

UM ESTUDO SOBRE O EFEITO DO ALIASING NA APLICAÇÃO DE SENSORES MEMS EM ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Fábio Maia de SOUSA (1); Geraldo Luis Bezerra RAMALHO (2)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Av. Contorno Norte, 10 - Parque Central
Distrito Industrial - Maracanaú - CE, CEP:61925-315, Fone: (85) 3878.6300 - Fax: (85) 3878.6311,
e-mail: (1) fabioifce@gmail.com; (2) gramalho@ifce.edu.br

RESUMO

Esse trabalho propõe uma metodologia para aplicação de sensores de vibração eletrônicos de baixo custo e taxa de amostragem limitada na manutenção preditiva de máquinas rotativas. Para os experimentos, foram escolhidos defeitos de desalinhamento e desbalanceamento, pois são falhas que produzem vibração em baixa frequência. Tomou-se como base para o estudo o sensor MEMS MMA7455L que possui 125 Hertz de taxa de amostragem. Utilizando-se de simulações com o software Qt octave e a ferramenta FFT, chegou-se a uma metodologia que viabiliza, com o conhecimento do fenômeno de *aliasing* na discretização dos sinais de vibração, a aplicação do sensor em situações além da sua capacidade nominal.

Palavras-chave: análise de vibração, máquinas rotativas, sensor MEMS, *aliasing*.

1 INTRODUÇÃO

Um das tendências da manutenção é o estabelecimento de um diagnóstico das condições de funcionamento da máquina a partir de parâmetros medidos (KHATER, 1999). O monitoramento da condição é atualmente uma prática corrente em máquinas rotativas, pois aumenta a disponibilidade de peças e a segurança das instalações, além de diminuir os custos de manutenção (ALBARBAR et. al, 2009). Essa técnica tem o objetivo de prevenir falhas e prolongar a vida útil dos equipamentos. A análise de vibração está entre os métodos mais usados neste tipo de manutenção. Para cada tipo de máquina existe um sensor de vibração que será mais adequado, entre os sensores comumente utilizados estão o probe de deslocamento sem contato, pick-up de velocidade e acelerômetros (KARDEC; NASCIF; BARONI, 2002).

Um clima de grandes expectativas é criado com o surgimento dos sensores MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*), chips acelerômetros montados com tecnologia de circuitos integrados. O baixo custo, alta confiabilidade e baixo consumo de energia desses acelerômetros abrem um campo de investimentos e avanços em técnicas preditivas em manutenção. Os sensores MEMS, entretanto, possuem algumas limitações quando comparados aos acelerômetros baseados em tecnologia piezoresistiva e por isso sua utilização deve ser mais investigada (MARUTHI; VITTAL, 2005).

Este trabalho propõe uma metodologia para utilização de sensores MEMS na análise e detecção de falhas de máquinas rotativas. As próximas seções explicam o fenômeno da vibração, as técnicas utilizadas em seu diagnóstico, o princípio de funcionamento do sensor MEMS, a influência do *aliasing* na discretização dos sinais de vibração e um método para sua correção.

2 ANÁLISE DA VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO

Qualquer movimento que se repita com o passar de certo tempo pode ser denominado vibração ou oscilação. O número de repetições por intervalo de tempo é chamado frequência de vibração. Se após uma perturbação, um sistema continuar a vibrar sem a ação de forças externas, a frequência com que ele oscila é a sua frequência natural, também denominada frequência fundamental (RAO, 2008).

A vibração é causada por pequenos distúrbios localizados e que crescem com o passar do tempo (PACHECO, 2007). O sinal de vibração está diretamente ligado aos movimentos da máquina, podendo ser localizado e analisado para atestar o seu estado (KHATER, 1999). Cada falha tem sua frequência característica e em máquinas rotativas ocorrem em frequências múltiplas da fundamental, harmônicas. A correlação entre a amplitude e a frequência, sabendo que existe um limite de amplitude para condições normais, nos permite saber qual a falha e sua gravidade (YA'CUBSOHN, 1983).

2.1 Análise em Frequência

A vibração é provocada por uma força oscilante e a frequência da vibração é a mesma da força que é aplicada. Quando existem várias forças atuando, a vibração resultante será composta pela soma das componentes de frequência destas forças. Uma nova onda, complexa, será formada (PACHECO, 2007). A Figura 1 representa a forma de onda resultante da vibração de uma estrutura quando duas forças são aplicadas em frequências de 1 e 2 Hertz.

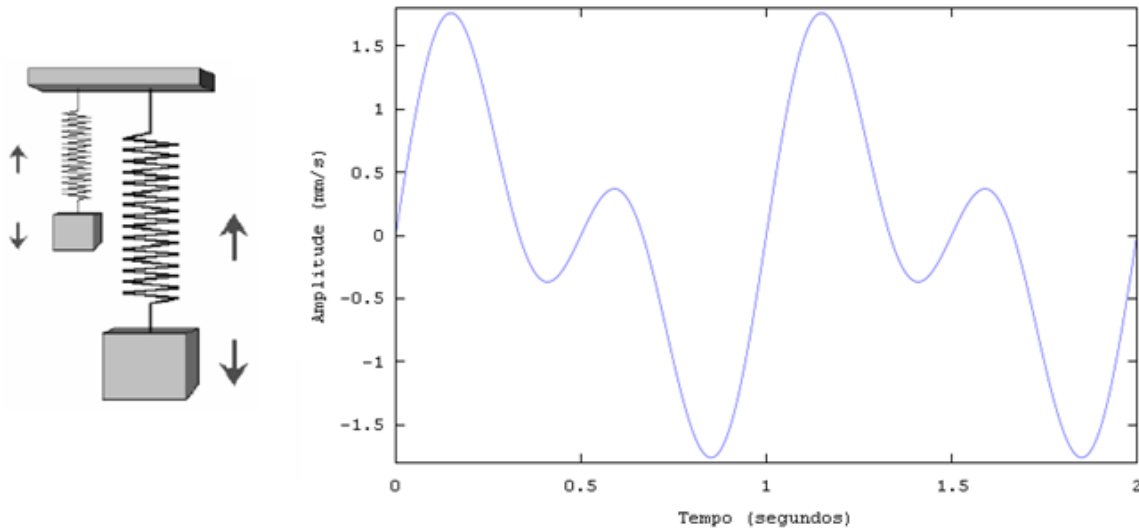


Figura 1 – Onda resultante de forças mútuas sobre uma estrutura

O domínio do tempo permite visualizar somente a onda resultante do comportamento de um sistema. Entretanto, sabe-se que cada parte de uma máquina vibra numa frequência característica. A análise em frequência possibilita estimar a origem da vibração e determinar sua proporção (DIAS; RODRIGUES; RAMALHO, 2009).

Máquinas rotativas foram feitas para terem o mínimo de vibração, pois o seu aumento implica em perdas de rendimento e maior desgaste do equipamento. O aumento da vibração em componentes aponta para o agravamento de alguma falha.

A relação entre frequência e amplitude da vibração proporciona um diagnóstico mais detalhado e confiável. Fourier foi um grande contribuinte para o avanço da análise em frequência quando propôs a idéia de que uma onda complexa no domínio do tempo poderia ser representada por componentes com amplitudes variadas e frequências múltiplas da fundamental no domínio da frequência.

A representação de sinal decomposto em componentes harmônicas é conhecida como Série de Fourier. A Eq. 01 define uma Série de Fourier infinita em que a função no tempo, $f(t)$, é representada por uma soma de senos e cossenos com amplitudes variadas, a_n , e frequências múltiplas da fundamental, ω_0 .

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \sin 2\omega_0 t + \dots \quad [\text{Eq. 01}]$$

Para uma análise computacional, o sinal analógico precisa ser convertido em digital. A digitalização é um processo de captura de vários pontos do sinal analógico em instantes periódicos (amostragem). Segundo o teorema de Nyquist a frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da frequência do sinal amostrado, para que não ocorra o efeito do *aliasing*.

A Figura 2 ilustra a digitalização do sinal em vermelho com a aplicação de uma frequência de amostragem representada pelos pontos em azul. Devido à amostragem ocorrer em frequência inferior ao dobro da frequência do sinal amostrado, o sinal digital pode ser representado pela forma de onda em azul. O registro errôneo do sinal devido a uma taxa de amostragem inadequada caracteriza a ocorrência do fenômeno *aliasing*.

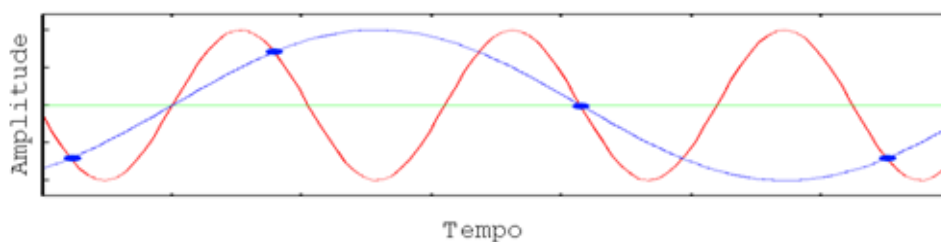


Figura 2 – Digitalização de um sinal e o fenômeno *aliasing*

Após a digitalização do sinal, a ferramenta FFT (*Fast Fourier Transform*), contida no ambiente do software livre Qt octave, pode ser usada para transformar a função no domínio do tempo para o domínio da frequência. Em sinais discretizados, utiliza-se a DFT (*Discret Fourier Transform*) para realizar a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência (JAMES, 2002). A FFT é um algoritmo para implementar a DFT com maior velocidade de processamento em computadores digitais.

2.2 Falhas de Desbalanceamento e Desalinhamento

O desbalanceamento ocorre devido ao desequilíbrio das massas em relação ao eixo de inércia e é caracterizado por um pico predominante na frequência fundamental do sistema, 1X (Sá, 2000). A frequência de desbalanceamento irá somar-se à fundamental, elevando sua amplitude. A Figura 3 é o espectro de frequência de um suposto motor com rotação de 20 Hz, o pico elevado nesta frequência, 1X, aponta para um desbalanceamento.

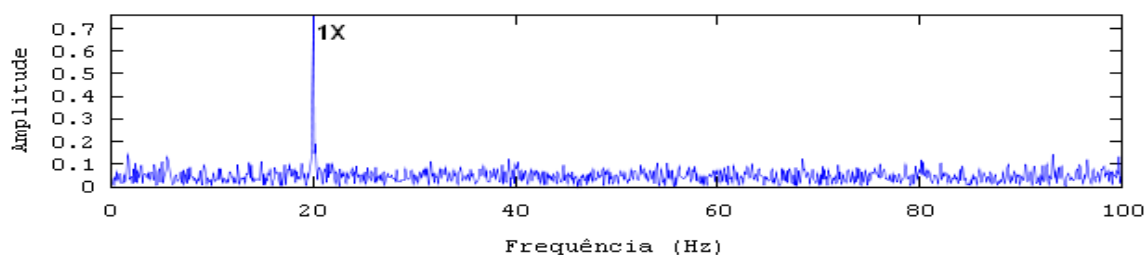


Figura 3 – Espectro de frequência de um desbalanceamento

O desalinhamento ocorre devido ao deslocamento angular ou paralelo entre os acoplamentos de máquinas e é composto por frequências múltiplas com picos em 1X, 2X e às vezes 3X. A Figura 4 ilustra estes picos para o motor com rotação de 20 Hz. Algumas vezes, em desalinhamentos severos, frequências entre 4X e 8X podem aparecer.

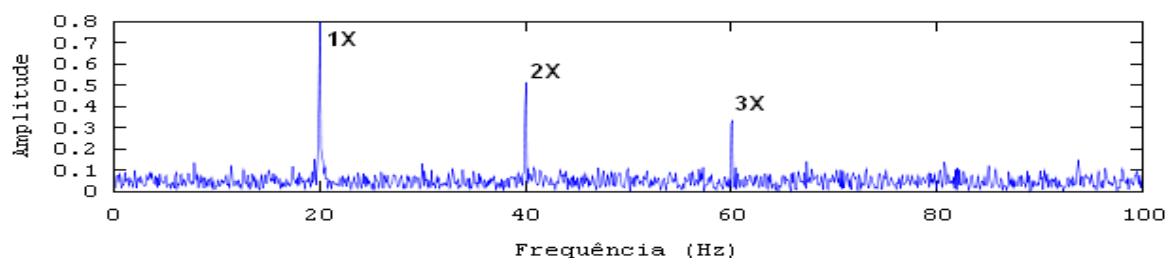


Figura 4 – Espectro de frequência de um desalinhamento

3 SENSOR MEMS MMA7455L

O acelerômetro MEMS é composto por uma célula capacitiva, célula-g, e um ASIC (*Analogic Signal Integration Circuit*) como pode ser visto na Figura 5. A superfície central da célula capacitiva movimenta-se, sendo submetida a uma aceleração. A diferença entre as distâncias das placas capacitivas produz uma variação das capacitâncias que pode ser obtida pela Eq. 02, C é a capacitância, A é a área da superfície das placas, ϵ é a constante dielétrica e D é a distância entre as placas.

Como pode ser observado na Eq. 02, a capacitância irá variar com o deslocamento D das placas capacitivas, isto será devido ao movimento do sensor. O ASIC utiliza-se da comutação de capacitores para medir suas

diferenças e extrair dados de aceleração através de diferença entre dois deles. O ASIC também condiciona e filtra o sinal, proporcionando uma elevação da tensão de saída, que varia linearmente com a tensão de entrada e a sensibilidade ao deslocamento, além de ser proporcional à aceleração.

$$C = A\varepsilon / D \quad [\text{Eq. 02}]$$

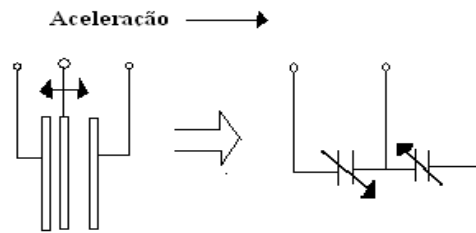


Figura 5 – Modelo simplificado do sensor

A Tabela 1 fornece alguns dados característicos do sensor MEMS utilizado.

Tabela 1 - Características gerais do sensor

Características	Mínimo	Tipico	Máximo	Unidade
Tensão de alimentação analógica	2.4	2.8	3.6	V
Tensão de alimentação digital	2.4	2.8	3.6	V
Temperatura de operação	-40	25	10	°C
Taxa interna de amostragem	-	125	-	Hz
Sensibilidade de cruzamento entre eixos	-5	-	5	%

4 METODOLOGIA

A fonte de vibração em análise é um motor elétrico trifásico operando com inversor de frequência, que proporciona a variação da velocidade de rotação. O sensor usado para os ensaios é o MEMS MMA7455L.

A aquisição do sinal de vibração é realizada diretamente na máquina por meio da fixação do sensor. Dados reais e simulados são trabalhados no Qt octave por meio da utilização do algoritmo DFT que utiliza a ferramenta matemática FFT de forma discreta.

Após a DFT do sinal, este é trabalhado no domínio da frequência. A indicação de um defeito é obtida pela observação dos espectros de frequência. Cada falha tem seu espectro característico e algum desvio é perceptível. O desvio possivelmente é um *aliasing* e sua correção ocorre pela aplicação do método detalhado na próxima seção. Somente após a correção do *aliasing*, o diagnóstico para a caracterização do defeito é obtido. A Figura 6 sintetiza o processo de análise da vibração.

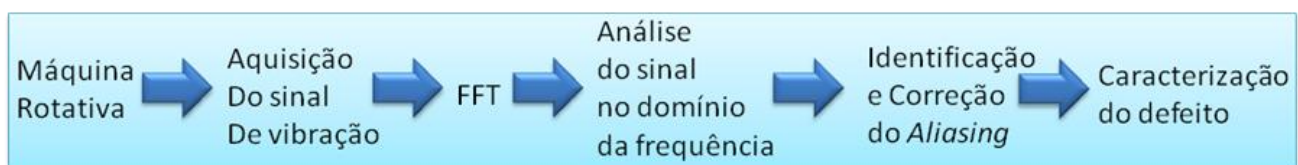


Figura 6 – Fluxograma do processo de aquisição e análise da vibração

As próximas seções implementam uma série de ensaios sob diferentes condições para uma observação mais vasta da ocorrência do *aliasing* e de defeitos.

5 OBSERVAÇÃO DO FENÔMENO ALIASING

O sensor MEMS MMA7455L utilizado possui taxa de amostragem de 125 Hz e produz leitura correta para componentes de frequência de até 62,5 Hz, segundo o teorema de Nyquist. A utilização desse sensor é simulada em máquinas com diferentes velocidades de operação, centrado no diagnóstico de falhas de desbalanceamento e desalinhamento por meio da análise do espectro de frequência.

5.1 Motor Trifásico Seis Pólos, 900 r.p.m.

A Figura 7 representa o espectro de frequência de uma coleta num motor com velocidade de 900 r.p.m. Transformando a velocidade de r.p.m. para Hertz encontramos a frequência fundamental desse motor que é 15 Hz. O pico elevado nesta frequência implica um desbalanceamento. Como esta componente é menor do que 62,5 Hz, ela pode ser representada sem a ocorrência do fenômeno do *aliasing*.

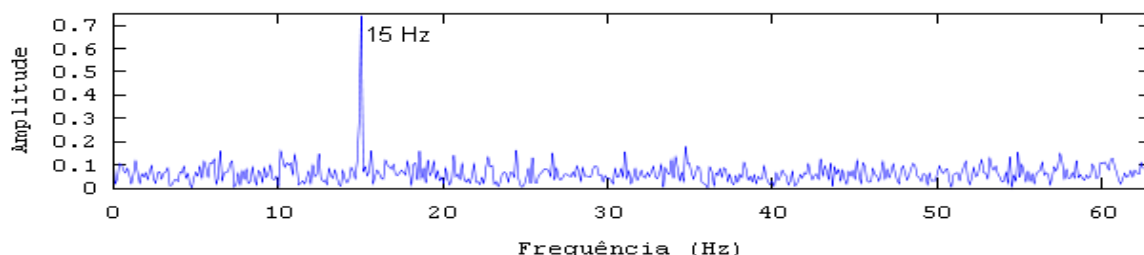


Figura 7 – Espectro de frequência característico de um desbalanceamento

O espectro da Figura 8 possui três componentes de frequência, 1X, 2X, 3X, as quais caracterizam um desbalanceamento. Como todas as componentes são menores que 62,5 Hz, o espectro foi representado sem a ocorrência do fenômeno do *aliasing*.

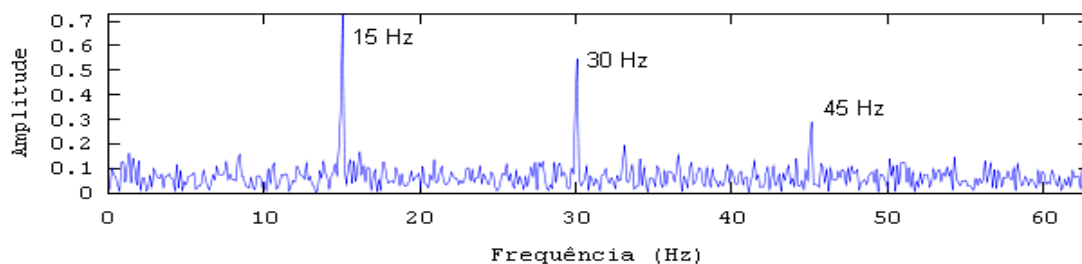


Figura 8 – Espectro de frequência característico de um desalinhamento

5.2 Motor Trifásico Quatro Pólos, 1800 r.p.m.

O espectro da Figura 9 é de uma coleta hipotética de um motor desbalanceado em que se é esperado um pico elevado na frequência fundamental desta máquina. Pela análise da Figura 9 observa-se um pico elevado na frequência de 30 Hz, que, por ser menor que 62,5 Hz, não sofreu *aliasing*.

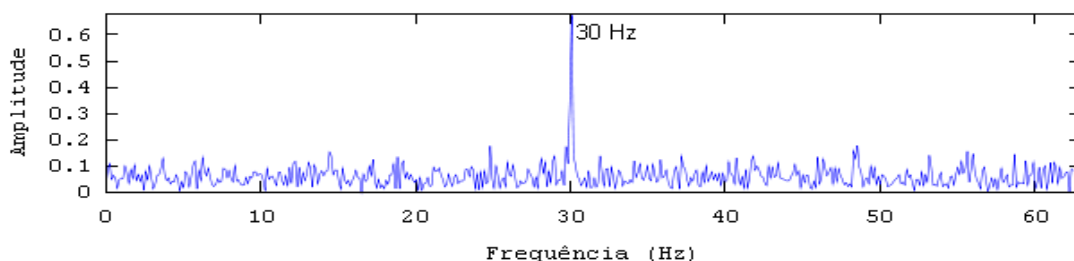


Figura 9 – Espectro de frequência característico de um desbalanceamento

O espectro da Figura 10 é de uma coleta do mesmo motor, mas agora desalinhado. Os picos em 30 e 60 Hz já caracterizam o desalinhamento. Um pico estranho apareceu em aproximadamente 35 Hz, esta frequência não múltipla, poderia indicar um defeito em rolamentos, mas por ser muito baixa anula essa possibilidade. Como não se encontra relação entre este pico intermediário e algum defeito, a única conclusão é que esta frequência é resultante de um *aliasing*, possivelmente da terceira harmônica, 90 Hz.

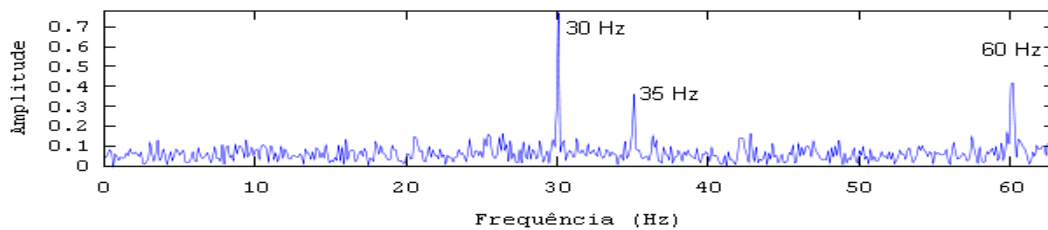


Figura 10 – Espectro de frequência característico de um desalinhamento

Com a observação do efeito do *aliasing* no diagnóstico de defeitos de desalinhamento e desbalanceamento em máquinas com diferentes velocidades de rotação, chegou-se a um método para a identificação sua identificação. Por meio da aplicação da Eq. 03, em que Ta é a taxa de amostragem, Fd é a frequência do defeito e Fa é frequência em *aliasing*, às frequências maiores do que 65 Hz descobrem-se quais são suas frequências em *aliasing*. A aplicação prática desta técnica no diagnóstico de falhas será abordada na próxima seção.

$$Ta - Fd = Fa \quad [Eq. 03]$$

6 EXPERIMENTAÇÃO PRÁTICA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após o estudo do *aliasing* e sua identificação com o uso da Eq. 03 utilizando-se de simulação, tornou-se necessária uma aplicação prática para a validação do método de identificação do *aliasing* proposto por este trabalho. Para isto, foram usados dois sensores MEMS, um com taxa de amostragem de 1000 Hz e o sensor MMA7455L, abordado neste trabalho, com taxa de amostragem de 125 Hz. Os dois sensores foram usados nas mesmas condições e no mesmo motor, que tem suas características na Tabela 2.

Tabela 2 – Motor WEG alto rendimento

Fabricação	29/05/07
Tensão de alimentação (V)	380
Número de fases	3
Número de pólos	4
Potência (cv)	1,5
Velocidade de operação (rpm)	1600
Frequência fundamental (Hz)	26.67

A Figura 11 representa o espectro de frequência do motor com o sensor com taxa de amostragem de 1000 Hz. A presença de cinco picos em 1X, 2X, 3X, 4X e 5X, respectivamente 26.88, 53.27, 80.16, 106.50 e 133.40 Hertz, aponta para um desalinhamento severo e os demais em frequência mais elevada apontam para possíveis defeitos em rolamentos.

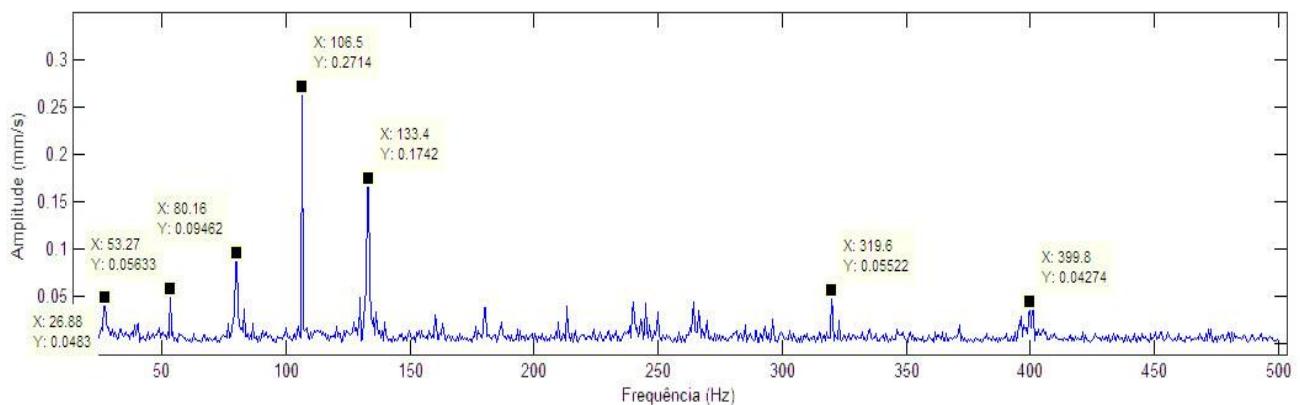


Figura 11 – Espectro coletado por um sensor com taxa de amostragem de 1000 Hz

Com a utilização do sensor MEMS MMA7455L chegou-se ao espectro de frequência da Figura 12. As frequências maiores do que 65 Hz sofreram *aliasing*, como é o caso das componentes de 80.16, 106.50 e 133.40 Hertz. Aplicando a Eq. 03 a cada frequência em *aliasing* encontram-se seus picos no espectro.

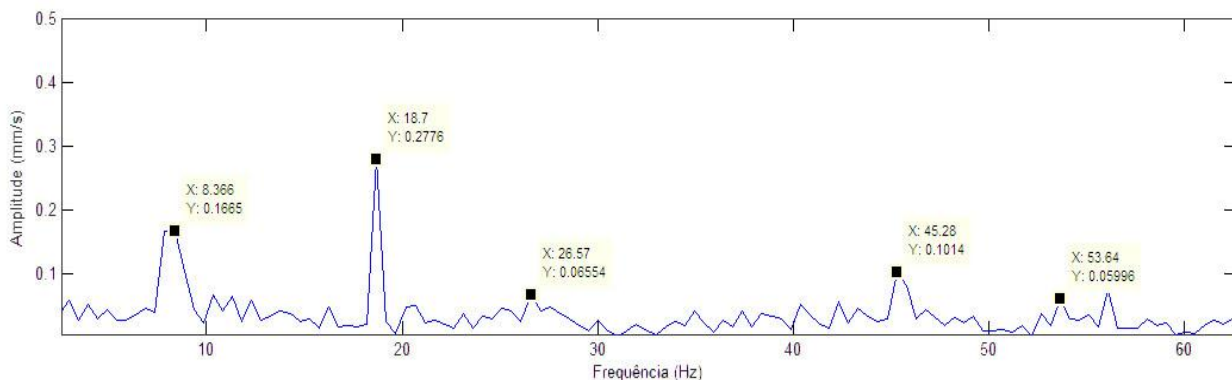


Figura 12 – Espectro coletado pelo sensor com taxa de amostragem de 125 Hz

Para a frequência de 80.16 Hz, a aplicação da Eq. 03 retorna o valor de 44.84 Hertz, muito próximo da frequência no espectro de 45.28 Hertz.

$$|125 - 80.16| = 44.84 \text{ Hertz}$$

A aplicação da Eq. 03 à frequência de 106.50 Hz retorna o valor de 18.50 Hertz, muito próximo da frequência de 18.70 Hz do espectro.

$$|125 - 106.50| = 18.50 \text{ Hertz}$$

Usando-se do mesmo método, a frequência de 133.40 Hz retorna o valor de 8.40 Hertz, mas é representada no espectro em 8.366 Hz.

$$|125 - 133.40| = 8.40 \text{ Hertz}$$

Note que há uma pequena variação entre os valores de amplitude e de frequência com a aplicação de sensores com taxa de amostragem diferente. Por ser uma diferença muito pequena, o diagnóstico não sofrerá alteração.

Quanto ao *aliasing*, pode-se localizá-lo e identificá-lo, mas deve ser analisado se o pressuposto *aliasing* não é uma frequência real de algum outro tipo de defeito de máquina rotativa. Os defeitos nesses tipos de máquinas ocorrem em frequências múltiplas inteiras da fundamental, exceto em folgas, com frequências múltiplas inteiras e em metade da parte inteira, e em rolamentos, com frequências não múltiplas devido a seus elementos girantes. Com uma análise criteriosa, um diagnóstico confiável pode ser atingido.

7 CONCLUSÃO

O estudo teve o objetivo de expor o efeito do *aliasing* na análise de vibração e, a partir do seu conhecimento, encontrar aplicações para o sensor MEMS MMA7455L com amostragem de 125 Hz. Foi observado que sua aplicação é adequada para o diagnóstico de falhas com frequências até 65 Hertz. Porém, com o conhecimento do equipamento e do fenômeno *aliasing*, provou-se que é possível aumentar a sua faixa de aplicação.

As simulações mostraram que, para uma máquina rotativa com velocidade de 30 Hz, 1800 RPM, e frequências de falhas para o desalinhamento de 30, 60 e 90 Hertz, pode ser obtido um diagnóstico correto, mesmo com o *aliasing*. Os experimentos práticos validaram a técnica de diagnóstico baseada no conhecimento do *aliasing*.

A aplicação de sensores de vibração a condições além de sua capacidade nominal requer um conhecimento maior sobre os tipos de defeitos, a análise em frequência e o *aliasing*. No entanto, devido ao alto custo dos sensores piezoelétricos comerciais, a utilização desses sensores é uma boa alternativa em análises preditivas.

Existem outras falhas de baixa frequência para as quais o uso do sensor pode ser analisado. Além de máquinas rotativas, o uso de acelerômetros MEMS será investigado em aplicações de monitoramento da condição de estruturas da construção civil.

REFERÊNCIAS

ALBARBAR, A.; BADRI, A.; SINHA, J. K.; STARR, A. **Performance evaluation of MEMS accelerometers**. ScienceDirect, Measurement, Volume 42, Issue 5, June 2009, Pages 790-795.

DIAS, A. S.; RODRIGUES, J. C.; RAMALHO, G. L. B. **Deteção de Falhas em Máquinas Rotativas Através da Análise de Vibração**. In: Anais do IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Nordeste de Educação Tecnológica. Belém: [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://connepi2009.ifpa.edu.br/connepi-anais>>.

GUADALUPE, U. B.; ASSAN A. E. **A transformada de fourier e o fenômeno de aliasing**. XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza-Argentina, 2004.

JAMES, J. F. **A student's guide to fourier transforms**. 2. Ed. United Kingdom: Cambridge, 2002.

KARDEC, A.; NASCIF J.; BARONI, T. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2002.

KHATER, E. **Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas através da análise da vibração torcional**. I Encontro de Manutenção da Funrei, São João del Rei – MG, 1999. I EMAN/FUNREI (anais em cd), 1999. v. I. p. 15-22.

MARUTHI G.S, VITTAL K. P. **Electrical fault detection in three phase squirrel cage induction motor by vibration analysis using MEMS accelerometer**. Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on, v. 2 p. 838 - 843 28-01 Nov.

NYQUIST H. **Determinados tópicos na teoria da transmissão de telégrafo**, transporte. AIEE, vol. 47, pp. 617-644, abril. 1928

PACHECO J. R. S. **Reconhecimento de padrões de vibração em máquinas rotativas utilizando rede neural artificial**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2007.

RAO S. **Vibrações mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SÁ M. **Curso de vibrações**. Macaé, Petrobras, 2000.

YA'CUBSOHN, R. V. **El diagnostico de fallas por análisis vibratorio**. São Paulo : Die Techik Ltda., 1983.