

DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICO POR MEIO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Letícia Resende Rodrigues, leticia.resende.rodrigues@outlook.com¹

Fabiano Bianchini Batista, fabianchini@ufsj.edu.br¹

Josemar de Souza Moreira, js_moreira99@yahoo.com.br¹

Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho, lamim@ufsj.edu.br¹

Charles Guimarães Fonseca de Paula, charlesguimaraesf@gmail.com

¹Universidade Federal de São João del Rei, Praça Frei Orlando 170, Centro, São João del Rei, MG, Brasil.

Resumo: A presença de defeito(s) iminente(s) em uma máquina é capaz de alterar o seu comportamento dinâmico. Em uma análise espectral torna-se possível verificar alterações nas amplitudes em frequências específicas, o que permite, com auxílio de algumas ferramentas matemáticas, caracterizar a gravidade e o tipo de defeito(s) presente(s). Os rolamentos, em especial, são componentes fundamentais em máquinas rotativas, fato este que justifica o grande interesse na realização de pesquisas com o intuito de compreender o processo de formação e progressão de defeitos nestes componentes. Estes defeitos podem ter origem no próprio processo de fabricação bem como pelo mau uso ou desgaste natural por tempo de operação. Neste trabalho é realizado um estudo para identificar a presença de defeitos na pista externa em rolamentos usando a clássica Transformada de Hilbert e a análise espectral em frequências via Transformada de Fourier.

Palavras-chave: Vibração, Falhas, Rolamentos, Transformada de Hilbert.

1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento industrial torna-se cada vez mais necessário o uso de procedimentos que permita a detecção de defeitos em máquinas durante o seu funcionamento. Tais procedimentos reduzem tempos de parada e, consequentemente, de prejuízos no sistema operacional. Em um plano de Manutenção Preditiva objetiva-se verificar com certa periodicidade o estado de um equipamento ou de uma máquina de forma a prever o seu tempo útil e criar, assim, ações que possibilitem o seu máximo aproveitamento e o mínimo de gastos. Dentre as muitas técnicas preditivas, a análise de vibração é uma das que permite a detecção e o diagnóstico de defeitos em motores elétricos. Através da análise do espectro de um sinal temporal de vibração pode-se detectar tanto os defeitos de origem elétrica quanto os de origem mecânica presentes no motor (Baccarini, 2005). A partir de frequências características e ferramentas matemáticas de processamento de sinais adequadas um defeito ou uma falha poderá ser detectada até mesmo em seu estado inicial. Como consequência, decisões mais sensatas poderão ser tomadas pela equipe de manutenção.

Os motores de indução trifásicos, que são capazes de produzir energia mecânica a partir de energia elétrica, são amplamente utilizados no meio industrial. Isso por terem melhor custo benefício quando comparados com os demais motores em aplicações compatíveis. Por terem a capacidade de operarem em altas rotações e grande variabilidade de carga, os rolamentos são os seus componentes girantes responsáveis, na maioria dos casos, por paradas não planejadas quando defeitos não são detectados a tempo. Durante a análise do estado de uma máquina através de seu comportamento vibratório, grande ênfase é, então, dada às essas peças rotativas. Falhas nesses componentes causam perdas econômicas e comprometem a segurança dos usuários (Bastos et al., 2010).

Como traz a Fig. 1, os rolamentos são as principais causas de falhas em motores de indução, apontados, em 2008, como responsáveis por 69% de todas as falhas. Mesmo geometricamente perfeitos, os rolamentos podem gerar vibrações devido a variações de conformidade ou de esforços entre seus componentes ao longo do tempo. As variações dos esforços estão diretamente relacionadas ao número de elementos girantes; esferas ou rolos. Ao longo do tempo, esses esforços tendem a causar fadiga (Bezerra, 2004).

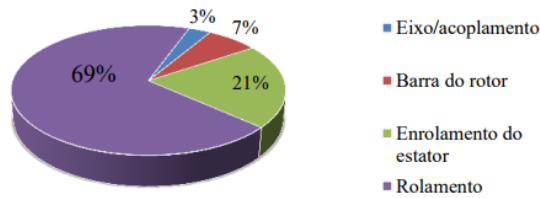


Figura 1. Distribuição de Falhas em Motores de Indução (Bellini et al.,2008).

Os sinais temporais de vibração medidos experimentalmente são formas de onda que contêm não só informações características de defeitos como também podem trazer consigo inúmeras outras informações não desejáveis, como por exemplo ruídos. Deste modo, durante uma análise espectral torna-se necessário destacar as informações requeridas (frequências associadas aos defeitos) daquelas não requeridas (Batista, 2016). Tal procedimento pode ser obtido, além dos processos de filtragens, através do uso de técnicas de “decomposição” e “demodulação” dos sinais temporais antes da aplicação da FFT (“*fast Fourier transform*”). Como uma das técnicas mais clássicas para demodulação de sinais de resposta temporal é possível citar a Transformada de *Hilbert* – HT (em inglês, “*Hilbert Transform*”) trabalhada por alguns autores como Hahn (1996) e Feldman (2011). A HT descreve a conexão entre os componentes reais e imaginários da transformada de *Fourier* de um sinal causal. Para um sinal real contínuo $x(t)$, sua transformada de *Hilbert* pode ser definida como a integral de convolução entre $x(t)$ e $(1/\pi t)$, definida pela Eq. (1) (Gonçalves, 2012):

$$H\{x(t)\} = y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right). \quad (1)$$

Um sinal com parte real e imaginária, denominado sinal analítico, pode ser criado com sua parte real $r(t)$ sendo o próprio sinal e sua parte imaginária $y(t)$ sendo a Transformada de *Hilbert* deste sinal, definido por $z(t)$ conforme a Eq.(2):

$$z(t) = r(t) + jy(t). \quad (2)$$

Reescrevendo em sua forma polar, $z(t)$ também pode ser escrito como:

$$z(t) = A(t)e^{-i\theta(t)}. \quad (3)$$

Sendo que $A(t)$ e $\theta(t)$ representam a amplitude e a fase instantânea do sinal analítico, respectivamente. O envelope ou sequência de tempo modulada de $z(t)$ é definido como o módulo do sinal analítico, representado pela Eq. (4):

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2}. \quad (4)$$

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{x(t)} \right). \quad (5)$$

Para o cálculo das frequências características de falhas em rolamentos, são utilizadas por Bezerra (2004) as Eq. de (1)-(4), em que *BPFI* refere-se ao defeito de pista interna, *BPFO* ao defeito de pista externa, *BSF* ao defeito na esfera e *FTF* ao defeito de gaiola, d é o diâmetro dos elementos rolantes, D é o diâmetro primitivo, n é o número de elementos rolantes e β é o ângulo de contato. Nas equações abaixo, $S = S_i - S_e$, onde S_e é a frequência de rotação da pista externa e S_i é a frequências de rotação da pista interna.

$$BPFI \text{ (Ball Pass Frequency Inner Race)} = \frac{n}{2D} [S/(D+d \cos \beta)]. \quad (6)$$

$$BPFO \text{ (Ball Pass Frequency Outer Race)} = \frac{n}{2D} [S/(D-d \cos \beta)]. \quad (7)$$

$$BSF \text{ (Ball Spin Frequency)} = \frac{D}{2d} \left[S \left(1 - \frac{d^2 \cos^2 \beta}{D^2} \right) \right]. \quad (8)$$

$$FTF \text{ (Fundamental Train Frequency)} = \frac{1}{D} \left(\frac{D-d \cos \beta}{2} S_i + \frac{D+d \cos \beta}{2} S_e \right). \quad (9)$$

Neste trabalho, devido a forma de fixação do rolamento junto ao mancal, a pista interna é girante e a pista externa é estacionária. Sendo assim, $S_e = 0$ e, conseqüentemente, $|S| = S = S_i$.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a pesquisa foi utilizado um motor de indução trifásico WEG W22 Plus, Fig. 2. Os sinais de vibração foram coletados por meio de um acelerômetro triaxial, modelo 4527-001 da Brüel & Kjaer, conectado à uma placa de aquisição de dados da National Instruments PCI-4461 de 24-Bit e 204.8 kS/s, com filtro anti-aliasing em 32 kHz. Foi utilizado uma frequência de amostragem de 65,2 kHz e um tempo de aquisição de 4,02 segundos. Dentre as diversas opções de fixação do acelerômetro, portátil, magnética, adesivo e base, neste trabalho foi utilizada a montagem em base fixa (Fig. 2).

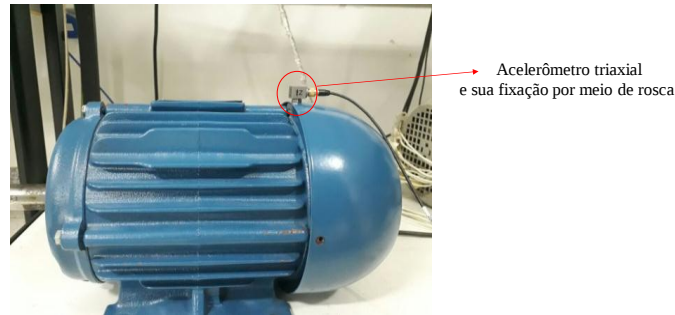


Figura 2. Motor de indução trifásico utilizado.

O rolamento utilizado no estudo é da empresa multinacional sueca SKF, modelo 6204-ZZ. Diferentes quantidades de cargas foram aplicadas ao motor. Estas cargas são torques que geram somente uma resistência ao movimento de rotação do rotor e simulam esforços que o mesmo poderia sofrer durante sua operação. No primeiro momento foram coletados sinais de vibração com um rolamento em perfeito estado, com variação na quantidade de carga em: carga total (100%), 80%, 50%, 20%, 10% da carga nominal (11 N.m de torque nominal), e sem carga. Em um segundo momento, um defeito foi inserido na pista do anel externo do rolamento estudado. Este defeito consiste de um furo usinado a partir do exterior do rolamento até a pista externa desejada, como mostrado na Fig. 3. Então, para efeitos comparativos entre as situações com defeito e sem defeito, foram adotadas as mesmas condições de carga anterior.



Figura 3. Falha inserida no rolamento.

Defeitos em rolamentos se manifestam em altas frequências. Isso devido à excitação das frequências naturais dos mancais ou da estrutura do motor. Assim, para separar as altas frequências das baixas frequências com altas amplitudes (geralmente relacionadas ao desalinhamento e desbalanceamento), foi aplicado nos sinais temporais um processo de filtragem passa banda. Para a seleção da banda de frequências em que o defeito se encontrava, foram verificadas três diferentes faixas: 15-25kHz, 20-30kHz e 15-30kHz. Através do espectro dos sinais filtrados verificou-se que a frequência natural excitada e portadora do indicativo de defeito encontrava-se próximo da frequência de 25kHz e, então, optou-se pela seleção da banda de 20-30kHz. Assim, após a filtragem aplicou-se a HT e posteriormente a FFT sobre o envelope obtido pela HT (Fig. 4).

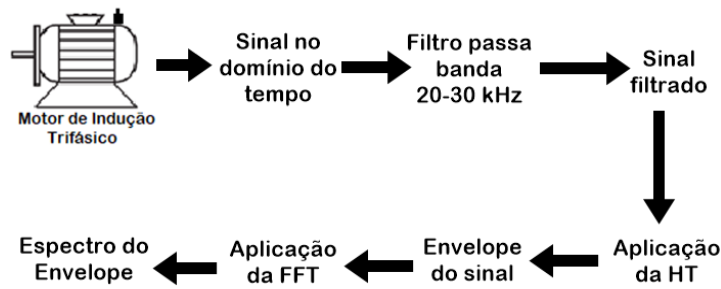


Figura 4. Etapas do processamento de sinais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas 10 medições nas três direções (X, Y e Z) para cada condição de carga. Somente para ilustrar, a Fig. 5 mostra dois sinais temporais coletados com 80% de carga na direção Y para as condições sem defeito e com defeito.

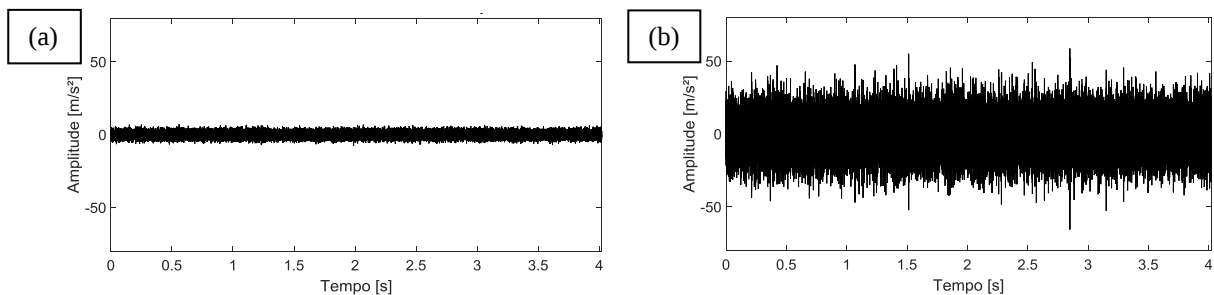


Figura 5. Sinais temporais de vibração: (a) Rolamento sem falha; (b) Rolamento defeituoso.

A Fig. 6 mostra os espectros dos envelopes dos sinais da Fig. 5 obtidos após o processo de filtragem passa banda. As amplitudes foram transformadas para unidade de velocidade m/s para melhor visualização na banda de frequência de interesse nesse trabalho. Pelo espectro da Fig. 6(a) é possível observar um pico em destaque na frequência de 29.3Hz. Esta, por sua vez, representa a frequência de rotação da máquina. Picos que aparecem próximos a duas vezes a frequência de rede ($2 \times 60 \text{ Hz} = 120 \text{ Hz}$) podem surgir devido a um desequilíbrio de tensão da rede durante a aquisição dos sinais. Quando comparado com a situação com defeito, é possível verificar no espectro da Fig. 6(b) um aumento significativo da amplitude na frequência relacionada ao defeito, em torno de 90 Hz, e da amplitude de um de seus harmônicos em torno de 180 Hz. Mais especificamente, no harmônico correspondente a duas vezes a frequência do defeito. Estas amplitudes se destacam no espectro em frequências múltiplas da frequência associada ao defeito devido ao processo de demodulação, sendo, juntamente com a frequência do defeito, as principais componentes que compõem o conteúdo em frequência dos sinais moduladores (envelopes).

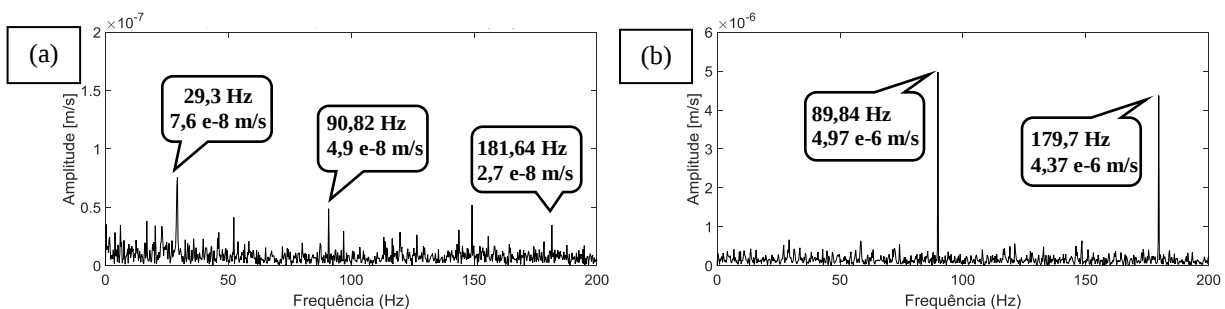


Figura 6. Espectros dos envelopes após aplicação da HT nos sinais da Fig. 5. (a) Rolamento sem defeito. (b) Rolamento defeituoso.

A Tab. 1 mostra os valores das frequências teóricas relacionadas com as falhas de rolamento calculadas por meio das Eqs. (6) a (9). Adotou-se a condição de 80% de carga, rotação de 1755 rpm, e as geometrias fornecidas pelo fabricante do rolamento. Observa-se que a frequência de 89.84 Hz, onde a amplitude se destaca no espectro da Fig. 6(b), está em concordância com a frequência teórica relacionada ao defeito da pista externa, calculada pela Eq. (7). De acordo com esta Eq. (7) percebe-se que alterações na velocidade de rotação causam também alterações na frequência da pista interna (Si) e, conseqüentemente, na frequência S. Na Tab. 2 são mostradas as variações da velocidade de rotação

para cada condição de carga juntamente com a respectiva frequência característica do defeito na pista externa obtida teoricamente por meio da Eq. (7) e experimentalmente por meio da análise espectral do envelope. Pode-se notar também uma grande concordância em seus valores.

Nas Tabs. 3 e 4 são apresentados as médias e os desvios padrões da frequência do defeito em estudo e de sua respectiva amplitude para as 10 medições realizadas em cada condição de carga nas duas situações, com e sem defeito, e para cada direção de medição: X, Y e Z. Em todas as medições os sinais temporais possuem o mesmo tempo aquisição e, portanto, espectros com a mesma resolução em frequência. Conforme pode ser visto, os baixos valores dos desvios padrões encontrados tanto para as frequências características do defeito bem como para as respectivas amplitudes no espectro indicam que as medições resultaram em valores confiáveis e convergentes.

Tabela 1. Frequências correspondentes aos tipos de falha para uma carga em 80%.

Tipo de defeito	Frequência característica (Hz)
<i>BPFI</i>	144,7
<i>BPFO</i>	89,3
<i>BSF</i>	116,5
<i>FTF</i>	58,2

Tabela 2. Frequência característica de falha na pista externa obtida de forma teórica e experimental para as diferentes cargas e respectivas velocidades de rotação.

Carga	Velocidade [rpm]	Frequência teórica BPFO [Hz]	Frequência experimental [Hz]
Sem carga	1798	91.5	92.04
10%	1795	91.3	91.8
20%	1790	91.1	91.55
50%	1774	90.2	90.82
80%	1755	89.3	89.84
Carga total	1742	88.6	89.1

Tabela 3. Média e Desvio Padrão das frequências e das amplitudes para X, Y e Z na situação sem defeito.

FM: Frequência Média (Hz); DPF: Desvio Padrão da Frequência (Hz);
AM: Amplitude Média(10^{-8} m/s); DPA: Desvio Padrão da Amplitude(10^{-8} m/s).

Carga	X				Y				Z			
	FM	DPF	AM	DPA	FM	DPF	AM	DPA	FM	DPF	AM	DPA
Sem carga	89,94	0,13	2,35	0,67	90,28	0,82	1,54	0,86	90,85	1,43	2,72	1,00
10%	89,99	0,21	1,93	0,68	90,27	1,66	2,13	0,44	90,26	1,35	3,39	1,08
20%	90,11	0,45	2,11	0,49	89,67	0,75	2,11	0,42	90,50	0,76	3,07	0,77
50%	89,72	1,26	1,67	0,60	89,89	1,62	2,44	0,88	90,43	2,32	3,07	1,26
80%	90,80	0,08	2,99	1,00	90,82	0,00	3,79	1,14	90,06	1,33	3,37	1,33
100%	91,06	0,00	5,48	1,00	91,13	0,62	5,88	1,54	89,92	1,21	4,82	1,50

Tabela 4. Média e Desvio Padrão das frequências e das amplitudes para X, Y e Z na situação com defeito.

FM: Frequência Média (Hz); DPF: Desvio Padrão da Frequência (Hz);
AM: Amplitude Média(10^{-6} m/s); DPA: Desvio Padrão da Amplitude(10^{-6} m/s).

Carga	X				Y				Z			
	FM	DPF	AM	DPA	FM	DPF	AM	DPA	FM	DPF	AM	DPA
Sem carga	92,04	0,00	3,66	0,34	92,04	0,00	3,96	0,79	92,07	0,08	4,91	0,89
10%	91,85	0,10	2,85	0,67	91,85	0,10	3,54	0,88	91,82	0,08	4,28	1,10
20%	91,55	0,00	2,70	0,69	91,55	0,00	3,44	0,49	91,55	0,00	4,63	0,99

50%	90,80	0,08	2,93	0,45	90,77	0,10	3,30	0,79	90,77	0,10	5,07	1,47
80%	89,82	0,08	3,19	0,46	89,82	0,08	3,53	0,80	89,86	0,04	5,06	0,62
100%	88,97	0,12	2,78	0,31	88,97	0,12	2,94	0,47	89,01	0,12	3,75	0,85

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos é possível notar uma grande diferença nas amplitudes do espectro do envelope com defeito e sem defeito. A frequência experimental correspondente à máxima amplitude no espectro aproxima-se da frequência teórica correspondente a um defeito na pista do anel externo. Sendo assim, é possível detectar experimentalmente o local de um defeito, desde que as frequências teóricas, dadas pelas Eqs. (5) - (9), sejam conhecidas. Ou seja, conhecendo-se o modelo do rolamento e suas velocidades de rotação, é possível localizar o defeito. Essa técnica auxilia na diminuição de perdas em um processo produtivo em virtude de possibilitar o acompanhamento da evolução de um defeito por meio de medições periódicas e sem a necessidade de paradas da máquina. Assim, manutenções programadas podem ser realizadas sem que ocorra a falha do equipamento e/ou maiores danos em todo sistema operacional.

Uma ferramenta de diagnóstico bem sucedida deve, sem dúvida, apresentar resultados convergentes e confiáveis. Neste contexto, a abordagem da HT juntamente com a análise espectral em frequência para a detecção de defeitos na pista externa em rolamentos se mostrou muito satisfatória.

5. AGRADECIMENTOS

Esse trabalho contou com o apoio do Laboratório de Máquinas Elétricas e Transformadores (LAMET) juntamente com os professores e da Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), que ofereceu a oportunidade de realizar esse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Baccarini, L. M. R., 2005. "Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução". Belo Horizonte, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. 179 p. Tese (Doutorado).
- Bastos, R. e Junior, R., 2010. "Previsão de Falhas em Rolamentos Utilizando a Demodulação de Sinais de Vibração" Anuário de Produção de Iniciação Científica Discente. Vol. 13, n. 17, pp. 359-366.
- Batista, F.B., Lamim Filho, P.C.M., Pederiva, R. e Silva V. A. D., 2016 "An Empirical Demodulation for Electrical Fault Detection in Induction Motors". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 65, No 3.
- Bellini, A., Filippetti, F., Tasson, C. e Capolino, G., 2008. "Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines" IEEE Transactions on Industrial Electronics., vol. 55, no. 12, pp.4109-4126.
- Bezerra, R. A., 2004 "Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração", Campinas, Universidade Estadual de Campinas, Tese (doutorado).
- Feldman, M., 2011 "Hilbert transform in vibration analysis", Mech. Syst.Signal Process., vol. 25, no. 3, pp. 735-802.
- Gonçalves, J. F., 2012. "Identificação de Defeitos em Rolamentos de Esferas por Análise de Vibração Utilizando Transformada de Hilbert". Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica).
- Hahn, S. L., 1996. "Hilbert Transforms in Signal Processing". Boston, MA, USA: Artech House.
- Lamim Filho, P. C. M., 2007. "Monitoramento on-line de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético", Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Tese (Doutorado).

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETECTION OF THREE-PHASE INDUCTION ELECTRIC MOTOR BEARINGS BY MEANS OF VIBRATION ANALYSIS

Letícia Resende Rodrigues, leticia.resende.rodrigues@outlook.com¹

Fabiano Bianchini Batista, fabianchini@ufsj.edu.br¹

Josemar de Souza Moreira, js_moreira99@yahoo.com.br¹

Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho, lamim@ufs.br¹

Charles Guimarães Fonseca de Paula, charlesguimaraesf@gmail.com

¹Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, Praça Frei Orlando 170, Centro, São João del Rei, MG, Brasil.

Abstract. *The presence of defect(s) in a machine is capable of changing its dynamic behavior. In a spectral analysis it is possible to verify changes of amplitudes in specific frequencies, which allows, with the help of some mathematical tools, to characterize the gravity and type of defect(s) present. The bearings, in particular, are fundamental components in rotary machines, a fact that justifies the great interest in conducting research in order to understand the process of formation and progression of defects in these components. Defects in bearings may originate from the manufacturing process itself as well as from misuse or natural wear and tear due to operating time. In this work a study is carried out to identify the presence of external track defects in bearings using the classical Hilbert Transform and the frequencies spectral analysis from the Fourier Transform.*

Keywords: *Vibration, Faults, Bearings, Hilbert Transform.*