



DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTORES DE INDUÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DA ENERGIA DA WAVELET

Isabela Oliveira Zapparoli*¹

¹PPGEL – Universidade Federal de São João Del Rei

Resumo - Falhas em máquinas de indução podem ocasionar diversos problemas a todos os equipamentos que fazem parte do sistema no qual estas máquinas estão inseridas, como no caso de correias transportadoras, ventiladores industriais, partes mecânicas quaisquer, equipamentos eletrônicos, entre outros. Danificar estes equipamentos quando eles estão inseridos no ambiente industrial acarreta também um problema financeiro pois as falhas podem levar a interrupção da produção, má qualidade na produção, acidentes, entre outros problemas. Uma dessas possíveis falhas é a de barra quebrada no rotor do motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo. Esta falha altera o campo magnético da máquina e, conseqüentemente, a corrente elétrica. O trabalho desenvolvido aqui traz um estudo da falha de barra quebradas e a aplicação de um método para se detectar este problema em motores de indução. O método utilizado é conhecido como Energia da *Wavelet* (WE). Foi desenvolvido então um algoritmo no *software* MATLAB para que seja feita a análise de sinais de corrente coletados do motor e detecção da falha. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a técnica aplicada mostrou-se satisfatória na detecção do problema e que é uma ferramenta útil por exigir poucos recursos computacionais para realizar a detecção.

Palavras-Chave - Barras quebradas, energia da *Wavelet*, motor de indução trifásico.

DETECTION OF BROKEN BARS IN INDUCTION MACHINE USING WAVELET ENERGY METHOD

Abstract - Failures in induction machines can cause various problems to all equipment that is part of the system in which these machines are inserted, as in the case of conveyor belts, industrial fans, any mechanical parts, electronic equipment, among others. Damaging these equipments when they are inserted in the industrial environment also entails a financial problem because the failures can lead to interruption of production, poor quality in production, accidents, among other problems.

*oliveirazapparoli@gmail.com

One of these possible faults is that of a broken bar in the rotor of the three-phase squirrel-cage induction motor. This fault changes the magnetic field of the machine and, consequently, the electric current. The work developed here brings a study of broken bar fault and the application of a method to detect this problem in induction motors. The method used is known as *Wavelet* Energy (WE). An algorithm was then developed in the MATLAB software to perform the analysis of current signals collected from the motor and fault detection. The results obtained in this work demonstrate that the applied technique was satisfactory in the detection of the problem and that it is a useful tool because it requires few computational resources to carry out the detection.

Keywords - Broken bars, three-phase induction motor, *Wavelet* energy .

I. INTRODUÇÃO

Os motores de indução estão amplamente presentes no nosso dia a dia e, assim como a grande variedade de uso também possuem uma larga escala de falhas que se não forem detectadas o mais rápido possível, podem acarretar em um problema que gere mais danos ao motor e ao sistema que ele está operando. Segundo [1] e [2], os motores de indução são responsáveis por cerca de 90% dos equipamentos instalados na indústria e seu consumo energético chega a 60% do total.

A grande utilização destes motores nas indústrias faz com que eles precisem ter uma alta confiabilidade assim como as manutenções neles aplicadas, pois qualquer tipo de interrupção acarretará em perdas financeiras [3]. Por isso, é importante conhecer as possíveis falhas que podem acontecer nesses motores para que se torne mínimo o período em que as máquinas ficam paradas.

Estudos feitos em [4] revelam que as falhas estão divididas da seguinte maneira: falhas relacionadas ao estator da máquina representam 38%, com o rolamento são 40%, com o rotor 10% e as outras somam 12%. Dentre as falhas relacionadas ao rotor da máquina, as falhas de barras quebradas são as mais comuns e para se detectar este tipo de falhas em motores de indução do tipo gaiola, é necessário que seja feita uma análise nas alterações da corrente e na frequência do enrolamento do estator.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar a utilização de um método de análise do sinal de corrente do motor que apresenta uma falha de barra quebrada. Neste trabalho o método de análise utilizado é o da Transformada *Wavelet* Contínua (Continuous *Wavelet* Transform - CWT) que consiste em um método *off-line* de análise de dados juntamente com um cálculo de energia das bandas de frequência.

II. METODOLOGIA

A. Barras Quebradas

Um conceito importante para que se entenda a metodologia aplicada neste trabalho é o de frequência elétrica. Frequência é uma grandeza que indica o número de vezes que um evento acontece em um determinado período de tempo. No caso da frequência elétrica, é medido o número de vezes que o sinal analisado se repete durante um intervalo de tempo. A unidade da frequência elétrica é o *Hertz* (Hz) e um 1Hz significa que o sinal se repetiu uma vez durante 1 segundo.

Os enrolamentos do rotor e estator são simétricos quando estão sem falhas, com isso, as barras do rotor são percorridas por uma corrente elétrica induzida por um campo magnético distribuído simetricamente em relação à divisão dos pares de polos. A frequência elétrica pode ser calculada pela Equação 1, onde s é o escorregamento e f_l é a frequência de linha (60Hz).

$$fs = sf_l \quad (1)$$

Para o caso do rotor com barras quebradas, o comportamento do campo magnético que antes era simétrico passa a ser assimétrico, como pode ser visto na Figura 1 e 2, por que nas barras defeituosas não terão fluxo de corrente induzida. Isso causa saturações locais no estator e nos dentes do rotor próximo as barras quebradas, fazendo com que as amplitudes das componentes de frequência, Equação 2, da corrente do estator aumente.

$$(1 \pm 2s)f_l \quad (2)$$

Ao se analisar a frequência da corrente do motor, é possível saber se o problema de barras quebradas existe verificando as bandas laterais de duas vezes a frequência da corrente induzida no rotor (f_s) em torno da frequência da linha (f_l). O número de barras quebradas é inversamente proporcional a diferença em *dB* das duas amplitudes.

Utilizar a assinatura da corrente do motor é uma ferramenta muito útil para detectar falhas de barra quebrada no rotor porque alguns dos outros comportamentos anormais do motor com a barra quebrada não são características exclusivas deste tipo de falha. Vibrações, ruídos e faíscas, por exemplo, acontecem tanto em falhas de barra quebrada quanto em outros tipos de falhas e isso dificulta o diagnóstico preciso do problema. Outro fator importante nesta diferenciação é a alteração da frequência da máquina, que dependerá do escorregamento do motor.

B. Método de identificação de falha de barra quebrada

Neste trabalho será utilizado o método da Energia da *Wavelet* (WE) para identificação da falha de barra quebrada, apresentado em [5], e o cálculo será realizado no software MATLAB. O método da WE consiste em analisar a

Figura 1: Distribuição do campo magnético com o motor em carga nominal sem barras quebradas do rotor tipo gaiola [10].

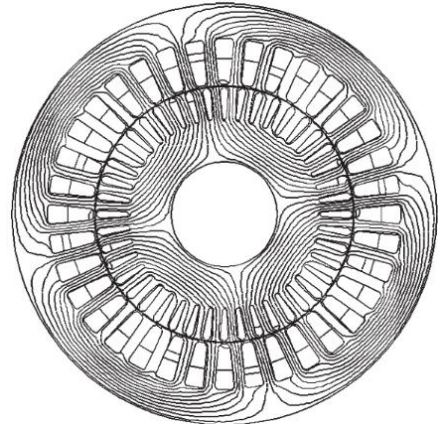
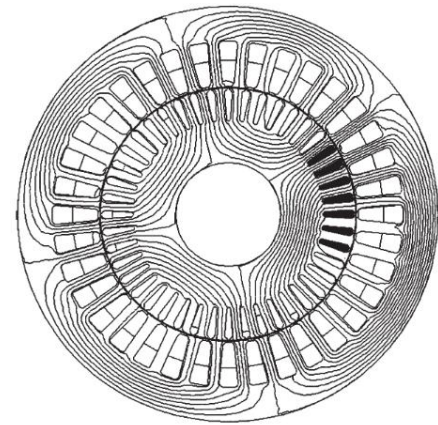


Figura 2: Distribuição do campo magnético com o motor em carga nominal com sete consecutivas barras quebradas [10].



quantidade de energia presente em cada nível de frequência da Transformada *Wavelet* do sinal de corrente. Neste caso, não usaremos o sinal original e sim o que chamamos de envelope superior que consiste em um sinal formado pela interpolação dos máximos locais do sinal original, apresentado em [6]. O método da Demodulação Empírica (ED) [6] propõe um algoritmo que, com uma aproximação empírica, utiliza apenas os extremos locais de um sinal modulado e fornece outro sinal que carrega a informação que representa a falha. Um detalhe importante sobre o algoritmo de ED é que o nível de tensão DC deve ser removido do sinal no primeiro passo para que o sinal original fique centralizado em volta do eixo de tempo.

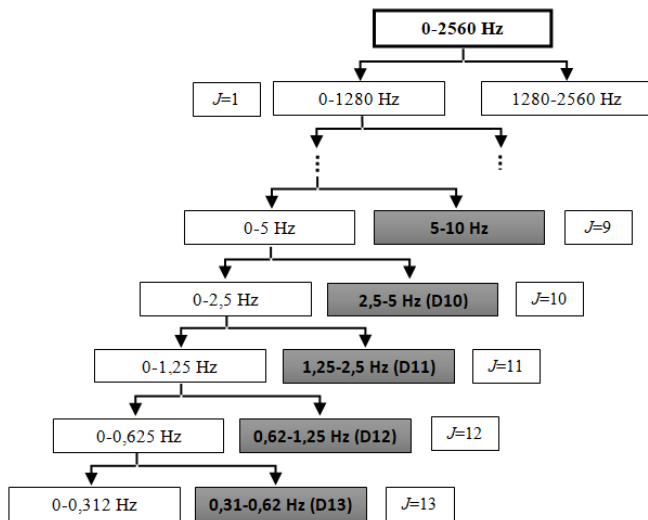
A Transformada de *Wavelet* é uma ferramenta utilizada no processamento de sinais. Ela surgiu como uma generalização da STFT, pois também funciona utilizando a ideia de janelas de análise, porém no caso da *Wavelet* esta janela tem tamanho variável e se localiza no domínio do tempo e da frequência, tornando-se possível que a análise do sinal seja feita em qualquer um dos domínios. Para este trabalho será utilizado o domínio do tempo.

O cálculo da Transformada *Wavelet* funciona da seguinte maneira: primeiramente deve-se escolher uma função matemática que será a base para os cálculos, o que chamamos de “*Wavelet*-mãe”. Posteriormente, o sinal que está sob análise passa por uma decomposição em versões

escalonadas da “Wavelet-mãe”, ou seja, pode-se dizer que o a TW de um sinal é o produto interno de um sinal e versões escalonadas e deslocadas da função “Wavelet-mãe”. Neste trabalho, a “Wavelet-mãe” utilizada foi a Daubechies. A TW pode ser implementada de duas formas distintas, conhecidas como Transformada Contínua de Wavelet e Transformada Discreta de Wavelet. Neste trabalho será utilizado a Transformada Contínua de Wavelet.

Assim, ao efetuar a sequência de decomposições, o sinal será dividido em níveis de frequência que correspondem aos coeficientes de aproximação e detalhe a TW. Neste trabalho, a frequência do sinal de corrente é de 5,12 KHz. Portanto, a decomposição do sinal e a qual a frequência correspondente para cada nível de decomposição pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Processo de Decomposição até o Nível J = 13.



Como mostrado anteriormente. Cada um deste nível possui uma energia que lhe é característica devido ao espectro de frequência que está localizado nesta banda. Com estas informações, é possível analisar a quantidade de energia de uma banda de frequência para um rotor sem falha e com falha de barra quebrada e compará-las a fim de identificar um padrão e com isso tornar possível a detecção de falhas. Como apresentado em [7], o cálculo da WE pode ser feito de acordo com as Equações de 3 a 5.

$$E_c = |b_j \cdot c(t)|^2 \quad (3)$$

Sendo b_j, c a amplitude do coeficiente da Transformada Wavelet Discreta para cada ponto discreto da sua respectiva banda de frequência.

A energia total é dada pelo somatório das energias de cada banda.

$$E = \left(\sum_{c=1}^{2^j} E_c \right) \quad (4)$$

Pela normalização dos valores de energia, a chamada Energia da Wavelet, que corresponde à quantidade de energia em cada pacote Wavelet, ou cada nível, é definida por [5]:

$$H = \left[\frac{E_1}{E}, \frac{E_2}{E}, \dots, \frac{E_{2^j}}{E} \right] \quad (5)$$

III. RESULTADOS

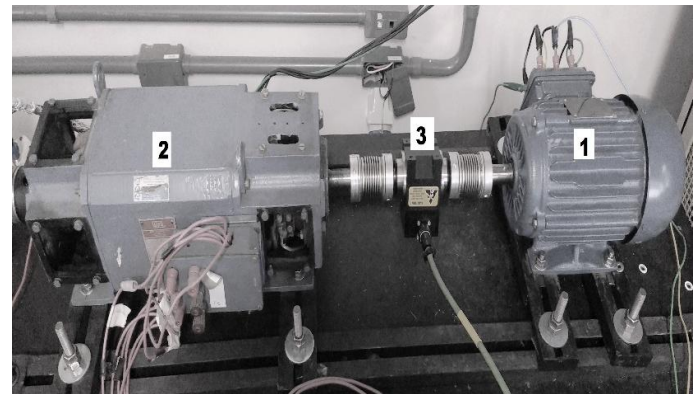
Foram realizados testes experimentais para validar a metodologia proposta neste trabalho utilizando uma bancada de testes, como representado na Figura 4. O motor de

indução trifásico (MIT) de 3 CV, com 4 polos, 60Hz e velocidade nominal de 1735 rpm foi utilizado para os testes em bancada. Um gerador de corrente contínua foi acoplado ao MIT e foi usado como carga deste. Um sensor medidor de torque foi colocado entre o motor e o gerador para medir o torque de carga e garantir uma padronização dos dados adquiridos. O gerador DC alimenta um banco de resistência variável a qual controla a carga mecânica do MIT.

Para aquisição de dados, foi usado um PCI-4461 da National Instruments, com 24 bits de resolução e canal de medição independente. O sinal de corrente do MIT foi coletado por um sensor de efeito hall (A622, modelo Tektronix) com uma frequência de amostragem de 5,12 kHz e 20 segundos de tempo de aquisição.

Foram realizados três testes com diferentes níveis de carga: o primeiro teste com 100% de carga, o segundo teste com 50% de carga e um terceiro teste com 10% de carga. Cada teste foi realizado tendo o motor funcionando em condições normais e também com a falha de barra quebrada inserida no rotor do motor de indução. Essa falha foi causada por um dano mecânico em uma barra do rotor (Figura 5).

Figura 4: Bancada experimental.



Em cada uma das situações de carga, o nível de energia que contém a frequência da falha difere dos demais. A Tabela I mostra a relação entre a porcentagem de carga, a frequência da falha e sua respectiva banda.

Tabela I: Relação entre o nível de carga e a frequência de falha.

Porcentagem de Carga (%)	Frequência da Falha	Nível de Energia
100%	5,325Hz	9
50%	2,125Hz	11
10%	0,425Hz	13

Seguindo então os dados da Tabela I, o algoritmo desenvolvido foi aplicado nos sinais de corrente coletados e os resultados serão apresentados nas próximas figuras. Primeiramente, na Figura 6, temos um exemplo mostrando o funcionamento da etapa de que selecionamos os máximos locais para criarmos o envelope superior. É possível ver que apenas os máximos locais são utilizados para serem interpolados e criar o sinal que será analisado.

Após a identificação dos máximos locais, o próximo passo consiste em calcular a transformada Wavelet do sinal criado através da interpolação dos pontos de máximo e então é calculado a quantidade de energia em cada nível da Wavelet.

Figura 5: Rotor com uma barra quebrada.

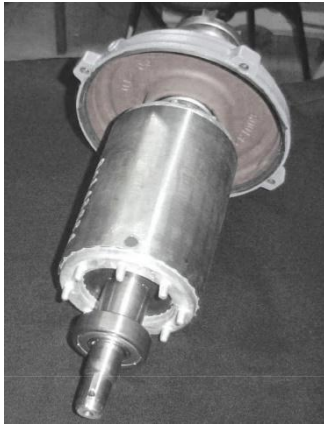
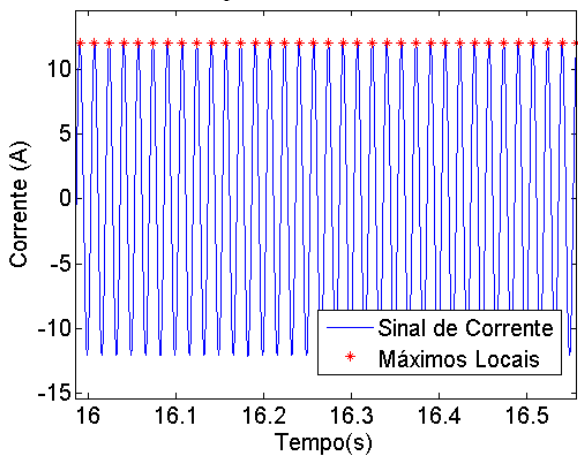


Figura 6: Sinal original de corrente em azul e os máximos locais em pontos vermelhos.



As Figuras 7 e 8 mostram, tem-se a Transformada *Wavelet* para a condição de 100% de carga do motor sem defeito e com defeito, respectivamente.

Como citado na Tabela I, a frequência de falha para a condição de 100% de falha se encontra no nível 9 da *Wavelet* e, através da Figura 8, é possível observar que a energia do sinal referente ao nível 9 para a condição defeituosa é maior, o que caracteriza a presença da falha. Nas Figuras 9 e 10, tem-se a Energia da *Wavelet* presente nos níveis analisados para o caso sem defeito e com defeito, respectivamente.

Figura 7: Transformada *Wavelet* do sinal com 100% de carga no motor sem defeito.

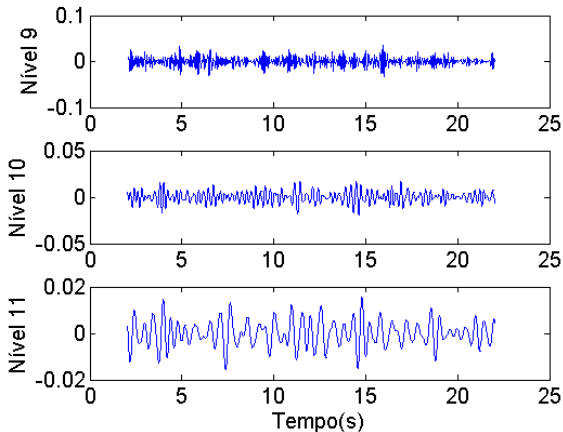


Figura 8: Transformada *Wavelet* do sinal com 100% de carga no motor com defeito.

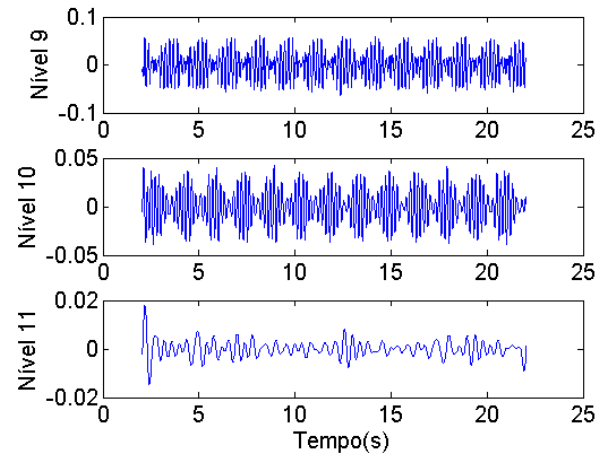


Figura 9: Energia da *Wavelet* do sinal com 100% de carga no motor sem defeito.

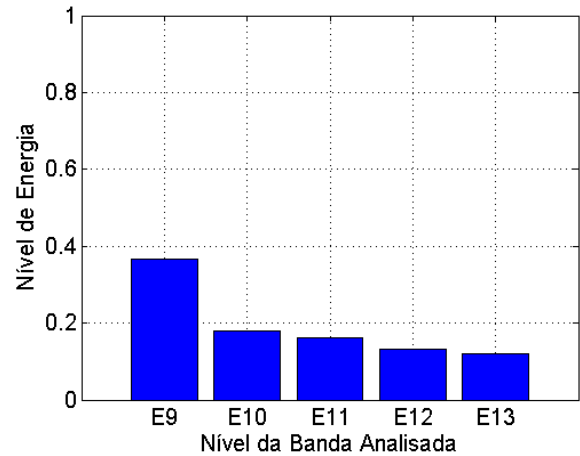
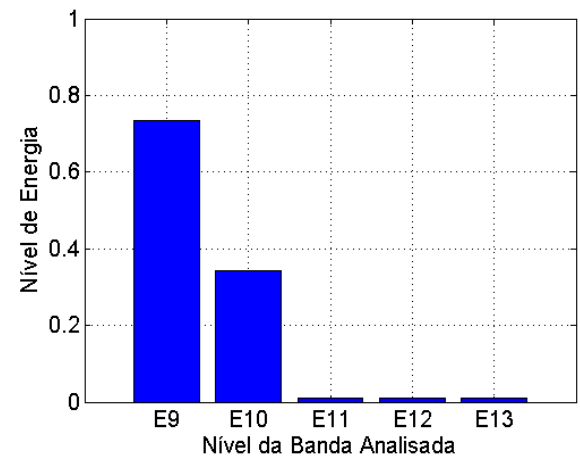


Figura 10: Energia da *Wavelet* do sinal com 100% de carga no motor com defeito.



As mesmas análises serão aplicadas para o motor sob a condição de 50% de carga. As Figuras 11 e 12 mostram a Transformada *Wavelet* do motor sem defeito e com defeito, respectivamente. Nesta condição de carga apresentada, ou seja, de 50%, o valor da frequência em que se detecta a falha está localizada no nível 11. Na Figura 12 também é possível verificar uma diferença na modulação das ondas do nível 11.

Nas Figuras 13 e 14, tem-se a Energia da Wavelet presente nos níveis analisados para o caso sem defeito e com defeito, respectivamente. Representado com clareza o aumento de energia devido à presença da falha.

Figura 11: Transformada Wavelet do sinal com 50% de carga no motor sem defeito.

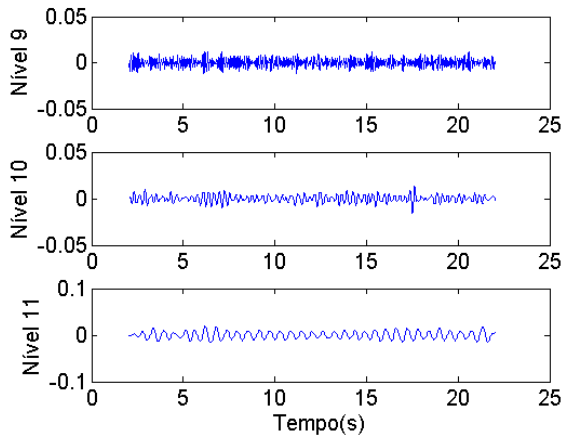


Figura 12: Transformada Wavelet do sinal com 50% de carga no motor com defeito.

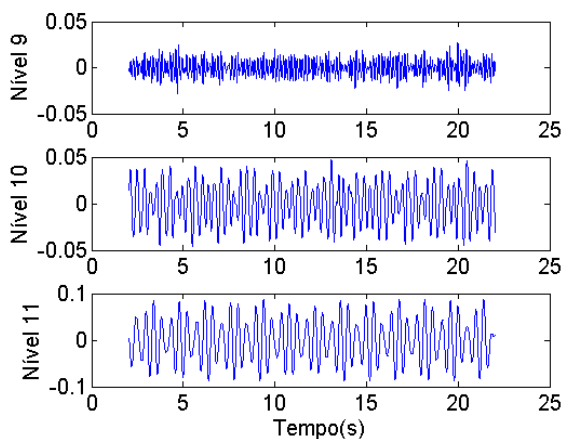


Figura 13: Transformada Wavelet do sinal com 50% de carga no motor sem defeito.

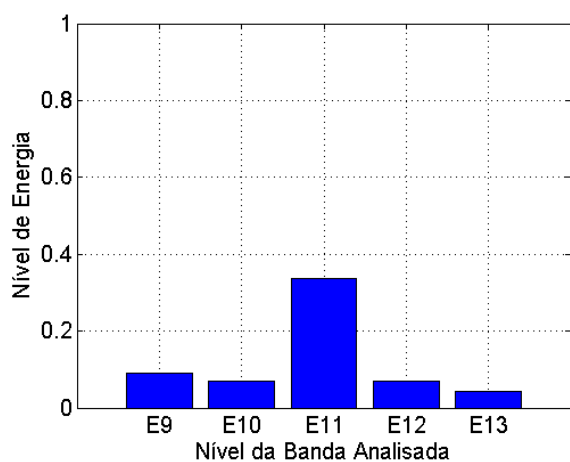
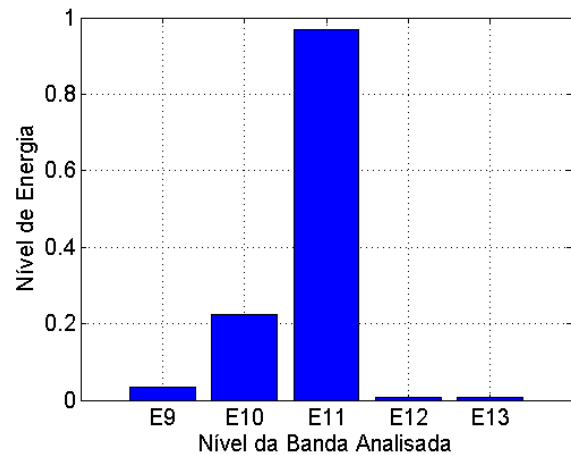


Figura 14: Transformada Wavelet do sinal com 50% de carga no motor com defeito.



Continuando com os testes, as Figuras 15 e 16 mostram agora a Transformada Wavelet para o motor com apenas 10% de carga sem defeito e com defeito, respectivamente.

Por possuir uma baixa frequência de falha, a diferença da modulação para a condição de 10% de carga com defeito e sem defeito é de difícil visualização. Entretanto, as Figuras 17 e 18 mostram com clareza que a Energia da Wavelet para os dois casos difere assim como nos anteriores, comprovando então a existência da falha.

Figura 15: Transformada Wavelet do sinal com 10% de carga no motor sem defeito.

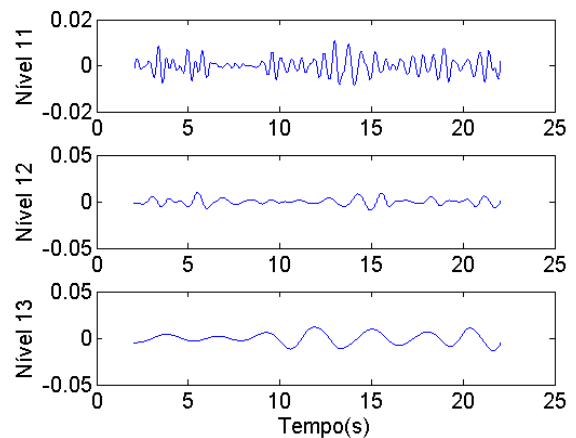


Figura 16: Transformada Wavelet do sinal com 10% de carga no motor com defeito.

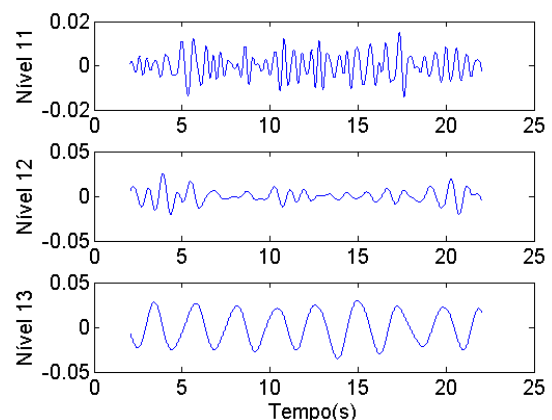


Figura 17: Transformada *Wavelet* do sinal com 10% de carga no motor sem defeito.

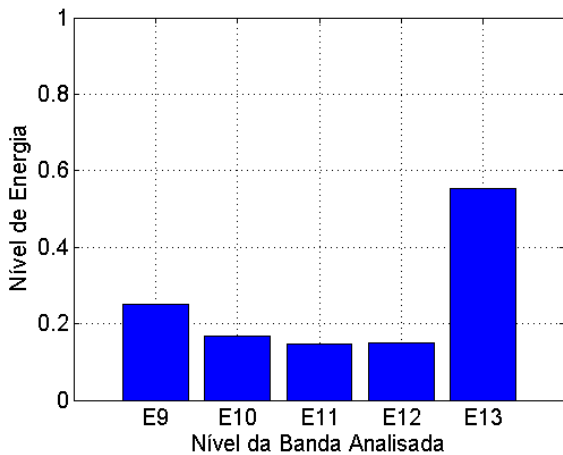
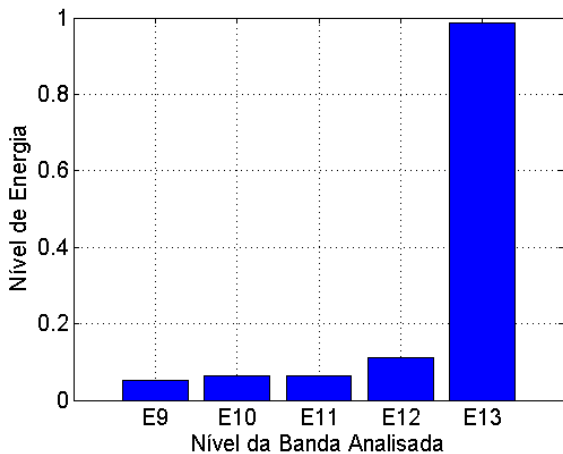


Figura 18: Transformada *Wavelet* do sinal com 10% de carga no motor com defeito.



IV. CONCLUSÕES

O método da Energia da *Wavelet* foi utilizado neste trabalho para detectar a falha de barras quebradas no rotor do motor de indução do tipo gaiola de esquilo. Este método foi aplicado ao envelope superior do sinal coletado. Os resultados gráficos mostraram-se satisfatórios e comprovam os fundamentos teóricos propostos anteriormente, ou seja, graficamente foi possível ver que a Energia da *Wavelet* no nível correspondente a falha destoa quando o motor está com a barra quebrada.

Com a metodologia proposta é possível realizar a detecção da falha de barras quebradas no rotor nas três condições de carga, 100%, 50% ou 10% da carga nominal. Nota-se também que para cada um destes casos, a frequência de falha é um valor diferente dos demais, e isso gera a necessidade de se analisar diferentes níveis da *Wavelet* para cada caso.

REFERÊNCIAS

[1] F.J.T.E. Ferreira, and A. T. Almeida (2016). "Energy Savings Potential Associated with Stator Winding Connection Mode Change in Induction Motors." *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 4-7 Sept., 2015.

[2] A.G. Espinosa, J. Cusidó, L. Romeral, J.A. Ortega, and J.A. Rosero (2008). "Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition". Published in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 55(2):633-643.

[3] R. S. Araujo, R.A Rodrigues, H. de Paula and L. M. R. Baccarini, "Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes dos Rolamentos de um MIT: Estudo de caso", Published in *Industry Application (INDUSCON)*, 2010 9th IEEE/IAS International Conference on, pp. 1-6, 2010

[4] R. Puch-Panadero, M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guas, J. Roger-Folch, E. Hurtado-Perez, and J. Perez-Cruz "Improved resolution of the MCSA method via Hilber Transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip", Published in *IEEE Transaction on Energy Conversion*, pp. 52-59, 2009.

[5] T. Liu and J. Huang (2005). "A Novel Method for Induction Motors Stator Interturn Short Circuit Fault Diagnosis by Wavelet Packet Analysis". Published by *IEEE Transactions on Electrical Machines and Systems*, 3(1):2254-2258

[6] Batista, Fabiano Bianchini et al. An empirical demodulation for electrical fault detection in induction motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, n. 3, p. 559-569, 2016.

[7] ALVES, Daiane Aparecida. Técnicas de Detecção de Falhas em Barras do Rotor nos Motores de Indução Trifásicos 2017. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de São João del Rei, São João Del Rei, 2017.