

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE MÁQUINAS ROTATIVAS PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS NOS DOMÍNIOS DO TEMPO, FREQUÊNCIA E TEMPO-FREQUÊNCIA NO ENSINO DE IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS MECÂNICAS

Thiago Henrique Gomes Lobato, thiagohgl@hotmail.com

Cleidson Silva Alves, cleidsonalves.eng.mecanica@gmail.com

Luis Paulo Brasil, luisbrasil55@gmail.com

Alexandre Luiz Amarante Mesquita, alexmesq@ufpa.br

Laboratório de Mecânica Aplicada, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA

Resumo: Entender o processo de predição de defeitos por sinais de vibração é extremamente importante ao engenheiro para evitar gastos e até possíveis acidentes. Dessa forma, visando o ensino do processamento de sinais de vibração para fins de diagnóstico, foi desenvolvida uma bancada de máquinas rotativas instrumentada. Nesta bancada, inicialmente, são inseridos defeitos mecânicos, mais especificamente defeitos relacionados ao desalinhamento e desbalanceamento, podendo ser estendidos aos defeitos nos rolamentos. Para o processamento do sinal foi utilizada a placa de aquisição da National Instruments e softwares Labview e Matlab. Nos softwares foi realizada a implementação do processamento do sinal por técnicas no domínio tempo, no domínio da frequência e no domínio conjunto tempo-frequência, usando as técnicas da transformadas de Fourier de curta duração, wavelet e de Hilbert-Huang, a qual podem ser aplicadas a sinais não estacionários e não lineares. Também foi implementado um sistema para trabalhar com inteligência artificial com support vector machines (SVM), o que, nos dias atuais, está se tornando cada vez mais uma necessidade aos engenheiros, embora seja muitas vezes desconsiderada nos cursos de predição de defeitos.

Palavras-chave: Bancada didática, Vibrações Mecânicas, Identificação de defeitos, Tempo-Frequência, SVM.

1. INTRODUÇÃO

O uso de técnicas preditivas para máquinas rotativas é extremamente importante, pois possibilita ao engenheiro evitar falhas e problemas antes que eles de fato aconteçam (KARDEC, 2013). Dessa forma, torna-se essencial o ensino dessas técnicas nas aulas de engenharia de forma aos estudantes estarem prontos para enfrentar esses tipos de problemas no mundo real.

A quantidade de falhas que se permitem identificar experimentalmente é enorme, incluindo principalmente falhas nos componentes de rolamentos e desbalanceamento. Para a identificação de um defeito por meio de sinais de vibração, deve-se medir o sinal, realizar um método de processamento nesse sinal (que pode ser tanto no domínio do tempo, no domínio da frequência ou no domínio do tempo-frequência, quando os sinais forem não estacionários) e finalmente usar as informações extraídas desse processamento, ou seja, usar os seus atributos (*features*) para o diagnóstico, o qual pode ser feito baseado em normas, ábacos, ou mesmo usando fazendo uso de inteligência artificial, tal como técnicas como SVM (*Support Vector Machine*) e redes neurais.

Visando o ensino de técnicas de processamento de sinais para fins de diagnóstico de máquina, na graduação e pós-graduação do curso de Engenharia Mecânica da UFPA, foi desenvolvida uma bancada de máquinas rotativas instrumentada e com o auxílio dos softwares Labview e Matlab. Com esse software foi feito o controle da aquisição do sinal e o processamento usando técnicas nos domínios do tempo (média rms, fator de crista, fator K, curtose, modelos AR) (FU, 2016), no domínio da frequência (análise espectral, cepstrum e envelope) (WENTAI, 2010; TANDON, 1992; DIPEN, 2014) e no domínio conjunto tempo-frequência usando a transformada de Fourier de curta duração (*short-time Fourier transform* – STFT), transformada de wavelet (GAO, 2006; ALFRED, 2001) e transformada de Hilbert-Huang (RUQIANG, 2006), além da implementação de um modelo de inteligência artificial com SVM (DEÁK, 2014).

2. METODOLOGIA

A bancada usada para os ensaios experimentais está disponível no Laboratório de Mecânica Aplicada UFPA e está mostrada na Fig.1. Nesta bancada é possível inicialmente inserir os defeitos de desbalanceamento, desalinhamento e rolamento, sendo implementados, nesse trabalho, somente os dois primeiros. A inserção de outros defeitos na bancada será realizada em trabalhos futuros.



Figura 1: Bancada didática de vibração em máquinas rotativas.

Os equipamentos que são usados para a análise experimental são: acelerômetros, placa de aquisição da NI (*National Instruments*) e *software* Labview. No *software* Labview já foram implementadas as técnicas no domínio no tempo e no domínio da frequência citadas anteriormente. O programa desenvolvido em Labview é uma extensão de trabalhos desenvolvidos na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA (NERY,2008; JESUS,2010). Na Figura 2 é possível verificar um esquema do sistema criado. Os sinais podem ser também exportados para o Matlab para o processamento de sinais tempo-frequência. Após o processamento do sinal por um ou mais de um método, pode-se elencar os atributos que serão usados para o diagnóstico, por meio de um classificador SVM, conforme Fig.2.

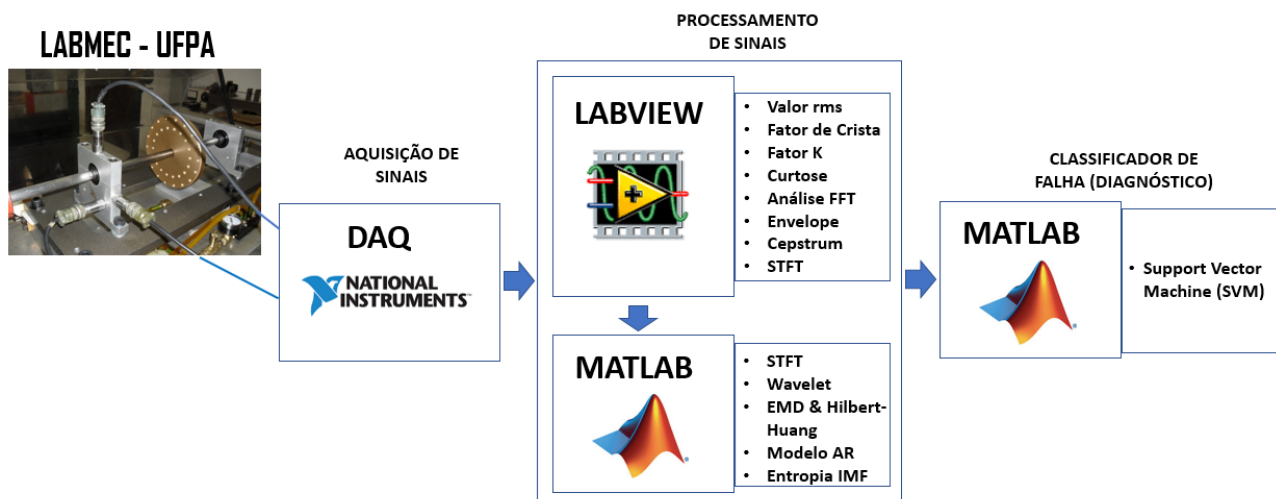


Figura 2: Esquema da aquisição, processamento de sinais (em diferentes domínios) e diagnóstico.

3. RESULTADOS

3.1 Programa em Labview

No programa do Labview os seguintes métodos foram implementados:

- RMS do sinal
- Fator K
- Fator de crista

- Pico
- Kurtose
- FFT
- Envelope
- Cepstrum
- Espectrograma (STFT)

O Programa é dividido em 3 abas principais, sendo a primeira para análises temporais, a segunda para análises no domínio da frequência e a terceira no domínio tempo-frequência. As três abas podem ser vistas respectivamente nas Figs 3, 4 e 5 para um sinal da bancada com desalinhamento.

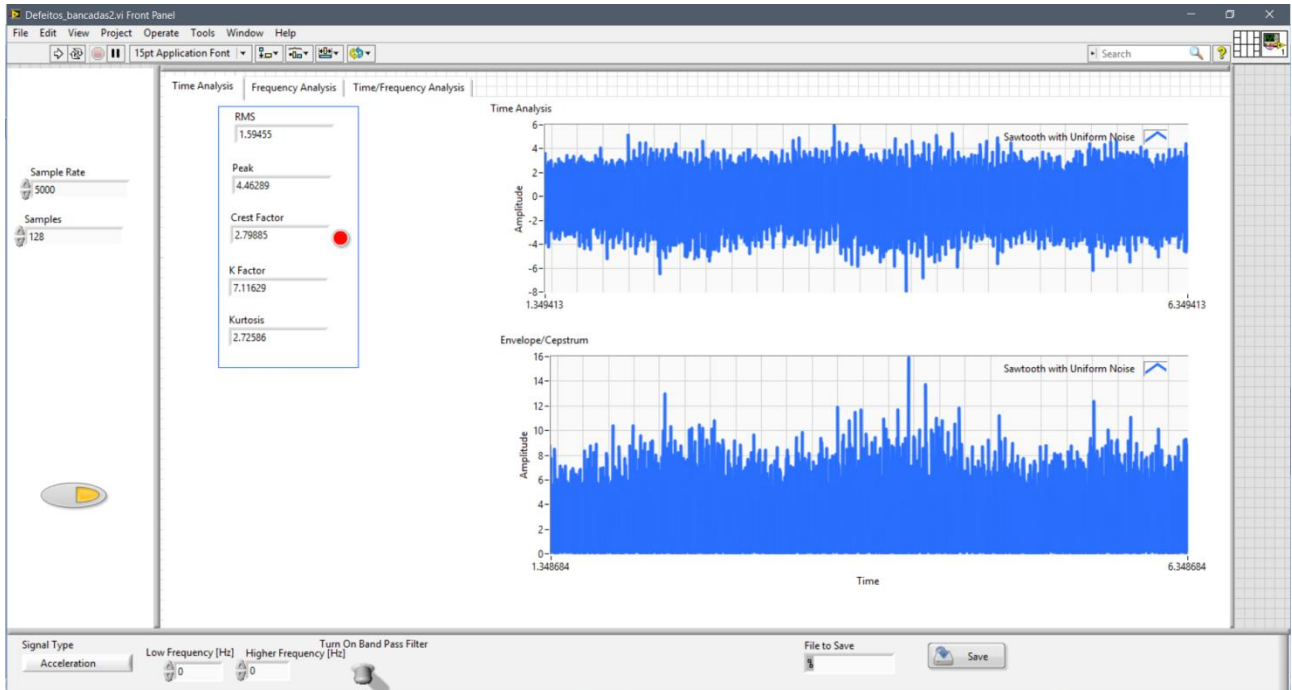


Figura 3: Primeira aba do programa Labview - Análise Temporal.

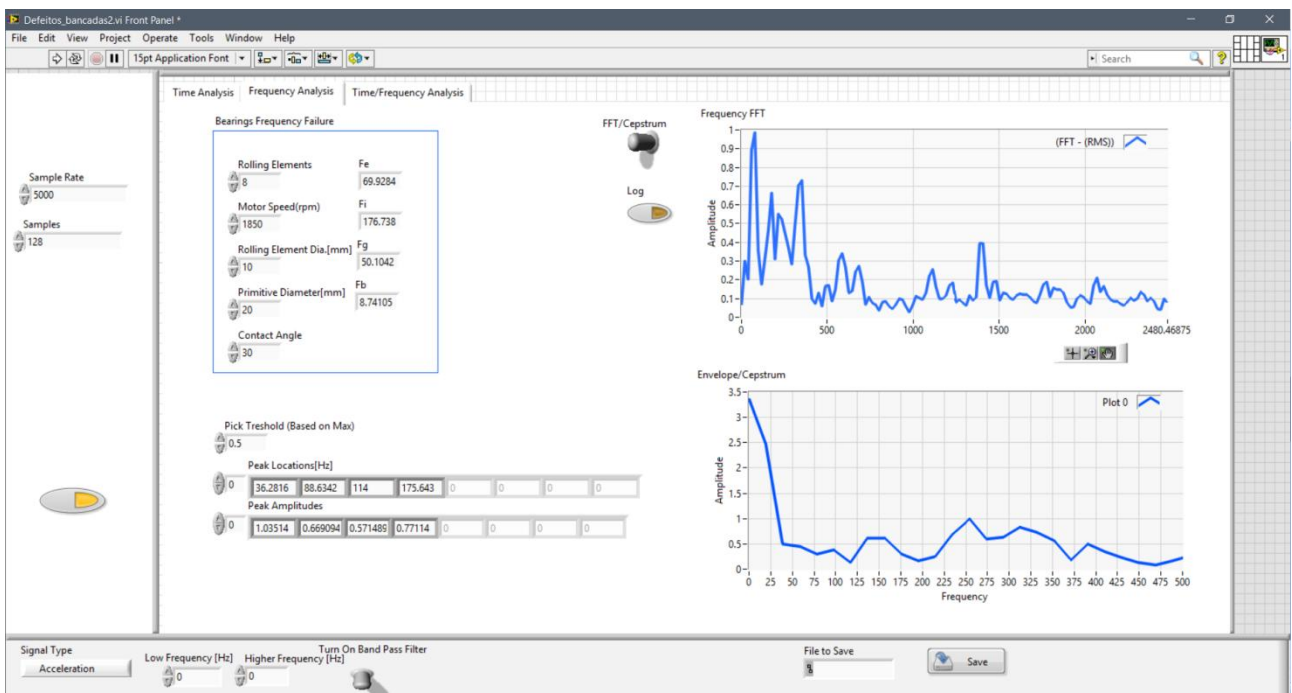


Figura 4: Segunda aba do programa Labview - Análise de frequência.

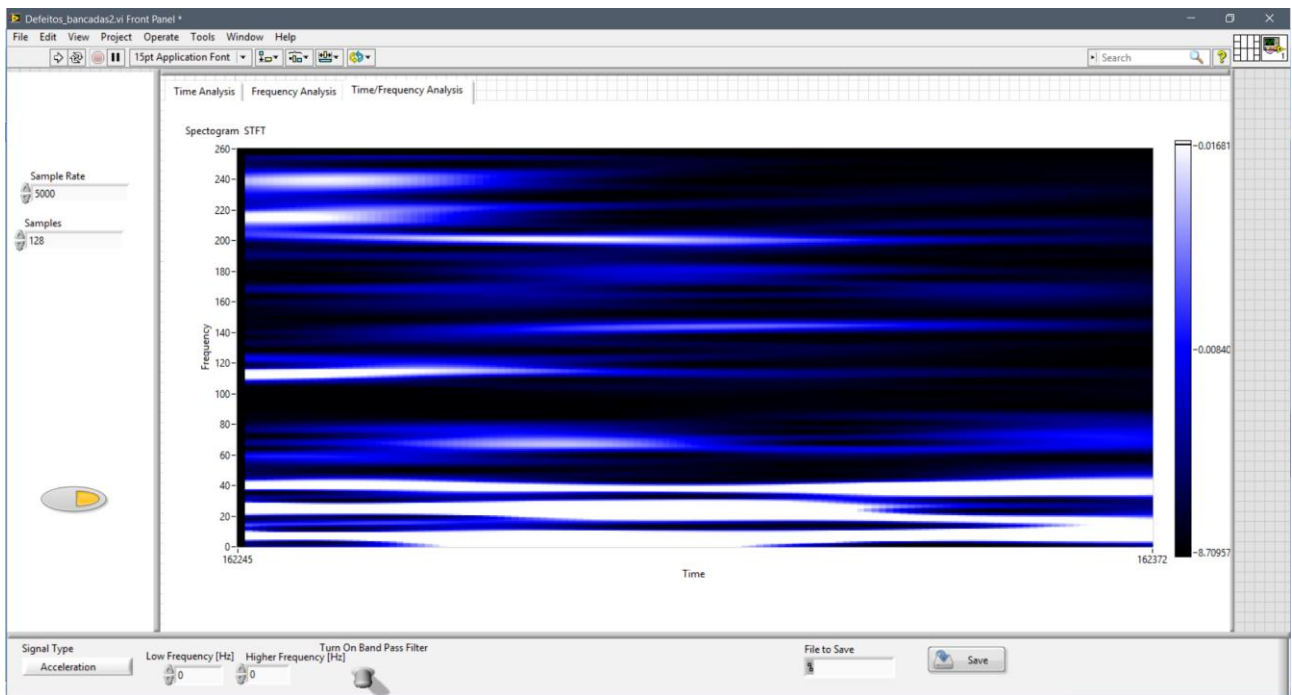


Figura 5: Terceira aba do programa Labview - Análise de frequência - Análise tempo-frequência.

No programa também é possível calcular frequências de falha de rolamentos. Os defeitos desses, entretanto, ainda não foram implementados na bancada. Outras funcionalidades são: filtro passa banda para isolar regiões específicas de frequência e possibilidade integração do sinal de aceleração para obter velocidade e deslocamento. Com esse programa os alunos são capazes de analisar em tempo real as medições a ponto de verificar o que determinado defeito causa na visualização e propriedades do sinal.

3.2 Programa em Matlab

No programa do Matlab, os seguintes métodos foram implementados:

- Wavelet discreta e contínua do Sinal
- Espectrograma
- EMD & Hilbert-Huang
- Support-Vector-Machine (SVM)

Esses métodos, fora o espectrograma, possuem uma complexidade matemática maior e, por isso, não são normalmente demonstrados em programas didáticos. Dessa forma, os alunos podem ter acesso à métodos avançados de tempo frequência e inteligência artificial. O programa do Matlab possui apenas uma janela com todos os dados, a qual pode ser vista abaixo na Fig. 6, sendo o gráfico mostrado a transformada de Wavelet contínua tipo Bump de um sinal sem defeito.

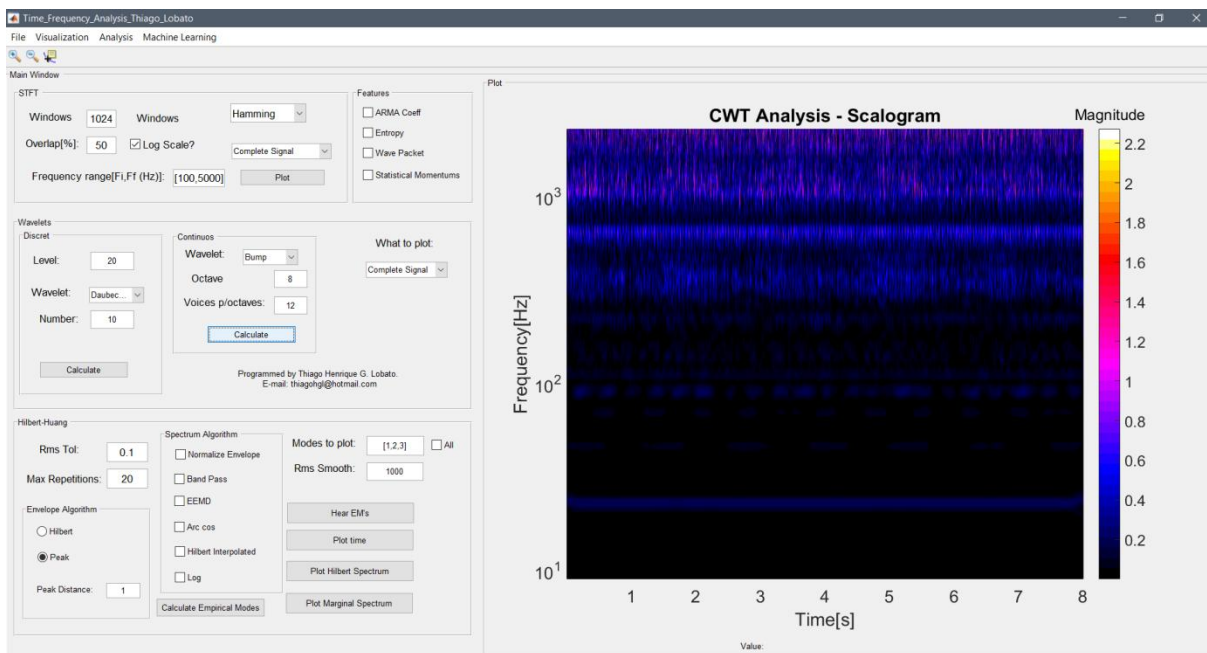


Figura 6: Interface do Programa no Matlab para análises de Tempo-Frequência e Inteligência artificial.

Com esse programa é possível aos alunos verificar diferentes tipos de resultados a ponto de perceber características visuais distintas de defeitos. Exemplos podem ser vistos comparando a figura 6 de um sinal limpo e a Fig. 7 de um sinal com desalinhamento na transformada contínua de Wavelet.

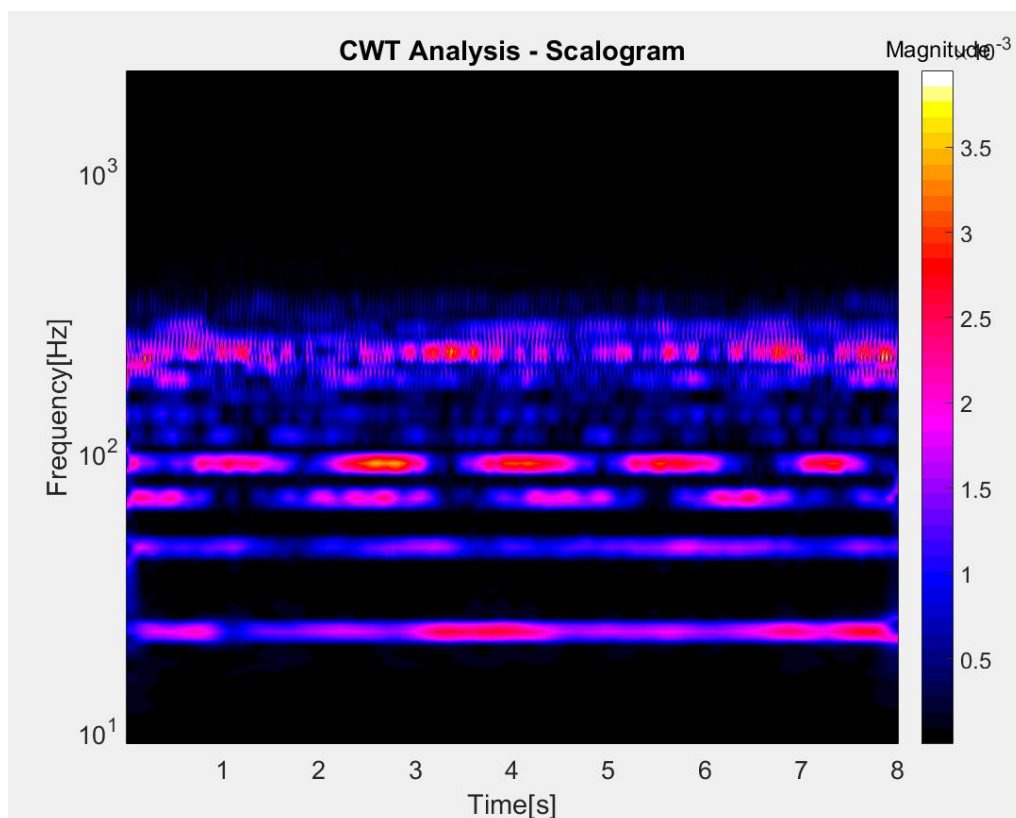


Figura 7: CWT de um sinal com desbalanceamento.

Outro exemplo disso pode ser visto na Fig. 8 abaixo comparando a transformada de Hilbert-Huang em um sinal de desalinhamento nos mesmos sinais.

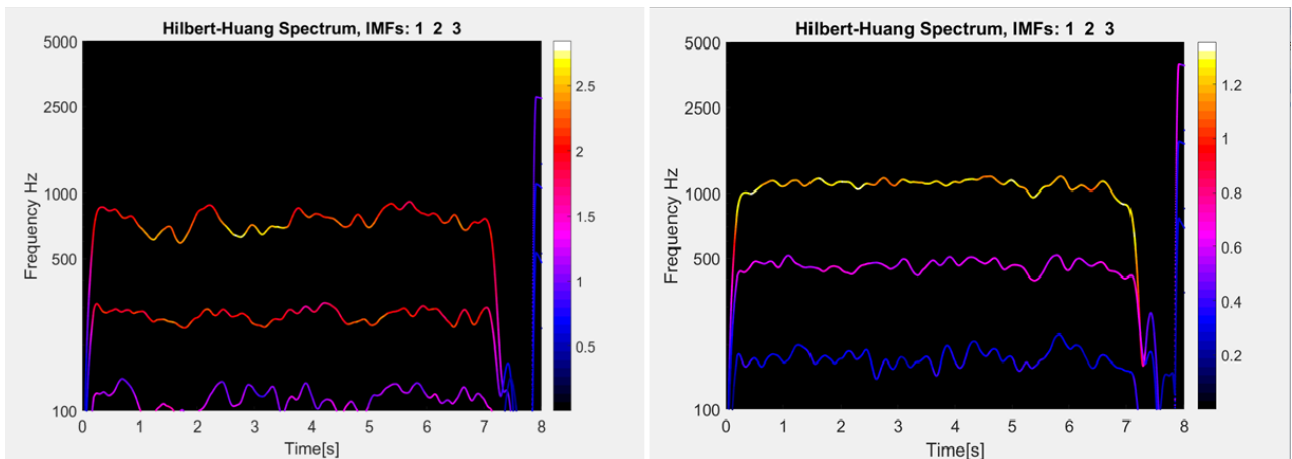


Figura 8: Análise Hilbert-Huang. Esquerda: Desalinhamento. Direita: Normal.

Para o SVM os usuários necessitam disponibilizar ao programa um arquivo de texto indicando as classes referentes aos dados medidos. Para a disponibilidade dos alunos, temos um banco de dados com 26 arquivos contendo estados: normais, com desbalanceamento e com desalinhamento. Os atributos (*features*) que podem ser usados para o treino das classes são: coeficientes de um modelo AR, entropia das IMF's da análise de Hilbert-Huang, entropia dos coeficientes da transformada de wavelet e valores estatísticos (RMS, pico, fator k e Kurtose). Os valores de precisão do nosso modelo SVM utilizando as melhores *features* para o nosso banco de dados pode ser visto na Tab. 1, sendo esses resultados correspondentes a uma validação cruzada K-fold com 3 folds.

Tabela 1. Resultados modelo SVM com database criado para ministrar as aulas.

Precisão Cross-Validation teste	92.31%
Precisão Cross-Validation treino	94.23%

A implementação desse modelo de fácil acesso para qualquer grupo de sinais permite aos alunos entender um pouco do uso prático de inteligência artificial para predição de defeitos mesmo esse sendo um tema relativamente complexo.

4. CONCLUSÃO

Sabendo a importância do conhecimento de técnicas preditivas com os sinais de vibração, foi criada uma bancada de ensino de máquinas rotativas com dois programas de suporte, sendo um no Labview e outro no Matlab. Esse sistema permite aos alunos, além de verificar a influência dos defeitos em tempo real no domínio do tempo e frequência no caso do Labview, trabalhar com métodos matematicamente complexos no domínio do tempo-frequência e inteligência artificial, tornando a bancada inovadora principalmente na época atual, onde os métodos de identificação de defeitos estão se aperfeiçoando cada vez mais e não é mais suficiente aos futuros engenheiros um conhecimento limitado às técnicas básicas. Além disso, pela complexidade das análises do programa em Matlab, ainda é possível uma extensão do mesmo para futuros trabalhos acadêmicos.

5. REFERÊNCIAS

- Alfred, M. Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications. English, Revised Edition, Focal Press, 2001.
- Dipen, S., Patel, V. A Review of Dynamic Modeling and Fault Identifications Methods for Rolling Element Bearing. Procedia Technology Procedia Technology, 14, 447-456, 2014.
- Fu, S., Liu, K., XU, Y., Liu, Y. Rolling Bearing Diagnosing Method Based on Time Domain Analysis and Adaptive Fuzzy -Means Clustering. Shock and Vibration, Vol 2016, Article ID 9412787, 2016.
- Gao, R.X, Ruqiang, Y.. Non-stationary signal processing for bearing health monitoring. International Journal of Manufacturing Research 1(1), 18-40, 2006.
- Jesus, K.M.S, Soeiro, N.S., Nery, R.T.C., Braga, D.S. Desenvolvimento de uma ferramenta virtual para diagnóstico de defeitos em máquinas rotativas: aplicação em uma bancada didática. VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Campina Grande-PB, 2010.
- K. Deák; I. Kocsis. FAILURE DIAGNOSTICS WITH SVM IN MACHINE MAINTENANCE ENGINEERING. Annals of the oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, May 2014.

- Kardec, A., Nascif, J. Manutenção Preditiva. Fator de Sucesso na Gestão Empresarial. QualityMark, 2013.
- Nery, R.T.C. Desenvolvimento de uma ferramenta virtual para análise de vibração em máquina rotativa: aplicação em uma bancada didática. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, 2008.
- Ruqiang, Y., Gao, R.X. Hilbert–Huang Transform-Based Vibration Signal Analysis for Machine Health Monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 55 (6), 2006.
- Tandon, N.; Choudhury, A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. Tribology International 32, 469-480,1992.
- Wentai, S., Dan, Z. Research on Envelope Analysis for Bearings Fault Detection. The 5th International Conference on Computer Science & Education Hefei, China, 2010.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF ROTOR TEST RIG FOR SIGNAL PROCESSING IN TIME, FREQUENCY, AND TIME-FREQUENCY DOMAINS FOR MECHANICAL FAILURE IDENTIFICATION LEARNING

Thiago Henrique Gomes Lobato, thiagohgl@hotmail.com
Cleudson Silva Alves, cleudsonalves.eng.mecanica@gmail.com
Luis Paulo Brasil, luisbrasil55@gmail.com
Alexandre Luiz Amarante Mesquita, alexmesq@ufpa.br

Laboratório de Mecânica Aplicada, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA.

Abstract. Among the applications of the theory of mechanical vibrations is the identification of machine mechanical failures through the processing and analysis of machine vibration. Aiming to teach the vibration signal processing for diagnostic purposes, an instrumented rotating machine bench was developed. Initially, in this bench, mechanical defects are inserted, more specifically misalignment and imbalance, with the possibility to be extended to bearing defects. For signal processing, signal acquisition was used with the National Instruments acquisition board and the Labview and Matlab software. In the softwares, the signal processing was implemented by techniques in the time domain, frequency domain and the time-frequency domain, using the techniques of the short-time Fourier transform(STFT), wavelet and Hilbert-Huang, which can be applied to non-stationary and non-linear signals. A system for working with artificial intelligence with support vector machines (SVM) has also been implemented, since it is a topic that has becoming a necessity for engineers today, even though it is often overlooked in fault prediction courses.

Keywords: Didactic Bench, Mechanical Vibration, Defect Identification, Time-Frequency, SVM