

Eduardo Vieira Falcão

**Sistema de Monitoramento de Severidade
Vibracional e Detecção de Faltas em Máquinas
Girantes**

Brasil

17 de outubro de 2016

Eduardo Vieira Falcão

Sistema de Monitoramento de Severidade Vibracional e Detecção de Falhas em Máquinas Girantes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Péricles Rezende Barros

Brasil

17 de outubro de 2016

Eduardo Vieira Falcão

Sistema de Monitoramento de Severidade Vibracional e Detecção de Faltas em Máquinas Girantes, Eduardo Vieira Falcão, Brasil, 17 de outubro de 2016.

Orientador: Péricles Rezende Barros

Tese de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica, 17 de outubro de 2016.

1. Monitoramento de condições, 2. Manutenção Preditiva, 3. NBR10082.

CDU 621.8'11

Eduardo Vieira Falcão

Sistema de Monitoramento de Severidade Vibracional e Detecção de Falhas em Máquinas Girantes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Ciências no domínio da Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado, Brasil, 17 de outubro de 2016:

Péricles Rezende Barros
Orientador

Brasil
17 de outubro de 2016

*Dedico este trabalho aos meus pais,
força motriz da minha constante ambição pelo conhecimento
e guia dos meus objetivos.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a meus pais Franklin e Elione, pois sem o apoio e empenho destes, nada seria possível.

A minha namorada, Júlia, pois mesmo não fazendo parte integral da minha formação, me deu força quando mais precisei.

Ao meu orientador e tutor Péricles Rezende Barros, exemplo de acadêmico, pelas oportunidades e contínuo aprendizado.

A minha família Tropa Campina pelos valores adquiridos ao passo em que o futebol americano mostrou-se não só como um esporte mas uma filosofia de vida.

Aos meus colegas Rafael Lima e André Barbosa pelo apoio prestado durante a pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus estimados amigos Renan Freire e Jason Anastassakis, pela verdadeira amizade.

*“Quando as raízes são profundas
não se deve temer o vento.”
Provérbio africano*

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema utilizando o *.NET Compact Framework* que objetiva qualificar os níveis vibracionais mensurados em máquinas girantes a partir do uso da NBR10082 da ABNT e detectar faltas em desenvolvimento por meio da análise de frequência. Ao longo do texto será apresentada a teoria envolvendo a detecção de faltas em máquinas girantes e a Transformada Rápida de Fourier, bem como o *.NET Compact Framework* e as funcionalidades desenvolvidas. Por fim, serão apresentados ensaios realizados a partir de uma plataforma de testes e os resultados obtidos utilizando-se o sistema proposto, seguidos de uma análise acerca da sua eficácia e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chaves: Monitoramento de condições, manutenção preditiva, NBR10082.

Abstract

This work describes the development of a system using the .NET Compact Framework whose aims to qualify vibration levels measured in rotating machinery through the policy described in the NBR10082 from ABNT and detect evolving faults by means of frequency analysis. The theory involving fault detection in rotating machinery, Fast Fourier Transform's algorithm and the .NET CF-based functionalities implemented are presented. Lastly the results regarding the use of the system in experiments made through a test platform will be provided, followed by an analysis about the system's effectiveness and suggestions for further improvements.

Key-words: Condition-based monitoring, predictive maintenance, NBR10082.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Desalinhamento angular (ELY, 2011)	23
Figura 2 – Desalinhamento paralelo (ELY, 2011)	23
Figura 3 – Arquitetura do Sistema (LIMA et al., 2016)	27
Figura 4 – Diagrama esquemático do módulo de aquisição de dados (LIMA et al., 2016)	28
Figura 5 – Plataforma de aquisição de dados (direita) e PDAs utilizados para a distribuição do sistema (LIMA et al., 2016)	29
Figura 6 – Tela inicial do aplicativo	29
Figura 7 – Aba de parâmetros da inspeção em tempo real	30
Figura 8 – Aba de parâmetros da inspeção <i>offline</i>	31
Figura 9 – Funcionalidade do botão “Procurar”	32
Figura 10 – Interfaces de diagnóstico de severidade (esquerda) e anomalia (direita)	33
Figura 11 – Plataforma de Testes (LIMA et al., 2016)	34
Figura 12 – Parafusos utilizados para simular desbalanceamentos (LIMA et al., 2016)	35
Figura 13 – Verificação do desbalanceamento residual proveniente da massa de <i>nylon</i>	35
Figura 14 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 1	36
Figura 15 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 2	36
Figura 16 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 3	37
Figura 17 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 4	37
Figura 18 – Esquema para a verificação dos tipos de desalinhamento (ELY, 2011)	38
Figura 19 – Verificação do desalinhamento residual proveniente do acoplamento de <i>nylon</i>	39
Figura 20 – Desalinhamento promovido por $y_1 = 0$ e $y_2 = 4mm$	39
Figura 21 – Desalinhamento promovido por $y_1 = y_2 = 1mm$	40

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de zonas de severidade de vibração (ABNT, 2012)	21
Tabela 2 – Parâmetros relativos aos ensaios de desbalanceamento e desalinhamento	35
Tabela 3 – Resultados obtidos nos ensaios de desbalanceamento	38
Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios de desalinhamento	40

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle
.NET CF	.NET <i>Compact Framework</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
<i>mm</i>	milímetro
<i>s</i>	segundo
RPM	Rotações por Minuto
CV	Cavalo-vapor
Hz	Hertz

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	16
2.1	Filosofias de Manutenção	16
2.1.1	Manutenção <i>Run-to-Break</i> ou Manutenção <i>Breakdown</i>	16
2.1.2	Manutenção Preventiva ou Manutenção Baseada no Tempo	16
2.1.3	Manutenção Preditiva ou Manutenção Baseada em Condições	17
2.2	Princípios da Manutenção Preditiva	17
2.3	Técnicas de Manutenção Preditiva	17
2.4	Análise de Vibrações	18
2.5	Terminologias Relativas à Análise Vibracional	19
2.5.1	Deslocamento Vibracional	19
2.5.2	Velocidade Vibracional de Pico	19
2.5.3	Velocidade Vibracional Eficaz	19
2.5.4	Aceleração vibracional de pico	19
2.6	Quando Utilizar Deslocamento, Velocidade e Aceleração	20
2.7	Limites e Padrões de Vibração em Equipamentos	20
2.8	Faltas em Máquinas Girantes	21
2.8.1	Desbalanceamento	22
2.8.2	Desalinhamento	22
2.9	Análise de Frequência	23
2.9.1	Séries de Fourier	24
2.9.2	Transformada Discreta de Fourier	24
2.9.3	Transformada Rápida de Fourier	25
2.10	.NET <i>Compact Framework</i>	25
3	O SISTEMA	27
3.1	A Arquitetura do Sistema de Monitoramento	27
3.2	A Interface	29
3.2.1	Inspeções em Tempo Real	30
3.2.2	Inspeção <i>Offline</i>	31
3.2.3	Realização do Diagnóstico	31
3.2.3.1	Cálculo da velocidade vibracional	32
3.2.3.2	Cálculo do valor eficaz da velocidade de vibração	32
3.2.3.3	Verificação das harmônicas dominantes	32
3.2.4	Interface de visualização dos resultados	33

4	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	34
4.1	Plataforma de Testes	34
4.2	Análise de Desbalanceamento de Carga	34
4.3	Análise de Desalinhamento	38
5	CONCLUSÃO	41
Conclusão		41
	REFERÊNCIAS	42

1 Introdução

O monitoramento de condições (do inglês, *Condition-based Monitoring*) é um método utilizado no acompanhamento do estado operacional de máquinas que atuam continuamente e corresponde a uma ferramenta poderosa a ser utilizada para a implementação da estratégia de manutenção preditiva (RANDALL, 2011). Nesta tática as máquinas que antes operavam até a ocorrência de falhas críticas, provocando interrupção da linha de produção e, conseqüentemente, prejuízos financeiros, são inspecionadas periodicamente com vias a detectar de modo prematuro o surgimento de anomalias. Desta maneira é possível realizar o agendamento prévio de manutenções, provendo às indústrias tempo suficiente para o planejamento da correção da falta do equipamento monitorado.

Dentre os diferentes indicadores apropriados para a realização do monitoramento de condições, a vibração emitida quando do funcionamento da máquina apresenta-se como prevalente devido à característica predominante de reagir instantaneamente a mudanças no estado operacional da máquina e ao rigor quanto à identificação da natureza da falta (SCHEFFER, 2004). Tais aspectos, combinados às diferentes ferramentas matemáticas existentes, como a transformada de Fourier, viabilizam a implementação de algoritmos capazes de detectar padrões vibracionais singulares que indicam uma característica operacional peculiar.

Das faltas que podem surgir ao longo da operação do equipamento, duas delas foram abordadas neste trabalho: desbalanceamento e desalinhamento. O enfoque deve-se não só pelo número substancial de ocorrências destas nas máquinas girantes frente a outras anomalias (SCHEFFER, 2004) como também pela viabilidade de detecção a partir da análise do espectro de frequência do sinal vibracional. A partir desta premissa, foi realizada a implementação de um algoritmo de detecção capaz de diagnosticar faltas em desenvolvimento, antecipando manutenções a serem realizadas no equipamento e preservando sua integridade.

As diretrizes utilizada para estabelecer os valores limítrofes das zonas vibracionais está descrita na NBR10082 da ABNT, onde os critérios estabelecidos são úteis para a avaliação do estado de funcionamento dos equipamentos monitorados e complementam a análise de frequência (ABNT, 2012). As diretrizes contidas na norma regulamentar informam os limites operacionais para diferentes faixas de valor eficaz da velocidade vibracional.

O *framework* utilizado para a implementação do sistema foi o *.NET Compact Framework*. Este é um subconjunto do *framework .NET* que fornece ao desenvolvedor suporte para a implementação e execução de aplicações *.NET* em dispositivos móveis que

apresentam recursos limitados (YAO, 2004) como, por exemplo, PDAs (do inglês *Personal Digital Assistant*), aparelhos portáteis que possuem as certificações adequadas para o uso em ambientes de risco, como os pátios industriais; sendo a plataforma escolhida para a distribuição da aplicação. A partir desta biblioteca foi possível desenvolver o algoritmo de detecção de faltas, onde incluem-se as funcionalidades necessárias para o cálculo da transformada rápida de Fourier, e a interface gráfica de acesso ao usuário.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Na Parte I são apresentados referenciais teóricos em relação aos principais aspectos que regem a estratégia de manutenção preditiva, bem como a metodologia de monitoramento de condições, com enfoque na análise de vibração. Além disto, as faltas estudadas são descritas fisicamente. Em seguida apresenta-se o algoritmo de análise de frequência utilizado e o .NET *Compact Framework* é introduzido. Na Parte II o sistema é descrito e os principais aspectos do código-fonte são investigados. Na Parte III, são realizados ensaios com vias a verificar tanto a veracidade das diretrizes descritas nas literaturas utilizadas como a eficácia do *software*.

2 Referenciais Teóricos

2.1 Filosofias de Manutenção

O fator preponderante para minimizar as perdas quando da ocorrência de falhas diz respeito ao planejamento realizado. Para tanto, diferentes técnicas de manutenção são abordadas com o intuito de oferecer ao cliente a estratégia mais viável no que diz respeito à necessidade, seja ela voltada à minimização das perdas na linha de produção ou incremento da vida útil da máquina onde a diretriz avaliada diz respeito à importância do equipamento na cadeia produtiva, seja ele crítico, essencial ou de propósitos gerais (SCHEFFER, 2004). A seguir são descritas as diferentes estratégias de manutenção utilizadas pelas indústrias: *run-to-break*, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

2.1.1 Manutenção *Run-to-Break* ou Manutenção *Breakdown*

Este método de manutenção visa realizar o reparo das máquinas danificadas somente quando estas apresentassem falhas críticas em seu funcionamento (e.g. eixo do rotor partido). A princípio, a linha de produção não será interrompida pelo maior intervalo de tempo possível. Entretanto, o tempo de reparo dos equipamentos danificados pode ser elevado - onde inclui-se o tempo necessário para produzir (se necessário) a peça danificada e realizar a troca. Em muitos casos, as perdas na linha de produção são muito maiores do que os custos envolvidos na manutenção individual de uma máquina (SCHEFFER, 2004). Muito embora as desvantagens sejam evidentes, o uso desta técnica de manutenção é amplamente difundido em linhas de produção que consistem em um grande número de máquinas de pequeno porte - as quais não geram grandes perdas na cadeia produtiva em caso de falhas individuais - e faltas não são catastróficas (RANDALL, 2011).

2.1.2 Manutenção Preventiva ou Manutenção Baseada no Tempo

Na manutenção preventiva, as inspeções são realizadas em intervalos regulares reconhecidamente menores do que os períodos entre ocorrência de falhas (SCHEFFER, 2004). Como vantagens, a maior parte da manutenção das máquinas pode ser bem planejada de antemão, evitando que faltas de grande escala ocorram, resultando em perdas. Desvantagens incluem a negligência de outras fontes de defeitos e manutenção excessiva - resultando em trocas desnecessárias de peças da máquina. Desta forma, a manutenção preventiva pode ser utilizada quando os operários e supervisores são capazes de estimar com precisão os momentos em que as falhas podem ocorrer para um dado equipamento.

2.1.3 Manutenção Preditiva ou Manutenção Baseada em Condições

Neste escopo de detecção de faltas, faz-se necessário que o operário encarregado da inspeção dos equipamentos tenha acesso a técnicas de monitoramento confiáveis que não somente sejam capazes de diagnosticar as condições atuais do equipamento mas também possa prever o tempo de vida útil restante da máquina para que possam ser agendadas trocas e ajustes na máquina. Dados os avanços computacionais dos últimos anos, esta metodologia vem sendo cada vez mais abordada no ambiente fabril uma vez que os diagnósticos puderam ser mais detalhados e, assim, tratar de uma maior variedade de problemas.

2.2 Princípios da Manutenção Preditiva

O método de manutenção preditiva pode ser classificado como uma manutenção preventiva orientada pelas condições do equipamento (SCHEFFER, 2004), onde o monitoramento de parâmetros como, por exemplo, a sua eficiência ao realizar determinada ação, representam tentativas de estimar de modo aproximado o tempo restante até que ocorra uma falha na execução da operação a qual está encarregada.

Um programa de manutenção preditiva abrangente deve fazer uso de um sistema de monitoramento capaz de obter com precisão as condições operacionais das máquinas envolvidas na cadeia produtiva, onde o tratamento dos dados coletados irá ditar a realização de agendamentos para a manutenção do equipamento susceptível à falhas.

Diferentes indicadores são utilizados para endereçar a metodologia de manutenção preditiva. Como exemplo, temos os níveis vibracionais, óleo lubrificante, acústica do equipamento, termografia e avaliação de performance. Os parâmetros empregados irão depender diretamente do tipo de máquina utilizada na instalação industrial ou o seu impacto na cadeia produtiva, por exemplo.

2.3 Técnicas de Manutenção Preditiva

O monitoramento de condições (do inglês, *Condition-based Monitoring*) é um método utilizado no acompanhamento do estado operacional de máquinas que atuam continuamente (RANDALL, 2011). A partir do acompanhamento de determinadas características do equipamento é possível verificar o seu estado de operação e prever o acontecimento de faltas críticas que podem interromper subitamente o seu funcionamento. Uma importante característica desta técnica de inspeção remete à obtenção de diagnósticos de equipamentos enquanto que estes encontram-se em operação.

Dentre os indicadores mais utilizados para o monitoramento de condições, podemos incluir níveis vibracionais, temperatura de operação, características do material lubrificante

e performance quando da operação:

- **Níveis vibracionais:** Cada máquina, quando do seu funcionamento, produzirá ondas de vibração que caracterizarão o seu estado operacional. Qualquer falta decorrente do seu funcionamento refletirá na alteração do padrão vibracional. A partir da análise dos níveis vibracionais o diagnóstico de faltas por meio de métodos computacionais se torna viável e efetivo.
- **Características do material lubrificante:** A lubrificação da máquina também retém informações das condições de operação do equipamento. A análise de contaminantes químicos, por exemplo, pode indicar vazamentos (RANDALL, 2011).
- **Performance:** Para determinados tipos de máquinas girantes, a verificação das suas características de funcionamento corresponde a um método efetivo no diagnóstico de falhas.
- **Termografia:** A verificação de flutuações de temperatura ao longo do tempo de uso de uma máquina também pode indicar falhas. Utilizando-se instrumentos bastante sensíveis e disponíveis no mercado, é possível mensurar remotamente até mesmo pequenas variações no revestimento do equipamento e, com isto, predizer a possibilidade de ocorrência de um funcionamento inadequado.

2.4 Análise de Vibrações

A análise de dados vibracionais é realizada para verificar o estado mecânico e operacional da máquina avaliada, onde seu maior benefício é a viabilidade de detecção de faltas em desenvolvimento antes do seu agravamento e provável falha crítica da máquina. É um método não-invasivo bastante efetivo para analisar as condições do equipamento durante o seu acionamento, desligamento ou sua operação

Todas as máquinas, enquanto que em operação, produzem vibrações. Estas vibrações possuirão diferentes padrões, os quais serão funções da dinâmica do equipamento sujeita às mais diferentes anomalias. A partir da verificação de determinadas componentes de frequência presentes no sinal vibracional é possível obter informações valiosas acerca de faltas presentes no equipamento.

Um sistema de monitoramento de vibração consiste das seguintes partes:

- Transdutor (de aceleração ou deslocamento);
- Sistema de aquisição de dados vibracionais;
- Sistema de análise e armazenamento de dados;

Estes componentes podem compor tanto um sistema de monitoramento em tempo real como de monitoramento periódico a partir do uso de equipamentos portáteis, onde a segunda estratégia foi abordada para a implementação do sistema.

2.5 Terminologias Relativas à Análise Vibracional

Esta sessão evidencia algumas terminologias pertinentes ao estudo da análise de vibração.

2.5.1 Deslocamento Vibracional

Define-se como a distância total percorrida por um corpo vibrante de um extremo do movimento oscilatório ao outro, sendo esta distância o deslocamento vibracional de pico-a-pico. A unidade dimensional é o micron (milésima parte de um milímetro).

2.5.2 Velocidade Vibracional de Pico

A medida que o corpo vibra a sua velocidade varia. Será zero nos extremos do movimento vibracional e máxima quando esta atravessa a sua posição de repouso, na ausência de forças vibracionais. A esta velocidade máxima, denomina-se velocidade vibracional de pico. Sua unidade é mm/s.

2.5.3 Velocidade Vibracional Eficaz

A Organização Mundial para Padronização (do inglês, *International Standards Organization*), a qual estabelece os indicadores internacionalmente aceitos para a realização de medições de vibração em máquinas, sugeriu que o valor eficaz da velocidade de vibração fosse o indicador padrão. Esta decisão foi tomada na tentativa de, a partir deste indicador, critérios para a classificação dos níveis vibracionais pudessem ser derivados.

O valor eficaz da velocidade vibracional tende a fornecer a energia contida no sinal de vibração enquanto que a velocidade vibracional provê com a intensidade da vibração. Um alto valor eficaz da velocidade vibracional é, geralmente, mais danoso ao equipamento do que um pico vibracional de magnitude similar.

2.5.4 Aceleração vibracional de pico

A aceleração vibracional corresponde a um máximo nos extremos do deslocamento vibracional, onde as velocidades são nulas. A medida que o corpo aproxima-se da sua posição de repouso a aceleração vibracional decai até atingir o zero e aumentar gradualmente a medida que o corpo se distancia da posição de repouso.

2.6 Quando Utilizar Deslocamento, Velocidade e Aceleração

Em termos de condições operacionais de um dado equipamento, a amplitude da vibração a qual está sendo imposta à estrutura do mesmo é o primeiro indicador do quão bom ou ruim pode ser o estado da máquina. Intuitivamente, altos níveis vibracionais indicam uma condição indesejada do equipamento. Uma vez que a vibração pode ser expressa em função tanto do deslocamento, da velocidade e da aceleração da vibração é importante saber quando utilizar cada parâmetro para realizar o monitoramento correto.

A relação entre aceleração, velocidade e deslocamento com respeito à amplitude vibracional e saúde do equipamento redefinem as técnicas de medição e métodos de análise que devem ser utilizados, onde o fator que determina quando lançar mão dos indicadores supracitados é a velocidade de rotação síncrona do rotor. Movimentos abaixo de 10Hz (600 RPM) produzem níveis imperceptíveis de aceleração, moderados de velocidade e vibrações notórias em termos de deslocamento. Portanto, o deslocamento vibracional deve ser utilizado quando a velocidade de rotação do eixo é de até 600 RPM.

No domínio de frequências superiores a 10 Hz e inferiores a 1000 Hz a velocidade vibracional apresenta-se como um indicador excelente da severidade vibracional, e acima de 1000 Hz a aceleração é um bom parâmetro para quantificar a condição do equipamento.

Uma vez que a maioria das máquinas girantes (e suas faltas) encontram-se dentro do intervalo 10-1000 Hz a velocidade vibracional é definida como o indicador mais utilizado para a realização de medições e análises.

2.7 Limites e Padrões de Vibração em Equipamentos

Um dilema comum relativo à análise vibracional refere-se à aceitação ou não de determinados níveis vibracionais de modo a permitirem o funcionamento da máquina de maneira segura. Dentre os diferentes padrões adotados pela indústria internacional para garantir esta premissa temos a NBR10082 da ABNT intitulada "*Ensaio não destrutivo - Análise de vibrações - Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 15000 rpm*". Esta norma estabelece as zonas de avaliação para a avaliar a vibração de uma determinada máquina, fornecendo recomendações sobre as possíveis ações a serem tomadas. São elas:

- Zona A: valores de vibração recomendados para máquinas novas ou recentemente comissionadas.
- Zona B: valores vibracionais aceitáveis para operação contínua do equipamento para longo período de funcionamento, sem restrição.

- Zona C: valores vibracionais considerados insatisfatórios para a operação contínua do equipamento por um longo período, podendo operar por um período limitado de tempo ao passo em que sua manutenção é agendada.
- Zona D: valores vibracionais que indicam a possibilidade de danos em curto prazo.

Vale salientar que a potência passível de ser desenvolvida pela máquina e o tipo de fundação ao qual a mesma está conectada são fatores preponderantes na distinção das zonas de risco para cada classe de máquina girante. Uma fundação é considerada rígida quando a menor frequência natural do conjunto for pelo menos 25% superior à maior frequência de rotação do equipamento a ser avaliado, caso contrário a fundação é considerada flexível (NBR10082). Paralelamente, a norma estabelece que as máquinas girantes pertencentes aos grupos I (potência acima de 300kW), II (potência entre 15kW e 300kW) e III (potência de até 15kW) possuam os limites entre zonas de risco estabelecidos pela Tabela 1.

Grupo	Classe do suporte	Limite entre zonas	Valor eficaz (mm/s)
Grupo I	Rígido	A/B	1,1
		B/C	1,8
		C/D	2,8
	Flexível	A/B	1,1
		B/C	2,8
		C/D	4,5
Grupo II	Rígido	A/B	1,1
		B/C	2,8
		C/D	4,5
	Flexível	A/B	2,8
		B/C	4,5
		C/D	7,1
Grupo III	Rígido	A/B	2,8
		B/C	4,5
		C/D	7,1
	Flexível	A/B	4,5
		B/C	7,1
		C/D	11

Tabela 1 – Classificação de zonas de severidade de vibração (ABNT, 2012)

2.8 Faltas em Máquinas Girantes

Ao longo da vida útil de uma máquina é comum que ocorram desgastes de suas partes e o surgimento de anomalias. Dentre as diferentes faltas passíveis de se manifestarem

será dado enfoque a duas delas, consideradas as mais recorrentes: desbalanceamento e desalinhamento.

2.8.1 Desbalanceamento

Vibrações decorrentes de desbalanceamentos do rotor são, provavelmente, a anomalia mais comum em máquinas girantes (SCHEFFER, 2004). Ao mesmo tempo, é uma falta de fácil detecção e retificação. Esta condição decorre da transmissão de esforços mecânicos aos rolamentos da máquina, excitando vibrações ao longo do rotor (ISO, 2004).

Para classificar os tipos de desbalanceamento é necessário ter conhecimento das seguintes terminologias:

- Eixo de Inércia: define-se como o eixo em torno do qual o rotor iria rotacionar caso não estivesse sujeito a forças axiais dos rolamentos.
- Eixo geométrico: eixo axial geométrico do rotor.

Quando os dois eixos estão alinhados, significa dizer que o rotor está balanceado e não haverão vibrações induzidas por esta falta. Caso este alinhamento não exista, o rotor estará desbalanceado, havendo três tipos de configurações:

- Desbalanceamento estático: eixos inercial e geométrico paralelos entre si.
- Desbalanceamento por acoplamento: eixos inercial e geométrico interseccionam-se no centro de massa.
- Desbalanceamento Dinâmico: eixos inercial e geométrico não interseccionam-se ou não são coincidentes.

Para todos os tipos de desbalanceamento, o espectro de frequência da vibração irá mostrar que há uma predominância nos níveis vibracionais radiais em torno da frequência síncrona de rotação, $1X^1$, onde sua amplitude varia com o quadrado da velocidade de rotação do eixo.

2.8.2 Desalinhamento

Assim como o desbalanceamento de carga, o desalinhamento é uma das principais causas de ocorrência de vibração em máquinas girantes (SCHEFFER, 2004) dado que o acoplamento de dois rotores distintos para a transmissão de conjugado mecânico é uma configuração trivial em linhas de produção industriais. Os tipos de desalinhamento são:

¹ no jargão do monitoramento de condições, as harmônicas da velocidade síncrona de rotação são representadas por meio da terminologia nX , onde n referencia a harmônica correspondente

- Desalinhamento angular: essencialmente, o desalinhamento angular impõe vibrações axialmente predominantes em torno da frequência 1X tanto para o eixo transmissor quanto para o receptor de conjugado (ADAMS, 2000). Esta configuração também proporciona o surgimento de altos níveis vibracionais axiais nas harmônicas 2X e 3X.

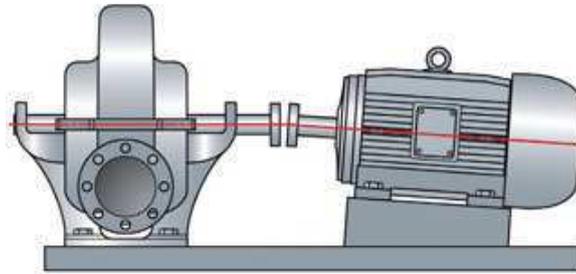


Figura 1 – Desalinhamento angular (ELY, 2011)

- Desalinhamento paralelo: esta configuração leva ao surgimento de altos níveis vibracionais em torno da frequência 2X devido à ocorrência de dois esforços mecânicos por ciclo sob os rotores. A ocorrência desta falta é comumente observada em conjunto com o desalinhamento angular, levando à presença de vibrações elevadas em torno da frequência 1X (ADAMS, 2000). Entretanto, uma vez que os efeitos do desalinhamento paralelo sejam predominantes, a harmônica 2X irá se destacar no espectro de frequência. Quando os desalinhamentos tanto angulares quanto paralelos tornam-se severos, podem ser observados picos vibracionais elevados em componentes de frequência múltiplas da velocidade síncrona de rotação que vão de 3X a 8X (SCHEFFER, 2004).

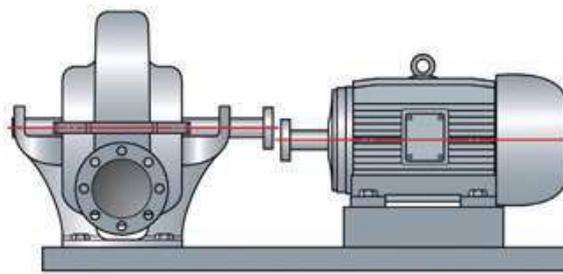


Figura 2 – Desalinhamento paralelo (ELY, 2011)

2.9 Análise de Frequência

A análise de frequência é um dos métodos mais populares utilizados no processamento de sinais. Esta ferramenta matemática realiza a decomposição de funções periódicas e aperiódicas em séries trigonométricas convergentes, também conhecidas como séries de Fourier.

2.9.1 Séries de Fourier

Seja uma função $f(x)$ periódica com período T , sendo integrável e finita no intervalo $[x_0, x_0 + T]$. Esta função pode ser reescrita como:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}x\right) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}x\right)$$

onde

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \cos\left(\frac{2n\pi}{T}x\right) dx$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{x_0}^{x_0+T} f(x) \sin\left(\frac{2n\pi}{T}x\right) dx$$

No entanto, é apreciável que seja possível verificar as componentes de frequência em sinais aperiódicos. Para tanto, temos a transformada de Fourier.

2.9.2 Transformada Discreta de Fourier

É sensato afirmar que as séries de Fourier são um caso particular da transformada de Fourier. Para sinais digitais, a transformada é definida como:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

A transformada de Fourier é reversível, onde a função temporal é obtida a partir da seguinte expressão:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

onde, para ambas as equações, N é o número de amostras do sinal $x[n]$.

Um inconveniente da transformada de Fourier retrata o esforço computacional envolvido no seu cálculo. Neste contexto temos o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier, que reduz a complexidade computacional de $O(n^2)$ da transformada de Fourier para $O(n \log n)$, onde n corresponde ao tamanho do vetor de dados.

2.9.3 Transformada Rápida de Fourier

A expressão da transformada de Fourier pode ser desmembrada da seguinte maneira:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n] W_N^{2nk} + \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1] W_N^{(2n+1)k}$$

onde

$$W_N^{2nk} = e^{-j \frac{2\pi}{N} 2nk} = e^{-j \frac{2\pi}{\frac{N}{2}} nk} = W_{\frac{N}{2}}^{nk}$$

e

$$W_N^{(2n+1)k} = W_N^{2nk+k} = W_N^{2nk} W_N^k = W_{\frac{N}{2}}^{nk} W_N^k$$

portanto,

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n] W_{\frac{N}{2}}^{nk} + W_N^k \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2n+1] W_{\frac{N}{2}}^{nk}$$

que pode ser escrita de modo a evidenciar os cálculos realizados para as amostras pares e ímpares do sinal:

$$X[k] = X_i[k] + W_N^k X_p[k]$$

Ainda, para um sinal que contenha N amostras, temos que:

$$W_N^z = -W_N^{z-\frac{N}{2}}$$

onde esta observação nos leva a concluir que, para determinar-se o espectro de frequência do sinal que contém N amostras, foram calculados $\frac{N}{2} - 1$ coeficientes espectrais (SZYMANOWSKI, 2016), onde menor será o esforço computacional.

2.10 .NET Compact Framework

O .NET *Compact Framework* é uma versão do .NET *framework* designada para desenvolver aplicações que são executadas em dispositivos móveis que possuem recursos limitados como PDAs (do inglês, *Personal Digital Assistant*), plataforma utilizada para realizar o *deploy* do sistema.

A partir da IDE Visual Studio 2008 foi possível implementar todo o sistema, onde incluem-se as já citadas bibliotecas para o cálculo da transformada de Fourier e *plot* dos

resultados. Muito embora o .NET CF ofereça suporte a apenas um dos cinco *namespaces* oferecidos pela versão *desktop* do *framework* no que diz respeito a gráficos, foi possível implementar uma interface sofisticada capaz de evidenciar visualmente tanto o sinal de vibração medido quanto o espectro de frequência.

3 O Sistema

3.1 A Arquitetura do Sistema de Monitoramento

O sistema de análise de severidade vibracional e detecção de falhas adquire os dados vibracionais da máquina por meio de um módulo portátil de aquisição de dados desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle. Este módulo possui interfaces para uma série de sensores, entre eles um acelerômetro piezoelétrico de alta frequência. Ele é operado remotamente pelo sistema desenvolvido, que é executado em um PDA, através de comunicação sem fio. A aplicação é responsável por realizar toda análise dos dados e fornecer os indicadores de condição da máquina inspecionada.



Figura 3 – Arquitetura do Sistema (LIMA et al., 2016)

O módulo de aquisição de dados foi projetado para ser compacto e autônomo. Dessa forma, as funcionalidades que exigem maior poder de processamento, como a análise de frequência, é realizada no PDA que o operador utiliza em suas atividades cotidianas, barateando significativamente os custos de implantação da solução. O módulo de aquisição é dividido em seis grandes blocos: Alimentação e Gerenciamento de Energia, Interface de Aquisição de Dados, Armazenamento de Dados, Sinalização, Transmissão de Dados e Unidade Controladora

- **Alimentação e Gerenciamento de Energia:** existem duas baterias recarregáveis de Lion-Polymer, responsáveis por fornecer a energia para o módulo. Um circuito dedicado permite que as mesmas sejam carregadas por um adaptador DC de 12 V. Além disso, existe uma rotina responsável pela proteção e monitoramento do estado das baterias.

- **Interface de Aquisição de Dados:** é responsável por realizar a transdução das vibrações da máquina sob experimento, em sinais elétricos. O sensor utilizado é o acelerômetro piezoelétrico IMI 601A01. Esse transdutor analógico é capaz de captar valores de vibrações da ordem de $\pm 50g$ em uma faixa de frequência variando de 0.27 Hz à 10 kHz. O sinal medido passa por um filtro passa-baixa analógico de segunda ordem, é amplificado e injetado em um conversor analógico/digital de 12 bits.
- **Armazenamento de Dados:** Os dados coletados durante os experimentos realizados são armazenados na memória flash de um cartão micro SD. Esses dados são posteriormente transferidos para o PDA do operador onde são processados e analisados.
- **Sinalização:** A sinalização de estados de funcionamento do módulo de aquisição é realizada por meio de dois LEDs e um *buzzer*.
- **Transmissão de dados:** permite a troca de dados entre o PDA e módulo de aquisição. O protocolo de comunicação escolhido foi o Bluetooth, visto que é padrão em PDAs industriais e permite uma alta taxa de transmissão de dados.
- **Unidade controladora:** é implementada em um microcontrolador ARM Cortex-M4 operado à 84 MHz. É responsável por gerir toda a lógica da aplicação embarcada.

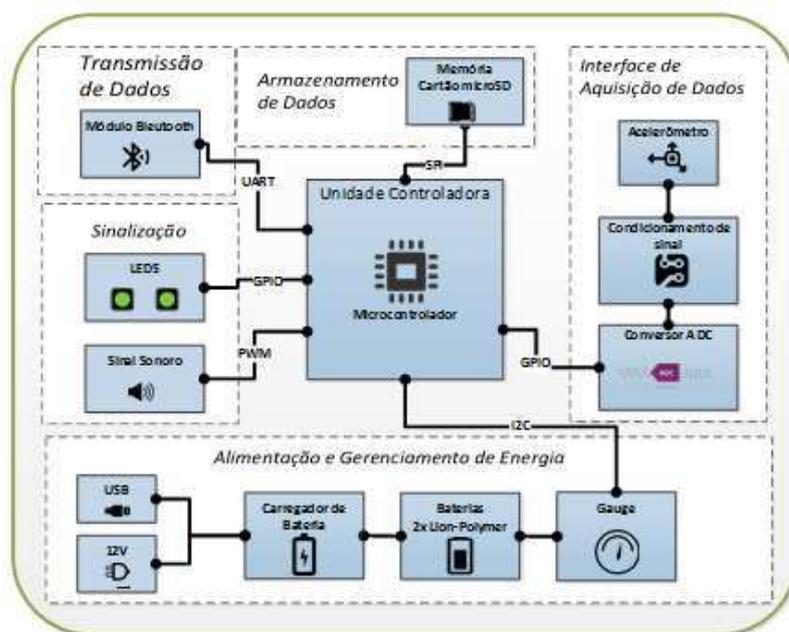


Figura 4 – Diagrama esquemático do módulo de aquisição de dados (LIMA et al., 2016)

Os experimentos são gerenciados através de um PDA industrial. Após estabelecida a conexão Bluetooth com o módulo de aquisição, são informados parâmetros de tempo, frequência de aquisição dos dados durante a realização ensaios e categoria da máquina

inspecionada. Após a coleta dos dados, os sinais são processados e disponibilizados para o usuário em forma de gráficos no tempo e frequência, assim como são calculados índices de interesse, a saber, valores de máximo e mínimo e valor eficaz de velocidade da vibração. Vislumbrando uma futura atualização do hardware para zonas classificadas, foram utilizados PDAs robustos e classificados para zonas explosivas. Os dispositivos utilizados são ilustrados na Figura 5. Da esquerda para direita: ECOM i.roc 420, Advantech psw-470, Getac PS336-Ex, ECOM i.roc CI70-Ex, Juniper Mesa 1 e o módulo de aquisição de dados confeccionado.



Figura 5 – Plataforma de aquisição de dados (direita) e PDAs utilizados para a distribuição do sistema (LIMA et al., 2016)

3.2 A Interface

A tela inicial do aplicativo é mostrada na Figura 6.



Figura 6 – Tela inicial do aplicativo

O operador pode realizar tanto experimentos em tempo real, realizados a partir da plataforma de aquisição de dados, quanto inspeções *offline* com o intuito de verificar algum quadro anterior do equipamento especificado.

3.2.1 Inspeções em Tempo Real

A aba de inspeções em tempo real é evidenciada na Figura 7.

Início 3:01

Dados do equipamento

Classificação	Montagem
Grupo III	Flexível
Rotação (RPM):	Amostragem (Hz)
1700	1000
Porta COM	Duração do Experimento (s)
COM5	5

Conectar

Inspeccionar

Figura 7 – Aba de parâmetros da inspeção em tempo real

Os parâmetros necessários para que a inspeção seja realizada são:

- **Classificação:** determina os níveis vibracionais a serem estabelecidos para o equipamento segundo a NBR10082.
- **Montagem:** o tipo de montagem (ou fundação) determina os limites vibracionais dentro de cada categoria.
- **Amostragem:** a frequência de amostragem utilizada para realizar as medições.
- **Porta COM:** especifica a porta serial utilizada para conectar-se com a plataforma de aquisição.
- **Rotação:** indica a velocidade de rotação do eixo rotórico no momento do ensaio. Este dado é primordial para que o algoritmo de detecção de faltas tenha a performance desejada.
- **Duração do experimento:** para que seja possível delimitar a janela de comunicação com a plataforma de aquisição.

O botão “Conectar”, quando clicado, gera um evento que estabelece a conexão com a plataforma de aquisição. O *baud rate* foi configurado para 115200 e o *timeout*, em milissegundos, 1000. Caso a conexão não seja feita neste intervalo de tempo, o botão “Inspeccionar” não é habilitado.

3.2.2 Inspeção *Offline*

Na aba de verificação de inspeções já realizadas o usuário visualiza a seguinte interface:

Início 3:00

Dados do equipamento

Classificação	Montagem
Grupo III	Flexível
Rotação (RPM):	Amostragem (Hz)
1740	500

Selecionar arquivo

\\My Documents\Data\ensaio_d

Procurar

Inspeccionar

Figura 8 – Aba de parâmetros da inspeção *offline*

Das diferenças em relação à aba de inspeções em tempo real, temos que não é necessário informar o tempo de ensaio uma vez que não utilizamos a plataforma de aquisição nesta modalidade de diagnóstico. Além disto, é possível navegar nos diretórios do PDA por meio do evento gerado pelo *click* do botão “Procurar” e selecionar o experimento desejado, como mostra a Figura 9.

3.2.3 Realização do Diagnóstico

No que diz respeito às funcionalidades da aplicação, a análise dos níveis vibracionais e seu espectro de frequência correspondem à principal delas. Nesta sessão abordaremos os procedimentos realizados para a realização do diagnóstico correto.

Conversão dos dados de aceleração

Para que os dados vibracionais sejam analisados é necessário, inicialmente, realizar o seu tratamento. Muito embora a plataforma de aquisição realize a conversão dos dados brutos adquiridos por meio do acelerômetro piezoelétrico em aceleração, expressa em g , temos que realizar uma conversão de unidades. Dado que $1g = 9800 \frac{mm}{s^2}$, todas as medições realizadas são multiplicadas por um fator de 9800.

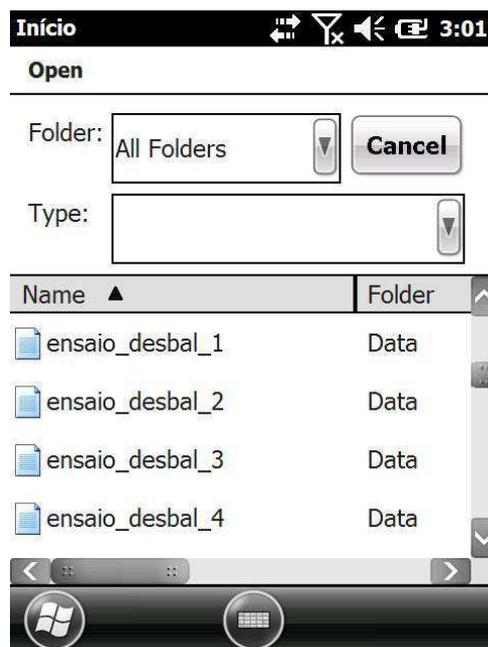


Figura 9 – Funcionalidade do botão “Procurar”

3.2.3.1 Cálculo da velocidade vibracional

Em seguida é necessário integrar o vetor de aceleração para obter-se as medições de velocidade. Para tanto, certificou-se de que o ruído contido no sinal não inserisse incertezas quanto às medições de velocidade obtidas.

3.2.3.2 Cálculo do valor eficaz da velocidade de vibração

A partir do vetor de velocidades vibracionais foi realizado o cálculo do seu valor eficaz. É a partir deste parâmetro que, definidas categoria e montagem do equipamento, é realizado o diagnóstico de severidade vibracional, indicando se o funcionamento da máquina é *normal*, *aceitável*, *insatisfatório* ou *alarmante*. O cálculo do valor eficaz foi realizado por meio de um método auxiliar.

Pré-processamento e cálculo da Transformada de Fourier

Agora, inciam-se os procedimentos para a realização do diagnóstico da anomalia presente no equipamento. Dado que o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier será executado, faz-se necessário processar o sinal de velocidade de vibracional.

3.2.3.3 Verificação das harmônicas dominantes

Nesta sessão são verificados os picos vibracionais da lista que contém os valores de magnitude do espectro de frequência. Estes valores de magnitude dizem respeito ao intervalo $[0, \frac{F_s}{2}]$, F_s sendo a frequência de amostragem especificada no momento da inspeção. Supondo um número de magnitudes de vibração n contidos na lista, temos que, para

cada frequência $f \in \mathbb{Z}$, o número de elementos de magnitude relativos a uma frequência específica será a razão $\frac{2n}{F_s}$. Com isto, verificam-se os picos vibracionais dentro de cada intervalo e compõe-se a lista `frequenciasPico`. Em seguida, utiliza-se uma tolerância de 50% da velocidade de rotação da máquina para retirar o nível de conteúdo no espectro. Inicialmente o algoritmo verifica a harmônica dominante e sua frequência correspondente para, em seguida, realizar a busca pelas principais componentes de frequência.

3.2.4 Interface de visualização dos resultados

Os resultados do diagnóstico são mostrados em duas abas. Na aba inicial são mostrados os valores máximo, mínimo, médio e o valor eficaz da velocidade de vibração. A partir da NBR10082, o nível vibracional é avaliado e o diagnóstico da severidade da vibração é mostrado ao usuário.

Na segunda aba é possível visualizar o diagnóstico quanto à falta característica do padrão vibracional. Nesta interface evidenciam-se tanto os principais picos vibracionais, de modo a auxiliar o usuário na visualização do espectro de frequência, quanto a falta. A interface é mostrada na Figura 10.

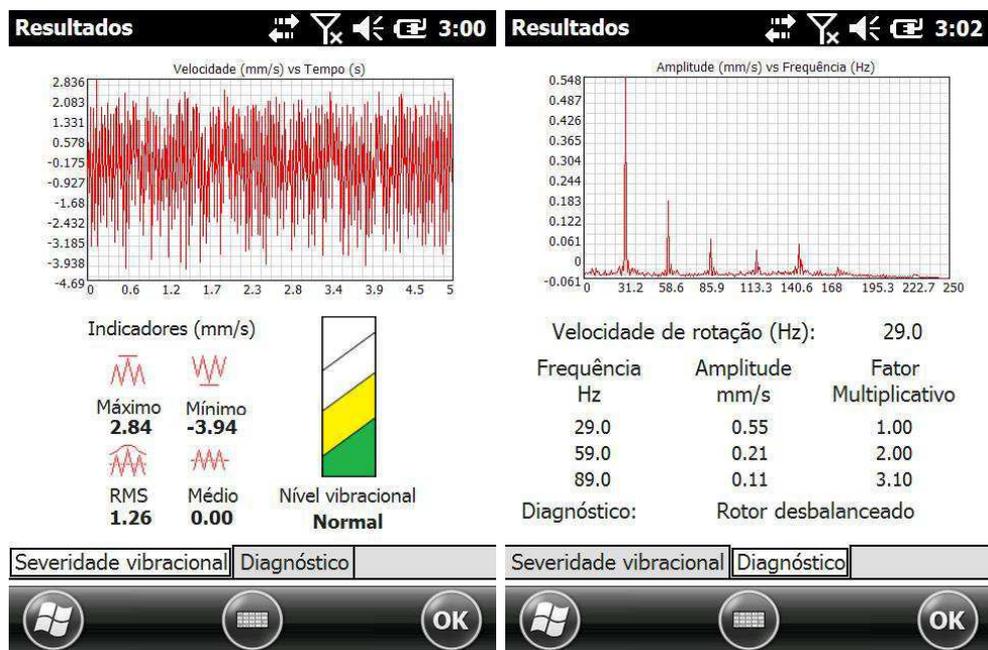


Figura 10 – Interfaces de diagnóstico de severidade (esquerda) e anomalia (direita)

4 Experimentos e Resultados

4.1 Plataforma de Testes

Foi confeccionada uma plataforma de testes para simulação de falhas de desbalanceamento e desalinhamento. A montagem para estudo de desbalanceamento consiste de um motor de $\frac{1}{4}$ CV (1800 RPM) acoplado a um cilindro perfurado de nylon. A introdução de parafusos nos orifícios promove o desbalanceamento do eixo rotórico, propiciando a análise de diferentes estágios desta falta. A montagem para avaliar o desalinhamento consiste de outro motor de $\frac{1}{4}$ CV (1800 RPM), conectado por meio de flanges de nylon, a um motor secundário. O desalinhamento angular ou paralelo é simulado, variando a altura do suporte do motor principal. Na Figura 11 são ilustrados da esquerda para direita os motores (secundário e primário) da montagem de desalinhamento, seguido do motor com a carga desbalanceada.

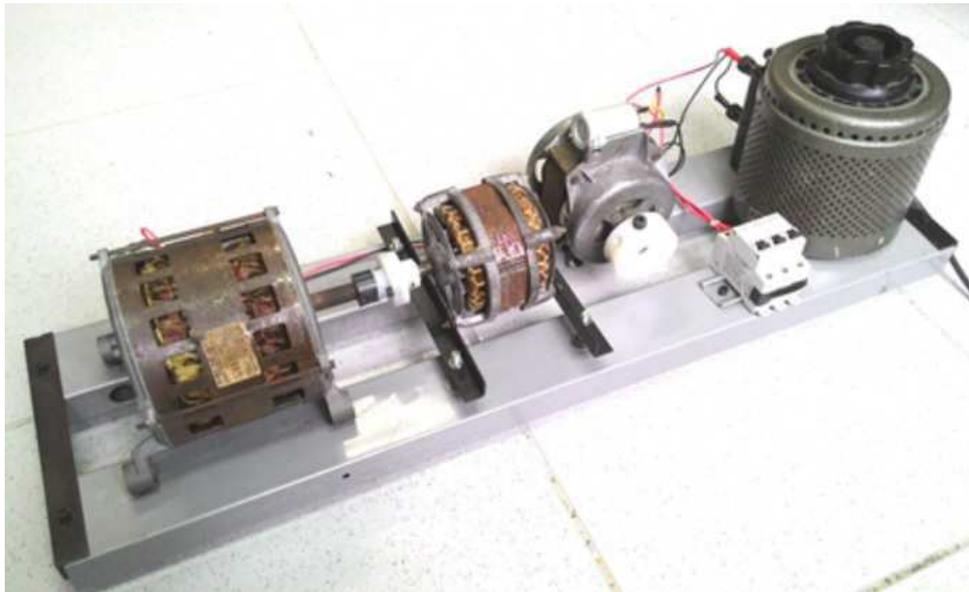


Figura 11 – Plataforma de Testes (LIMA et al., 2016)

Os experimentos foram configurados de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 2.

4.2 Análise de Desbalanceamento de Carga

Para analisar-se os efeitos do desbalanceamento na vibração da estrutura da máquina foram introduzidos parafusos de diferentes tamanhos e pesos (Figura 12) nos orifícios da massa cilíndrica de *nylon*. Inicialmente, verificou-se o desbalanceamento provocado

Parâmetro	Valor
Tempo de duração (s)	5
Taxa de amostragem (Hz)	500
Grupo	III
Fundação	Rígida
Rotação do eixo (Hz)	28,3

Tabela 2 – Parâmetros relativos aos ensaios de desbalanceamento e desalinhamento

unicamente pela massa de *nylon*. Em seguida, foram realizados experimentos para cada um dos parafusos.



Figura 12 – Parafusos utilizados para simular desbalanceamentos (LIMA et al., 2016)

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados são mostrados nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18.

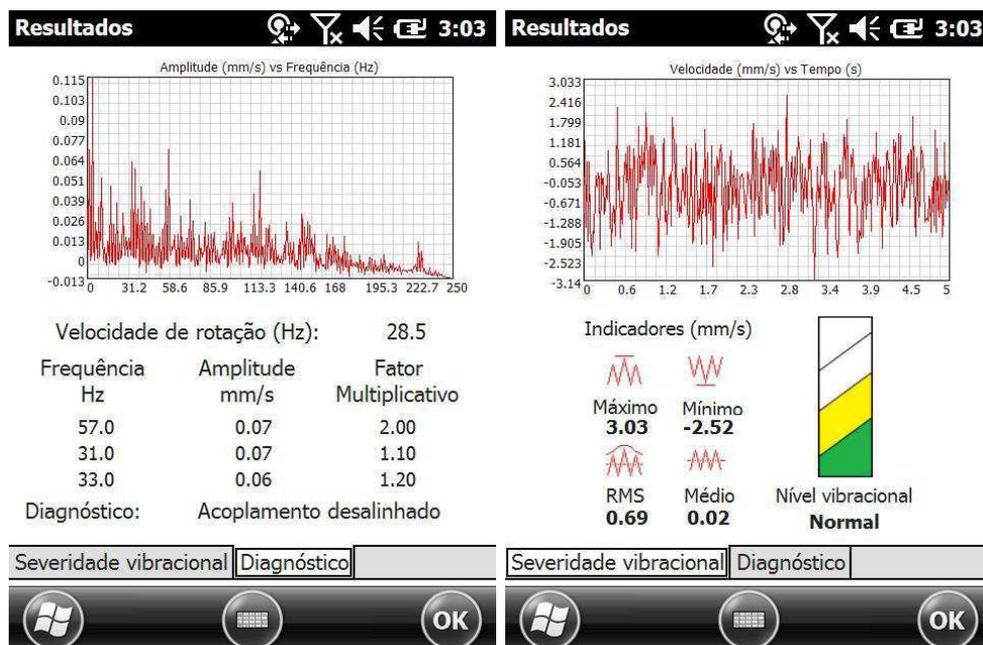


Figura 13 – Verificação do desbalanceamento residual proveniente da massa de *nylon*

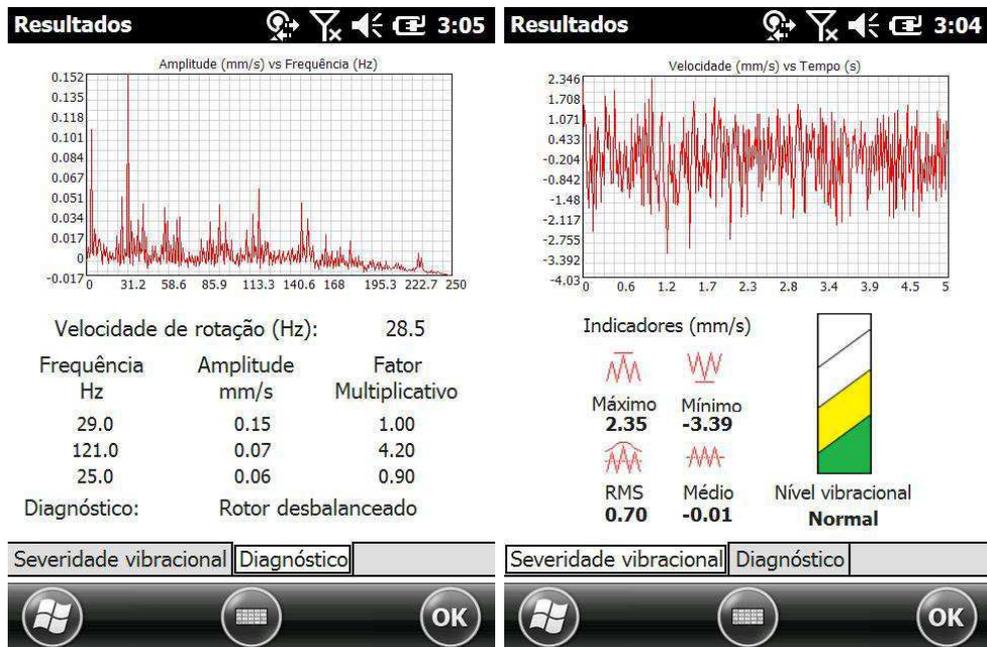


Figura 14 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 1

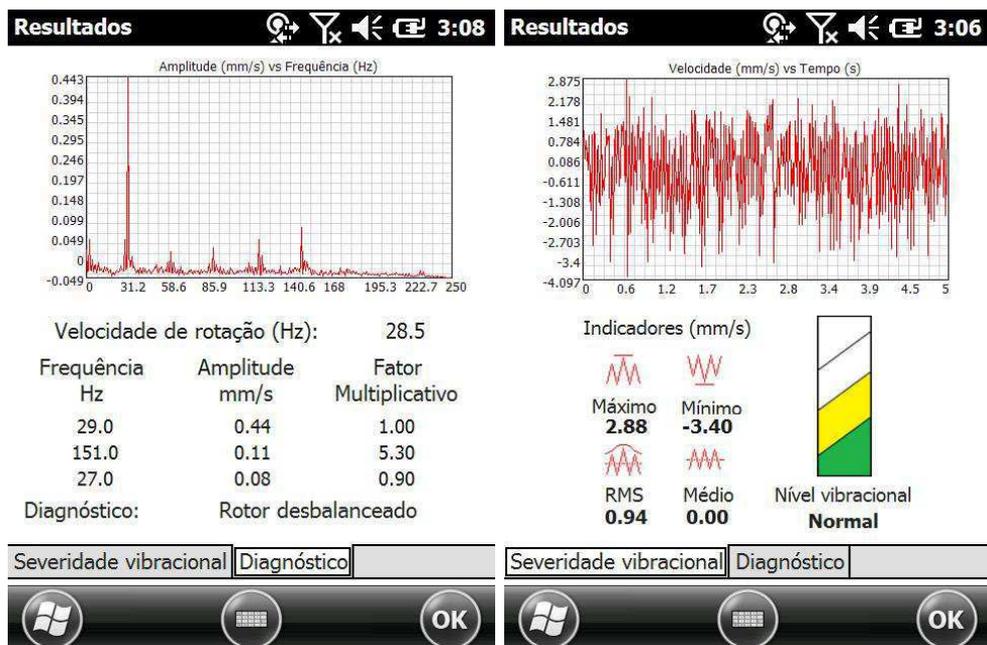


Figura 15 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 2

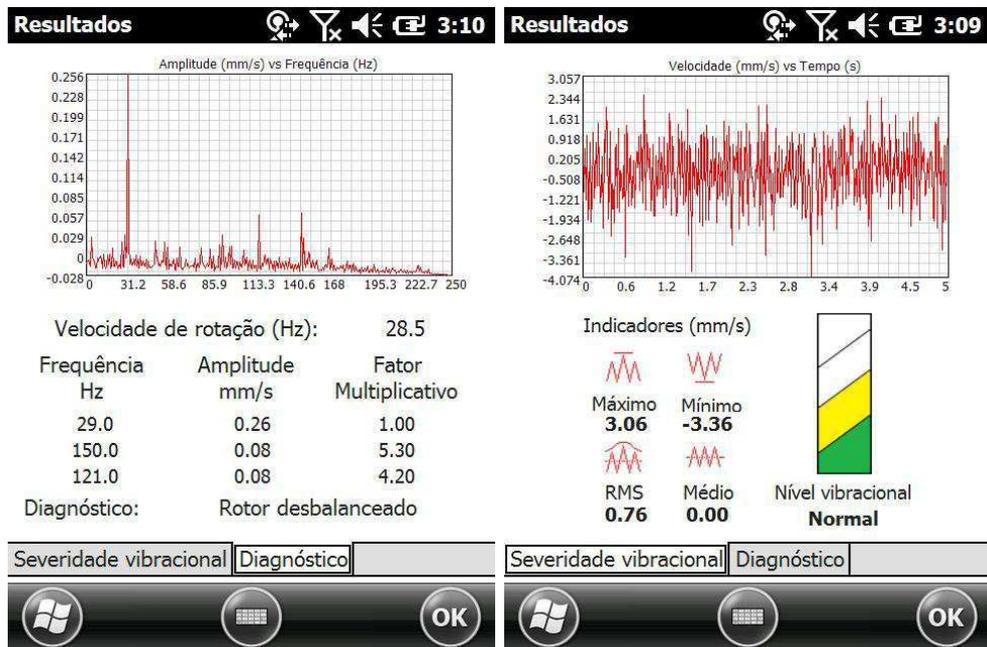


Figura 16 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 3

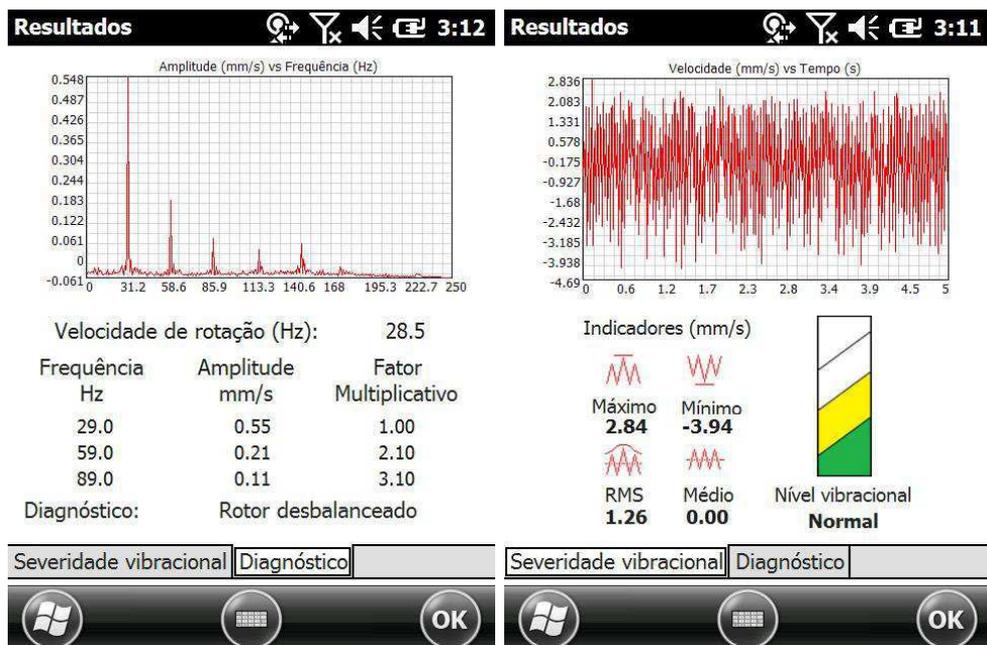


Figura 17 – Desbalanceamento promovido pelo parafuso 4

Avaliando as respostas do sistema para as diferentes condições de desbalanceamento, obtemos os valores apresentados na Tabela 3.

Parafuso	Valor RMS	Harmônica (mm/s)				
		1X	2X	3X	4X	5X
Sem parafuso	0.69	0.07	0.07	-	-	-
1	0.70	0.15	-	-	0.07	0.07
2	0.94	0.44	-	-	-	0.11
3	0.76	0.26	-	-	0.08	0.08
4	1.26	0.55	0.21	0.11	-	-

Tabela 3 – Resultados obtidos nos ensaios de desbalanceamento

É possível verificar que há um aumento no valor eficaz da velocidade vibracional a medida que o desbalanceamento rotórico se torna mais agudo. Vale salientar que o parafuso 3 introduziu mais desbalanceamento ao sistema do que o parafuso 2, sendo possível verificar esta assertiva a partir do valor eficaz de velocidade vibracional do parafuso 2 ser superior ao parafuso 3. A partir disto, verifica-se que tanto os valores eficazes quanto as componentes vibracionais da frequência 1X crescem com o agravamento da condição. Como visto na sessão dos referenciais teóricos, este comportamento é típico para a falta investigada.

4.3 Análise de Desalinhamento

Objetivando avaliar as características do sinal vibracional proveniente do desalinhamento entre dois rotores foram realizados dois experimentos. O primeiro deles verificou o desalinhamento promovido pelos flanges de *nylon*. Em seguida foram simulados os desalinhamentos angular, e paralelo. É possível simular tais falhas variando as alturas y_1 e y_2 dos suportes do motor principal, como mostra a Figura 13.

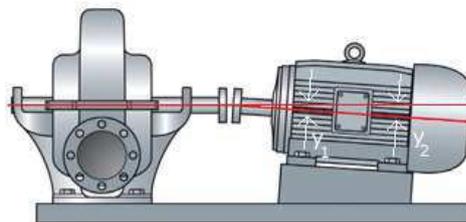


Figura 18 – Esquema para a verificação dos tipos de desalinhamento (ELY, 2011)

Foram simuladas três situações. Na primeira delas, verificou-se que com $y_1 = y_2 = 0\text{mm}$ a falta se manifesta, evidenciando que o acoplamento de *nylon* possui um desalinhamento residual. O resultado obtido está evidenciado na Figura 19. No que diz respeito à simulação do desalinhamento paralelo, as alturas y_1 e y_2 foram alteradas para divergir da altura dos suportes do motor acoplado em 1mm , resultando nos sinais representados na Figura 20. No segundo experimento, foi simulado um desalinhamento

angular com $y_1 = 0mm$ e $y_2 = 4mm$, provendo os sinais da Figura 21. Os resultados estão sintetizados na Tabela 4.

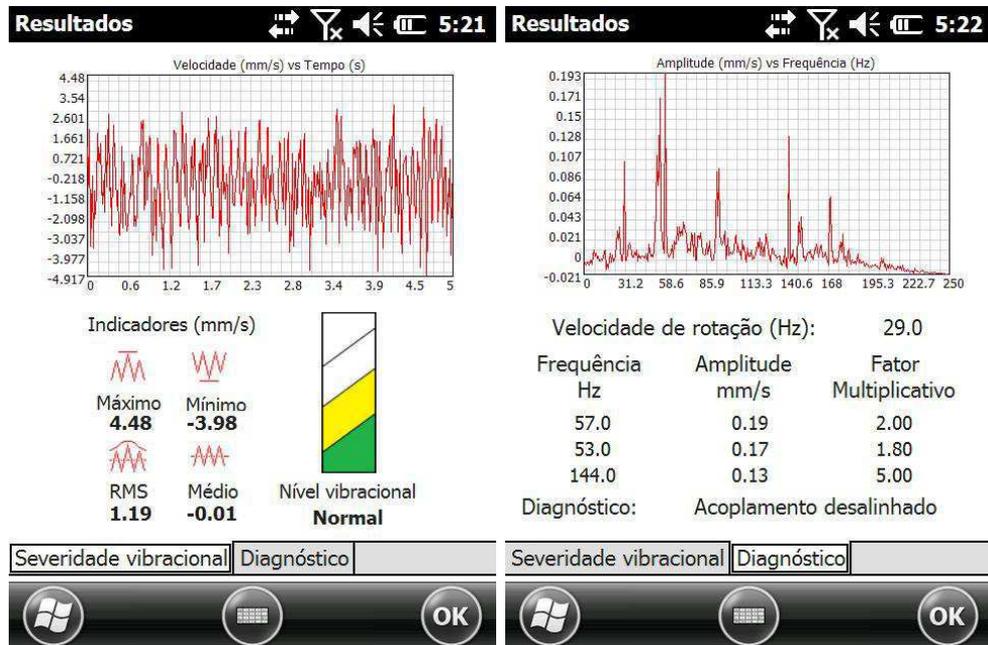


Figura 19 – Verificação do desalinhamento residual proveniente do acoplamento de *nylon*

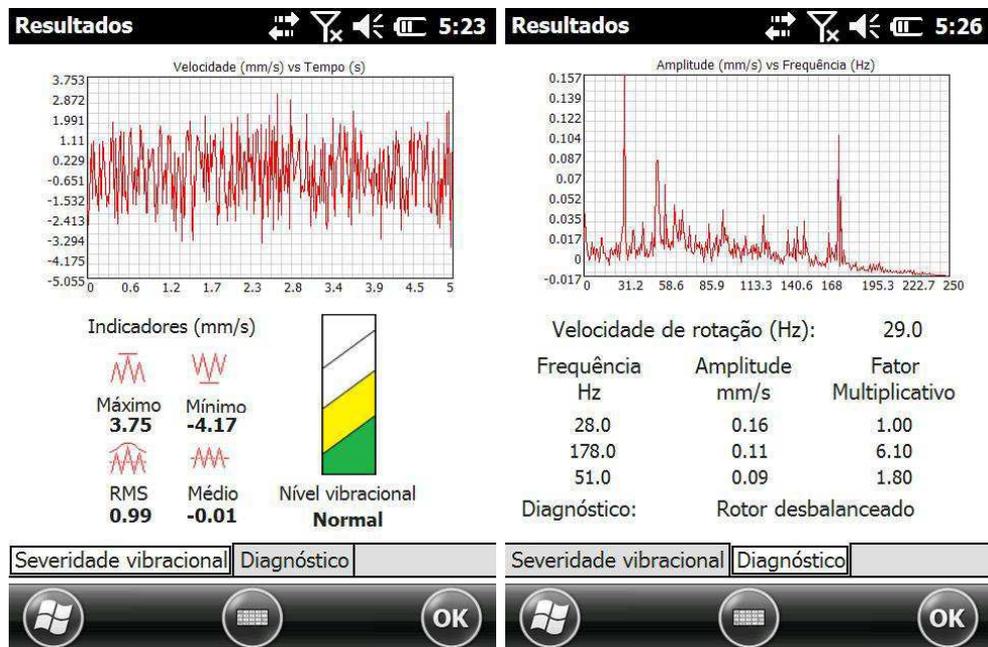


Figura 20 – Desalinhamento promovido por $y_1 = 0$ e $y_2 = 4mm$

Assim como para o desbalanceamento, verifica-se que o valor eficaz de velocidade vibracional não apresenta-se como o indicador adequado tanto para a detecção da falta quanto para a indicação do seu agravamento uma vez que o desalinhamento residual contém um nível superior à das faltas simuladas. Observa-se que o aplicativo apresentou desempenho indesejado quanto à detecção do desalinhamento angular uma vez que a

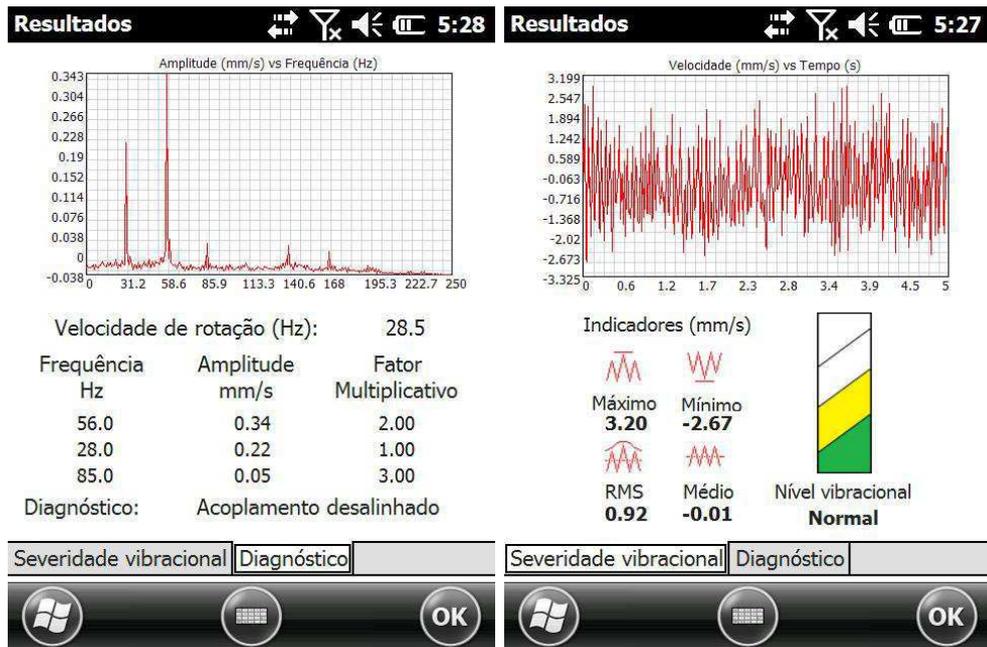


Figura 21 – Desalinhamento promovido por $y_1 = y_2 = 1mm$

Desalinhamento	Valor RMS	Harmônica (mm/s)					
		1X	2X	3X	4X	5X	6X
Residual	1.19	0.10	0.19	-	-	0.13	-
Paralelo	0.92	0.16	0.09	-	-	-	0.11
Angular	0.99	0.22	0.34	0.05	-	-	-

Tabela 4 – Resultados obtidos nos ensaios de desalinhamento

harmônica 1X apresenta destaque, e isto gera um conflito de decisão entre diagnosticar desbalanceamento ou desalinhamento. Ademais, é possível verificar que a descrição das faltas na literatura foi empiricamente comprovada, onde para o desalinhamento angular a harmônica dominante do espectro de frequência continha o dobro da frequência de rotação do eixo rotórico.

5 Conclusão

Muito embora os valores eficazes de velocidade vibracional mensurados durante os ensaios de desbalanceamento estejam enquadrados numa mesma classificação, observa-se que a falta torna-se cada vez mais evidente quando analisam-se os espectros de frequência, onde a primeira harmônica apresenta um crescimento substancial, destacando-se no espectro. Desta forma, a análise em frequência mostra-se como uma metodologia complementar à verificação da vibração em uma máquina girante.

Analisando os resultados obtidos nos ensaios de desalinhamento, tem-se que os valores eficazes dos desalinhamentos simulados encontram-se inferiores aos valores residuais provenientes do acoplamento. Quando analisam-se os espectros de frequência dos sinais de velocidade vibracional, percebe-se que a teoria apresentada na Parte I foi confirmada. Muito embora o diagnóstico realizado para o desalinhamento angular descreva a necessidade de rebalancear os rotores, deve-se levar em consideração que as medições foram tiradas com o transdutor acoplado axialmente à carcaça do motor, e este tipo de falta manifesta-se radialmente na frequência $2X$.

A partir da implementação do algoritmo de identificação descrito neste trabalho, conclui-se que este apresenta-se efetivo no que diz respeito à identificação das faltas desbalanceamento e desalinhamento. No entanto, para que este se torne versátil e possa detectar uma maior diversidade de anomalias faz-se necessário utilizar novas ferramentas de análise e diagnóstico como, por exemplo, lógica Fuzzy. Para os trabalhos futuros, faz-se necessário incluir informações capazes de auxiliar o operador na compreensão do diagnóstico e como proceder para realizar a inspeção.

Referências

- ABNT. *NBR10082 - Ensaio não destrutivo — Análise de vibrações — Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm*. [S.l.]: ABNT, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 10, 14 e 21.
- ADAMS, M. L. *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2000. (Mechanical Engineering). Citado na página 23.
- ELY, K. V. M. *The Importance of Shaft Alignment*. 2011. <<http://www.flowcontrolnetwork.com/the-importance-of-shaft-alignment/>>. Acessado em 15 de Agosto de 2016. Citado 3 vezes nas páginas 9, 23 e 38.
- ISO. Standard. *Mechanical vibration and shock - Performance parameters for condition monitoring of structures*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 22.
- LIMA, R. et al. Sistema móvel para inspeção de máquinas girantes - análise de vibração. *Rio Oil & Gas 2016 Expo and Conference*, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 9, 27, 28, 29, 34 e 35.
- RANDALL, R. B. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications*. [S.l.]: Wiley, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 14, 16, 17 e 18.
- SCHEFFER, P. G. C. *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. 1. ed. [S.l.]: Elsevier; Newnes, 2004. (Practical professional books from Elsevier). Citado 5 vezes nas páginas 14, 16, 17, 22 e 23.
- SZYMANOWSKI, J. *Fourier Transform in Digital Signal Processing*. 2016. <<http://http://www.codeproject.com/Articles/1077529/Fourier-Transform-in-Digital-Signal-Processing>>. Acessado em 15 de Agosto de 2016. Citado na página 25.
- YAO, D. D. P. *.Net Compact Framework Programming with C#*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2004. (Microsoft .NET Development Series). Citado na página 15.