct.ufrn.br¹

¹Laboratório de Manufatura, Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil.

Resumo: Manipuladores flexíveis são alternativas viáveis em substituição aos mecanismos rígidos clássicos, quando se desejar reduzir o consumo de energia e garantir um menor volume de trabalho. Objetivando montar um sistema de instrumentação com transdutores de baixo custo e capaz de obter um conjunto amplo de informações relacionados à dinâmica de oscilação em mecanismos flexíveis, nesse trabalho foi feita uma comparação de extensômetros e de acelerômetros para poder medir a frequência de vibração de uma viga flexível engastada em uma das extremidades. Os valores de frequência obtidos foram comparados com a solução analítica presente na literatura. Os resultados foram separados de acordo com a frequência do excitador. O extensômetro apresentou adequados resultados para frequências próximas da excitação enquanto os acelerômetros para outras frequências, inclusive identificando a superposição de modos naturais distintos.

Palavras-chave: Instrumentação, mecanismos flexíveis, extensômetros, acelerômetros, vibração.

1. INTRODUÇÃO

Os manipuladores robóticos flexíveis, quando comparados aos rígidos, possuem as vantagens de serem mais leves, demandarem menor consumo de energia, possuírem menor volume de trabalho, poderem trabalhar em altas velocidades e proporcionarem maior segurança em ambientes onde pessoas e robôs trabalham conjuntamente. Em contrapartida, devido à baixa rigidez, apresentam problemas relacionados às incertezas vinculados as vibrações ocasionadas pelo movimento do mecanismo (Lochan, Roy e Subudhi, 2016). Essas vibrações podem ocasionar perda de precisão na operação do manipulador além de induzirem fadiga mecânica em componentes críticos, caso ocorram de forma frequente.

Com o intuito de estudar o comportamento dessas vibrações a fim de controlá-las e/ou amortecê-las, validar e melhorar modelos analíticos, transdutores apropriados podem ser utilizados para monitorá-las e medi-las (Inman, 2014). As medições de vibrações podem ser descritas através das medidas de amplitude e frequência. Com a amplitude é possível mensurar o quão intensa é a vibração sobre o mecanismo e com a frequência é possível conhecer sua taxa de ocorrência. Os extensômetros são utilizados para medir deformações e, consequentemente, vibrações no mecanismo também podem ser determinadas. Além do tipo de informação adquirida, a diferença no uso de um transdutor para outro está na precisão de medição para faixas de frequências diferentes. (Ágoston, 2016).

Algumas aplicações nas quais foram usados extensômetros para medição de vibração foram observadas por (Knapp et al., 1998) para aplicação em medições de vigas sujeitas a impactos e por (Marques dos Santos et al. 2015) para detecção de vibrações baseado no dano.

O objetivo desse trabalho é comparar esses dois tipos de transdutores para medir a vibração livre e forçada harmonicamente de uma viga flexível engastada-livre. Os acelerômetros utilizados foram o MMA8452Q e o 4518 da Brüel & Kjaer (B&K). Já o extensômetro utilizado foi o BX120-3AA. Essa tecnologia e sua instrumentação se aplicam a outros sistemas similares, inclusive os manipuladores flexíveis. Varanis et al. (2016) realizou um trabalho similar utilizando acelerômetro, giroscópio e um transdutor ultrassônico, sem utilizar uma fonte externa de excitação de vibração no sistema.

Com a utilização conjunta desses transdutores foi possível medir a frequência de vibração a qual essa viga está submetida para diversas frequências do excitador. Os resultados obtidos pelos transdutores foram comparados com os resultados analíticos obtidos através de expressões presentes na literatura. Além disso, os resultados obtidos pelo acelerômetro MMA8452Q e do extensômetro foram comparados com os resultados vindos do acelerômetro 4518 da Brüel & Kjaer, por esse último fornecer resultados de maior qualidade e por ele possuir maior capacidade de aplicação

em termos de *range* de frequência. Esses transdutores também possuem custo bem menor em relação transdutores da Brüel & Kjaer (de 10 a 15 vezes menor).

Com essa comparação foi possível afirmar até qual frequência de excitação externa seria adequado utilizar o acelerômetro de Arduino e o extensômetro. Esses transdutores demandam recursos de menor custo em comparação ao acelerômetro da Brüel & Kjaer. Ao final desse trabalho foram feitos apontamentos relacionadas às limitações desses transdutores e ao custo relativo deles. A possibilidade de reduzir os gastos de instrumentação utilizando equipamentos mais baratos sempre é bem-vinda contanto que os resultados obtidos por eles estejam dentro de padrões aceitáveis.

2. METODOLOGIA

2.1. Fundamentação Teórica

A equação diferencial que descreve a dinâmica de uma viga é dada pela equação (Meirovitch, 1986):

$$m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \right) = f(x,t) \quad (1)$$

na qual $m(x)$ é a massa por unidade de comprimento, $EI(x)$ é a rigidez à flexão, $f(x,t)$ é a carga externa e $y(x,t)$ o deslocamento transversal da viga.

Suas frequências naturais são calculadas pela Eq. 2 apresentada por Meirovitch (1986):

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (2)$$

Onde, $n \in \mathbb{Z}^+$ e $\beta_n L \in \mathbb{R}^+$. Esse último é dado pela solução da Eq. 3, também apresentada por Meirovitch (1986):

$$\cos(\beta L) \cosh(\beta L) = -1 \quad (3)$$

em que L é o comprimento da viga. A Eq. 3 é consequência direta da solução geral da Eq. 1 aplicada as condições de fronteira (condições de contorno) e desconsiderando o termo referente as cargas externas (vibração livre).

2.2. Procedimento Experimental

O aparato experimental utilizado é mostrado na Fig. 1. Lacres de *Nylon* foram utilizados para fixar o motor e os fios do acelerômetro MMA8452Q na régua.

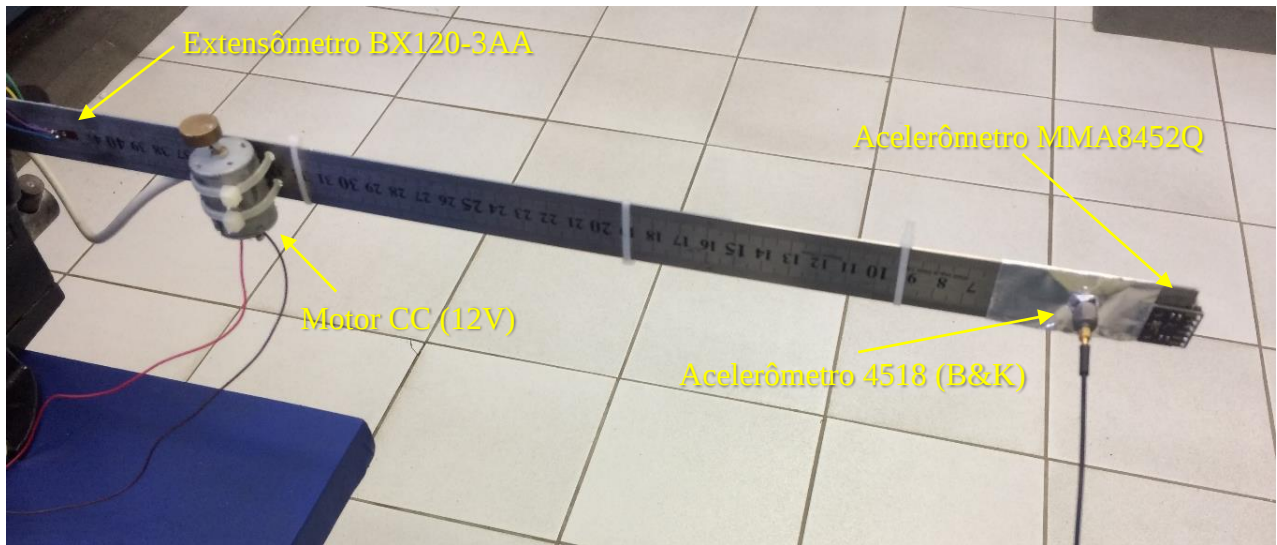


Figura 1. Aparato experimental mostrando os transdutores e o motor CC.

O aparato experimental construído é composto pelos elementos presentes na Fig. 1 e relacionados a seguir:

- Arduino UNO;
- Acelerômetro MMA8452Q;
- Acelerômetro da B&K;
- Régua de aço inoxidável da Vonder;
- Extensômetro BX120-3AA;
- Motor CC de 12V com massa excêntrica;
- Fonte de tensão de 12V;
- Driver L293D (ponte-H);
- Resistores de 300 Ω ;
- Demais materiais para montagem do circuito (jumpers, fios, *protoboard*).

A aquisição dos dados com o acelerômetro MMA8452Q foi feita utilizando o Arduino. O circuito utilizado para essa aquisição é mostrado na Fig. 2 e as especificações desse transdutor são mostradas na Tab. 1.

Já a aquisição dos dados com o acelerômetro da B&K e com o extensômetro BX120-3AA foi feita utilizando os módulos NI 9234 e NI 9237 da B&K , respectivamente. As especificações desses transdutores encontram-se nas Tabs. 1 e 2.

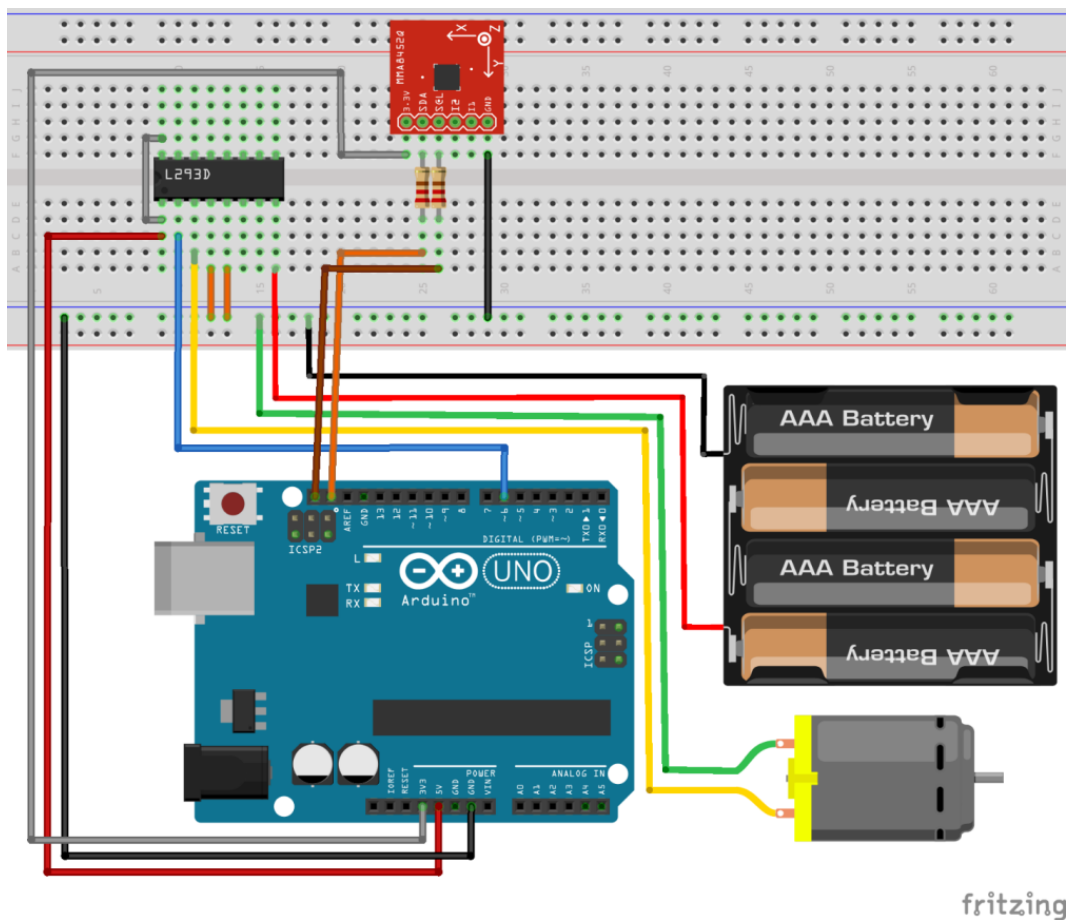


Figura 2. Circuito esquemático com a ligação do Arduino com o acelerômetro MMA8452Q da Ponte H com o motor CC e a fonte de alimentação.

Tabela 1. Especificações de ambos acelerômetros usados

	MMA8452Q	Type 4518
Tensão de alimentação	1,95 – 3,6 V	Informação indisponível
Escala de medição	$\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$	$\pm 500g$
Frequência de aquisição	1,56 – 800 Hz	1,0 Hz – 20 kHz
Interface digital de saída	I ² C	CCLD
Corrente de alimentação	Informação indisponível	4 mA
Sensibilidade	Informação indisponível	10,33 mV/g

Tabela 2. Especificações do extensômetro BX120-3AA.

Resistência	120 Ω
Fator gauge	$2 \pm 2\%$

A vibração harmônica foi causada por um motor CC controlado utilizando o princípio de PWM (*Pulse-Width Modulation*) e posicionado a 116 mm do engaste. O controle do motor foi feito utilizando a ponte-H com a placa Arduino servindo de intermediário com o computador. A ligação desses elementos também é mostrada na Fig. 2.

Os acelerômetros foram colocados na extremidade da régua oposta ao engaste, pois foi o local esperado de maior deslocamento, e o extensômetro a 20mm do engaste, pois foi o local esperado de maior deformação.

Na Tab. 3 são mostradas as características da régua utilizada como viga.

Tabela 3. Características da régua utilizada como viga.

Comprimento	450 mm
Largura	25 mm
Espessura	1 mm
Módulo de Young	198 GPa
Momento de Inércia	2,083 mm ⁴
Massa específica	7810 kg/m ³

A aquisição de dados foi feita para o caso de vibração livre e para os valores de rotação do motor de 707,46, 1385,58 e 2063,72 RPM. Foi aplicada FFT (*Fast Fourier Transform*) sobre os dados captados pelos transdutores para obter o espectro de frequência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Cálculo das frequências naturais

Calculando as 4 primeiras raízes da Eq. 3 é possível determinar, utilizando os dados da Tab. 3, as 4 primeiras frequências naturais de oscilação da estrutura, para o sistema já detalhado na metodologia. As frequências são mostradas na Tab. 4:

Tabela 4. Frequências naturais de oscilação para uma viga engastada para cada valor de βL .

βL	ω [Hz]
1,875	4,016
4,694	25,171
7,855	70,486
10,995	138,103

3.2. Dados captados pelos transdutores

As frequências de aquisição dos dados de cada transdutor foram de 570 Hz, 2560 Hz e 2500 Hz, para os acelerômetros MMA8452Q e da B&K e do extensômetro, respectivamente.

Para o caso de vibração livre seguem os dados adquiridos pelos diferentes transdutores na Tab. 5.

Tabela 5. Frequências captadas pelos transdutores para o caso de vibração livre.

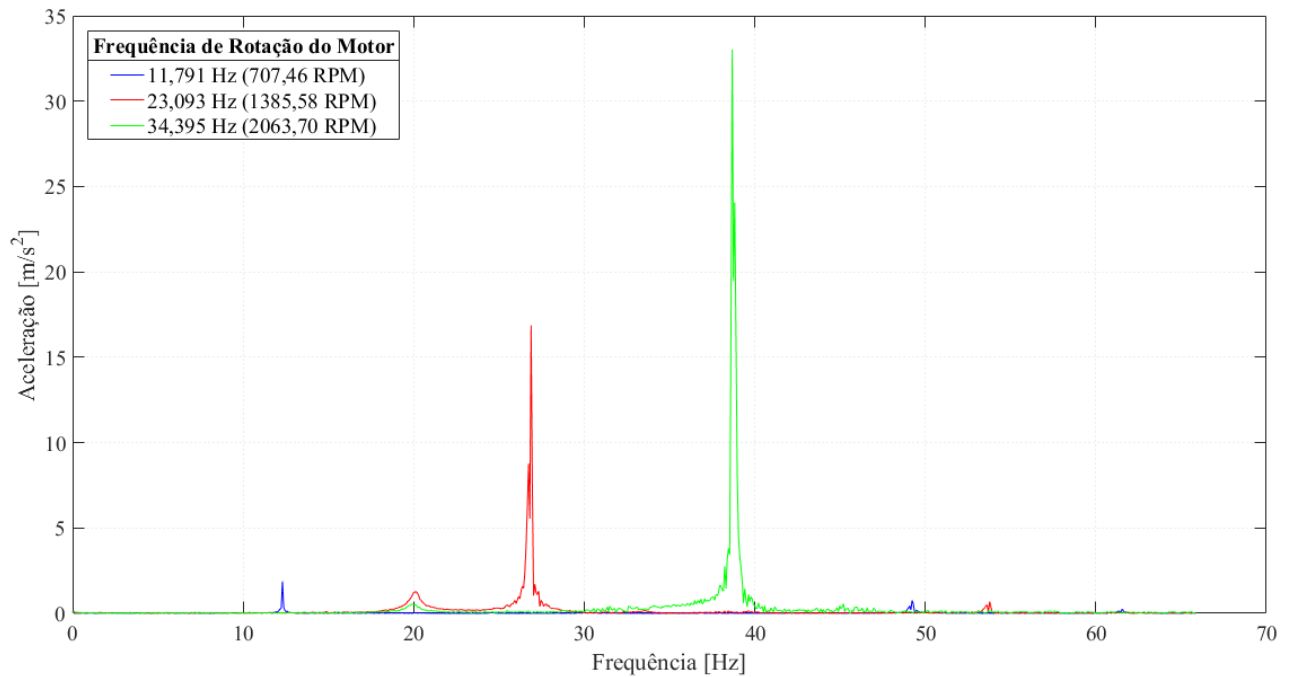
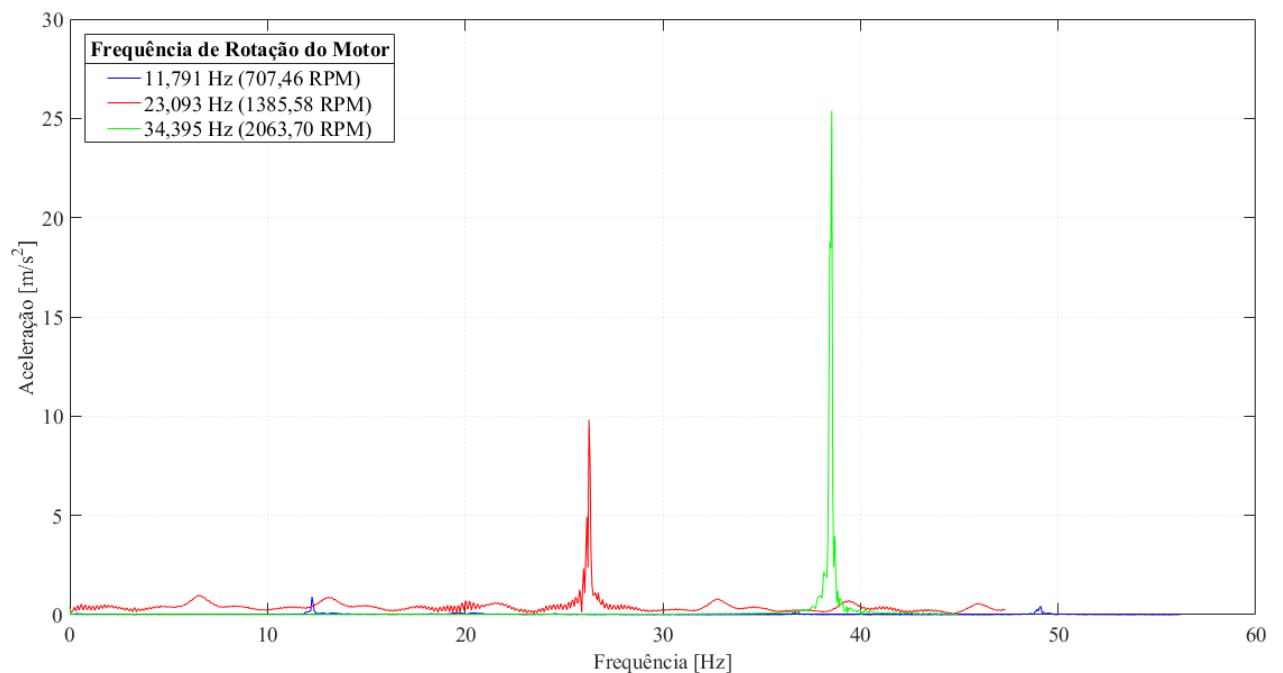
Transdutor	Frequência [Hz]
MMA8452Q	3,296
Type 4518	3,306
BX120-3AA	3,297

Considerando já a excitação do motor, os dados colocados na Tab. 6 representam as frequências com maior amplitude de aceleração dentro do espectro para cada um dos transdutores.

Tabela 6. Frequências de maior amplitude captadas pelos transdutores para cada uma das rotações postas no motor.

Frequências de rotação do motor	Transdutor		
	MMA8452Q	Type 4518	BX120-3AA
11,791 Hz (707,46 RPM)	12,307	12,250	12,281
23,093 Hz (1385,58 RPM)	25,145	26,21	26,144
34,395 Hz (2063,72 RPM)	38,678	38,567	38,568

Os espectros de frequências são mostrados nas Figs. 3, 4 e 5 para os acelerômetros MMA8452Q e Type 4518 e do extensômetro, respectivamente.

**Figura 3. Espectro em frequência dos dados captados pelo acelerômetro MMA8452Q.****Figura 4. Espectro em frequência dos dados captados pelo acelerômetro Type 4518.**

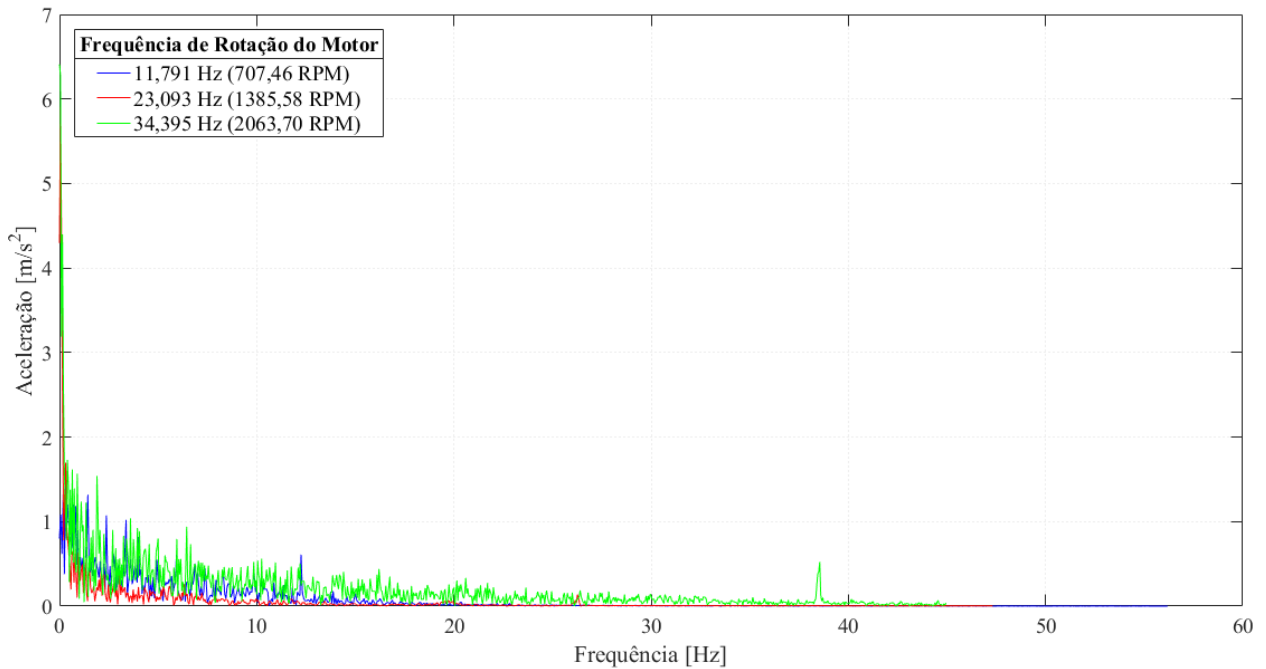


Figura 5. Espectro em frequência dos dados captados pelo extensômetro BX120-3AA.

3.3. Análise dos resultados

Em relação aos dados de vibração livre, nota-se o quão próximo eles ficaram entre si, pois a divergência máxima é de 0,01 Hz, considerando os dados dos dois acelerômetros e que a aquisição deles foi feita utilizando-se frequências bem distintas. Nota-se também uma diferença média de 0,7 Hz dessas frequências com o a frequência do primeiro modo de vibração. Essas diferenças podem ter ocorrido devido ao *incremento* de massa na estrutura pela presença do motor e dos cabos do acelerômetro.

Com respeito aos dados do acelerômetro MMA8452Q apresentados na Fig. 3 e na Tab. 6, nota-se as frequências de maior destaque citadas na Tab. 6 dentro da Fig. 3. Além dessas frequências outras foram notadas, mas não levadas em consideração devido à baixa amplitude em relação aos picos para uma mesma curva do espectro. Entretanto vale destacar que próximo à frequência de 20 Hz, tanto para rotação do motor de 1385,58 RPM quanto 2063,70 RPM, ocorreu um pequeno pico provavelmente indicando a presença do segundo modo de vibração. Apesar do valor de frequência para o segundo modo ser de 25,145 Hz, deve-se lembrar que essa frequência *não é a real*, pois não leva em conta a modificação da massa da estrutura, conforme mencionado para o caso livre. Os dados adquiridos com o acelerômetro MMA8452Q foram muito satisfatórios, porém o baixo limite de medição desse transdutor impossibilitou a aquisição de dados para altas frequências de vibração forçada.

Observando a Fig. 4 faz-se a mesma observação que foi feita em relação ao uso do acelerômetro MMA8452Q. Algo que deve ser notado é a diferença em termos de amplitudes em relação ao uso dos acelerômetros. Isso pode ser explicado pelo fato desses transdutores não estarem localizados exatamente no mesmo ponto. Como pode ser verificado na Fig. 1, o acelerômetro MMA8452Q está realmente na extremidade da régua enquanto o acelerômetro Type 4518 está recuado em 15mm.

Já em relação aos dados do extensômetro, nota-se, primeiramente, a grande quantidade de ruído presente no espectro de frequência em relação ao espectro dos acelerômetros para frequências abaixo de 10Hz. Esse ruído impossibilita a totalmente a análise dos dados para a faixa descrita. Mesmo assim foi possível identificar as frequências que se destacaram, distantes da faixa ruidosa, com ótima aproximação em relação aos dados dos demais transdutores. Em relação à amplitude, deve-se observar que como não foi realizada uma calibração desse transdutor, logo não serão levadas em consideração as informações com respeito a essa informação, exceto a avaliação *qualitativa* do espectro para identificar as frequências.

4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foram comparadas as frequências de oscilação de uma régua (viga) sujeita a vibração livre vibração forçada harmonicamente com a utilização de um motor CC com massa excêntrica. Os transdutores utilizados foram o acelerômetro MMA8452Q, o acelerômetro Type 4518 da Brüel & Kjaer e o extensômetro BX120-3AA.

Com base nos resultados obtidos foi possível observar uma boa aproximação das frequências em relação aos três transdutores utilizados e em cada uma das aplicações (vibração livre e excitação externa). A análise ficou retida em relação as principais (maiores) frequências que se destacavam em amplitudes dentro do espectro de frequência.

Dados esses resultados pode-se concluir que a utilização do acelerômetro MMA8452Q e do extensômetro BX120-3AA conduz a adequados resultados dentro das frequências postas. Esses transdutores, por serem de menor custo em relação ao da B&K, acabam por reduzir os custos de instrumentação e, consequentemente, os de projeto. Porém, faz-se necessárias uma análise de valores esperados para o sistema antes de realizar a instrumentação e avaliar se os transdutores serão capazes de funcionar corretamente, dadas suas limitações, para as necessidades do projeto.

5. AGRADECIMENTOS

Contribuíram com esse trabalho a equipe do Laboratório de Manufatura da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (LabMan/UFRN) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. REFERÊNCIAS

- Ágoston, Katalin. 2016. "Vibration Detection of the Electrical Motors Using Strain Gauges." *Procedia Technology* 22:767–72.
- Inman, Daniel J. 2014. *Engineering Vibration*. Pearson Education. 4th ed. New Jersey: Pearson.
- Knapp, J., E. Altmann, J. Niemann, and K.-D. Werner. 1998. "Measurement of Shock Events by Means of Strain Gauges and Accelerometers." *Measurement* 24 (2):87–96.
- Lochan, K., B. K. Roy, and B. Subudhi. 2016. "A Review on Two-Link Flexible Manipulators." *Annual Reviews in Control* 42. Elsevier Ltd:346–67.
- Marques dos Santos, Fabio Luis, Bart Peeters, Jenny Lau, Wim Desmet, and Luiz Carlos Sandoval Goes. 2015. "The Use of Strain Gauges in Vibration-Based Damage Detection." *Journal of Physics: Conference Series* 628.
- Meirovitch, Leonard. 1986. *Elements of Vibration Analysis*. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill.
- Varanis, Marcus, Anderson Langone Silva, Pedro Henrique, Ayres Brunetto, and Rafael Ferreira Gregolin. 2016. "Instrumentation for Mechanical Vibrations Analysis in the Time Domain and Frequency Domain Using the Arduino Platform." *Revista Brasileira de Ensino de Física* 38 (1):1–10.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPARISON OF STRAIN GAUGES AND ACCELEROMETERS FOR VIBRATION MEASUREMENT IN FLEXIBLE BEAMS SUBJECT TO EXTERNAL EXCITATIONS

Gabriel da Silva Lima, limagabriel@ufrn.edu.br¹

Diego Rolim Porto, dporto@ufrn.edu.br¹

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br¹

Wallace Moreira Bessa, wmbessa@ct.ufrn.br¹

¹Manufacturing Laboratory, Mechanical Engineering Department, Center of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brazil.

Abstract: Flexible Manipulators are viable alternatives to the classic rigid manipulators. Especially, when a lower energetic cost and workload are wanted or needed. Aiming to assemble a low cost instrumentation system capable of obtaining a wide set of information related to oscillation dynamics in flexible mechanisms. In this work a comparison of strain gauges and accelerometers was made to be able to measure the vibration frequency of a flexible beam set in one end. The obtained frequency values were compared with the analytical solution present in the literature. The results were separated according to the frequency of the exciter. The strain gauges showed good results for frequencies close to the excitation while the accelerometers for other frequencies, including identifying the superposition of distinct natural modes.

Keywords: Instrumentation, flexible mechanisms, strain gauges, accelerometers, vibrations.