



* B R 1 0 2 0 2 1 0 2 1 1 7 1 A 2 *

República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102021021171-7 A2

(22) Data do Depósito: 22/10/2021

(43) Data da Publicação Nacional:
09/05/2023

(54) **Título:** PROCESSO PARA DIAGNÓSTICO DE DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO E FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS

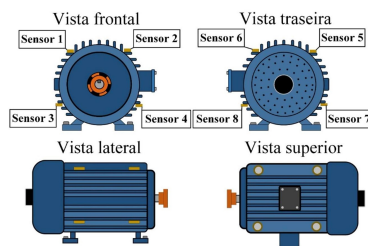
(51) **Int. Cl.:** G01M 1/22; G01M 1/30; H02K 15/16.

(52) **CPC:** G01M 1/22; G01M 1/30; H02K 15/16.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO.

(72) **Inventor(es):** ANDRÉ LUIZ ANDREOLI; BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO; GUILHERME BERARDI LUCAS; MARCO AURÉLIO ROCHA.

(57) **Resumo:** PROCESSO PARA DIAGNÓSTICO DE DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO E FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS. A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento e diagnóstico de desbalanceamento e falhas em máquinas rotativas, utilizando técnicas avançadas de processamento de sinais e transdutores piezelétricos. A técnica apresentada é capaz de detectar a fase e identificar o nível de desbalanceamento elétrico pela qual uma máquina elétrica pode estar sujeita. A técnica também pode ser utilizada para o diagnóstico e monitoramento de outros tipos de falhas.



**PROCESSO PARA DIAGNÓSTICO DE DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO
E FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS**

Campo da invenção:

[001] Sistemas de monitoramento e diagnóstico de falhas em máquinas elétricas rotativas têm ganhado atenção da indústria nas últimas décadas. O objetivo é evitar que falhas totais ou parciais acometam processos, garantindo, deste modo, produtividade e alto rendimento industrial por meio de manutenções programadas.

[002] Falhas como o desbalanceamento de tensão podem reduzir a vida útil da máquina elétrica, diminuir seu rendimento, produzir vibração e calor excessivo. Neste contexto, a presente invenção refere-se a uma nova técnica de diagnóstico de falhas em máquinas elétricas por meio de transdutores piezelétricos de baixo custo e técnicas avançadas de processamento de sinais. A técnica apresentada é capaz de detectar a fase e identificar o nível de desbalanceamento elétrico pela qual uma máquina pode estar sujeita. O invento também pode ser aplicado a outros tipos de avarias.

Estado da técnica:

[003] Atualmente tanto a indústria quanto a ciência têm buscado desenvolver sistemas de monitoramento para máquinas elétricas de modo a se garantir um elevado grau de eficiência de processos industriais. A finalidade é desenvolver sistemas robustos que possam prevenir falhas parciais ou totais nos mais variados tipos de processos, por meio de testes não destrutivos. A motivação é tanto

científica como econômica. Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais significa conquistar um elevado grau de segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa em manutenção (SCHANTZ, C. J.; LEEB, S. B. **Self-Sensing Induction Motors for Condition Monitoring**, IEEE Sensors Journal, v. 17, p. 3735-3743, 2017), (SAPENA-BANO, A., et al. **The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the Fault Diagnosis in Induction Motors Under Time-Varying Conditions**. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 32, p. 244-256, 2017.).

[004] Entre os diversos dispositivos aplicados na indústria, os motores de indução são caracterizados por sua robustez e eficiência (MORFIN, O. A., et al. **Real time ssm super-twisting combined with block control for regulating induction motor velocity**. IEEE Access, v. 6, p. 25898-25907, 2018), (SOLEIMANI, Y; CRUZ, S. M. A.; HAGHJOO, F. **Broken rotor bar detection in induction motors based on air-gap rotational magnetic field measurement**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 68, p. 2916-2925, 2019). Apesar disso, esse tipo de máquina pode ser submetido a diferentes não conformidades como sobrecarga, variações de tensão, anomalias em seus rolamentos, caixas de engrenagens, barras de rotores etc.

[005] Uma das avarias mais preocupantes, que reduz a vida útil de uma máquina, é o desequilíbrio da tensão de alimentação. Pode ser ocasionado por meio da falha na própria fonte de energia ou também por curtos entre as espiras das máquinas. Esse problema pode levar o

dispositivo à falha total, uma vez que aumenta as perdas no rotor, produz calor e vibração excessiva. Em aplicações práticas, o desbalanceamento também pode ocorrer em um curto período, levando silenciosamente a máquina a uma falha total (AL-BADRI, M; PILLAY, P; ANGERS, P. **A novel technique for in Situ efficiency estimation of three-phase IM operating with unbalanced voltages** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 52, p. 2843-2855, 2016.), (XIA, Y; KANNA, S; MANDIC, D. P. **Maximum likelihood parameter estimation of unbalanced three-phase power signals.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 67, p. 569-581, 2018.), (SHEIKH, M. A., et al. **Unsupervised online method to diagnose unbalanced voltage in three-phase induction motor.** Neural Computing and Applications, v. 30, p. 3877-3892, 2018). (SHEIKH, M. A., et al. **An Analytical and Experimental Approach to Diagnose Unbalanced Voltage Supply.** Arabian Journal for Science and Engineering, v. 43, p. 2735-2746, 2018.).

[006] Devido a esse problema, diversos tipos de metodologias de diagnóstico de falhas foram desenvolvidos.

[007] Dentre as alternativas existentes, a análise de corrente é uma das técnicas utilizadas para detectar falhas em máquinas elétricas. No documento de patente WO 2011/006528 A1 publicado em 20/01/2011, "Fault detection in a rotating electrical machine", é descrito um sistema que detecta diferentes falhas por meio da análise da assinatura da corrente do motor, baseado na técnica da Transformada Wavelet.

[008] Outro tipo de abordagem para diagnóstico de falhas pode ser observado no documento de patente US 9, 255, 837 B2 publicado em 09/02/2016, "Method for identifying a fault in an electrical machine". O documento descreve um sistema que utiliza oito acelerômetros acoplados ao estator de uma máquina elétrica a fim de detectar: barras quebradas, excentricidade dinâmica, excentricidade estática, curto circuito entre espiras e curto circuito entre bobinas por meio de análise de vibrações.

[009] Ainda neste contexto, Qian et al (2018) e Rahnama et al. (2019), desenvolveram sistemas inteligentes para detecção de falhas que possuem como parâmetro de entrada sinais de vibração (QIAN, W. et al. **An intelligent fault diagnosis framework for raw vibration signals: adaptive overlapping convolutional neural network**. Measurement Science and Technology, v. 29, n. 9, p. 095009, ago. 2018), (RAHNAMA, M. et al. **Machine-learning approach for fault detection in brushless synchronous generator using vibration signals**. IET Science, Measurement Technology, v. 13, n. 6, p. 852-861, 2019).

[010] No entanto, o invento proposto utiliza o método da emissão acústica baseada nos sinais provenientes de sensores piezelétricos de baixo custo. A emissão acústica é uma técnica promissora e já demonstrou ser bem-sucedida no diagnóstico de máquinas elétricas em outros trabalhos.

[011] Um exemplo de aplicação desta técnica é o documento de patente CA 2, 687, 785 C publicado em 15/09/2015, "Parameter independent detection of rotating

machinery faults". Neste documento é descrito um método de detecção de falhas mecânicas utilizando a análise do espectro dos sinais de emissão acústica através da Transformada de Fourier.

[012] Outra abordagem para essa mesma técnica foi desenvolvida por Mohanty, Gupta, Raju (2018) onde os autores captaram sinais de emissão acústica através de microfones de pressão. Através desses sinais, foi possível a detecção de falhas nos rolamentos de uma máquina elétrica por meio da aplicação do expoente de Hurst (MOHANTY, S.; GUPTA, K. K.; RAJU, K. S. **Hurst based vibro-acoustic feature extraction of bearing using EMD and VMD.** Measurement, v. 117, p. 200-220, 1 mar. 2018).

[013] A emissão acústica também foi usada na elaboração do documento de patente CH, 711, 632 A2 publicado em 13/04/2017, "System and method for detecting defects in stationary components of rotary machines". Neste documento, é apresentado um sistema para detectar falhas em componentes estacionários de máquinas rotativas através dos sinais acústicos e da Transformada de Hilbert.

[014] Glowacz (2019) propôs um sistema de detecção para falhas no rolamento, estator e rotor através dos sinais obtidos por um microfone capacitivo e da aplicação da Transformada de Fourier (GLOWACZ, A. **Fault diagnosis of single-phase induction motor based on acoustic signals.** Mechanical Systems and Signal Processing, v. 117, p. 65-80, fev. 2019.)

[015] Por fim, no documento de patente GB, 2, 430, 034 A os inventores realizam o monitoramento de uma máquina rotativa através de um par de sensores especiais. Para tal, foi utilizado um sensor emissor acoplado à parte móvel da máquina. Este sensor transmite os sinais acústicos captados para um segundo sensor que tem o papel de receber esses sinais a fim de enviá-los para um dispositivo de armazenamento de dados.

[016] Todos esses esforços culminaram com técnicas de monitoramento de máquinas elétricas. Dessa forma, é notória a importância do desenvolvimento de sistemas que possibilitem o diagnóstico de uma falha nesses dispositivos. O objetivo é promover um elevado grau de rentabilidade de processos industriais de forma que se obtenha a redução de custos por meio de manutenções preditivas mais eficientes e evitar paradas não programadas. Como observado, embora exista uma grande parcela de contribuição científica na área em questão, não há nenhum registro de uma técnica de diagnóstico de falhas em máquinas elétricas que utilize transdutores piezelétricos do tipo titanato de zirconato de chumbo (PZT). Esses transdutores, atualmente, possuem baixo custo (na ordem de R\$ 0,50 (ano de 2020)) são conhecidos como "buzzers" e comercializados como geradores de som. Além disso, não existe na literatura técnica que faça o diagnóstico de desbalanceamento pelo uso desses transdutores.

[017] Neste contexto, a presente invenção propõe um sistema não invasivo para o diagnóstico de desbalanceamento

de tensão aplicados em máquinas elétricas. A técnica se baseia no sensoriamento de ondas acústicas emitidas pela falha. Apresenta-se, o invento, como uma solução simples para também diagnosticar outros tipos de falhas que venham a acarretar geradores, motores elétricos ou qualquer sistema industrial. O método do invento tem simples implementação e é aplicável em sistemas que demandam baixo custo computacional. A técnica apresentada é capaz de detectar o desbalanceamento de tensão em curto período, além de estimar o nível de afundamento da tensão pela qual a máquina é exposta. Uma outra vantagem do método se refere a sua segurança operacional, pois não demanda contato com partes ativas como cabos elétricos, evitando com que operadores tenham contato ou operem próximos a partes energizadas. Esse fator é fundamental também para análise de máquinas que se valem de médias e altas tensões.

Breve descrição da invenção:

[018] Refere-se o presente pedido de patente a uma técnica para diagnóstico de desbalanceamento de tensão e falhas em máquinas rotativas por meio do uso dos transdutores piezelétricos a base de titanato de zirconato de chumbo (PZT) e técnicas avançadas de processamento de sinais. O sistema é constituído de:

[019] Transdutores piezelétricos a base de titanato zirconato de chumbo e suas variações.

[020] Um hardware de aquisição de dados para capturar os sinais dos transdutores durante a aplicação da técnica.

[021] Um computador/interface com o usuário que será responsável pelo processamento dos sinais e cálculo do índice de falha proposto.

[022] Em relação aos procedimentos: a descrição da invenção será feita com base em um estudo de caso, especificando as posições dos transdutores, o tipo de motor elétrico empregado, e os níveis de afundamento de tensão estudados etc. Porém, a invenção estende-se as mais diversas opções e tipos transdutores e de máquinas, ou qualquer outro componente industrial acionado por elas como as injetoras, as prensas, máquinas de usinagem, ou seja, qualquer tipo de aparato industrial que necessite de torque. O invento também se estende ao monitoramento de geradores de eletricidade.

[023] Dessa forma, no estudo de caso, utilizou-se um motor de indução trifásico. Oito sensores piezelétricos foram fixados na carcaça do motor. Quatro na parte superior e, os demais, na parte inferior. Uma fonte programável foi utilizada para alimentar o motor de indução com diversos níveis de desbalanceamento de tensão. De posse dos dados, os sinais foram processados digitalmente com a implementação do novo índice proposto, que será mostrado a seguir. Cabe destacar que o invento se estende também a qualquer outro tipo de falha presente nos mais variados tipos de máquinas elétricas.

Breve descrição das figuras:

[024] Para melhor compreender o invento, seguem as descrições das figuras apresentadas:

[025] **Figura 1:** Representação esquemática do acoplamento dos transdutores piezelétricos no invento proposto.

[026] **Figura 2:** ilustração da bancada de ensaio.

[027] **Figura 3:** gráfico do índice proposto para identificação de desbalanceamento nas três fases para o nível wavelet de detalhe 6.

[028] **Figura 4:** gráfico do índice proposto para identificação da evolução do percentual de desbalanceamento de tensão nas três fases para o nível wavelet de detalhe 6.

[029] **Figura 5:** gráfico de energia para identificação da evolução do percentual de desbalanceamento de tensão para o nível wavelet de aproximação 1.

Descrição detalhada da invenção:

[030] Tomando como base as figuras 1 e 2, um conjunto de oito sensores piezelétricos foram anexados na parte superior e inferior de um motor elétrico de indução de 4 cv, 4 polos, 220/380V. Uma fonte de tensão trifásica programada alimentou o motor de forma a se aplicar tensões que variaram desde a nominal (220 V) até tensões com afundamentos de na ordem de 5 %, 10 %, 20%, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % e 90 %, em relação à tensão nominal. Esses afundamentos foram produzidos em cada fase da máquina elétrica.

[031] Um oscilógrafo da marca Yokogawa ®, foi utilizado para captar os sinais desses sensores em uma taxa de aquisição de dados de 2 MHz.

[032] Após a aquisição de dados sob condições de desbalanceamento os sinais foram processados. A transformada wavelet discreta foi aplicada e os níveis de aproximação e detalhe foram calculados para cada condição de falha. Também se calculou o número de vezes que os sinais inverteram sua polaridade, técnica essa conhecida como "contagem de cruzamento por zero". Após o cálculo desses parâmetros, um inédito índice (EZ), baseado na energia dos níveis wavelets ponderados pelo fator de cruzamento por zero foi calculado, conforme Equação (1):

$$[033] \quad EZ = Z_v \cdot E,$$

(1)

$$[034] \quad E = \sum_{n=1}^N |x[n]|^2$$

(2)

[035] em que Z_v é o número de vezes que o sinal inverte sua polaridade e E é a energia de cada nível wavelet de aproximação ou detalhe $x[n]$ formado por N elementos.

[036] Para cada sensor e cada caso de desbalanceamento, EZ foi calculado. Formou-se um gráfico 3D em que cada coordenada é representa um trio de sensores acoplados. Na Figura (3) é ilustrado a aplicação dessa metodologia para um desbalanceamento de 50 % considerando-o de forma separada em cada fase do motor trifásico. Observa-se que o

desbalanceamento forma três regiões bem definidas no gráfico da Figura (3), que representam a fase em que essa fase ocorre. O mesmo acontece quando todos os níveis de afundamento de tensão são considerados, conforme Figura (4). Para desbalanceamentos de 5 % a 90 % as regiões também apresentam um padrão para cada fase, sendo distintas. Foram considerados 100 pontos para cada tipo de desbalanceamento. Deste modo, torna-se factível a aplicação desse índice como técnica de separação e identificação de fase de desbalanceamento. Sendo assim, cada região representa a falha relacionada a uma única fase.

[037] Conforme Figura (5) o método também é capaz de estimar o percentual de afundamento de tensão mediante a análise da energia de cada nível wavelet de sinal. Observa-se que a energia do nível wavelet, que no caso é o nível 1 de aproximação, tem relação direta com o percentual da falha imposta à máquina. Deste modo, a técnica proposta, além de detectar a fase de ocorrência da falha, consegue também estimar seu percentual.

[038] Por conseguinte, o invento apresentado é uma técnica não invasiva para o monitoramento de desbalanceamento elétrico aplicado a qualquer tipo de máquina. Embora utilize técnicas avançadas de processamento de sinais o cálculo dos parâmetros demanda baixo custo computacional, sendo viável a qualquer tipo de sistema de aquisição de dados. O invento torna-se uma alternativa para a identificação de outros tipos de falhas uma vez que detém a capacidade de sensoriamento e classificação de dados.

REIVINDICAÇÕES

1. **PROCESSO PARA DIAGNÓSTICO DE DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO E FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS**, caracterizado pelo fato de se utilizar transdutores piezelétricos e o método de detecção pela energia ponderada pela inversão de polaridade de sinais e por compreender as seguintes etapas:

- a) Uso de transdutores de emissão acústica de sensoriamento que receba ondas mecânicas acústicas em qualquer faixa de frequência, em transmissão com ou sem fio, fixados por parafusos, colas ou magneticamente;
- b) Cálculo da energia de nível wavelet e da taxa de cruzamento por zero do sinal captado (inversão de polaridade) por método de processamento de sinais;
- c) Aplicação dos sinais originais ou aplicação de outros níveis wavelet, de filtros digitais e analógicos ou a partir da seleção de bandas de frequência pertinentes às condições do teste.

2. USO DO PROCESSO, conforme definido na reivindicação 1, caracterizado por ser na aplicação em máquinas elétricas e mecânicas, sendo a aplicação em qualquer ponto externo ou interno ao aparato a ser monitorado para detecção de qualquer tipo de avaria com possibilidade de uso como formador de cluster de dados.

FIGURAS

Figura 1

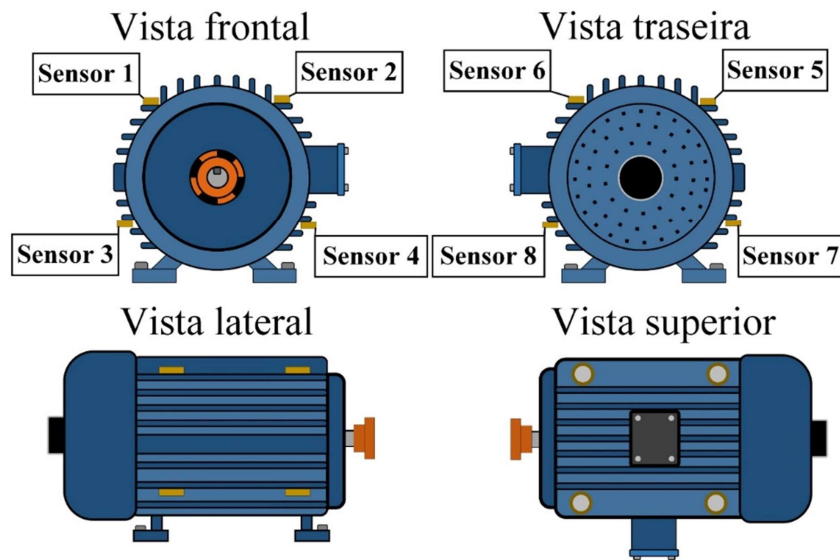


Figura 2

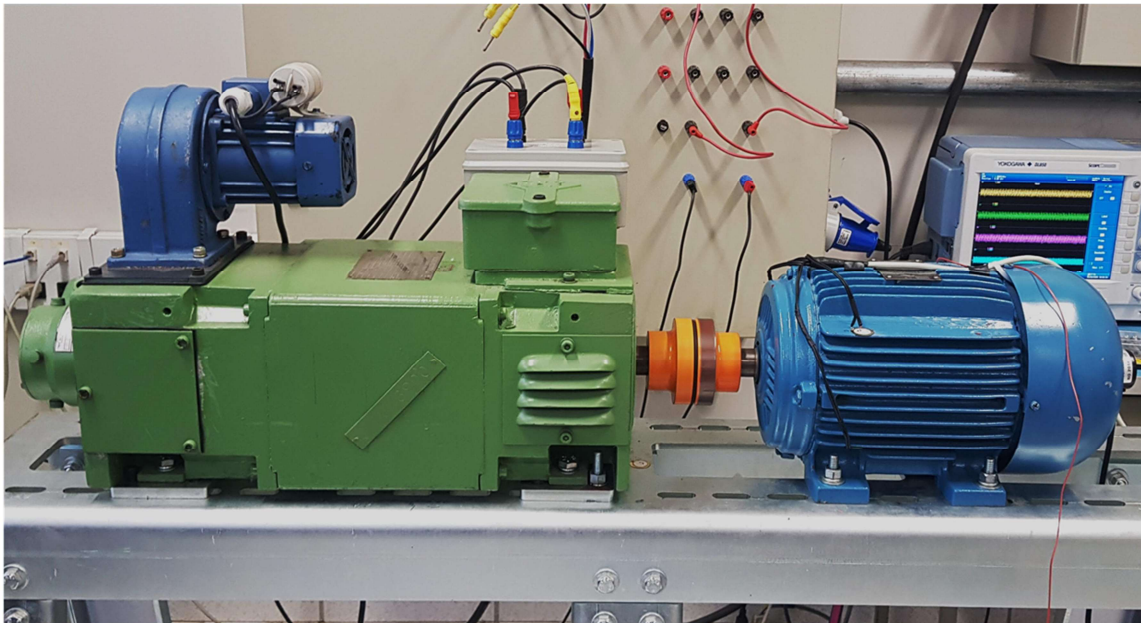


Figura 3

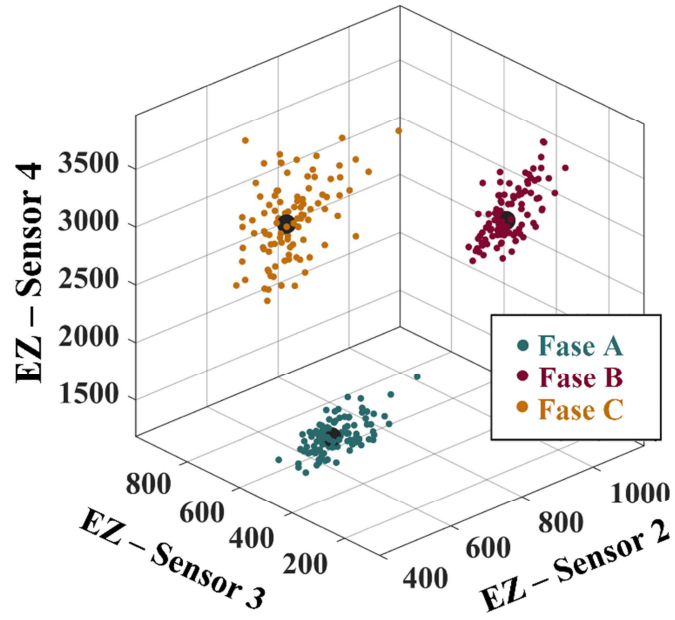


Figura 4

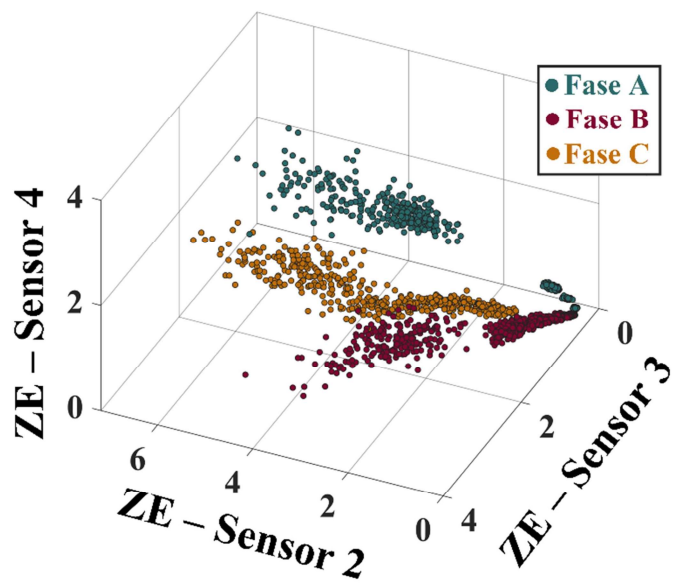
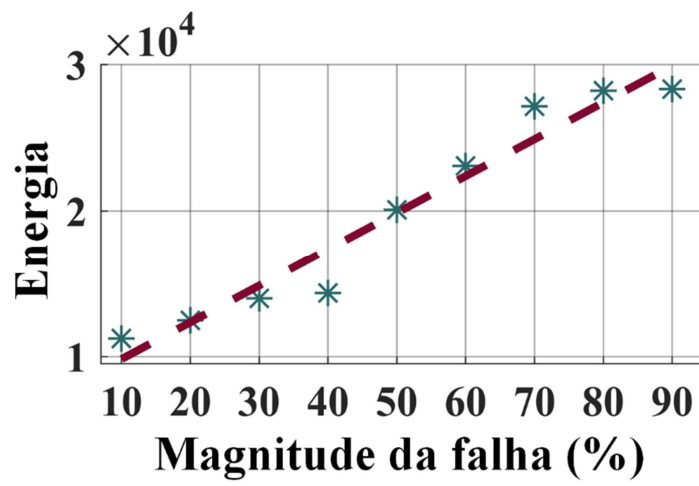


Figura 5



RESUMO**PROCESSO PARA DIAGNÓSTICO DE DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO E FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS**

A presente invenção se refere a uma nova técnica de monitoramento e diagnóstico de desbalanceamento e falhas em máquinas rotativas, utilizando técnicas avançadas de processamento de sinais e transdutores piezelétricos. A técnica apresentada é capaz de detectar a fase e identificar o nível de desbalanceamento elétrico pela qual uma máquina elétrica pode estar sujeita. A técnica também pode ser utilizada para o diagnóstico e monitoramento de outros tipos de falhas.