



Avaliação de metodologia de detecção de falhas em mancais de rolamento utilizando técnica de separação de componentes determinísticas e aleatórias

Domingues, R. K.¹; Cordioli, J. A.²; Braga, D. S.³

^{1,2} Laboratório de Vibrações e Acústica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, racquel.knust@lva.ufsc.br, julio.cordioli@ufsc.br

³ Pesquisa & Inovação, Dynamox SA, Florianópolis, SC, Brasil, danilo@dynamox.net

Resumo

A manutenção adequada é essencial nos setores industriais para garantir a disponibilidade máxima de ativos. Existem diversas estratégias de manutenção, sendo a manutenção preditiva, que se baseia no monitoramento das condições das máquinas, a mais utilizada. O uso da resposta vibratória como parâmetro para monitorar a condição da máquina é uma das principais soluções para detectar defeitos. Os sinais vibratórios de máquinas rotativas geralmente têm duas partes: determinística e aleatória. A parte determinística está ligada à resposta estrutural e à operação, útil para identificar anomalias, enquanto a aleatória pode ser devido a excitações aleatórias ou ruído elétrico. Portanto, é importante remover o ruído indesejado para utilizar a análise de vibração como uma ferramenta eficaz na detecção de falhas. Neste estudo, é proposta uma abordagem baseada na média síncrona no tempo (TSA - Time-Synchronous Averaging) para separar os sinais determinísticos e aleatórios. A metodologia utiliza o TSA para extrair as componentes de frequência relacionadas aos defeitos em rolamentos, com o objetivo de inferir sua presença ou ausência. Também é avaliado o uso da análise de ordem em sinais com variação de velocidade, explorando técnicas de estimativa de rotação através da vibração para dispensar o uso do tacômetro. Este estudo avalia a eficácia da metodologia na detecção de defeitos e os efeitos da variação de parâmetros internos.

Palavras-chave: Detecção de Falhas, Média Síncrona no Tempo, Mancal de Rolamento, Análise de Ordem.

Evaluation of fault detection methodology in bearings using deterministic and random component separation technique

Abstract

Proper maintenance is essential in industrial sectors to ensure maximum asset availability. There are various maintenance strategies, with predictive maintenance, based on monitoring machine conditions, being the most commonly used. Using vibrational response as a parameter to monitor machine condition is one of the primary solutions for defect detection. Vibrational signals from rotating machines typically consist of two components: deterministic and random. The deterministic part is linked to structural response and operation, which is useful for anomaly identification, while the random component may be caused by random excitations or electrical noise. Therefore, it is important to eliminate undesired noise to utilize vibration analysis effectively in fault detection. In this study, we propose an approach based on Time-Synchronous Averaging (TSA) to separate deterministic and random signals. The methodology employs TSA to extract frequency components related to bearing defects, aiming to infer their presence or absence. Additionally, we evaluate the use of order analysis in signals with varying speed, exploring vibration-based rotation estimation techniques to eliminate the need for a tachometer. This study assesses the effectiveness of the methodology in defect detection and the effects of internal parameter variations.

Keywords: Fault Detection, Time-Synchronous Average, Bearing Fault, Order analysis.

1. Introdução

A manutenção preditiva desempenha um papel crucial na garantia da eficiência e disponibilidade das máquinas, baseando-se na análise das condições atuais da máquina para prever falhas e realizar intervenções no momento mais adequado. Diferentemente da manutenção corretiva e preventiva, a manutenção preditiva evita falhas imprevistas e substituições desnecessárias de peças, contribuindo para processos de produção mais ágeis e eficientes. Cada componente de uma máquina, assim como qualquer estrutura, possui uma resposta vibratória única e específica diretamente relacionada às suas propriedades físicas ou à excitação aplicada. Quando ocorre uma falha nesses componentes, ocorre uma alteração imediata em pelo menos um desses fatores, afetando diretamente a vibração da máquina ou equipamento. Isso, combinado com o fato de que a medição de vibração é não intrusiva, torna a análise de vibrações uma das técnicas mais amplamente utilizadas na manutenção preditiva [1].

Em geral, ao realizar medições de vibração em uma máquina rotativa, o sinal obtido é composto por duas componentes principais: uma componente aleatória e uma componente determinística. A componente aleatória está relacionada aos ruídos presentes no sinal, como ruídos elétricos provenientes da instrumentação ou ruídos de natureza estocástica, como o deslizamento aleatório presentes em mancais. Por outro lado, a componente determinística está diretamente relacionada à estrutura e às condições de operação da máquina e é a parte do sinal que deve ser analisada para detectar uma falha. Portanto, durante a análise de vibração, é importante identificar e separar a componente determinística do sinal para que seja possível realizar uma avaliação precisa do estado da máquina [2].

Um método tradicional para separar as componentes determinísticas das componentes aleatórias é a Média Síncrona no Tempo (Time-Synchronous Average - TSA). Esse método envolve o cálculo da média dos segmentos do sinal que estão relacionados a uma frequência específica. Esse processo de média corresponde a uma filtragem no domínio da frequência, que possui a característica de atenuar as componentes não relacionadas com a frequência de sincronização, resultando na separação da componente dessa frequência e suas harmônicas [3].

Embora o TSA seja uma técnica simples, sua aplicação é limitada em algumas condições de operação, como quando o sinal analisado varia em função da rotação. Nessas situações, uma abordagem comum é a análise de ordem, que envolve a transformação do domínio de análise do sinal do tempo para o domínio angular. Dessa forma, a análise é conduzida em relação à rotação, independentemente do intervalo de tempo associado a essa rotação. Isso permite a realização da média dos segmentos, mesmo quando ocorrem flutuações na velocidade de rotação. A reamostragem angular é uma técnica numérica que viabiliza a aplicação da análise de ordem, utilizando informações de referência sobre a fase do eixo [4]. Essas informações podem ser obtidas por meio de um dispositivo externo, como um tacômetro, ou por meio de técnicas de estimativa de rotação com base na vibração [5].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar uma metodologia para a detecção de falhas em mancais de rolamentos. Esta abordagem combina o uso do TSA para extrair as componentes determinísticas relacionadas às frequências características de defeito e a análise de ordem, a qual permite lidar com a variação de rotação. A análise de ordem é conduzida tanto com o auxílio de um tacômetro quanto por meio de técnicas de estimativa de rotação com base na vibração. O fluxo de trabalho adotado engloba a aquisição de dados experimentais, o processamento do sinal para extrair as componentes associadas às frequências características dos defeitos e, finalmente, a realização da detecção de falhas, comparando as magnitudes dessas componentes com valores pré-estabelecidos. Além disso, será avaliado o desempenho das técnicas de estimativa de rotação baseadas na vibração ao variar alguns de seus parâmetros internos.

2. Revisão Bibliográfica

A detecção de falhas em máquinas por meio da análise de vibração envolve a comparação do sinal a ser analisado com um padrão estabelecido. Existem várias abordagens para realizar essa comparação e diferentes critérios para determinar se o sinal indica uma falha em um componente. Uma abordagem

amplamente utilizada é a análise espectral, que se baseia na identificação de frequências características nas respostas vibratórias de elementos mecânicos defeituosos. Essa análise de frequência permite detectar falhas ao comparar as magnitudes das componentes relacionadas a essas frequências específicas com padrões estabelecidos [2]. Para entender este conceito, na próxima seção serão demonstradas as informações vibratórias relacionadas aos rolamentos e quais são suas frequências características de defeito, uma vez que o foco deste trabalho é a detecção de falhas nesse componente específico.

2.1 Sinais Vibratórios em Mancais de Rolamento

Os mancais de rolamento são projetados para suportar cargas e fornecer suporte a eixos rotativos. Esses rolamentos podem desenvolver defeitos localizados, como rachaduras ou cavidades, em seus componentes, como anel externo, anel interno e elementos rolantes, devido à fadiga. Quando ocorre o choque entre esses defeitos e as superfícies do rolamento, isso gera impactos no mancal e na máquina, que podem ser modelados como impulsos aplicados ao sistema. Ao colocar um sensor em um ponto fixo do mancal com defeito, pode-se medir a resposta impulsiva desse sistema. Devido à rotação do mancal e ao movimento do eixo, esses impulsos ocorrem periodicamente, resultando em uma sequência de respostas impulsivas. Quando o defeito está nos anéis, os impactos ocorrem quando os elementos rolantes colidem com eles. Se o defeito estiver nos elementos rolantes, os impactos ocorrem quando esses elementos colidem com os anéis. Com base na frequência de rotação do eixo, f_r , e na geometria do rolamento, pode-se calcular a frequência dessas respostas impulsivas de acordo com a localização do defeito [6]. Essas frequências são conhecidas como frequências de defeito e são definidas da seguinte maneira:

$$f_e = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right\}, \quad f_i = \frac{nf_r}{2} \left\{ 1 + \frac{d}{D} \cos \phi \right\}, \quad f_{er} = \frac{f_r D}{d} \left\{ 1 - \left(\frac{d}{D} \cos \phi \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

onde f_e é a frequência de defeito do anel externo, f_i é a frequência de defeito do anel interno, f_{er} é a frequência de defeito do elemento rolante. Os parâmetros internos dessas definições são D , que é o diâmetro primitivo do rolamento, d , que é o diâmetro do elemento rolante, ϕ , que é o ângulo de contato em relação ao plano radial e n , que é o número de elementos rolantes. Outra frequência importante na análise de rolamentos é a frequência de gaiola, f_g , que representa a frequência com que a gaiola gira em torno do seu próprio eixo e pode ser definida da seguinte forma:

$$f_g = \frac{f_r}{2} \left\{ 1 - \frac{d}{D} \cos \phi \right\}. \quad (2)$$

Outra característica presente na resposta a esses tipos de defeitos é a modulação da amplitude, a qual ocorre devido a dois principais fatores. O primeiro fator está relacionado à modulação da intensidade do impulso gerado, influenciada pela distribuição de carga não uniforme no mancal de rolamento. O segundo fator decorre das variações na função de transferência, que determina o caminho de propagação da energia gerada pelos impulsos, devido à presença de um anel fixo e outros elementos em movimento. Essa variação ocorre em relação à posição fixa do sensor [7]. A Figura 1 apresenta os sinais esperados para mancais de rolamento com defeitos no anel externo, no anel interno e nos elementos rolantes, juntamente com os sinais que modulam a sequência de respostas impulsivas de cada defeito.

2.2 Análise de Envelope

Uma técnica utilizada na detecção de falhas em mancais de rolamento é a análise de envelope. Seu uso é motivado pela ocorrência de flutuações aleatórias na frequência dos impulsos, resultantes das variações no ângulo de contato (ϕ) a cada passagem dos elementos rolantes pela zona de distribuição de carga. Embora essas flutuações sejam quase imperceptíveis no domínio do tempo, seu efeito no espectro pode causar o espalhamento (*smearing*) lateral das componentes de frequência e sobreposições indesejadas [8].

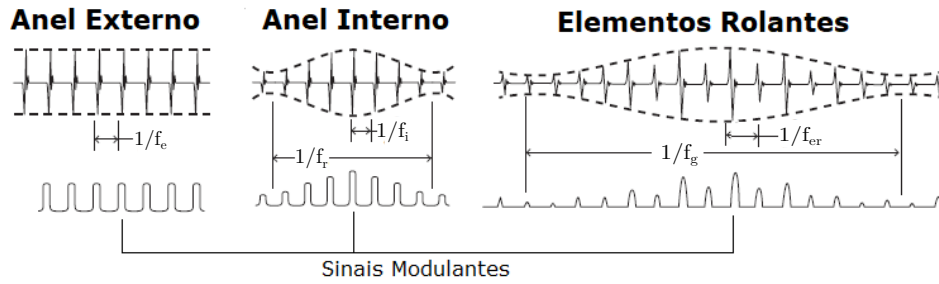


Figura 1: Sinais de Defeitos em Mancais de Rolamento (Adaptado de Randall [2])

A análise de envelope utiliza uma metodologia que extrai exclusivamente as informações relacionadas à amplitude modulada do sinal. Esse procedimento envolve três etapas principais. Na primeira etapa, identifica-se uma região no espectro do sinal onde existe uma possível frequência natural do sistema, presumivelmente diretamente relacionada à resposta aos impulsos gerados pelo defeito. O sinal é então filtrado dentro dessa faixa de frequência, removendo todas as outras componentes e isolando apenas as sequências de respostas impulsivas. Na segunda etapa, o sinal modulante é extraído do sinal filtrado usando a demodulação por transformada de Hilbert. A última etapa na análise de envelope envolve a obtenção de um espectro do sinal de envelope. Se o sinal analisado for proveniente de um mancal com defeito, esse espectro terá componentes associadas às frequências de defeito, uma vez que os sinais modulantes possuem periodicidade relacionada a essas frequências [2].

2.3 Média Síncrona no Tempo

A Média Síncrona no Tempo, também conhecida como TSA (Time-Synchronous Averaging), além de separar a parte determinística do sinal da parte aleatória, possui a capacidade de isolar componentes em frequências específicas, justificando o termo 'Síncrona' em seu nome [9]. Para compreender a aplicação desta técnica, pode-se definir que um sinal no tempo, $x(t)$, pode ser decomposto em três parcelas distintas. A primeira é a parcela determinística e síncrona à frequência f_s que deseja-se isolar, $s(t)$, a segunda é a parcela determinística e não-síncrona, $n(t)$, e a terceira é a parcela aleatória do sinal, $r(t)$.

Portanto, para extrair a componente $s(t)$ por meio do TSA, é suficiente aplicar uma transformação em $x(t)$ usando a média de segmentos desse sinal, com intervalos equivalentes ao período $T_s (=1/f_s)$. Em cada segmento, a componente síncrona $s(t)$ terá formas similares devido à sua periodicidade, enquanto as demais componentes apresentarão comportamentos desordenados. Isso ocorre porque a parcela $r(t)$ possui características aleatórias, resultando em amostras aleatórias em cada segmento, e a parcela $n(t)$ está dessincronizada com o intervalo do segmento, resultando em diferentes partes dessa componente em cada segmento [10]. Levando em consideração esses aspectos, ao final do processo de média dos segmentos, os valores da parcela $s(t)$ permanecerão próximos aos seus valores originais, enquanto as demais parcelas podem ter a tendência de serem atenuadas, conforme pode ser observado na Figura 2.

Matematicamente, esse processo de média de N segmentos pode ser formulado como uma convolução do sinal $x(t)$ com uma sequência de N impulsos ideais espaçados por T_s e com amplitudes iguais a $1/N$. Devido à propriedade da convolução na transformada de Fourier, esse modelo pode ser representado no domínio da frequência por meio de uma multiplicação, da seguinte forma:

$$Y(f) = X(f)C(f) = X(f) \frac{1}{N} \frac{\text{sen}(\pi N T_s f)}{\text{sen}(\pi T_s f)}, \quad (3)$$

onde f é a variável de frequência, j é o número imaginário, $X(f)$ é a transformada de Fourier do sinal $x(t)$ e $C(f)$ é a transformada de Fourier da sequência de impulsos. Observa-se que a multiplicação no domínio da frequência é análoga a uma filtragem, onde $C(f)$ é definida como a resposta do filtro.

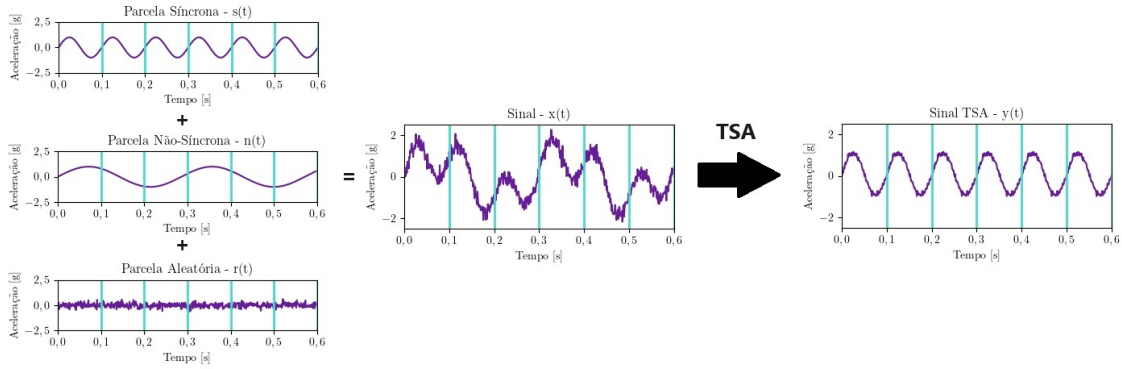


Figura 2: Parcelas Constituintes de um Sinal e Resultado da Aplicação do TSA

Sua definição indica que $|C(f)|$ se assemelha a uma sequência de picos centrados em múltiplos de f_s , igualmente espaçados. Portanto, ao realizar a multiplicação no domínio da frequência, conforme descrito em (3), podemos entender o processo de extração por meio do TSA [11].

2.4 Análise de Ordem e Reamostragem Angular

Embora o TSA seja uma técnica de aplicação simples, sua eficácia depende da igualdade no número de amostras em cada segmento correspondente ao intervalo T_s . No entanto, é comum que essa igualdade não seja atendida devido a vários fatores. Para abordar essa questão, é possível manipular o sinal de forma que ele seja analisado em relação a uma frequência específica e suas harmônicas, chamadas de ordens. No caso da análise em relação à rotação de um eixo, esse processo deve assegurar que o mesmo número de amostras do sinal seja obtido a cada rotação, ou seja, a amostragem deve ser realizada com incrementos de ângulos idênticos [12].

Para realizar essa transformação, utilizou-se a técnica de reamostragem angular, composta por três etapas. Na primeira etapa, são identificados os momentos em que ocorre uma rotação completa do eixo, conhecidos como períodos de rotação. Esses momentos são determinados por meio de um sinal externo, gerado por um tacômetro, ou por meio das técnicas de estimativa de rotação baseadas na vibração. Na segunda etapa, determinam-se os momentos em que ocorrem incrementos regulares de ângulo, utilizando interpolação numérica e os instantes obtidos na etapa anterior para obter uma função que descreve a relação entre o tempo e o ângulo, denotada como $t(\Theta)$. A terceira etapa consiste em reamostrar o sinal no domínio do ângulo, utilizando os tempos associados aos incrementos angulares regulares [4].

2.5 Estimativa de Rotação através da Vibração

A obtenção de um sinal com a informação da velocidade de rotação por meio de um dispositivo externo, como um tacômetro, pode ser impraticável em certas aplicações industriais. Portanto, a utilização de técnicas para estimar a velocidade de rotação de uma máquina com base em sua própria vibração pode oferecer uma solução para esse problema. Neste trabalho, foram utilizadas três metodologias para estimar a rotação: demodulação de fase [13], rastreamento do máximo de espectrograma [5] e uma combinação das duas abordagens anteriores, visando obter um resultado final aprimorado [14].

A demodulação de fase é baseada em separar e processar certas componentes do sinal, que estão diretamente associadas à frequência do eixo, e extrair informações de fase relacionadas à rotação do eixo, que, por sua vez, estão diretamente relacionadas à sua velocidade de rotação. O primeiro passo, então, consiste em identificar esta componente. Em seguida, é necessário separá-la do sinal original para que possa ser processada. Para isso, pode-se aplicar um filtro passa-banda. Nessa etapa, é importante escolher uma largura de banda adequada para o filtro, de modo a extrair apenas a componente de interesse. Com o sinal filtrado, utiliza-se a transformada de Hilbert nesta componente para obter a fase ao longo do tempo. Pode-se aplicar essa informação extraída sobre a fase do eixo para obter os instantes de tempo associados às revoluções do eixo, utilizados na reamostragem angular. Para isso, deve-se lembrar que uma rotação

completa corresponde a um aumento de 2π na fase do eixo [13].

O rastreamento de máximo de espectrograma baseia-se em, através do uso espectrograma, identificar, em cada instante de tempo, qual frequência apresentam maior energia dentro de uma faixa específica. Com isso, pode-se construir uma função de frequência máxima no tempo e assume-se, então, que essa corresponde à frequência instantânea do eixo. A partir da função de frequência máxima rastreada, $f_{\max}$ obtida pelo método, é possível calcular a fase instantânea associada a ela, $\theta_{\max}$, da seguinte forma:

$$\theta_{\max}(t) = 2\pi \int_0^t f_{\max}(u) du. \quad (4)$$

Uma vez obtida a fase do eixo, pode-se utiliza-la para extrair os instantes associados às revoluções do eixo, análogo ao que é feito na demodulação de fase, e utilizá-los na reamostragem angular [14].

O método híbrido é uma combinação dos dois métodos anteriores. Primeiramente é utilizado o rastreamento do máximo do espectrograma para realizar uma reamostragem angular preliminar. Após esta etapa, observa-se que qualquer tipo de espalhamento é removido do sinal, e as componentes de frequência são representadas por picos nas ordens. Isso permite o uso de um filtro estreito e centrado na ordem no sinal resultante do primeiro processo. Em seguida, o sinal filtrado é revertido para o domínio do tempo por meio de uma reamostragem inversa. Com o sinal no domínio do tempo, devidamente filtrado, a demodulação de fase pode ser aplicada para obter a estimativa final da rotação do eixo [5].

3. Materiais e Métodos

A metodologia empregada neste estudo para detecção de falhas em mancais de rolamento é dividida em três etapas principais, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 3. Essa abordagem segue um padrão muito bem estabelecido no monitoramento de condições para detecção de falhas em elementos de máquinas, no qual um sinal vibratório é medido e processado para extrair informações relevantes que indiquem a presença ou ausência de falhas no elemento analisado [15].

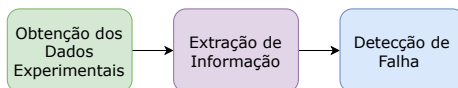


Figura 3: Fluxograma Geral da Metodologia Aplicada para Detecção de Falha

O primeiro estágio é a obtenção dos dados. No presente estudo, os dados foram gerados por meio de uma bancada de simulação de falhas em máquinas fabricada pela empresa SpectraQuest, mostrada na Figura 4. O sistema principal da bancada consiste em um motor acionado por um inversor de frequência, que permite o controle da velocidade pelo usuário. O motor é acoplado a um eixo que é suportado por dois mancais de rolamentos. Na extremidade do eixo mais distante do motor há uma polia que, por meio de um sistema de correias, está conectada a uma polia maior que, por sua vez, está ligada a uma caixa de engrenagens. Essa caixa de engrenagens é responsável por transmitir o torque de um freio magnético para o sistema mencionado anteriormente. O freio magnético tem a função de gerar carga no sistema.

Foi estabelecida uma matriz de testes com sete condições de operação distintas, agrupadas em cinco classes diferentes e suas variações, conforme colocado na Tabela 1. As condições referem-se à velocidade de rotação do eixo e à configuração do sistema principal da bancada. Foi criada uma matriz de teste para cada condição de defeito (saudável, anel externo, anel interno e elemento rolante) com a velocidade de rotação do eixo a 1200 RPM.

Foram utilizados três acelerômetros da PCB, modelo 353C33, montados de forma perpendicular, de modo a simular um sensor triaxial em um único ponto. Além dos sinais desses três acelerômetros, também foi realizada a aquisição simultânea do tacômetro integrado da bancada. Todos os sinais foram medidos com um tempo de aquisição de 30 s e uma frequência de amostragem de 25600 amostras/s, através de um

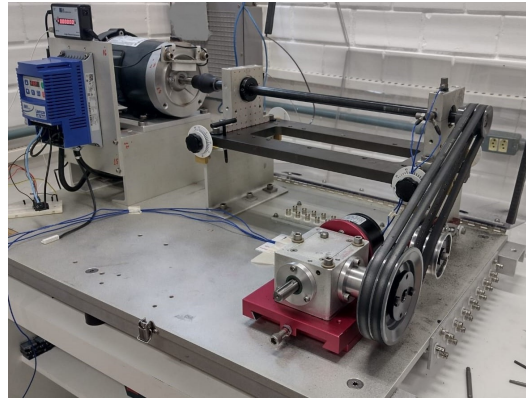


Figura 4: Bancada de Simulação de Falhas

Tabela 1: Condições de operações da bancada

Classe	Variação	Descrição
A	-	Velocidade constante e sem carga
B	a	Velocidade variando em 1% e sem carga
B	b	Velocidade constante e com 5% de carga
B	c	Velocidade constante e com 10% de carga
C	-	Velocidade constante, sem carga e com shaker acoplado
D	a	Velocidade constante e com 50% de carga
D	b	Velocidade constante e com 100% de carga

módulo de aquisição da National Instruments, do modelo 9234.

Foram gerados 2 conjuntos gerais de dados, cada um contendo 28 subconjuntos de sinais (aceleração e tacômetro), que estão divididos em 4 grupos, cada um com 7 subconjuntos de sinais, correspondentes às 7 condições de operação propostas. Cada grupo é referente à uma condição de defeito do rolamento. A criação de dois conjuntos gerais de dados é necessária devido à metodologia aplicada para a detecção de falhas, já que será necessário utilizar um processo de otimização, sendo necessário um conjunto para treinar essa otimização e outro para testá-la.

A segunda etapa corresponde ao bloco destacado em roxo no fluxograma apresentado na Figura 3. Nesse bloco, os dados experimentais são processados para extrair informações relevantes para a detecção de falhas. Neste trabalho, utiliza-se uma metodologia de processamento que envolve a aplicação de uma análise de envelope ao sinal, seguida pela reamostragem angular e pela média síncrona no tempo, sincronizada nas frequências características de defeito de rolamento, destacadas na Equação (1). O fluxograma dessa metodologia de extração de informações é apresentado na Figura 5.

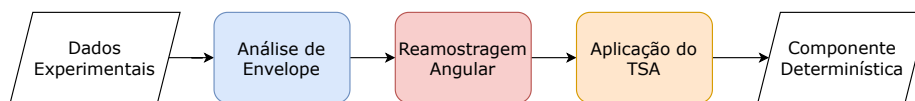


Figura 5: Fluxograma da Metodologia de Extração de Informação

O processamento inicia-se com a aplicação da análise de envelope. Neste trabalho, uma faixa de filtragem pré-definida de 500 Hz a 10 kHz foi utilizada, uma vez que o objetivo é avaliar as demais etapas do processamento e não focar no desempenho da análise de envelope. Em seguida, é aplicada a reamostragem angular, para a qual foi necessário obter os tempos correspondentes aos intervalos relacionados às frequências de extração. Esses tempos foram obtidos utilizando o tacômetro ou técnicas de estimativa de rotação. No caso do tacômetro, utilizou-se um algoritmo de detecção de borda de subida para obter a frequência de rotação e, utilizando as relações apresentadas em (1), as frequências dos defeitos foram obtidas. Quando se empregaram as técnicas de estimativa de rotação, as próprias frequências de defeito esperadas foram utilizadas como componente de referência na demodulação e como ponto de partida para o rastreamento do máximo no espectrograma e para o método híbrido.

As técnicas de estimativa de rotação possuem um parâmetro comum em suas aplicações. Tanto no processo de filtragem da demodulação de fase quanto na etapa de busca da frequência máxima em cada instante do rastreamento de máximo de espectrograma (também presente no primeiro bloco do método híbrido), é necessário determinar uma faixa de frequência para análise. Neste trabalho, foram explorados quatro valores diferentes para essa faixa de frequência. Considerando que f_c representa o valor central da faixa, a faixa de frequência de análise é $f_c \pm \delta f_c$, onde δf_c é definido como βf_c . O parâmetro β representa as porcentagens utilizadas, que foram definidas como 1,25 %, 2 %, 5 %, 10 % e 15 %.

Com o sinal reamostrado, pode-se aplicar a última etapa do fluxograma apresentado na Figura 5, destacada em laranja. A segmentação necessária para a aplicação do TSA foi realizada considerando que o número de amostras por revolução é conhecido, pois foi definido durante a reamostragem angular. É importante destacar que, neste trabalho, optou-se por utilizar o máximo de segmentos possível dentro do sinal, ou seja, considerou-se o número total de rotações ocorridas durante o tempo de aquisição do sinal. Dessa forma, todos os segmentos disponíveis foram utilizados para calcular a média.

Para o bloco destacado em azul no fluxograma da Figura 3, foi empregado um algoritmo de detecção que compara os valores das magnitudes das harmônicas das frequências de defeito com um limiar pré-determinado e define se há uma falha se pelo menos dois desses três valores de magnitude excedem tais limiares. Estes limiares são determinados multiplicando-se coeficientes pelas magnitudes das harmônicas da frequência de defeito obtidas a partir de um sinal de vibração de um mancal de rolamento sem defeito. São definidos limiares separados para cada harmônica, permitindo uma análise mais precisa. O objetivo de definir os limiares por meio dessa multiplicação é determinar a partir de qual desvio em relação à normalidade é possível identificar uma falha.

Os coeficientes foram determinados através de uma otimização da acurácia balanceada, AB, que é definida da seguinte forma:

$$AB = \frac{1}{2} \left(\frac{VP}{VP + FN} + \frac{VN}{VN + FP} \right) \quad (5)$$

onde VP é o número de verdadeiros positivos, VN é o número de verdadeiros negativos, FP é o número de falsos positivos e FN é o número de falsos negativos. Esses parâmetros refletem o desempenho da detecção. Um verdadeiro positivo ocorre quando o algoritmo detecta corretamente uma falha em um sinal de um componente com defeito. Um falso positivo ocorre quando o algoritmo erroneamente detecta uma falha em um sinal de um componente sem defeito. Da mesma forma, um verdadeiro negativo ocorre quando o algoritmo corretamente não detecta uma falha em um sinal de um componente sem defeito. Um falso negativo ocorre quando o algoritmo falha em detectar uma falha em um sinal de um componente com defeito [16]. Foi utilizado o conjunto de treino para obter os coeficientes.

4. Resultados e Discussão

Com o objetivo de avaliar exclusivamente o desempenho das técnicas de estimativa de rotação, primeiramente foram utilizados os sinais medidos no mancal com o rolamento sem defeito para estimar a frequência de rotação do eixo. Essa escolha foi motivada pelo fato do tacômetro fornecer de forma direta a informação da rotação do eixo, tornando-se uma referência precisa para o cálculo do erro. Foram calculados os erros para todas as 15 combinações possíveis (3 direções do acelerômetro x 5 faixas de frequência de análise). Na Tabela 2 tem-se o menor erro obtido para cada condição de operação (CO), assim como a técnica, faixa e direção que o gerou.

Os resultados em relação à direção eram esperados, uma vez que as direções vertical e horizontal correspondem às direções radiais, onde a vibração induzida por qualquer desbalanceamento será mais pronunciada. Em relação à faixa de frequência, observa-se que nos casos de rotação constante, uma faixa estreita possibilita a extração apenas da componente de rotação, evitando que informações de outras

Tabela 2: Menores Erros - Técnicas de Estimativa de Rotação

	A	Ba	Bb	Bc	C	Da	Db
Técnica	Demodulação de Fase	Demodulação de Fase	Demodulação de Fase	Demodulação de Fase	Rastreamento de Espectrograma	Demodulação de Fase	Rastreamento de Espectrograma
Direção	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Vertical	Axial	Vertical
Faixa	1,25 %	10 %	15 %	15 %	1,25 %	1,25 %	1,25 %
Erro	0,037 %	0,135 %	0,292 %	0,566 %	0,047 %	0,326 %	0,275 %

componentes contaminem a estimativa da técnica. Por outro lado, nos casos em que há variação de rotação, a faixa de frequência deve ser adequada para capturar essa variação, abrangendo toda a faixa em que ocorre o espalhamento das frequências.

A metodologia de detecção de falhas proposta neste estudo foi avaliada em etapas para examinar o impacto de cada etapa no processo de detecção. Três processos de detecção foram realizados: (1) envolveu a aplicação apenas da análise de envelope nos sinais, (2) foi conduzido após a execução da análise de envelope e a reamostragem angular e (3) foi realizado ao aplicar a metodologia completa, incluindo a análise de envelope, a reamostragem angular e a média síncrona no tempo.

Serão apresentados as acurácias balanceadas de cada processo de detecção obtidos a partir do conjunto de teste. É importante ressaltar que, para os segundos e terceiros processos de detecção mencionados anteriormente, os resultados são avaliados para cada técnica de estimativa de rotação (demodulação de fase, rastreamento máximo de espectrograma e o método híbrido), bem como para o tacômetro. Nas Tabelas 3 a 5, estão postos os valores obtidos das acurácias balanceadas para detecção de defeitos no anel externo, no anel interno e nos elementos rolantes.

Tabela 3: Acurácias Balanceadas - Anel Externo - Teste

Processos de Detecção	Vertical			Horizontal			Axial		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
-	0,74	-	-	0,74	-	-	0,52	-	-
Tacômetro	-	0,88	0,83	-	0,83	0,81	-	0,86	0,86
Demodulação	-	0,86	0,83	-	0,88	0,79	-	0,90	0,86
Espectrograma	-	0,93	0,93	-	0,88	0,83	-	0,71	0,62
Híbrido	-	0,83	0,80	-	0,74	0,76	-	0,79	0,76

Tabela 4: Acurácias Balanceadas - Anel Interno - Teste

Processos de Detecção	Vertical			Horizontal			Axial		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
-	0,90	-	-	1	-	-	0,71	-	-
Tacômetro	-	1	0,93	-	0,98	1,00	-	0,93	0,93
Demodulação	-	0,88	0,95	-	0,98	0,95	-	0,83	0,79
Espectrograma	-	0,90	0,88	-	1	0,93	-	0,93	0,95
Híbrido	-	0,88	0,98	-	0,98	1,00	-	0,93	1,00

Tabela 5: Acurácias Balanceadas - Elementos Rolantes - Teste

Processos de Detecção	Vertical			Horizontal			Axial		
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
-	0,36	-	-	0,5	-	-	0,64	-	-
Tacômetro	-	0,52	0,69	-	0,52	0,52	-	0,76	0,81
Demodulação	-	0,48	0,45	-	0,57	0,45	-	0,64	0,55
Espectrograma	-	0,48	0,5	-	0,52	0,52	-	0,71	0,71
Híbrido	-	0,43	0,48	-	0,38	0,57	-	0,64	0,62

Algumas considerações podem ser feitas sobre esses resultados. Em primeiro lugar, observa-se que os valores obtidos para a detecção de defeitos nos elementos rolantes foram significativamente mais baixos em comparação com os valores das outras detecções. Isso pode ser atribuído ao comportamento desses sinais, uma vez que tais sinais não apresentaram componentes relacionadas ao defeito de forma proeminente. Além disso, nota-se que a detecção de defeitos no anel interno apresentou resultados

melhores. Isso pode estar relacionado ao fato de que os sinais desse defeito apresentaram harmônicas mais proeminentes na frequência do defeito. Para exemplificar isso, a Figura 6 exibe os espectros do sinal com defeito e do sinal de referência para o defeito no anel externo, no anel interno e nos elementos rolantes, respectivamente, na condição de operação Db (com 100 % de carga). É evidente que a diferença de magnitude na frequência do defeito e suas harmônicas, destacadas em verde, é significativamente maior para o sinal com defeito no anel interno. Esse fato pode ter influenciado o processo de detecção, uma vez que, nesses casos, o desvio da normalidade é mais evidente.

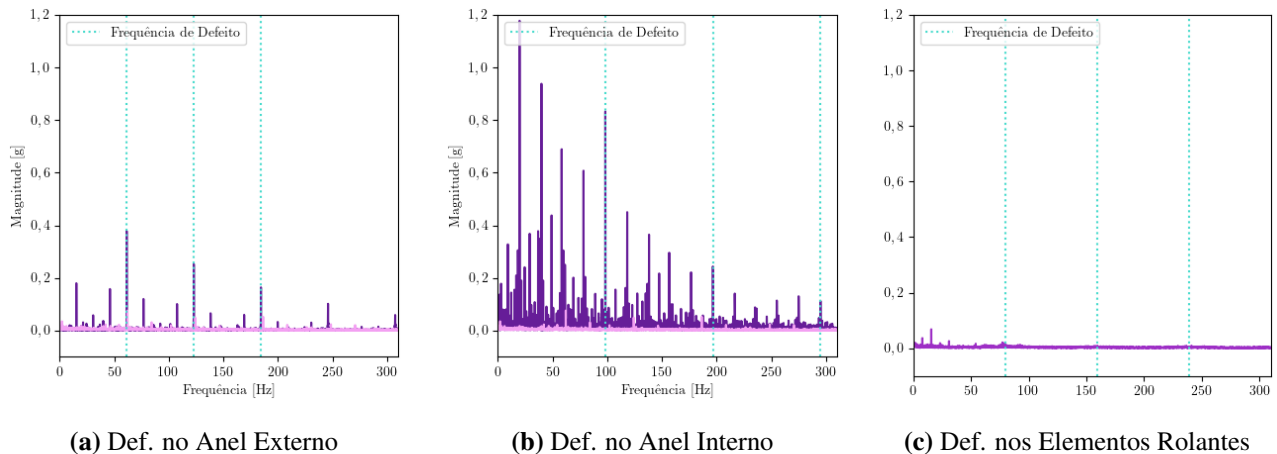


Figura 6: Espectros de Ordem - Rolamento com Defeito e Rolamento Saudável - Cond. Op.: Db

Também é importante observar que o segundo processo de detecção (2), que envolve a aplicação da reamostragem angular, apresentou uma melhora na detecção em 70 % dos casos em comparação com o primeiro processo (1). Isso pode ser atribuído diretamente à reamostragem angular, evitando possíveis erros causados pela flutuação dessa frequência. Para ilustrar este comportamento, será utilizado como exemplo o sinal do acelerômetro vertical medido em um rolamento com defeito no anel externo, na condição de operação Bc (RPM variando em 15 %). A Figura 7 exibe o espectro do sinal de envelope, juntamente com o espectro de envelope do sinal de referência (sem defeito). Observa-se que as componentes relacionadas ao defeito apresentam uma ligeira dispersão devido à variação de rotação. Já na Figura 8 é apresentado o espectro de ordem do sinal reamostrado com defeito, juntamente com o espectro de ordem do sinal de referência reamostrado. É perceptível nesse espectro que as componentes relacionadas ao defeito, assim como as demais componentes do espectro, deixaram de apresentar dispersão na frequência, e agora são visualizadas como picos centrados em suas respectivas ordens, facilitando a detecção da falha.

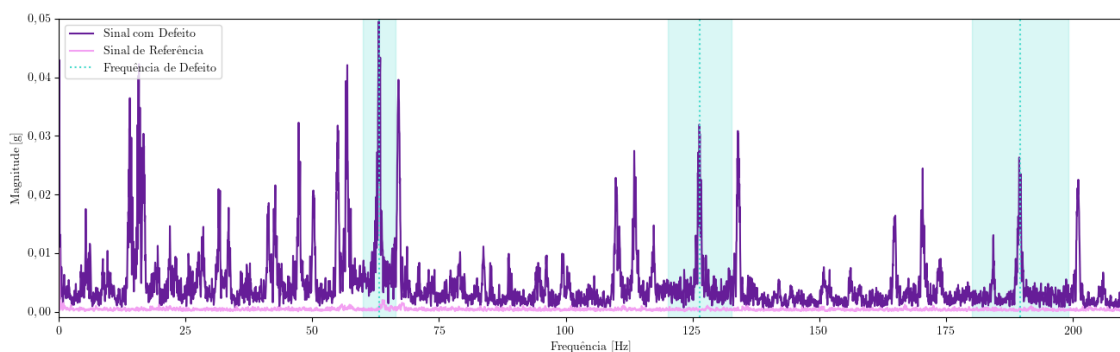


Figura 7: Espectros do Sinal de Envelope - Vertical - Cond. Op.: Bc - Defeito no Anel Externo/Referência

Em relação à aplicação do terceiro processo de detecção (3), que engloba toda a metodologia proposta, notou-se que os resultados obtidos, na grande maioria dos casos, foram melhores do que os obtidos

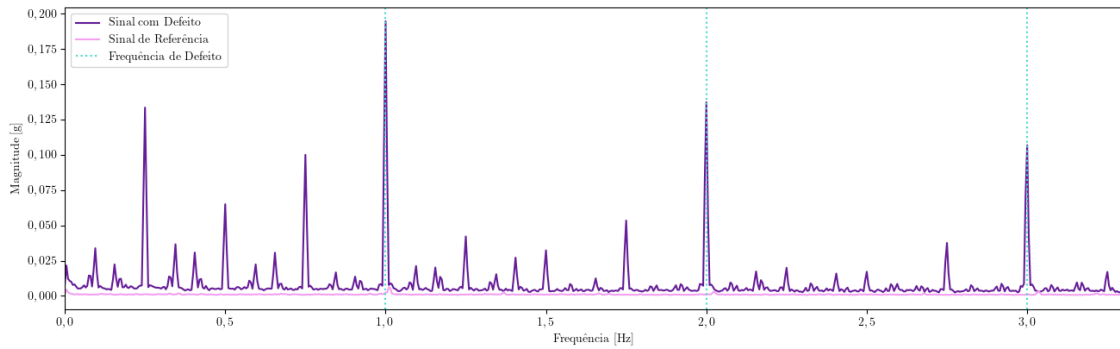


Figura 8: Espectros do Sinal Reamostrado - Vertical - Cond. Op.: Bc - Defeito no Anel Externo/Referência

no processo de detecção (1). No entanto, não houve uma melhora significativa nos resultados em comparação ao processo de detecção (2), havendo casos em que a acurácia balanceada foi mantida e outros em que houve uma ligeira diminuição. Presume-se que a motivação por trás desses resultados esteja no comportamento dos sinais analisados, uma vez que, em grande parte dos casos, a componente relacionada ao defeito já estava bem caracterizada apenas com a reamostragem angular. Para ilustrar, na Figura 9, é mostrado o espectro de ordem do sinal resultante do TSA com defeito e o espectro de ordem do sinal resultante do TSA de referência do exemplo anterior. É evidente que o TSA demonstra eficiência ao exibir no espectro apenas as componentes relacionadas ao defeito, porém pode-se notar que estas componentes já estavam destacadas apenas com a aplicação da reamostragem angular, como mostrado na Figura 8.

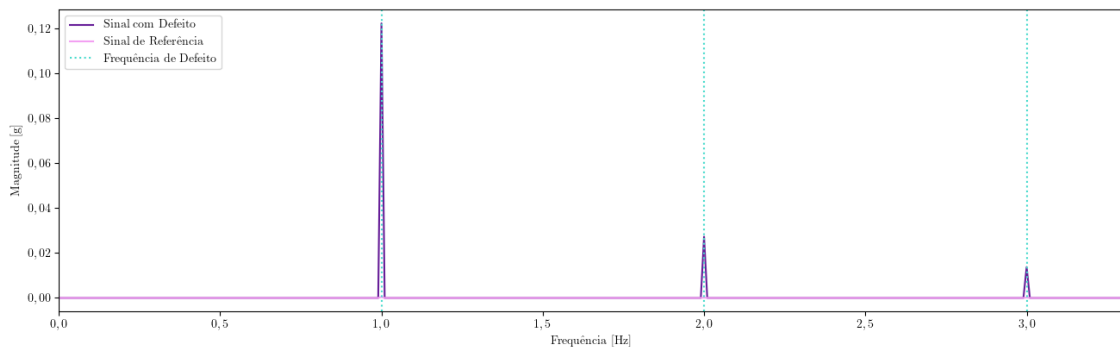


Figura 9: Espectros do Sinal TSA - Vertical - Cond. Op.: Bc - Defeito no Anel Externo/Referência

5. Conclusões

Neste trabalho, uma metodologia de detecção de defeitos em mancais de rolamento foi analisada, envolvendo técnicas de processamento de sinais, como análise de envelope, reamostragem angular e média síncrona no tempo. A análise de envelope extrai informações específicas relacionadas aos defeitos, enquanto a reamostragem angular lida com variações de velocidade, e a média síncrona no tempo separa as componentes determinísticas da frequência de defeito. Foram consideradas duas abordagens para a obtenção dos sinais de sincronização na reamostragem angular, utilizando o sinal do tacômetro ou técnicas de estimativa de frequência. Três técnicas de estimativa de frequência foram avaliadas (demodulação de fase, rastreamento de máximo de espectrograma e método híbrido), demonstrando que sinais provenientes dos acelerômetros vertical e horizontal apresentaram menor erro de estimativa, e a faixa de frequência deve ser ajustada para abranger as variações de rotação do eixo.

A avaliação em etapas da metodologia proposta para detecção de falhas revelou alguns pontos importantes. Observou-se que a aplicação da reamostragem angular foi um passo fundamental para melhorar os resultados de detecção. A análise no domínio da ordem permitiu uma avaliação mais precisa das componentes relacionadas ao defeito, o que contribuiu para um melhor desempenho na detecção. A

aplicação do TSA não apresentou uma melhora significativa nos resultados, sugerindo que a reamostragem angular por si só foi suficiente para obter bons resultados na detecção dos sinais analisados.

Portanto, conclui-se neste trabalho que a metodologia proposta pode ser eficiente para a detecção de falhas em mancais de rolamento, embora algumas considerações devam ser feitas. A primeira diz respeito ao uso do tacômetro ou das técnicas de estimativa. Embora o tacômetro tenha apresentado resultados superiores, as técnicas mostraram-se promissoras em casos em que a componente relacionada à frequência analisada é bem caracterizada no espectro, ou seja, possui um alto SNR. A reamostragem angular foi uma ferramenta fundamental para lidar com sinais em que a rotação varia, e o TSA demonstrou habilidade em extrair as componentes síncronas, especialmente quando a frequência de sincronização está bem definida.

Referências

1. BRAUN, SG; EWINS, DJ; RAO, Singiresu S; LEISSA, AW. Encyclopedia of vibration: Volumes 1, 2, and 3. *Appl. Mech. Rev.*, v. 55, n. 3, p. B45–B45, 2002.
2. RANDALL, Robert Bond. *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2021.
3. HOCHMANN, D; SADOK, Mokhtar. Theory of synchronous averaging/sup/spl omega. In: IEEE. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No. 04TH8720)*. [S.l.], 2004. v. 6, p. 3636–3653.
4. FYFE, KR; MUNCK, EDS. Analysis of computed order tracking. *Mechanical systems and signal processing*, Elsevier, v. 11, n. 2, p. 187–205, 1997.
5. URBANEK, Jacek; BARSZCZ, Tomasz; SAWALHI, Nader; RANDALL, Robert B. Comparison of amplitude-based and phase-based method for speed tracking in application to wind turbines. *Metrology and measurement systems*, Polska Akademia Nauk. Czytelnia Czasopism PAN, v. 18, n. 2, p. 295–303, 2011.
6. UTPAT, Abhay; INGLE, RB; NANDGAONKAR, MR. A model for study of the defects in rolling element bearings at higher speed by vibration signature analysis. Citeseer, 2009.
7. SAWALHI, Nader; RANDALL, RB; ENDO, Hiroaki. The enhancement of fault detection and diagnosis in rolling element bearings using minimum entropy deconvolution combined with spectral kurtosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 21, n. 6, p. 2616–2633, 2007.
8. HO, D; RANDALL, RB. Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing fault signals. *Mechanical systems and signal processing*, Elsevier, v. 14, n. 5, p. 763–788, 2000.
9. RANDALL, RB; SAWALHI, Nader; COATS, M. A comparison of methods for separation of deterministic and random signals. *International Journal of Condition Monitoring*, The British Institute of Non-Destructive Testing, v. 1, n. 1, p. 11–19, 2011.
10. HA, Jong M; YOUN, Byeng D; OH, Hyunseok; HAN, Bongtae; JUNG, Yoongho; PARK, Jungho. Autocorrelation-based time synchronous averaging for condition monitoring of planetary gearboxes in wind turbines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 70, p. 161–175, 2016.
11. BRAUN, Simon. The extraction of periodic waveforms by time domain averaging. *Acta Acustica united with Acustica*, S. Hirzel Verlag, v. 32, n. 2, p. 69–77, 1975.
12. BORGHESEANI, Pietro; PENNACCHI, Paolo; CHATTERTON, Steven; RICCI, Riccardo. The velocity synchronous discrete fourier transform for order tracking in the field of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 44, n. 1-2, p. 118–133, 2014.
13. BONNARDOT, F.; El Badaoui, M.; RANDALL, R.B.; DANIÈRE, J.; GUILLET, F. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation). *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 19, n. 4, p. 766–785, 2005. ISSN 0888-3270.
14. URBANEK, Jacek; BARSZCZ, Tomasz; ANTONI, Jerome. A two-step procedure for estimation of instantaneous rotational speed with large fluctuations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 96–102, 2013.
15. JIN, Guiyang; XIANG, Zhanqin; LV, Fuzhai. Semantic integrated condition monitoring and maintenance of complex system. In: IEEE. *2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [S.l.], 2009. p. 670–674.
16. BISHOP, Christopher M. Machine learning. *Machine learning*, v. 128, n. 9, 2006.