

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL PACHECO DA COSTA

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE TÉCNICAS DE
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE
DESBALANCEAMENTO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS DE BAIXA
ROTAÇÃO**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL PACHECO DA COSTA

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE TÉCNICAS DE
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE
DESBALANCEAMENTO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS DE BAIXA
ROTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Sérgio Luciano Avila, Dr. Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Costa, Gabriel

INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE DESBALANCEAMENTO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS DE BAIXA ROTAÇÃO / Gabriel Costa; orientação de Sérgio Luciano Avila. - Florianópolis, SC, 2022.

107 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Monitoramento de vibrações. 2. Máquinas elétricas rotativas. 3. Desbalanceamento. 4. Bancada Experimental. 5. Manutenção preditiva. I. Luciano Avila, Sérgio. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE DESBALANCEAMENTO

INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL SOBRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE DESBALANCEAMENTO EM MÁQUINAS ELÉTRICAS DE BAIXA ROTAÇÃO

GABRIEL PACHECO DA COSTA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro(a) Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de dezembro de 2022.

Banca Examinadora:

Sergio Luciano Avila, Dr. Eng.

Cesar Alberto Penz, Dr. Eng.

Fernando Lila, Me. Eng.

Ao meu avô, Joaquim Fernandes da Costa, em memória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda equipe de pesquisadores do Grupo de Computação Científica para Engenharia (PECCE), em especial aos professores Dr. Eng. Sérgio Luciano Avila e Dr. Eng. Cesar Alberto Penz, pela orientação, ensinamentos e correções no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço aos meus companheiros de graduação e de pesquisa, em especial ao Eng. Marcos Granado, Eng. Jonas Honorato e Eng. Leonardo Jablon, pelo conhecimento compartilhado e convivência no laboratório do PECCE.

Agradeço à empresa AQTech Power Prognostics, em especial ao Me. Eng. Tiago Matsuo, pela parceria desenvolvida e disponibilização de software utilizado para aquisição e análise de sinais.

Agradeço à empresa Cotesa Engenharia, em especial ao Eng. Daniel Bicicgo, ao Eng. Leonardo Debastiani, ao Eng. Wanderley Bispo, ao Sr. Gregori Signor e ao Eng. Nacib Elias, pelos ensinamentos referentes à operação e manutenção de hidrogeradores e usinas hidrelétricas.

Por fim, agradeço à minha família pelo amor, educação e suporte, sem os quais não seria possível chegar até aqui, e a Deus, pela vida e sabedoria.

“Só é digno da vida aquele que vai, todos os dias, à luta por ela”.
Johann Goethe

RESUMO

Com a evolução da tecnologia a área de engenharia de manutenção tem desenvolvido técnicas preditivas eficazes para a avaliação da condição de máquinas. O monitoramento de vibrações em máquinas elétricas rotativas pode ser utilizado em indústrias e plantas de geração do setor elétrico para detectar falhas nos equipamentos, porém é necessário o aperfeiçoamento dos sistemas existentes para que seja possível realizar com precisão o diagnóstico de defeitos nas máquinas. Neste sentido, o Grupo de Pesquisa em Computação Científica para Engenharia (PECCE-IFSC) possui uma linha de atuação voltada para o monitoramento e análise de desbalanceamento de máquinas elétricas de baixa rotação, onde foi desenvolvida uma bancada experimental para realização de testes em ambiente controlado. Este trabalho de conclusão de curso fez parte da fase inicial de operação da bancada, onde foi instalado um sistema de monitoramento de vibrações composto por sensores e hardware para aquisição dos dados. Foram realizados ensaios e utilizadas técnicas de análise de vibrações encontradas na literatura para análise dos registros. Este trabalho apresenta a documentação do projeto da bancada e da instrumentação utilizada para realizar o monitoramento, e os resultados iniciais obtidos na análise dos registros, que sinalizam a recomendação da utilização de sensores de aceleração para detecção de desbalanceamento em máquinas elétricas de baixa rotação que utilizam mancais de rolamento.

Palavras-chave: Monitoramento de vibrações. Máquinas elétricas rotativas. Desbalanceamento. Bancada experimental.

ABSTRACT

With the evolution of technology, the maintenance engineering area has developed effective predictive techniques for assessing the condition of machines. Vibration monitoring in rotating electrical machines can be used in industries and generation plants in the electrical sector to detect equipment failures, but it is necessary to improve existing systems so that it is possible to accurately diagnose faults in machines. In this sense, the Research Group on Scientific Computing for Engineering (PECCE-IFSC) has a line of action aimed at monitoring and analyzing the unbalance of low-speed electrical machines, where an experimental bench was developed to carry out tests in a controlled environment. This course completion work was part of the initial phase of operation of the bench, where a vibration monitoring system composed of sensors and hardware for data acquisition was installed. Tests were carried out and vibration analysis techniques found in the literature were used to analyze the records. This work presents the documentation of the bench project and the instrumentation used to carry out the monitoring, and the initial results obtained in the analysis of the records, which indicate the recommendation of using acceleration sensors to detect unbalance in low-speed electrical machines that use roller bearings.

Keywords: Vibration monitoring. Rotating electrical machines. Imbalance. Experimental bench.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de indução com rotor em gaiola.....	24
Figura 2 - Rolamentos cilíndricos e de esferas	26
Figura 3 - Matriz elétrica brasileira	29
Figura 4 - Usina Hidrelétrica.....	30
Figura 5 - Turbina Francis	33
Figura 6 - Mancal de deslizamento	34
Figura 7 - Desbalanceamento	35
Figura 8 - Desbalanceamento Estático	36
Figura 9 - Desbalanceamento Acoplado	36
Figura 10 – Desbalanceamento Dinâmico	37
Figura 11 - Sensor de aceleração	39
Figura 12 - Sensor de proximidade	40
Figura 13 - Posição do sensor de aceleração	41
Figura 14 - Posição dos sensores de proximidade.....	42
Figura 15 - Pontos de instalação dos sensores.....	42
Figura 16 - Sensor de fase, máquina parada	54
Figura 17 - Filtro sensores de aceleração, máquina parada	55
Figura 18 - Sensores de proximidade, máquina parada.....	56
Figura 19 - Filtro digital passa-faixa, sensor de aceleração M1	57
Figura 20 - Sensor de fase, máquina em rotação 5 Hz.....	58
Figura 21 - Sensor de fase e sensores de proximidade, mancais M1 e M2.....	59
Figura 22 - Sensor de fase e sensores de aceleração, mancais M1 e M2.....	59
Figura 23 - FFT sensor de aceleração, mancal M1	61
Figura 24 - FFT sensor de aceleração, mancal M2.....	61
Figura 25 - Espectro completo FFT sensor de proximidade 0°, mancal M1	62
Figura 26 - FFT sensores de proximidade, mancal M1	63
Figura 27 - FFT sensores de proximidade, mancal M2	63
Figura 28 - Diagrama de órbitas, mancais M1 e M2.....	64
Figura 29 - Sensor de fase e sensores de proximidade, mancais M1 e M2, desbalanceamento	66
Figura 30 - Sensor de fase e sensores de aceleração, mancais M1 e M2, desbalanceamento	66
Figura 31 - FFT sensor de aceleração, mancal M1, desbalanceamento.....	68

Figura 32 - FFT sensor de aceleração, mancal M2, desbalanceamento.....	68
Figura 33 - Espectro completo FFT sensor de proximidade 0°, mancal M1, desbalanceamento	69
Figura 34 - FFT sensores de proximidade, mancal M1, desbalanceamento	70
Figura 35 - FFT sensores de proximidade, mancal M2, desbalanceamento	70
Figura 36 - Diagrama de órbitas, mancais M1 e M2, desbalanceamento	71
Figura 37 - Diagramas de órbita mancal M2	76
Figura 38 - Topologia Sensoriamento Bancada PECCE	86
Figura 39 - Conjunto eletromecânico da bancada.....	87
Figura 40 - Plaqueta identificação Motor WEG	89
Figura 41 - Mancal de rolamentos.....	91
Figura 42 - Bloco de contatos da instrumentação	96
Figura 43 - Conversor analógico-digital.....	97
Figura 44 - Projeto de construção da bancada.....	98
Figura 45 - Projeto do eixo mecânico.....	99
Figura 46 - Circuito comando-inversor-motor	101
Figura 47 - Esquemático do circuito de instrumentação.....	102
Figura 48 - Massas de desbalanceamento	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Empreendimentos hidráulicos em operação	31
Tabela 2 - Frequências Notáveis.....	50
Tabela 3 - Comparação eixo parado x eixo em rotação	72
Tabela 4 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, valores globais ..	73
Tabela 5 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, frequências notáveis	74
Tabela 6 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, orbitais.....	75
Tabela 7 - Relação de equipamentos conjunto eletromecânico	86
Tabela 8 - Relação de equipamentos instrumentação	86
Tabela 9 - Chave DIP S1.....	103
Tabela 10 - Chave DIP S2.....	103
Tabela 11 - Chave DIP S3.....	103
Tabela 12 - Configuração das entradas analógicas do conversor.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ca – Corrente alternada

cc – Corrente contínua

CGH – Central Geradora Hidrelétrica

fem – Força eletromotriz

IFSC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

MIT – Motor de Indução Trifásico

NPD – Número de palhetas do distribuidor

NPT – Número de pás da turbina

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PECCE – Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia

rms – *Root mean square*

RN – Rotação nominal

rpm – Rotações por minuto

SIN – Sistema Interligado Nacional

UGH – Unidade Geradora Hidrelétrica

UHE – Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Definição do Problema	16
1.2	Justificativa	18
1.3	Objetivos.....	20
1.3.1	Objetivo Geral	20
1.3.2	Objetivos Específicos	21
1.4	Estrutura do trabalho.....	21
2	REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1	Máquinas elétricas rotativas	23
2.1.1	Motor de indução trifásico	23
2.1.1.1	<i>Aspectos construtivos e de funcionamento</i>	<i>23</i>
2.1.1.2	<i>Classificação e principais aplicações</i>	<i>25</i>
2.1.1.3	<i>Mancais de rolamento</i>	<i>25</i>
2.1.1.4	<i>Velocidade de rotação</i>	<i>26</i>
2.1.1.5	<i>Acionamento e alimentação via inversor de frequência</i>	<i>27</i>
2.1.1.6	<i>Defeitos elétricos e mecânicos.....</i>	<i>28</i>
2.1.2	Hidrogerador	28
2.1.2.1	<i>Usinas Hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas</i>	<i>29</i>
2.1.2.2	<i>Unidades geradoras hidrelétricas.....</i>	<i>31</i>
2.1.2.3	<i>Turbinas hidráulicas</i>	<i>32</i>
2.1.2.4	<i>Mancais de deslizamento.....</i>	<i>33</i>
2.1.2.5	<i>Defeitos elétricos e mecânicos.....</i>	<i>34</i>
2.2	Desbalanceamento mecânico do eixo.....	35
2.2.1	Desbalanceamento estático	35
2.2.2	Desbalanceamento acoplado	36
2.2.3	Desbalanceamento dinâmico	36
2.3	Metodologia para monitoramento e análise de vibrações.....	37
2.3.1	Tecnologia de sensores	38
2.3.1.1	<i>Sensor de aceleração</i>	<i>38</i>
2.3.1.2	<i>Sensor de proximidade</i>	<i>39</i>
2.3.1.3	<i>Sensor de fase.....</i>	<i>40</i>
2.3.2	Topologia de sensoramento	41
2.3.3	Hardware para aquisição de dados.....	43
2.3.4	Ferramentas matemáticas para análise e processamento de sinais.....	44
2.3.5	Técnicas de análise de vibrações	47
2.3.5.1	<i>Análise de valores globais.....</i>	<i>47</i>
2.3.5.2	<i>Análise de frequências notáveis.....</i>	<i>49</i>
2.3.5.3	<i>Análise de orbitais.....</i>	<i>51</i>
3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS INICIAIS.....	53
3.1	Configuração inicial.....	53
3.2	Condição saudável	57
3.2.1	Análise de valores globais, condição saudável	60
3.2.2	Análise de frequências notáveis, condição saudável	60
3.2.3	Análise de orbitais, condição saudável	64
3.3	Condição de desbalanceamento	65
3.3.1	Análise de valores globais, condição de desbalanceamento	67

3.3.2	Análise de frequências notáveis, condição de desbalanceamento	67
3.3.3	Análise de orbitais, condição de desbalanceamento	71
3.4	Comparação das condições.....	72
3.4.1	Análise de valores globais, comparação dos resultados.....	73
3.4.2	Análise de frequências notáveis, comparação dos resultados.....	73
3.4.3	Análise de orbitais, comparação dos resultados	74
4	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICES	84
	APÊNDICE A – Relatório da Bancada Experimental de Ensaios.....	85

1 INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas rotativas, operando como motores, compensadores ou geradores, têm sido amplamente utilizadas para diversas aplicações. Estão presentes em uma grande variedade de equipamentos com diferentes construções e tecnologias, sendo empregadas em ambientes residenciais, comerciais, industriais e na própria geração de energia elétrica.

Os motores de indução trifásicos, por exemplo, devido a sua robustez, flexibilidade e baixo custo, são os motores elétricos mais utilizados na indústria, tanto para aplicações em velocidade constante quanto em velocidade variável (BENBOUZID; KLIMAN, 2003). Entretanto, como qualquer equipamento, estes motores têm limitações que, quando excedidas, podem provocar falhas no estator ou no rotor (FERRAZ, 2013). No setor elétrico, os hidrogeradores correspondem a mais de 58% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil, segundo informação disponibilizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no Sistema de Informações de Geração (SIGA – ANEEL, 2022). Isto demonstra a importância destas máquinas para o setor e ressalta a necessidade de confiabilidade na disponibilidade desses ativos. De forma semelhante aos motores de indução nas indústrias, essas máquinas também estão sujeitas à ocorrência de falhas, tendo em vista que muitas vezes são submetidas à operação em ambientes agressivos, devido à natureza de suas fontes primárias que impõe grandes esforços mecânicos às turbinas, além da elevada complexidade construtiva e operativa dos dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos que compõem geradores de grande porte.

Desta forma, manter a ótima condição de máquinas e equipamentos das plantas industriais e usinas geradoras e estender ao máximo sua vida útil é imprescindível para garantir o retorno de investimentos e lucratividade das indústrias e empresas do setor elétrico. Técnicas que auxiliem a detecção de problemas, reduzindo horas de engenharia e minimizando o tempo de máquina parada, são fundamentais para as equipes de operação e manutenção. Uma das ferramentas mais utilizadas para esse fim é o monitoramento de parâmetros, com destaque para o monitoramento de vibrações (MATSUO et al., 2016).

Dentro deste contexto está a engenharia de manutenção, área de conhecimento que tem se desenvolvido permitindo mudanças no sentido de migrar as políticas de manutenção para técnicas preditivas (manutenção preditiva), baseadas na condição das máquinas, em detrimento de atividades preventivas periódicas (manutenção preventiva) ou mesmo corretivas (manutenção corretiva), conforme a terminologia da manutenção do Instituto Português da Qualidade (2007, apud FELÍCIO, 2015). Enquanto a manutenção corretiva atua somente após a ocorrência da falha e a manutenção preventiva se baseia em registros históricos e estatísticos para realizar intervenções programadas, a manutenção preditiva tem como principal técnica o monitoramento constante de parâmetros para inferir a saúde dos equipamentos, observando as indicações do sistema de monitoramento para programar as paradas para manutenção e substituição de máquinas e peças, minimizando os tempos de interrupção da produção e os custos de manutenção, afirmam Tavner, Gaydon e Ward (1986 apud FERRAZ, 2013). Entre as principais técnicas utilizadas e parâmetros monitorados podem-se citar a análise de vibrações, monitoramento de emissão acústica, análise de partículas em óleo, análise por descargas parciais, análise das correntes elétricas, monitoramento da temperatura, entre outros.

Com relação ao monitoramento de vibrações, nos últimos anos este teve sua utilização difundida devido aos avanços nas tecnologias de sensoriamento e processamento de sinais, e também ao fato de diversos estudos desenvolvidos apontarem sua capacidade de diagnóstico de falhas em máquinas elétricas rotativas. A utilização de sensores nos mancais e próximos ao eixo da máquina estaria associada à capacidade de detecção de falhas mecânicas, enquanto a utilização de sensores nas carcaças do estator do motor e do gerador permitiria a detecção de falhas elétricas e eletromagnéticas, como, por exemplo, faltas no enrolamento do estator, entreferro não uniforme e alimentação não assimétrica, tendo em vista que, de acordo com Thorsen e Dalva (1994 apud FERRAZ, 2013), qualquer alteração na distribuição de fluxo irá provocar alterações no espectro das vibrações. Quanto às falhas mecânicas, o desbalanceamento e o desalinhamento são as duas principais fontes de vibrações em máquinas rotativas (JALAN; MOHANTY, 2009; PATEL; DARPE, 2009) e podem provocar perda de eficiência e rendimento e até mesmo severos danos aos equipamentos conforme o nível de intensidade da falha.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma comparação entre três diferentes técnicas presentes na literatura bibliográfica, desenvolvidas especificamente para o diagnóstico de desbalanceamento em máquinas elétricas rotativas, através da análise de vibrações. As técnicas utilizadas são: análise de valores globais, análise de frequências notáveis e análise de orbitais. A base do monitoramento é composta por sensores de proximidade e de aceleração, sensor de referência de fase e hardware de aquisição e processamento de sinais. Os dados brutos coletados do sensoramento são processados e analisados por ferramentas matemáticas como valor médio, valor eficaz (root mean square), valor de pico, transformada rápida de Fourier e diagrama de órbita, extraindo informações para o diagnóstico da condição da máquina.

As técnicas de monitoramento e análise de vibrações foram aplicadas em dados extraídos de ensaios em uma bancada de testes do laboratório do Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia (PECCE), composta por um eixo mecânico com discos de desbalanceamento acoplado a um motor de indução trifásico alimentado por inversor. A bancada de testes, a metodologia utilizada para o monitoramento e análise de desbalanceamento e os resultados iniciais obtidos são apresentados neste trabalho.

1.1 Definição do Problema

O monitoramento da condição para manutenção preditiva tem sido tema de muitas pesquisas e já é aplicado em larga escala em países desenvolvidos, porém sua utilização ainda é incipiente nos setores industrial e de energia no Brasil (FREITAS, 2016), onde ocorre o predomínio de políticas de manutenção preventiva sob a justificativa da redução de investimentos iniciais. Uma das maiores dificuldades consiste no fato de que os sistemas comercializados (hardware e software), para o caso de monitoramento de vibrações, são em maioria importados, de alto custo e de código fechado, restringindo o acesso à tecnologia e adaptação das funcionalidades (MATSUO, 2017a).

Além disto, as técnicas de monitoramento atualmente utilizadas geralmente se limitam à medição dos níveis globais de vibração das máquinas, comparando com valores limites de referência encontrados em normas e cartas técnicas, de forma a

classificar a condição do equipamento de acordo com os níveis de severidade da vibração. Para isso, a maior parte dos sistemas de monitoramento utiliza sensores de aceleração em partes estacionárias (mancais). Porém, sabe-se que também é possível utilizar sensores de proximidade para medir o deslocamento das partes móveis (eixo/rotor) de máquinas elétricas rotativas, extraíndo assim uma maior quantidade de informações do equipamento.

Desta forma, existe uma demanda por sistemas de monitoramento que incorporem técnicas de análise de vibrações que não só avaliem o nível global da vibração, mas que também realizem o diagnóstico preditivo da máquina, detectando falhas em estágios iniciais e apontando a causa do problema. Para se avançar neste sentido, é fundamental a realização de testes experimentais em ambientes controlados, como, por exemplo, em bancada de ensaios, onde seja possível a inserção dos principais tipos de defeitos que ocorrem em máquinas elétricas rotativas para se verificar separadamente as alterações provocadas por cada um deles. Deste modo é possível avaliar, para cada tipo de defeito, a eficácia da aplicação das diferentes técnicas de monitoramento e análise de vibrações encontradas na literatura técnica, realizando a comparação e avaliação dos resultados obtidos por cada uma das técnicas, e indicando qual é a mais adequada para detecção de cada problema. Por fim, é necessário implementar em campo as técnicas de monitoramento e análise de vibrações desenvolvidas, para avaliar os resultados obtidos em máquinas elétricas rotativas em situações reais de operação. Para o desenvolvimento de uma solução final de monitoramento e análise de vibrações é importante também considerar os diferentes tipos de máquinas elétricas rotativas existentes e suas características de operação.

Sendo norteado por estas necessidades, este trabalho realizou procedimentos de ensaios experimentais em bancada de testes, considerando o caso particular de defeito por desbalanceamento mecânico do eixo, em máquinas elétricas de baixa rotação. Foi avaliada a utilização de sensores de aceleração, sensores de proximidade e sensor de fase para monitoramento, e a resposta inicial de três diferentes técnicas de análise de vibrações: análise de valores globais, análise de frequências notáveis e análise de orbitais.

Formulação do problema em forma interrogativa:

É possível realizar ensaios de desbalanceamento do eixo de máquinas elétricas rotativas em ambiente controlado e avaliar a eficácia dos sistemas de monitoramento e das técnicas de análise de vibrações encontrados na literatura técnica?

1.2 Justificativa

O desenvolvimento da engenharia de manutenção através de tecnologias nacionais que viabilizem a utilização dos conceitos de manutenção preditiva e reduzam os custos de aplicação de sistemas de monitoramento baseados na condição é estratégico e contribui para o crescimento econômico e melhoria dos indicadores de confiabilidade e eficiência das indústrias e empresas do setor elétrico brasileiro.

O monitoramento de parâmetros mecânicos e elétricos para realizar o diagnóstico da saúde de máquinas possui um grande histórico de aplicações bem sucedidas, mas atualmente ainda se encontra em fase de implantação e desenvolvimento no Brasil, com demanda por comercialização de soluções com sistemas de hardware e software nacionais. Com relação ao monitoramento de vibrações, vem sendo cada vez mais utilizado e diversos estudos desenvolvidos apontam sua capacidade de diagnóstico de problemas em máquinas elétricas rotativas.

O defeito mecânico de desbalanceamento do eixo é um dos mais comuns e uma das principais fontes de vibrações em máquinas rotativas (JALAN; MOHANTY, 2009; PATEL; DARPE, 2009) e pode provocar perda de eficiência e rendimento e até mesmo causar danos aos equipamentos. Este trabalho realiza a avaliação de técnicas de monitoramento e análise de vibrações específicas para diagnóstico de desbalanceamento do eixo em máquinas elétricas de baixa rotação, de forma a serem aplicadas em sistemas de manutenção preditiva visando à redução de custos com manutenções preventivas e corretivas, através da antecipação dos problemas por meio do rápido diagnóstico de falhas. Desta forma espera-se contribuir proporcionando benefícios como: redução de indisponibilidades programadas, redução de indisponibilidades forçadas, redução homem-hora de manutenção, aumento de eficiência da máquina e aumento da vida útil da máquina.

É importante ressaltar a necessidade de projetos de P&D&I para o desenvolvimento de soluções tecnológicas. Em equipamentos do setor elétrico, por exemplo, os testes para validação de sistemas de monitoramento e diagnóstico de falhas em unidades geradoras reais é inviável, dada a demanda de disponibilidade do ativo e as regras rígidas das concessionárias, que inviabilizam alterações nas máquinas sem uma justificativa relevante (MATSUO, 2017a). Dentro deste contexto foi desenvolvida, a partir do ano de 2014, uma parceria entre o Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia (PECCE), e a empresa AQTech Engenharia Ltda. para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e análise de vibrações, com participação do graduando como bolsista de iniciação científica.

A primeira fase da parceria teve suporte do CNPq (Chamada CNPq-SETEC/MEC N ° 17/2014), através do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Pesquisa aplicada em diagnóstico preditivo: Desenvolvimento e inovação para produtos de monitoramento e análise de vibrações em geradores de energia”. Nesta primeira etapa foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema e conceituada uma solução de diagnóstico de falhas em hidrogeradores através do monitoramento e análise de vibrações utilizando as técnicas de análise de valores globais e de análise de frequências notáveis. O sistema de monitoramento desenvolvido foi implementado pela empresa parceira em 17 unidades geradoras e validado através da análise dos registros obtidos e de simulações computacionais realizadas. Os resultados obtidos foram apresentados em congressos, através de dois artigos, e por meio de uma dissertação de mestrado. A primeira etapa resultou também na elaboração do projeto de uma bancada experimental para análise de desbalanceamentos em máquinas elétricas rotativas.

A segunda fase da parceria, na qual este trabalho está inserido, foi realizada com amparo da FAPESC (Chamada Pública FAPESC nº 08/2016), através do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Diagnóstico preditivo: Melhoria na proposta de novo produto para monitoramento e análise de vibrações em geradores de energia”. Nesta etapa foi realizada a continuidade dos trabalhos da primeira fase. A bancada de testes foi instalada no laboratório do PECCE e entrou em operação, com motor de indução alimentado por inversor para controle de velocidade e sistema de eixo mecânico com possibilidade de inserção de desbalanceamentos controlados. Os projetos mecânico e elétrico da bancada são apresentados neste trabalho. Além

disso, foi realizada a instalação na bancada de um sistema de monitoramento de vibrações proposto nos projetos e trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo PECCE. A relação de equipamentos utilizados para o sensoriamento e aquisição de dados e o projeto elétrico da instrumentação para monitoramento de vibrações são apresentados neste trabalho. Foram também elaborados procedimentos de ensaios para incluir a modelagem de falhas por desbalanceamento na bancada.

Realizaram-se ensaios e os dados obtidos pelo sistema de aquisição foram salvos em forma de registros digitais. Os sinais obtidos nos ensaios foram processados em software aplicando as três principais técnicas de análise de vibrações propostas nos projetos e trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo PECCE: (a) análise de severidade através do nível global de vibração; (b) análise de frequências notáveis; e (c) análise de orbitais. Este trabalho de conclusão de curso contém a apresentação e comparação dos resultados iniciais obtidos.

Desta forma, o trabalho realizado procura contribuir com o desenvolvimento de um sistema de monitoramento realizando uma investigação experimental comparativa entre técnicas de análise de vibrações para diagnóstico de desbalanceamento aplicadas em bancada de testes em ambiente controlado, de modo a verificar a viabilidade da utilização da bancada para o desenvolvimento de modelos aplicados em hidrogeradores.

A apresentação do informe técnico intitulado “Metodologia para o diagnóstico de defeitos em hidrogeradores através da análise de vibrações em sistemas de monitoramento permanente utilizando técnicas no domínio do tempo e frequência”, de coautoria do graduando, no XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXIV SNPTEE), sinalizou o interesse do setor no diagnóstico de defeitos para este tipo de máquinas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma investigação teórico-experimental para avaliar a eficácia de sistemas de monitoramento e técnicas de análise de vibrações no diagnóstico de desbalanceamento em máquinas elétricas de

baixa rotação, contribuindo assim para o aprimoramento dos sistemas de diagnóstico preditivo existentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Documentar os projetos mecânico e elétrico da bancada experimental do PECCE;
- b) Realizar a instalação na bancada de um sistema de monitoramento de vibrações proposto nos projetos e trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo PECCE;
- c) Documentar a relação de equipamentos utilizados para o sensoriamento e aquisição de dados e o projeto elétrico da instrumentação para monitoramento de vibrações na bancada;
- d) Realizar ensaios na bancada, conforme metodologia de monitoramento desenvolvida, especificando procedimentos realizados, desbalanceamentos provocados e configurações para aquisição de dados;
- e) Analisar os resultados iniciais obtidos nos registros da bancada comparando as técnicas utilizadas.

1.4 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura, que contém a fundamentação teórica a respeito de máquinas elétricas rotativas e sobre o defeito de desbalanceamento mecânico do eixo. Além disso, é definida uma metodologia para monitoramento e análise de vibrações, resultado de pesquisa bibliográfica realizada e de trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo PECCE.

O capítulo 3 contém os resultados iniciais da aplicação da metodologia para monitoramento e análise de desbalanceamento do eixo na bancada através dos primeiros ensaios realizados e da análise dos dados obtidos.

Por fim, o capítulo 4 apresenta as considerações finais e as sugestões para os trabalhos futuros.

Além disso, no apêndice A é apresentado o relatório da bancada experimental de ensaios de desbalanceamento do eixo instalada no laboratório do PECCE, contendo as relações e especificações de equipamentos, projetos mecânico e elétrico e informações operacionais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a teoria e o equacionamento utilizados como base para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e análise de vibrações, com ênfase no diagnóstico de desbalanceamento mecânico em máquinas elétricas rotativas. Os temas contemplados são: máquinas elétricas rotativas, em particular motores de indução trifásicos e hidrogeradores; fundamentos mecânicos de desbalanceamento do eixo; e monitoramento e análise de vibrações, incluindo a tecnologia e topologia de sensoriamento, hardware para aquisição de sinais e ferramentas matemáticas para análise e processamento de sinais.

2.1 Máquinas elétricas rotativas

Existe uma grande variedade de tecnologias e aplicações para máquinas elétricas rotativas, podendo operar como motor, gerador ou compensador, tanto em corrente contínua (cc) como em corrente alternada (ca), de forma síncrona ou assíncrona. Porém, neste capítulo o estudo das características técnicas e operacionais de motores de indução trifásicos e de hidrogeradores é priorizado devido à disponibilidade destes tipos de máquinas para testes de validação da metodologia de monitoramento e análise de vibrações proposta.

2.1.1 Motor de indução trifásico

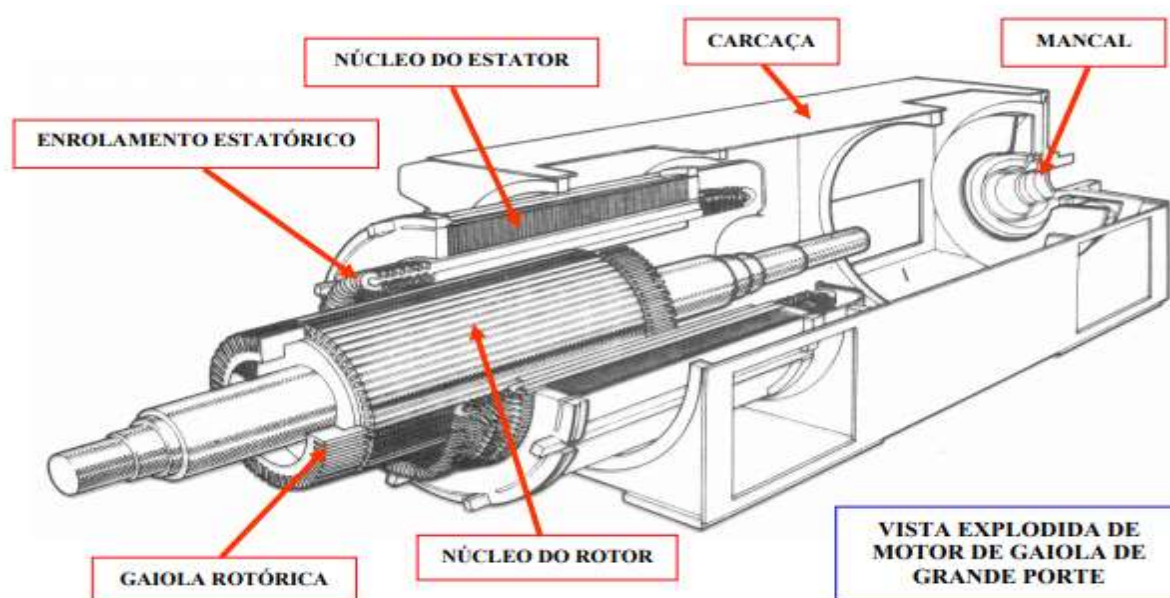
O motor de indução trifásico (MIT) é o tipo de motor mais utilizado na indústria (BENBOUZID; KLIMAN, 2003). Teve a utilização difundida devido à sua alimentação em corrente alternada, que permite uma conexão direta na rede elétrica. Além disso, é considerado um motor robusto, flexível e de baixo custo.

2.1.1.1 Aspectos construtivos e de funcionamento

O MIT é uma máquina que realiza a conversão de energia eletromagnética em energia mecânica por meio de dois componentes principais: o estator e o rotor.

O estator é a parte estacionária do motor. É construído com material ferromagnético de alta permeabilidade e tem como funções básicas alojar em suas ranhuras os enrolamentos estatóricos e compor o circuito magnético, facilitando o estabelecimento e a circulação do campo magnético. Já o rotor é a parte móvel do motor. Também é construído com material ferromagnético de alta permeabilidade e tem como funções básicas alojar em suas ranhuras os enrolamentos rotóricos (rotor bobinado) ou a gaiola (rotor com gaiola de esquilo), e também ajuda a compor o circuito magnético (KOSOW, 1991). A figura 1 apresenta uma visão geral da construção típica de um motor de indução com rotor em gaiola.

Figura 1 - Motor de indução com rotor em gaiola



Fonte: USP (2006).

Quanto ao princípio de funcionamento, o motor de indução opera baseado na indução eletromagnética sobre o rotor (gaiola ou enrolamentos curto-circuitados) provocada pelo movimento do campo girante (f_s) criado no estator pela alimentação alternada trifásica. Essa indução dá origem às correntes rotóricas que proporcionam o movimento de rotação (f_r) e o torque mecânico (T_m) ao rotor (FITZGERALD, 2006). Porém, no MIT existe uma diferença entre a velocidade do campo girante e a do rotor de acordo com o torque exigido na máquina. Com o aumento da carga, maior é a diferença de velocidade e mais lento é o rotor. Desta forma ocorre o aumento da variação de fluxo e da corrente induzida no rotor e, conseqüentemente, o aumento do torque mecânico.

2.1.1.2 Classificação e principais aplicações

Os motores de indução trifásicos são fabricados em diversas configurações, variando quanto ao tipo de rotor, categoria de torque, níveis de tensão, corrente e potência nominal, além do número de polos, rotação nominal e outras características.

Os rotores do tipo gaiola são de construção simples e de grande robustez, com baixo índice de manutenção, e por isto possuem uma ampla gama de aplicações. Como desvantagem, possuem um elevado nível de corrente na partida, que em geral fica entre 6 a 10 vezes a corrente nominal, sendo necessário muitas vezes a utilização de métodos de controle de partida, como chave estrela triângulo, chave compensadora e soft-start. Já os rotores do tipo bobinado têm uma construção mais complexa e de maior custo, exigindo maior manutenção. Porém, possuem a vantagem de possibilitar o controle da corrente de partida e da velocidade de rotação, sendo utilizados em partida sob carga e em aplicações que exigem controle de velocidade (KOSOW, 1991).

Quanto às características de torque, os motores de indução são divididos nas categorias N, H e D. Os motores da categoria N possuem baixo torque de partida e são utilizados em bombas, compressores, exaustores e outras aplicações. Os da categoria H possuem um torque maior que a categoria N, sendo utilizados para acionamento de cargas com alta inércia. E os motores da categoria D possuem o maior torque de partida, sendo recomendados para acionamento de cargas que possuem partidas sucessivas e necessitam de elevados torques de partida como, por exemplo, em motores de moinho.

2.1.1.3 Mancais de rolamento

Os mancais de rolamento são componentes da estrutura do MIT que têm a função de dar sustentação e permitir o movimento de rotação do rotor e de eixos acoplados. São constituídos basicamente de dois anéis (pistas), um interno e outro externo, e um conjunto de esferas ou cilindros posicionados em uma gaiola deslizante entre os anéis. A figura 2 ilustra a forma construtiva típica de rolamentos cilíndricos e de esferas.

Figura 2 - Rolamentos cilíndricos e de esferas



Fonte: GONÇALVES (2013).

Devido à larga utilização de mancais de rolamento em aplicações industriais com motores de indução, é comum que depois de certo tempo de operação ocorram defeitos nos componentes dos rolamentos. Estes defeitos podem ocorrer nas pistas (interna ou externa), nos elementos rolantes (esféricos ou cilíndricos) ou na gaiola. Para cada tipo de defeito, ocorrerá um aumento da vibração em uma frequência específica, dependendo da localização do defeito no rolamento. Quando uma área defeituosa faz contato com a sua superfície produz pulsos periódicos de curta duração. Os períodos com que se produzem tais pulsos dependem da geometria do rolamento, da velocidade de rotação e da localização do defeito (ALMEIDA, 2007).

2.1.1.4 Velocidade de rotação

Conforme descrito no subitem 2.1.1.1 a velocidade do rotor em um MIT depende do campo girante estabelecido no estator e do torque mecânico no rotor. Com o aumento da carga ocorre uma diminuição na velocidade do rotor, enquanto a velocidade do campo girante permanece constante. Esta diferença é denominada escorregamento (s). A equação (2.1) mostra o cálculo do escorregamento do motor (FITZGERALD, 2006).

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2.1)$$

Onde:

s = Escorregamento;

N_s = Velocidade do campo girante, em RPM;

N_r = Velocidade do rotor, em RPM.

Com relação ao campo girante, tem sua velocidade definida de acordo com o número de polos dos enrolamentos do estator e com a frequência de alimentação elétrica do motor. A equação (2.2) apresenta o cálculo da velocidade do campo girante (FITZGERALD, 2006).

$$N_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} \quad (2.2)$$

Onde:

N_s = Velocidade do campo girante [rpm];

f_s = Frequência de alimentação elétrica [Hz];

p = Número de polos.

Substituindo a equação (2.2) em (2.1), obtém-se a equação (2.3) que determina a velocidade do rotor de um MIT em função do escorregamento, da frequência de alimentação e do número de polos.

$$N_r = \frac{120 \cdot f_s}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.3)$$

A alteração do número de polos ocorre de forma discreta, pois estes só existem aos pares e em valores pré-definidos, geralmente iguais a 2, 4, 6 ou 8. Já o valor da frequência de alimentação pode ser ajustado de forma contínua através de sistemas eletrônicos como o inversor de frequência (KOSOW, 1991).

2.1.1.5 Acionamento e alimentação via inversor de frequência

O inversor de frequência permite o controle da velocidade e do torque de motores de indução trifásicos. Controlando o sinal elétrico de alimentação do MIT, o

inversor altera a forma de onda para ajustar a frequência e amplitude do sinal e regular o torque mecânico e a velocidade de rotação do rotor. Conforme artigo técnico do fabricante WEG (2016, apud HONORATO, 2017), o controle da velocidade é realizado diretamente através do ajuste da frequência de alimentação e o controle do torque mecânico ocorre através da variação proporcional da frequência e da amplitude da tensão de alimentação, mantendo constante o fluxo magnetizante. Desta forma é possível realizar o acionamento do motor sem induzir picos elevados de corrente durante a partida do rotor e ajustar a velocidade e o torque de forma contínua durante a operação da máquina.

Porém, os inversores eletrônicos podem introduzir significativo conteúdo harmônico no sinal de alimentação (PWM) do MIT, o que deve ser considerado no diagnóstico de falhas através de sistemas preditivos. De acordo com Oliveira (2013, apud HONORATO, 2017), geralmente estes harmônicos localizam-se em regiões de alta frequência, próximos à frequência de chaveamento do inversor (f_c).

2.1.1.6 Defeitos elétricos e mecânicos

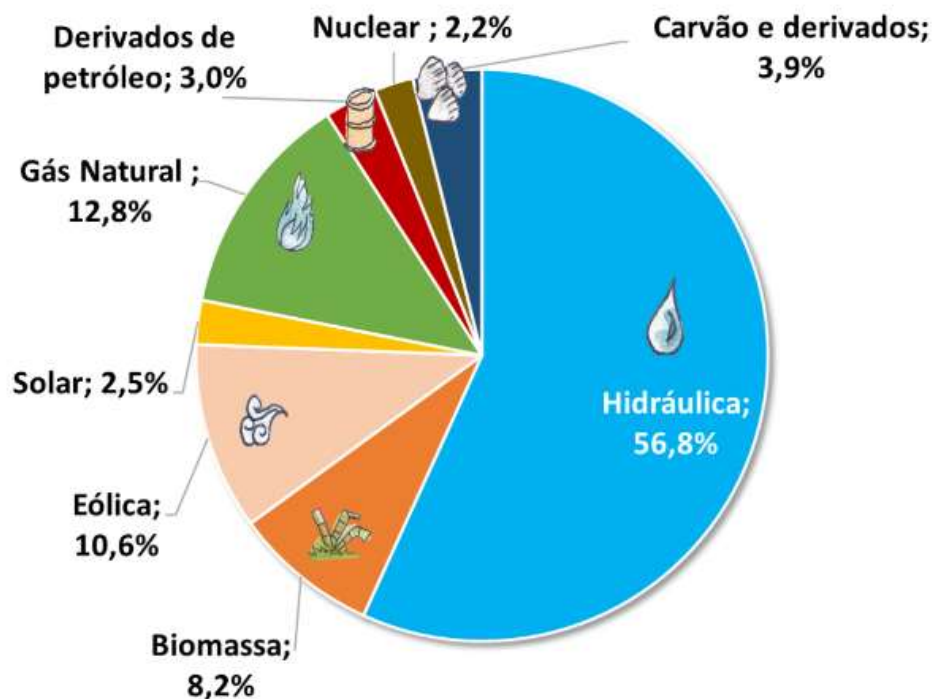
Os principais defeitos elétricos e mecânicos que ocorrem em motores de indução trifásicos são: desbalanceamento do eixo, defeitos no mancal de rolamentos, barras do rotor quebradas e curto circuito de espiras do estator. Conforme o escopo das técnicas de análise de vibrações deste trabalho, a ênfase é em relação ao primeiro defeito citado, que será detalhado na seção 2.2.

2.1.2 Hidrogerador

O hidrogerador é a máquina mais utilizada para geração de energia elétrica no Brasil. Devido à grande disponibilidade de recursos hídricos a matriz elétrica nacional é predominantemente hidráulica, com 1476 empreendimentos em operação e um total de 109,659 GW de potência instalada (SIGA-ANEEL, 2022). Considerando que a maioria destes empreendimentos é composto por mais de um hidrogerador, o número de unidades instaladas deste tipo de máquina no país se torna ainda maior. Desta forma, fica clara a importância do desenvolvimento de tecnologia que permita a otimização da operação e manutenção destes ativos. A figura 3 apresenta um gráfico

com os percentuais das fontes energéticas que compõem a matriz elétrica brasileira, com destaque para o potencial hidráulico.

Figura 3 - Matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE (2022).

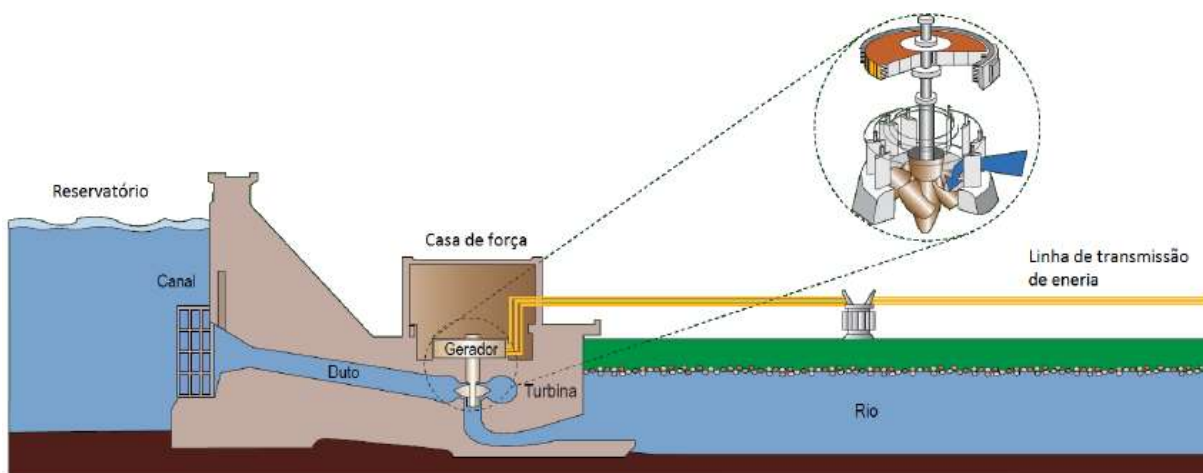
2.1.2.1 Usinas Hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas

Uma usina hidrelétrica é um conjunto de obras e de equipamentos (civis, mecânicos, hidráulicos, etc.), que tem por finalidade gerar energia elétrica por meio do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. A energia mecânica é convertida em energia elétrica, por meio de uma turbina hidráulica e de um gerador, sendo a energia elétrica transmitida por linhas de transmissão e que são interligadas à rede de distribuição.

A estrutura da usina é composta basicamente por reservatório, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro. O reservatório tem o objetivo de armazenar água, permitindo ainda a formação do desnível necessário para configuração da energia potencial hidráulica. O sistema de captação e adução é formado por túneis, canais ou condutos metálicos (condutos forçados), que tem a função de levar a água até a casa de força. Nesta instalação estão as unidades

geradoras hidrelétricas (UGH), responsáveis pela conversão da energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica (MATSUO, 2017a). A figura 4 apresenta um esquemático simplificado desta conversão.

Figura 4 - Usina Hidrelétrica



Fonte: MATSUO (2017a).

A potência instalada é o fator determinante para classificação de uma usina. Para isso, a resolução nº 673 da ANEEL (2015) adota três classificações:

- a) Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH, com até 3 MW de potência instalada);
- b) Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH, entre 3,1 MW e 30 MW de potência instalada);
- c) Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30 MW de potência instalada).

Além disso, diferentemente das UHEs que se utilizam de reservatórios para armazenar grandes volumes de água, as PCHs devem possuir área de reservatório de, no máximo, 13 km². Elas operam a fio d'água, ou seja, permitem a passagem contínua de toda água e requerem uma pequena área inundável, muitas vezes equivalente ao nível das cheias do rio.

A tabela 1 apresenta um levantamento sobre a quantidade de empreendimentos hidráulicos em operação e a potência fiscalizada, de acordo com a classificação da usina. Os valores de porcentagem são referentes ao montante de potência fiscalizada considerando toda a matriz elétrica.

Tabela 1 - Empreendimentos hidráulicos em operação

<i>Tipo</i>	<i>Quantidade</i>	<i>Potência Fiscalizada (kW)</i>	<i>%</i>
CGH	723	854.326	0,46
PCH	534	5.610.178	2,99
UHE	219	103.195.357	55,06
TOTAL	1476	109.659.861	58,51

Fonte: Adaptado de SIGA-ANEEL (2022).

2.1.2.2 Unidades geradoras hidrelétricas

As unidades geradoras hidrelétricas (UGH) estão localizadas na casa de força da usina e são equipadas com hidrogeradores. O hidrogerador é formado basicamente por uma turbina hidráulica, eixo mecânico, mancais e gerador. Quanto ao gerador, por se tratar de uma máquina síncrona, é composto por um rotor, com enrolamentos de campo (excitação) alimentados em corrente contínua, e um estator, com enrolamentos de armadura. O princípio de funcionamento é baseado na indução eletromagnética. O movimento rotativo do rotor (acionado pela turbina hidráulica) cria uma variação de fluxo magnético que induz uma força eletromotriz (fem) sobre os enrolamentos de armadura, o que caracteriza a conversão de energia mecânica em energia elétrica (FITZGERALD, 2006).

No hidrogerador a velocidade do rotor é síncrona e, portanto, pode ser determinada pela equação (2.2). O rotor é de polos salientes e a escolha do número de polos é ditada pela rotação mais apropriada para a máquina primária. Turbinas hidráulicas trabalham com baixa rotação, sendo por isso necessário geradores com alto número de polos. A velocidade de rotação nominal de turbinas hidráulicas varia em função da pressão hidráulica existente, da altura da queda d'água e do tipo de turbina, mas geralmente se situa entre 50 e 600 rpm. E de forma geral hidrogeradores são construídos com eixo vertical, possuindo grande diâmetro e pequeno comprimento axial (KOSOW, 1991).

Na operação de uma usina conectada ao sistema elétrico, a corrente de excitação é utilizada para controlar o valor eficaz da fem e o fornecimento de potência reativa ao Sistema Interligado Nacional (SIN), e o torque mecânico produzido pela máquina primária é utilizado para controlar a frequência de variação da fem e o fornecimento de potência ativa ao SIN. Para isto existem diferentes tipos de máquinas primárias, com sistemas de excitação, reguladores de velocidade e reguladores de tensão.

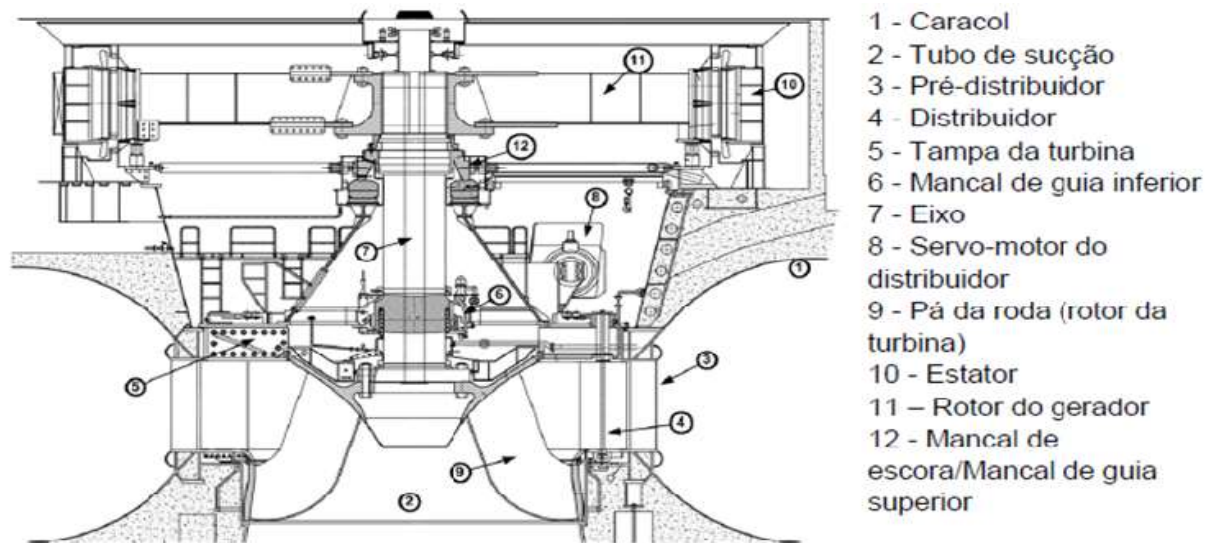
2.1.2.3 Turbinas hidráulicas

Existem quatro tipos principais de turbinas hidráulicas: Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo. Porém a mais utilizada no sistema elétrico brasileiro é a turbina do tipo Francis.

As turbinas Francis possuem um rotor na forma de um cilindro vazado com a parede lateral formada por palhetas curvas. A água de entrada é dirigida por um tubo em espiral e um sistema de palhetas estáticas que a forçam a atravessar radialmente a parede do rotor, empurrando as pás deste. A água sai pela base do rotor com pressão e velocidade muito reduzidas. Possui pré-distribuidor e distribuidor. O pré-distribuidor é um conjunto de pás fixas, responsável por dar um ângulo de entrada para a água, aumentando o rendimento. O distribuidor é um conjunto de pás-móveis, responsável pelo controle da quantidade de água que entra no rotor, assim variando a potência gerada (FITZGERALD, 2006). A figura 5 apresenta uma visão geral desses componentes.

A água proveniente do conduto chega ao caracol (1) que a distribui para o rotor da turbina através do pré-distribuidor (3) e distribuidor (4), que controla o fluxo de água. Essa água, em contato com a pá da roda da turbina (9) faz o conjunto entrar em rotação, e é escoada através do tubo de sucção (2) de volta para o rio. O eixo (7) transmite o movimento de rotação para o rotor do gerador (11). Esse movimento faz com que no estator (10) exista uma tensão elétrica e potência gerada. O mancal de escora/mancal guia superior (12) é responsável por suportar todo o peso do conjunto girante, e evitar que o mesmo saia do seu centro de rotação, assim como o mancal guia inferior (6).

Figura 5 - Turbina Francis



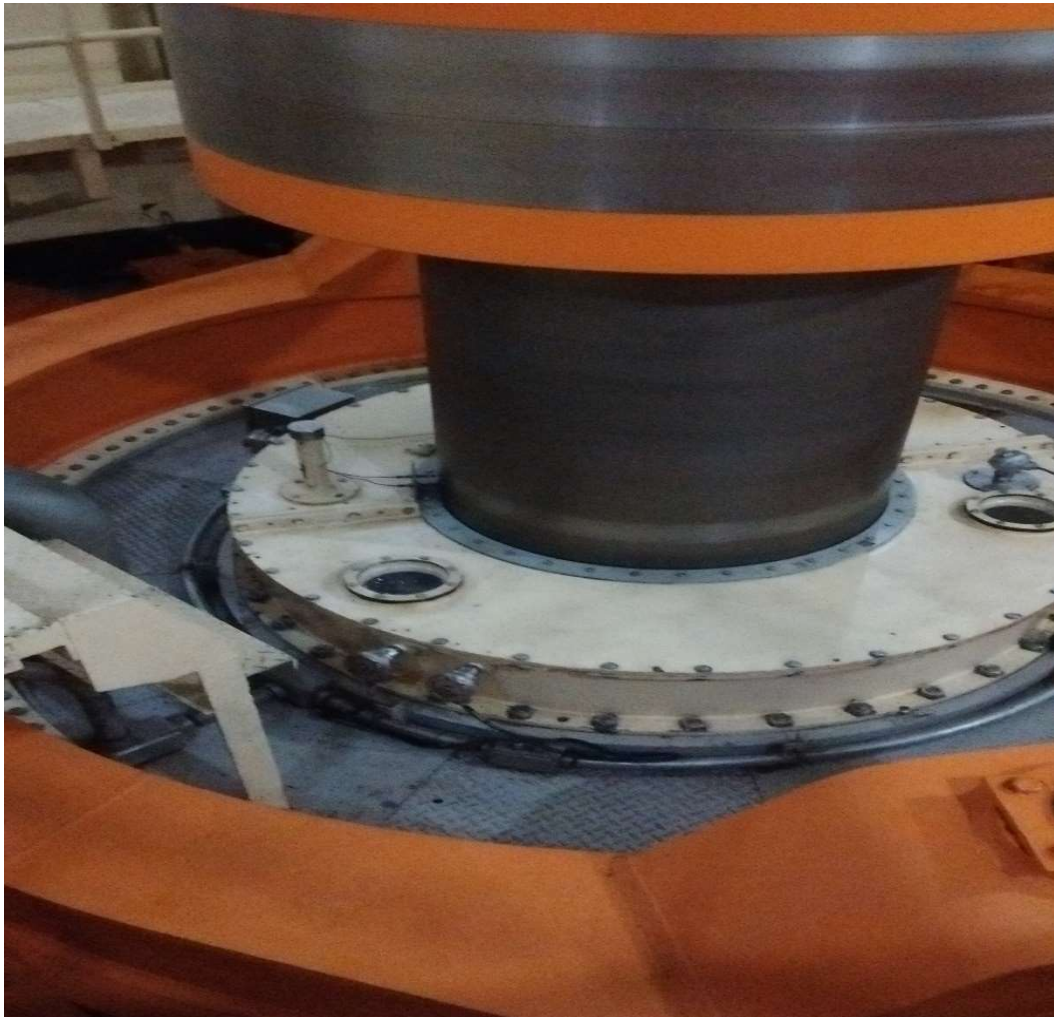
Fonte: MATSUO (2017a).

Turbinas Francis são adequadas para operar entre quedas de 40 m até 400 m. A Usina hidrelétrica de Itaipu assim como a Usina hidrelétrica de Tucuruí, Furnas e outras no Brasil funcionam com turbinas tipo Francis com cerca de 100 m de queda d'água.

2.1.2.4 Mancais de deslizamento

Mancais de deslizamento são amplamente utilizados em hidrogeradores para guiar o eixo e absorver os esforços radiais das unidades geradoras. São lubrificados por uma fina camada de óleo e possuem uma folga em relação ao eixo, permitindo que este deslize durante suas rotações. Esta característica deve ser considerada em sistemas de monitoramento de vibrações, podendo ser utilizados sensores de proximidade para medição do deslocamento do eixo dentro do mancal de deslizamento. A figura 6 exemplifica um mancal guia da turbina, com folga entre o eixo e o mancal de deslizamento e sensores de proximidade instalados radialmente.

Figura 6 - Mancal de deslizamento



Fonte: Acervo pessoal (2022).

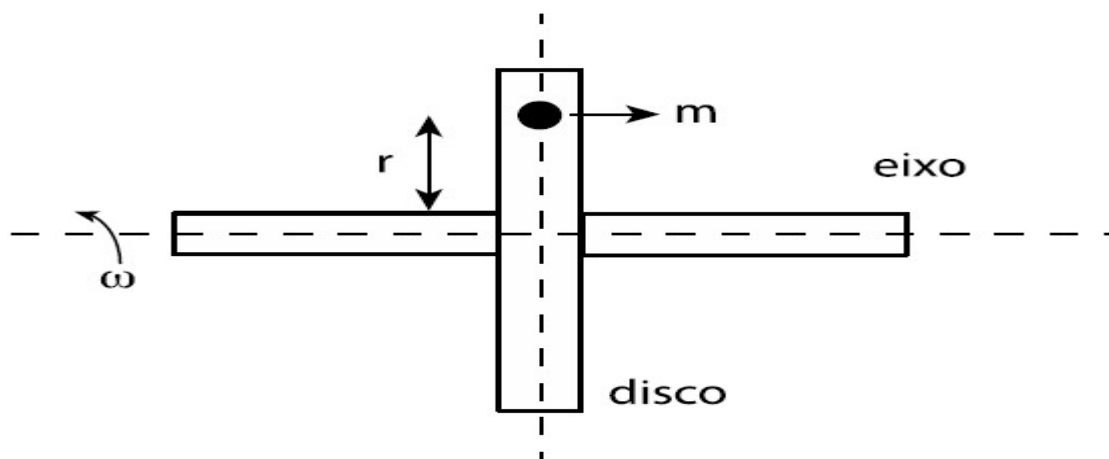
2.1.2.5 Defeitos elétricos e mecânicos

Alguns dos principais defeitos elétricos e mecânicos que ocorrem durante a operação de hidrogeradores são: Desbalanceamento e desalinhamento mecânico do eixo, cavitação, defeitos nos mancais de deslizamento, defeitos nas palhetas do distribuidor, defeitos nas pás da turbina, desbalanceamento de carga e defeitos no estator. Conforme o escopo do trabalho o defeito estudado é o de desbalanceamento mecânico do eixo e o tema é aprofundado na seção 2.2.

2.2 Desbalanceamento mecânico do eixo

O desbalanceamento é a condição na qual o centro de massa do eixo mecânico não coincide com o eixo de rotação. De acordo com Wowk (1991, apud FERRAZ, 2013) a razão disso é uma distribuição de massa assimétrica em relação ao eixo de rotação, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Desbalanceamento



Fonte: Ferraz (2013).

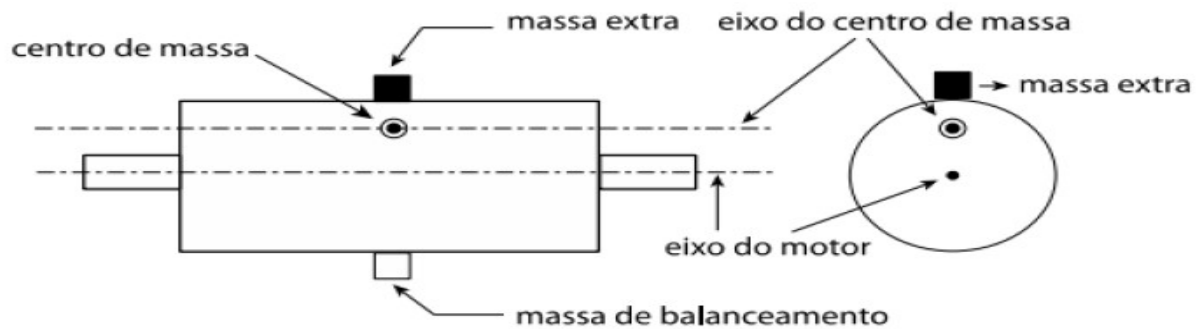
O desbalanceamento do rotor é o defeito mais comum em máquinas elétricas rotativas (JALAN; MOHANTY, 2009; PATEL; DARPE, 2009). Geralmente está associado ao desbalanceamento da carga ou do próprio eixo mecânico, tendo como principais causas defeitos de fabricação ou desgaste do eixo, além de problemas inseridos por erros na instalação ou manutenção. O desbalanceamento produz vibrações de elevada amplitude na mesma frequência de rotação do eixo da máquina (em $1X f_r$). O defeito de desbalanceamento do eixo é dividido em três tipos: Estático, dinâmico e acoplado.

2.2.1 Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático ocorre quando o eixo do centro de massa está deslocado paralelamente ao eixo de rotação. É chamado de estático porque mesmo com a máquina desligada o eixo gira até que o ponto de maior massa esteja para baixo. Pode ser corrigido com a adição de uma massa de balanceamento diametralmente oposta ao centro de gravidade em um plano perpendicular ao eixo de

rotação (FERRAZ, 2013). A figura 8 exemplifica uma configuração de desbalanceamento estático.

Figura 8 - Desbalanceamento Estático

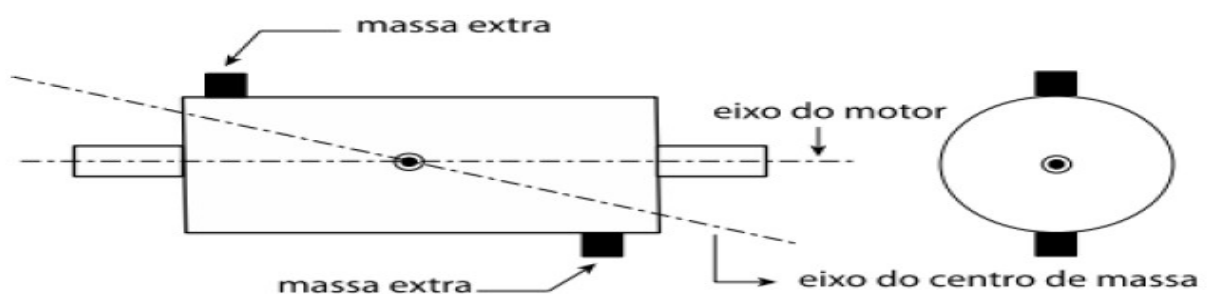


Fonte: Ferraz (2013).

2.2.2 Desbalanceamento acoplado

No desbalanceamento acoplado o eixo do centro de massa intercepta o eixo de rotação no centro de gravidade do rotor. Este desbalanceamento é equivalente a duas massas em dois planos diferentes, deslocadas de 180° entre si. A figura 9 apresenta um exemplo desta configuração. O desbalanceamento acoplado pode ser corrigido com a adição de duas massas de balanceamento também em planos opostos e deslocadas de 180° entre si, estando diametralmente opostas às massas equivalentes.

Figura 9 - Desbalanceamento Acoplado



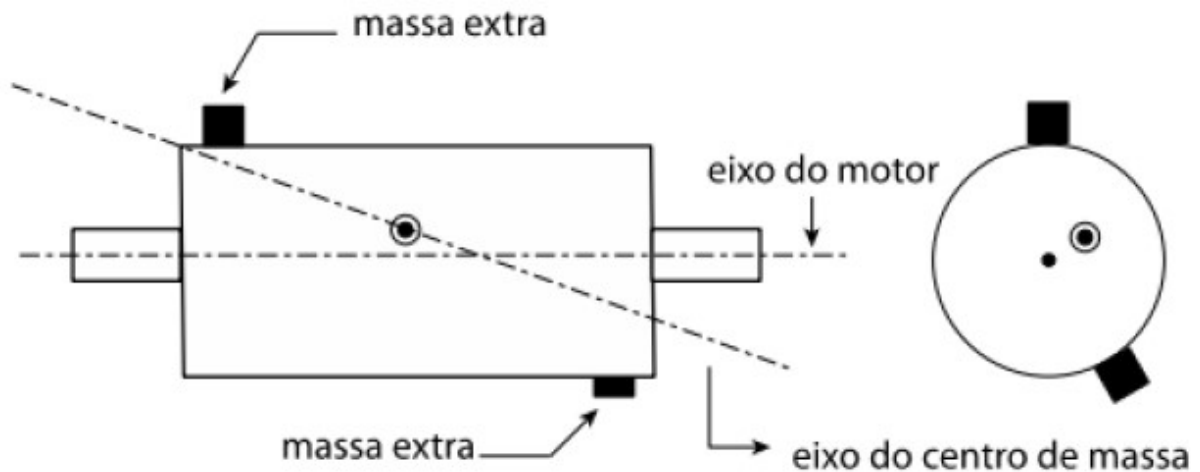
Fonte: Ferraz (2013).

2.2.3 Desbalanceamento dinâmico

O desbalanceamento dinâmico ocorre quando o eixo do centro de massa não é paralelo ao eixo de rotação e nem o intercepta. É o desbalanceamento mais

comum, ocorrendo em qualquer configuração não simétrica. Pode ser corrigido com a adição de pelo menos duas massas de balanceamento em planos perpendiculares ao eixo de rotação. Em um rotor real, é comum que ocorra uma série de pequenos desbalanceamentos que podem ser definidos por um desbalanceamento dinâmico equivalente. A figura 10 mostra um exemplo de desbalanceamento dinâmico.

Figura 10 – Desbalanceamento Dinâmico



Fonte: Ferraz (2013).

2.3 Metodologia para monitoramento e análise de vibrações

A análise de vibrações é utilizada em sistemas de monitoramento para avaliar a condição e realizar o diagnóstico preditivo de defeitos e falhas em máquinas rotativas. As vibrações geradas por máquinas de baixa rotação e de grande porte, como no caso de hidrogeradores, são de pequena amplitude e o nível de ruído pode ser o suficiente para dificultar a identificação das vibrações geradas pela presença de defeitos. Por isso é necessário a utilização de tecnologia de sensoriamento e hardware para aquisição de dados de alta precisão. Além disto existem topologias de sensoriamento recomendadas por normas internacionais e metodologias de análise de dados sugeridas pela literatura técnica que contribuem para a correta identificação e diagnóstico de defeitos em máquinas elétricas rotativas.

Desta forma, a metodologia proposta tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e análise de vibrações, com ênfase na utilização de ferramentas eficazes para o diagnóstico de desbalanceamento mecânico do eixo em máquinas elétricas de baixa rotação.

Para isso, estabelece uma configuração de tecnologia e topologia adequada para o monitoramento de vibrações de partes estacionárias e de partes móveis das máquinas, de acordo as normas técnicas ISO 10816 (ISO, 2001b) e ISO 7919 (ISO, 2001a), através da instalação de sensores de aceleração nos mancais e de sensores de proximidade e sensor de fase próximos ao eixo, e o hardware necessário para a aquisição dos sinais.

Além disso, propõe a análise dos dados coletados pelo sistema de monitoramento através de três técnicas de análise de vibrações: análise de valores globais, análise de frequências notáveis e análise de orbitais.

2.3.1 Tecnologia de sensores

O desenvolvimento tecnológico de sensores associado à sua redução de custos tem permitido a implementação de sistemas de monitoramento da condição em maior número e com maior precisão. Para o monitoramento de vibrações, três principais tipos de sensores são utilizados: sensor de aceleração, sensor de proximidade e sensor de fase.

2.3.1.1 *Sensor de aceleração*

Existem três principais tipos de sensores de aceleração: piezoelétricos, piezo-resistivos e capacitivos. O sensor de aceleração tipicamente utilizado para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas rotativas possui cristal piezoelétrico, e é utilizado para converter a força exercida sobre ele por uma vibração (aceleração) em um sinal elétrico proporcional à intensidade da força.

Na análise de vibrações pode ser utilizado para medir o valor rms da velocidade de vibração absoluta (V_{rms} , mm/s) nos mancais provocado pelo movimento de rotação do eixo mecânico, através da integração do sinal de aceleração.

As principais informações técnicas que devem ser consideradas na escolha do sensor de aceleração são: a tensão de alimentação (normalmente 24 Vcc), que deve estar de acordo com a alimentação do sistema de monitoramento; o sinal de saída (normalmente em mV), preferencialmente padrão ICP e de acordo com o

hardware de aquisição de dados; a sensibilidade, recomendada alta precisão (100 mV/g ou superior); a faixa de medição (normalmente entre ± 50 g), de acordo com as amplitudes de aceleração da vibração; e a resposta em frequência e frequência de ressonância, de acordo a faixa de excitação do espectro analisado, sendo tipicamente encontrados sensores com resposta na faixa de 1 Hz a 15 kHz. A figura 11 apresenta um exemplo de sensor de aceleração piezoelétrico.

Figura 11 - Sensor de aceleração



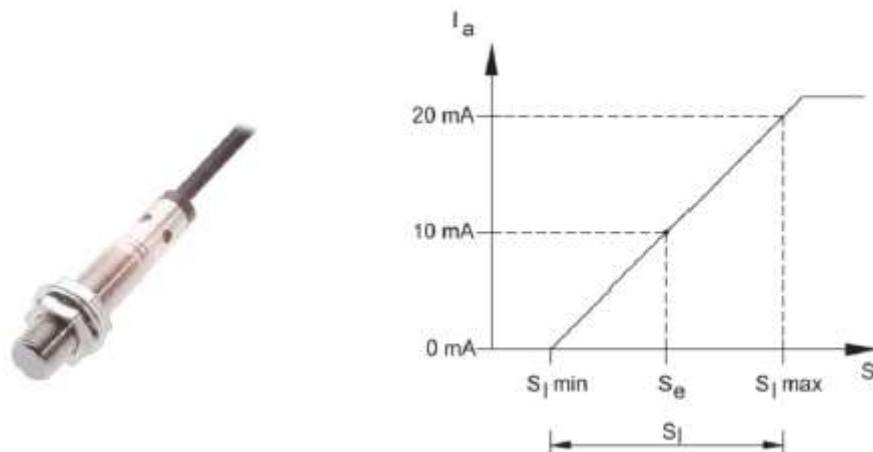
Fonte: PCB Piezotronics (2022).

2.3.1.2 Sensor de proximidade

Existem três principais tipos de sensores de proximidade: indutivos, capacitivos e fotoelétricos. O sensor de proximidade tipicamente utilizado para monitoramento de vibrações em máquinas elétricas rotativas é do tipo indutivo, utilizado para detecção sem contato de objetos metálicos. Tem como função medir o deslocamento relativo do eixo mecânico (S , μm) no eixo de cada sensor. As principais informações técnicas que devem ser consideradas para escolha do sensor de proximidade são: a tensão de alimentação (normalmente 24 Vcc), que deve estar de acordo com a alimentação do sistema de monitoramento; o sinal de saída (normalmente entre 4 e 20 mA), de acordo com o hardware de aquisição de dados; a faixa de medição, de acordo com as amplitudes de deslocamento do eixo e da distância de instalação do sensor (normalmente entre 0,5 e 10 mm) e a resposta em frequência, de acordo a faixa de excitação do espectro analisado, sendo tipicamente encontrados sensores com resposta até 500 Hz.

A figura 12 apresenta um exemplo de sensor de proximidade e sua curva do sinal de saída, com resposta linear proporcional a distância entre o sensor e a parte metálica do eixo.

Figura 12 - Sensor de proximidade



Fonte: Balluff (2022).

2.3.1.3 Sensor de fase

O sensor de fase tipicamente utilizado em máquinas elétricas rotativas é do tipo óptico (fotoelétrico) retro reflexivo com laser. Possui a necessidade do uso de um espelho prismático. A luz emitida para o espelho prismático é polarizada e refletida retornando para o sensor. A polarização realizada pelo espelho prismático garante que o receptor do sensor detecte apenas a luz emitida, ignorando luzes não polarizadas.

Tem como função medir a passagem de uma fita adesiva reflexiva (espelho prismático) fixada no eixo mecânico para obter sua velocidade de rotação (N_r , rpm), e também estabelecer um ponto de referência (fase) para agrupar e analisar os dados dos sinais de vibrações.

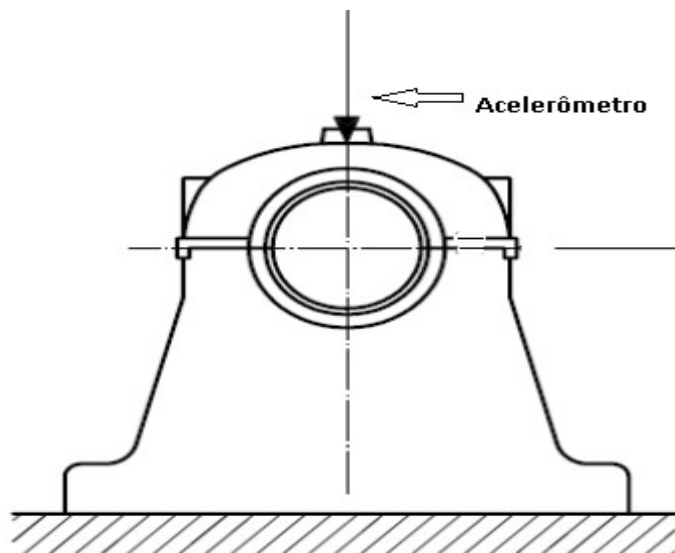
As principais informações técnicas que devem ser observadas na escolha do sensor de fase são: a tensão de alimentação, que deve estar de acordo com a alimentação do sistema de monitoramento; o sinal de saída (normalmente em V e de dois estados), de acordo com o hardware de aquisição de dados; a faixa de medição,

de acordo com a distância de instalação do sensor ao eixo; e o limite de frequência máxima, de acordo com a frequência de rotação do eixo.

2.3.2 Topologia de sensoriamento

A análise de vibrações se divide entre medidas das partes estacionárias e das partes rotacionais da máquina. Para as partes estacionárias, utiliza-se os sinais dos acelerômetros instalados nos mancais para calcular o valor rms de velocidade de vibração absoluta (V_{rms} , mm/s) de acordo com a norma ISO 10816 (ISO, 2001b). A figura 13 mostra o posicionamento do sensor de aceleração diretamente acima da estrutura do mancal.

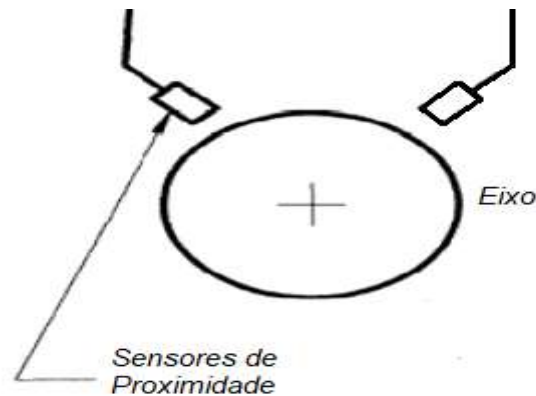
Figura 13 - Posição do sensor de aceleração



Fonte: Adaptado de ISO 10816 (2001b).

Para as partes rotacionais, neste caso o eixo mecânico, utilizam-se dois sensores de proximidade montados radialmente em partes estacionárias, próximos aos mancais e perpendiculares entre si, para medir o deslocamento relativo (S , μm) do eixo em cada sensor de acordo com a norma ISO 7919 (ISO, 2001a). A figura 14 mostra o posicionamento dos sensores de proximidade em relação ao eixo mecânico.

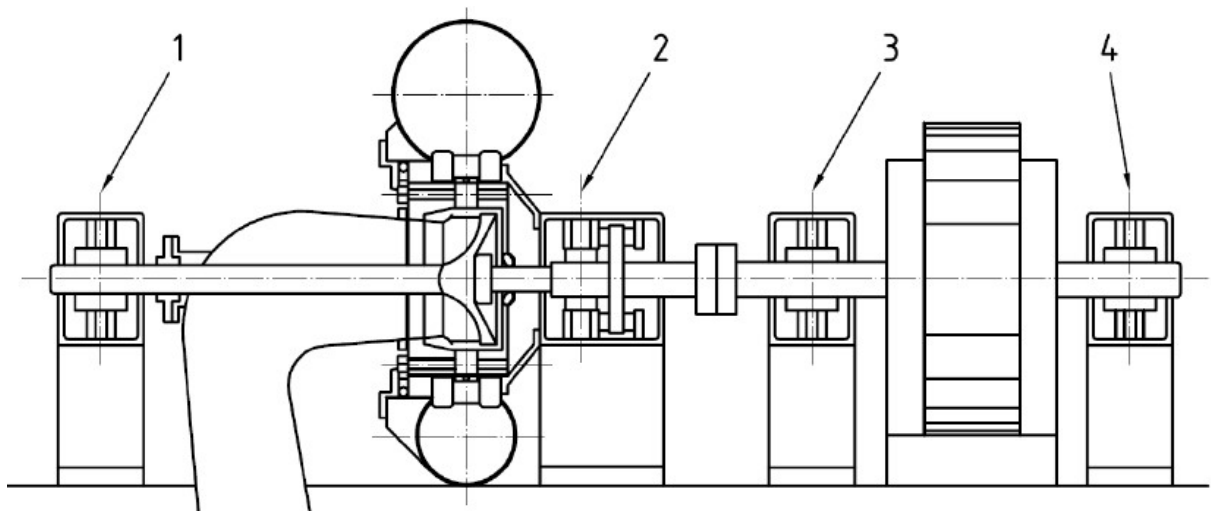
Figura 14 - Posição dos sensores de proximidade



Fonte: Adaptado de ISO 7919 (2001a).

A figura 15 apresenta os pontos sugeridos pela norma ISO 7919 para a distribuição da instalação dos sensores ao longo de uma unidade geradora de eixo horizontal. De forma geral, é sugerida a instalação de um sensor de aceleração e dois sensores de proximidade em cada mancal guia ou mancal de escora.

Figura 15 - Pontos de instalação dos sensores



Fonte: ISO 7919 (2001a).

E ainda, através do sinal de fase, é medido o período de rotação do eixo e calculada sua velocidade de rotação, em rpm, ao longo do tempo, e também o ponto de referência (fase) para agrupar e analisar os dados dos sinais de vibrações. O sensor de fase pode ser instalado em qualquer posição estacionária da máquina, desde que não exista nenhuma obstrução para o laser entre o sensor e a fita reflexiva instalada no eixo.

2.3.3 Hardware para aquisição de dados

O sistema de monitoramento deve incluir uma unidade eletrônica de aquisição de dados, do tipo conversor analógico-digital de sinais, além de software compatível e capacidade computacional para armazenamento e análise (processamento) de sinais.

A unidade de aquisição de dados deve possuir um número de canais (entradas analógicas) de acordo com o número de sensores utilizados para o monitoramento e nos níveis de amplitude dos sinais elétricos de saída dos sensores. De forma geral é recomendado por MATSUO (2017a) a seguinte configuração mínima:

- 4 canais de aquisição de dados por mancal monitorado, sendo:
 - 2 entradas com faixa de 4 a 20 mA compatíveis com sensores de proximidade;
 - 1 entrada padrão ICP compatível com sensor de aceleração;
 - 1 entrada com faixa de 0 a 24 V compatível com sensor de referência de fase.

Além disso, a frequência de amostragem (f_s) deve ser alta e os registros devem conter uma quantidade grande de amostras para obter melhor resolução na análise dos sinais. Para a frequência de amostragem é necessário que a mesma seja duas vezes maior (teorema de Nyquist) que o limite da faixa com a maior frequência de defeito esperada (f_{max}), conforme equação 2.4. Os limites da faixa estão relacionados com múltiplos e submúltiplos da velocidade de rotação do eixo e com os tipos de defeitos analisados. Já o tempo total do registro (T), está relacionado com o limite inferior da faixa de frequências de defeitos (f_{min}) e deve conter um número de amostras (n), conforme equação 2.5, suficiente para permitir a análise espectral através da transformada rápida de Fourier (FFT), que será detalhada no item 2.3.4, devendo o número de amostras ser uma potência de dois.

$$f_s > 2 \times f_{max} \quad (2.4)$$

Onde:

f_s = Frequência de amostragem, Hz;

f_{max} = Frequência máxima de defeito, Hz;

$$n > \frac{f_s}{f_{min}} \quad (2.5)$$

Onde:

n = Número de amostras;

f_s = Frequência de amostragem, Hz;

f_{min} = Frequência mínima de defeito, Hz.

De forma geral, para análise de desbalanceamento em máquinas de baixa rotação (até 600 rpm ou 10 Hz), considerando uma faixa de frequência de defeitos entre 0,2 e 500 Hz, é recomendada a seguinte configuração mínima:

- Frequência de amostragem (f_s) de 1 kHz simultânea em todos os canais, suficiente para análise na faixa de até 500 Hz;
- Número de amostras (n) superior a 5000 e equivalente a 2^n , portanto 8192 amostras (tempo de 8,192s nessa frequência de amostragem).

Os dados devem ser armazenados em arquivos para serem processados offline.

2.3.4 Ferramentas matemáticas para análise e processamento de sinais

São utilizadas algumas ferramentas matemáticas para o processamento dos sinais através das técnicas de análise propostas na metodologia:

a) Filtros de sinais;

Os filtros são utilizados na análise de vibrações para retirar a componente de frequência zero (cc) dos sinais, para retirar ruídos dos sinais e para selecionar uma faixa de frequências específica para análise, normalmente associada com a frequência de rotação do eixo. Os filtros podem ser implementados em hardware, através de placas de circuitos de componentes eletrônicos, ou em software, através da utilização de filtros digitais. Os tipos mais utilizados para o processamento dos sinais são:

- Filtro passa-alta, utilizado para retirar a componente cc do sinal de saída do sensor de aceleração;

- Filtro passa-baixa, utilizado para retirar ruídos elétricos do sinal, normalmente relacionados a frequência da rede (60 Hz) ou a frequências de chaveamento eletrônicas ($10 \text{ kHz} < f_c < 20 \text{ kHz}$), como de inversores;
- Filtro passa-faixa, utilizado para selecionar uma faixa específica de frequência para análise, como por exemplo a frequência de rotação nominal do eixo na análise de desbalanceamento.

b) Valor médio;

O valor médio é calculado através da média aritmética pelo somatório das amostras coletadas divididas pelo número de amostras, conforme a equação (2.6).

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (2.6)$$

Onde:

$\bar{X}$ = Valor médio;

X_n = Valor da amostra n;

n = Número de amostras.

O valor médio é utilizado na análise de vibrações para o cálculo da posição do centro da linha do eixo e para retirada de ruídos aleatórios.

c) Valor eficaz;

O valor eficaz ou valor rms (*Root Mean Square*) consiste na raiz do valor médio das amostras elevadas ao quadrado, conforme a equação (2.7).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (2.7)$$

Onde:

X_{rms} = Valor eficaz;

X_i = Valor da amostra i;

n = Número de amostras.

O valor eficaz é utilizado na velocidade de vibração dos mancais através dos sinais dos sensores de aceleração para comparar com os limites estabelecidos na norma ISO 10816 ou em outros valores de referência.

d) Valor de pico e valor de pico a pico;

O valor de pico a pico é a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de um sinal em um determinado período, conforme a equação (2.8).

$$X_{p-p} = x_{\max} - x_{\min} \quad (2.8)$$

O valor de pico é o maior valor (em módulo) de um sinal em um determinado período. Também pode ser expresso como a metade do valor de pico a pico, conforme a equação (2.9).

$$X_p = \frac{x_{p-p}}{2} \quad (2.9)$$

Os valores de pico e de pico a pico são utilizados na análise de vibrações para determinar as amplitudes dos deslocamentos relativos do eixo mecânico e comparar com os limites estabelecidos na norma ISO 7919 ou com outros valores de referência.

e) Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Para o tratamento de sinais digitalizados (discretos), são utilizadas as ferramentas de DFT (*Discrete Fourier Transform*) e a FFT (*Fast Fourier Transform*), que nada mais é que um algoritmo otimizado da DFT.

É utilizada para a análise espectral dos sinais de vibração através da técnica de frequências notáveis, de forma que é possível obter as amplitudes de diferentes componentes de frequência de um sinal resultante, onde cada componente pode estar associada a um determinado tipo de defeito. Para permitir a aplicação da FFT é necessário que o número de amostras do sinal seja um múltiplo de 2^n e que seja grande o suficiente para que a resolução da FFT (Δf) seja menor que a frequência mínima ($f_{\min}$) na faixa de análise, conforme equações 2.10 e 2.11:

$$\Delta f = \frac{f_s}{n} \quad (2.10)$$

Onde:

Δf = Resolução da FFT;

f_s = Frequência de amostragem;

n = Número de amostras.

$$\Delta f < f_{min} \quad (2.11)$$

Onde:

Δf = Resolução da FFT;

f_{min} = Frequência mínima da faixa;

2.3.5 Técnicas de análise de vibrações

Nesta seção são especificadas as três técnicas sugeridas para a análise dos registros de dados obtidos pelo sistema de monitoramento. As técnicas propostas são: análise de valores globais, análise de frequências notáveis e análise de orbitais. As análises são realizadas através de software, utilizando ferramentas matemáticas e de processamento de sinais, de acordo com as técnicas utilizadas.

A definição das técnicas utilizadas foi realizada com base em pesquisa bibliográfica e conhecimento experimental desenvolvido anteriormente durante projetos de pesquisa realizados no Laboratório de Computação Científica Aplicada (PECCE).

2.3.5.1 *Análise de valores globais*

A técnica de análise de valores globais é definida nas normas técnicas ISO 7919 - *Mechanical Vibration of Non-reciprocating Machines - Measurement on Rotating Shafts and Evaluation Criteria* e ISO 10816 - *Mechanical Vibration –*

Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts. Consiste no monitoramento no domínio do tempo de valores globais de vibração dos sensores de aceleração e de proximidade para comparação com valores limites de severidade apresentados nas normas, cartas técnicas ou de acordo com o projeto e histórico de operação de cada máquina. Também é possível monitorar o comportamento dos valores globais ao longo do tempo para verificar tendências de alteração no padrão de vibrações do eixo.

A medição é realizada de forma independente em cada sensor, agrupados por mancal, conforme definido a seguir:

Sensor de aceleração

- Aplicar filtro do tipo passa-alta para retirar componente cc do sinal, obtendo sinal alternado de aceleração da vibração do mancal;
- Aplicar integrador ao sinal de aceleração para obter um sinal alternado de velocidade da vibração do mancal;
- Utilizar o sinal do sensor de referência de fase para agrupar os dados de vibração do mancal para cada rotação do eixo, obtendo um sinal alternado de velocidade de vibração do mancal para cada rotação;
- Aplicar o cálculo de valor eficaz no sinal alternado de velocidade de vibração do mancal para cada rotação, obtendo um valor eficaz de velocidade de vibração (V_{rms} , mm/s) para cada rotação;
- Aplicar o cálculo de valor médio entre os valores eficazes obtidos de cada rotação, obtendo o valor eficaz médio de velocidade de vibração do mancal no ensaio.

Sensor de proximidade

- Aplicar o cálculo de valor médio ao sinal de deslocamento, para obter a posição média do eixo na direção de medição do sensor;
- Subtrair do sinal de deslocamento o valor médio calculado, obtendo o sinal alternado de deslocamento do eixo na direção do sensor;
- Utilizar o sinal do sensor de referência de fase para agrupar os dados de deslocamento para cada rotação do eixo, obtendo um sinal alternado de deslocamento do eixo na direção do sensor para cada rotação;
- Aplicar o cálculo de valor de pico a pico no sinal de deslocamento para cada rotação, obtendo um valor de deslocamento pico a pico do eixo na direção do sensor ($S(p-p)$, μm) para cada rotação.
- Aplicar o cálculo de valor médio entre os valores de pico a pico obtidos de cada rotação, obtendo o valor de pico a pico médio de deslocamento do eixo na direção do sensor no ensaio.

Desta forma para cada ensaio realizado, será obtido para cada mancal monitorado um valor eficaz resultante da velocidade de vibração do mancal (V_{rms} ,

mm/s) através do sensor de aceleração, e dois valores de pico a pico resultantes do deslocamento do eixo ($S(p-p)$, μm), sendo um para cada sensor de deslocamento. Os valores obtidos podem ser comparados com valores limites de severidade apresentados em normas técnicas ou de acordo com o projeto de cada máquina.

Para a análise de defeito de desbalanceamento do eixo, é esperado que com o aumento do desbalanceamento ocorra também um aumento na amplitude de deslocamento do eixo provocando também um aumento na vibração dos mancais. Desta forma a técnica apresentada deve ser capaz de perceber este tipo de defeito em máquinas elétricas rotativas.

2.3.5.2 Análise de frequências notáveis

A técnica de análise de frequências notáveis está associada à análise espectral dos sinais de vibração, através da avaliação das amplitudes das diferentes componentes de frequência que compõem os sinais resultantes obtidos pelo sistema de monitoramento. Porém, com objetivo de otimizar os cálculos, foi definido por MATSUO (2017a) as chamadas frequências notáveis, que estão normalmente associadas aos principais tipos de defeitos que ocorrem em máquinas elétricas rotativas, sendo estas compostas pela frequência de rotação nominal (RN) e harmônicas e subharmônicas da mesma. Desta forma somente é necessário monitorar a amplitude nas 16 frequências sugeridas, podendo ser desconsiderado todo o restante do espectro, reduzindo significativamente os esforços de processamento de sinais. A tabela 2 apresenta as frequências notáveis e os defeitos relacionados a cada uma delas.

Tabela 2 - Frequências Notáveis

Posição	Frequência	Descrição
1	$\frac{1}{3} \times RN$	Subharmônica associada a folgas
2	$\frac{1}{2} \times RN$	Subharmônica associada a folgas
3	0,42xRN até 0,48xRN	Subharmônica associada a óleo do mancal
4	RN	Rotação nominal, associada a desbalanceamento
5	$\frac{3}{2} \times RN$	Interharmônica associada a folgas
6	2xRN	Harmônica associada a desalinhamentos
7	$\frac{5}{2} \times RN$	Interharmônica associada a folgas
8	3xRN	Harmônica associada a desalinhamentos
9	$\frac{7}{2} \times RN$	Interharmônica associada a folgas
10	4xRN	Harmônica associada a desalinhamentos
11	$\frac{9}{2} \times RN$	Interharmônica associada a folgas
12	5xRN	Harmônica associada a desalinhamentos
13	2xFrede	Harmônica associada a problemas elétricos
14	NPTxRN	Harmônica associada ao nº de pás da turbina
15	NPDxRN	Harmônica associada ao nº de palhetas do distribuidor
16	NPTxNPDxRN	Harmônica associada as duas anteriores

Fonte: Adaptado MATSUO (2017a).

Para aplicação da técnica, a medição é realizada de forma independente em cada sensor, agrupados por mancal, conforme definido a seguir:

Sensor de aceleração

- Aplicar filtro do tipo passa-alta para retirar componente cc do sinal, obtendo sinal alternado de aceleração da vibração do mancal;
- Aplicar integrador ao sinal de aceleração para obter um sinal alternado de velocidade da vibração do mancal;
- Selecionar uma quantidade de 2^n amostras do sinal para o cálculo da FFT, atendendo as condições das equações 2.10 e 2.11;
- Aplicar o cálculo da FFT, obtendo as amplitudes (V_{rms} , mm/s) das componentes das frequências notáveis.

Sensor de proximidade

- Aplicar o cálculo de valor médio ao sinal de deslocamento, para obter a posição média do eixo na direção de medição do sensor;
- Subtrair do sinal de deslocamento o valor médio calculado, obtendo o sinal alternado de deslocamento do eixo na direção do sensor;
- Selecionar uma quantidade de 2^n amostras do sinal para o cálculo da FFT, atendendo as condições das equações 2.10 e 2.11;
- Aplicar o cálculo da FFT, obtendo as amplitudes ($S(p-p)$, μm) das componentes das frequências notáveis.

Como podemos ver da posição 4 da tabela 02, para o defeito de desbalanceamento do eixo somente é esperada alterações na amplitude da componente de frequência da rotação nominal da máquina.

2.3.5.3 *Análise de orbitais*

As medidas dos sensores de proximidade também permitem conhecer o deslocamento relativo instantâneo do eixo no plano de medição dos sensores. Desta forma podemos construir o diagrama de órbita e monitorar graficamente a órbita descrita pelo centro do eixo dentro do mancal e obter informações como o deslocamento máximo (S_{max} , μm) da órbita.

O valor de S_{max} consiste no máximo deslocamento no plano de medição, em relação à posição média de deslocamento do eixo. Também pode ser descrito como o maior raio da órbita descrita pelo centro do eixo mecânico durante uma rotação. A equação (2.12) define a forma de cálculo desse valor.

$$S_{max} = \left\{ \sqrt{S_a^2(t) + S_b^2(t)} \right\}_{\max} \quad (2.12)$$

Onde S_a e S_b correspondem aos sinais de deslocamento dos sensores de proximidade a e b durante uma rotação.

Para aplicação da técnica, a medição é realizada somente nos sensores de proximidade e de forma conjunta, agrupada por mancal, conforme definido a seguir:

- Aplicar o cálculo de valor médio ao sinal de deslocamento, para obter a posição média do eixo na direção de medição do sensor;
- Subtrair do sinal de deslocamento o valor médio calculado, obtendo o sinal alternado de deslocamento do eixo na direção do sensor;
- Utilizar o sinal do sensor de referência de fase para agrupar os dados de deslocamento para cada rotação do eixo, obtendo um sinal alternado de deslocamento do eixo na direção do sensor para cada rotação;
- Plotar em um mesmo plano e em conjunto os sinais de deslocamento dos dois sensores de proximidade, para cada rotação, obtendo os diagramas de órbita do eixo no plano de medição dos sensores.
- Aplicar o cálculo de valor de S_{max} , em conjunto nos sinais de deslocamento dos dois sensores de proximidade, para cada rotação, obtendo um valor de deslocamento máximo do eixo no plano de medição dos sensores (S_{max} , μm) para cada rotação.
- Aplicar o cálculo de valor médio entre os valores de S_{max} obtidos de cada rotação, obtendo o valor de S_{max} médio de deslocamento do eixo no plano de medição dos sensores no ensaio.

Desta forma, para cada ensaio realizado será obtido para cada mancal monitorado um valor de S_{max} resultante do deslocamento do eixo (S_{max} , μm) e os diagramas de órbita para cada rotação. Os valores obtidos de S_{max} podem ser comparados com valores limites de severidade apresentados em normas técnicas ou de acordo com o projeto de cada máquina. Com relação aos diagramas de órbitas, podem ser aplicadas análises gráficas para verificar alterações na forma dos orbitais descritos pelo eixo durante as rotações.

3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA E RESULTADOS INICIAIS

O sistema de monitoramento de vibrações foi instalado na bancada do PECCE e no dia 14/08/2018, entre às 19h30min e 20h30min, com temperatura ambiente de 23 °C, foram realizados os ensaios de monitoramento de desbalanceamento mecânico do eixo conforme a metodologia proposta.

O APÊNDICE A – Relatório da Bancada Experimental de Ensaios contém uma apresentação detalhada da bancada utilizada para a realização dos ensaios, com relação dos equipamentos utilizados, os projetos mecânicos e elétricos e características técnicas de operação da bancada experimental.

Os resultados são apresentados em quatro etapas: configuração inicial, condição saudável, condição de desbalanceamento e comparação das condições.

3.1 Configuração inicial

Para verificação da instalação e configuração inicial do sistema de sensoramento e aquisição de dados foi realizado um ensaio com o eixo mecânico parado.

Parâmetros configurados:

- Faixa de frequência de defeitos: $f_{min}=0,2$ Hz e $f_{max}=500$ Hz;
- Frequência de amostragem: $f_s=7,681$ kHz;
- Tempo de registro: $T=20$ s;
- Número de amostras: $n=153.611$;
- Resolução da FFT: $\Delta f=0,05$ Hz;
- Frequência saída inversor: $f_s=0$ Hz;
- Velocidade do rotor: $N_r=0$ Hz (0 RPM).

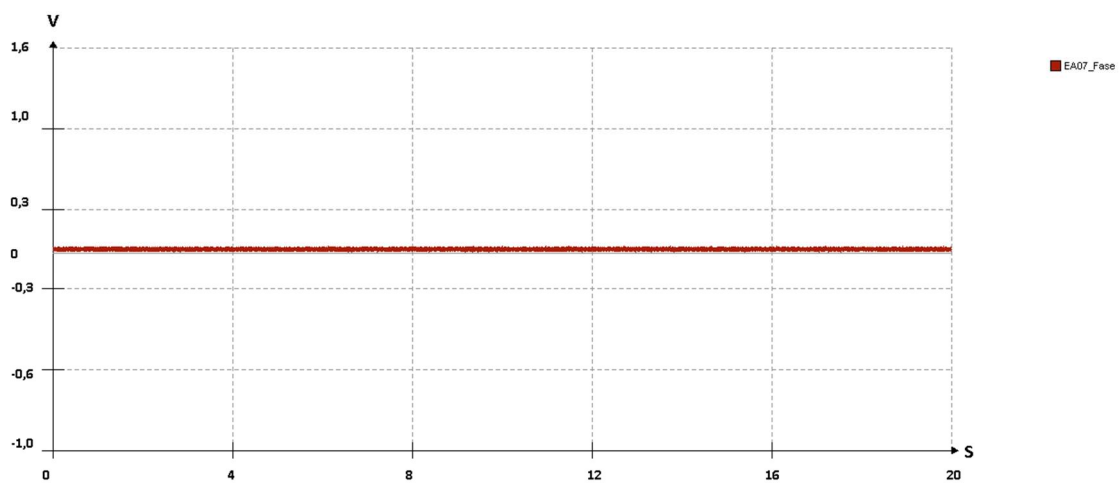
Registros realizados:

- EA01_M1d0 – Entrada analógica 01, Mancal 1, Sensor de deslocamento, Posição 0°;
- EA02_M1d90 – Entrada analógica 02, Mancal 1, Sensor de deslocamento, Posição 90°;
- EA04_M1a45 – Entrada analógica 04, Mancal 1, Sensor de aceleração, Posição 45°;
- EA05_M2d0 – Entrada analógica 05, Mancal 2, Sensor de deslocamento, Posição 0°;

- EA06_M2d90 – Entrada analógica 06, Mancal 2, Sensor de deslocamento, Posição 90°;
- EA07_Fase – Entrada analógica 07, Sensor de fase;
- EA08_M2a45 – Entrada analógica 08, Mancal 2, Sensor de aceleração, Posição 45°.

Para o sensor de referência de fase EA07_Fase, na etapa de configuração, com o eixo mecânico parado, seria esperado que não fosse identificada nenhuma rotação do eixo. A figura 16 apresenta o sinal de saída do sensor, com tensão contínua em 0,03 Vcc, sem nenhuma alteração, conforme esperado.

Figura 16 - Sensor de fase, máquina parada



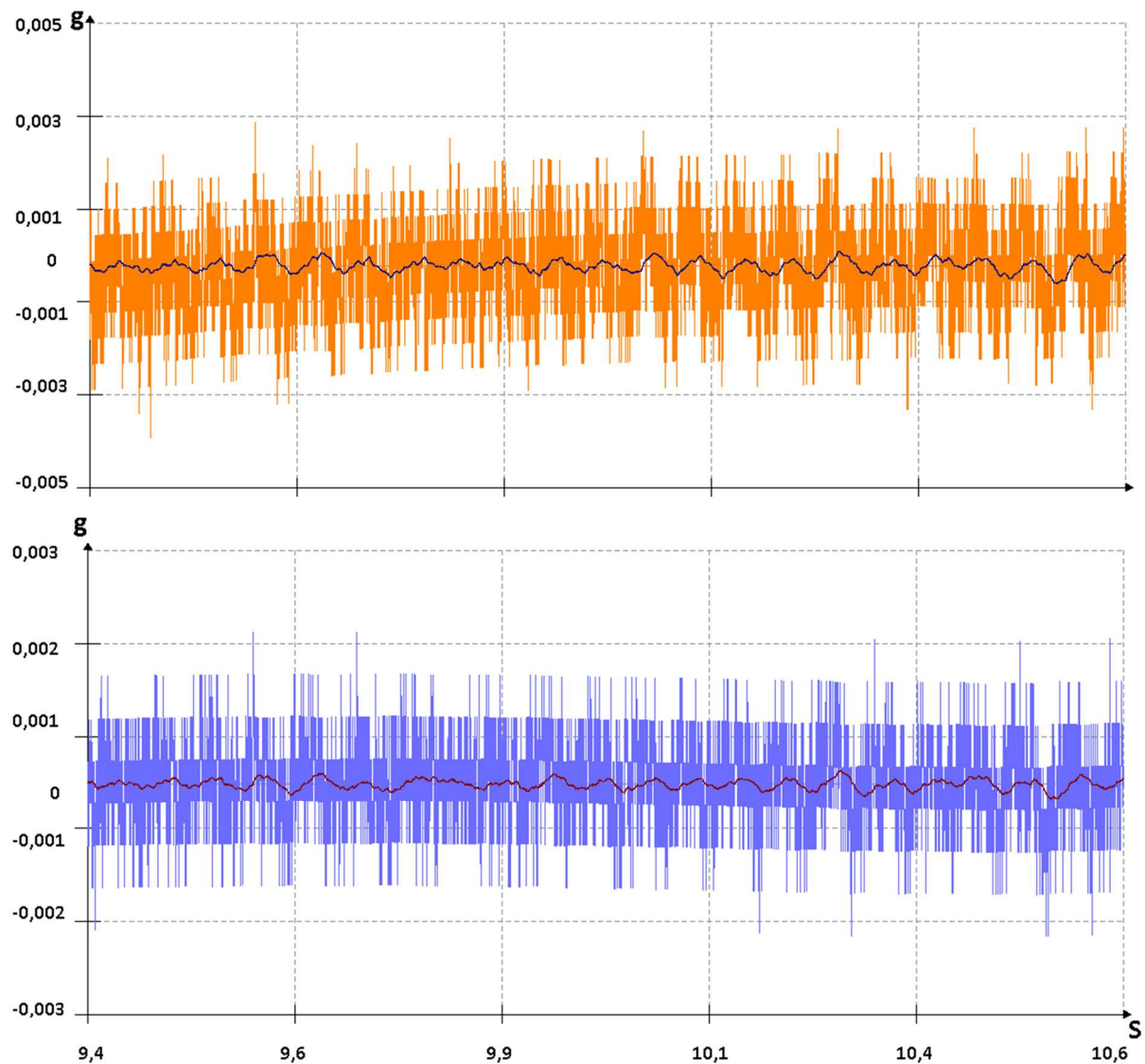
Fonte: Autoria própria (2022).

Para os sensores de aceleração, na etapa de configuração, com o eixo mecânico parado, seria esperado que não fossem medidos valores de vibração nos mancais. Após aplicação de filtro digital para retirada da componente cc e conversão da grandeza para aceleração (g , m/s^2), para o mancal M1 o valor RMS de aceleração foi $a_{1rms}=0,0009g$ e para o mancal M2 foi de $a_{2rms}=0,0005g$.

Para o monitoramento de desbalanceamento a metodologia sugere a aplicação de filtro passa-faixa na frequência da velocidade de rotação do eixo (Nr). Como nas etapas seguintes dos ensaios será utilizado a velocidade do rotor de $Nr = 5$ Hz, foram aplicados filtros digitais passa-faixa centralizados em 5 Hz nos sinais dos sensores de aceleração, que serão mantidos para as próximas etapas. A figura 17 apresenta os sinais de saída dos sensores de aceleração EA04_M1a45 e EA08_M2a45 em uma janela de 01 segundo, comparando os sinais antes e depois da

aplicação do filtro passa-faixa em 5 Hz. Para o mancal M1 o valor RMS de aceleração foi $a_{1rms}=0,0001g$ e para o mancal M2 foi de $a_{2rms}=0,0000g$. Para os ensaios os sinais dos sensores de aceleração serão mantidos na unidade de aceleração (g , m/s^2), não sendo necessária integração para conversão em velocidade, devido não existirem normas ou tabelas de referência para comparação dos limites de vibração da bancada do PECCE.

Figura 17 - Filtro sensores de aceleração, máquina parada

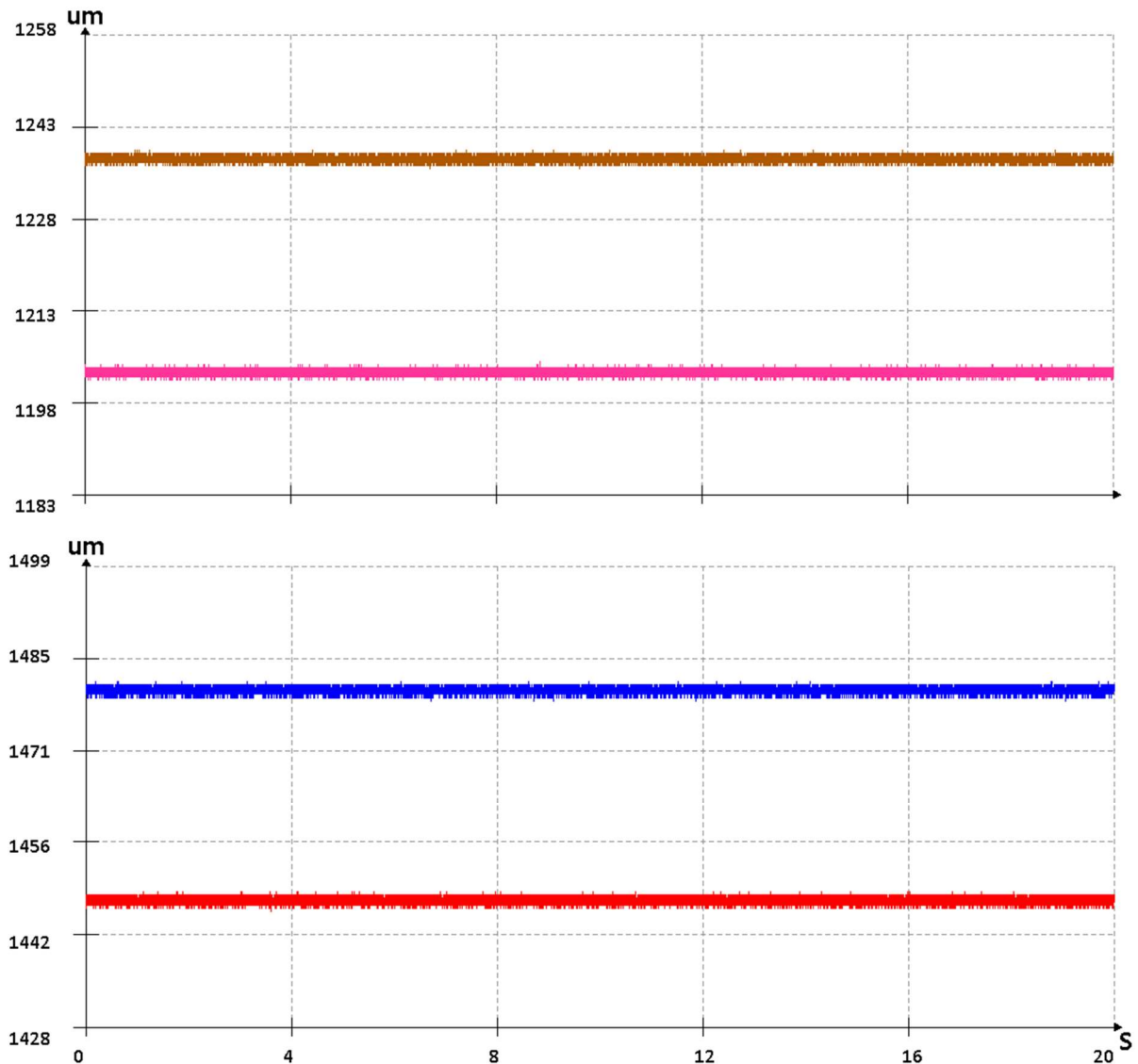


Fonte: Autoria própria (2022).

Para os sensores de proximidade, na etapa de configuração, com o eixo mecânico parado, seria esperado que não fossem medidos valores de deslocamento do eixo. A figura 18 apresenta os sinais de saída dos sensores de proximidade do mancal M1, EA01_M1d0 e EA02_M1d90, e os sinais de saída dos sensores de

proximidade do mancal M2, EA05_M2d0 e EA06_M2d90, após conversão da grandeza para deslocamento (S , μm). Foram utilizadas as medições para posicionar os sensores a uma distância do eixo dentro da faixa de medição, que vai de 500 a 2000 μm , e próxima da posição central que é de 1250 μm .

Figura 18 - Sensores de proximidade, máquina parada



Fonte: Autoria própria (2022).

Após isso, foi retirada a componente cc dos sinais, centralizando os mesmos em torno de uma posição média. Para o monitoramento de desbalanceamento a metodologia sugere a aplicação de filtro passa-faixa na frequência da velocidade de rotação do eixo (N_r). Como nas etapas seguintes dos ensaios será utilizado a velocidade do rotor de $N_r=5$ Hz, foram aplicados filtros passa-faixa centralizados em 5 Hz nos sinais dos sensores de proximidade, que serão

mantidos para as próximas etapas. Por fim, foi calculado o deslocamento pico a pico médio ($S(p-p)$, μm) com o eixo parado, resultando em $S(p-p)_0=0,09 \mu\text{m}$ e $S(p-p)_{90}=0,10 \mu\text{m}$ para o mancal M1, e $S(p-p)_0=0,08 \mu\text{m}$ e $S(p-p)_{90}=0,09 \mu\text{m}$ para o mancal M2.

A utilização dos filtros digitais foi fundamental devido a uma presença significativa de interferência elétrica na bancada, principalmente nas faixas de alimentação da rede elétrica (60 Hz) e de chaveamento do inversor (15 kHz). Com relação aos tipos de sensores, os de aceleração se mostraram mais expostos a estas interferências em comparação com os de proximidade. A figura 19 apresenta o espectro do sinal do sensor de aceleração do mancal M1 antes e depois da aplicação do filtro passa-faixa, evidenciando a importância da utilização da ferramenta digital.

Figura 19 - Filtro digital passa-faixa, sensor de aceleração M1



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2 Condição saudável

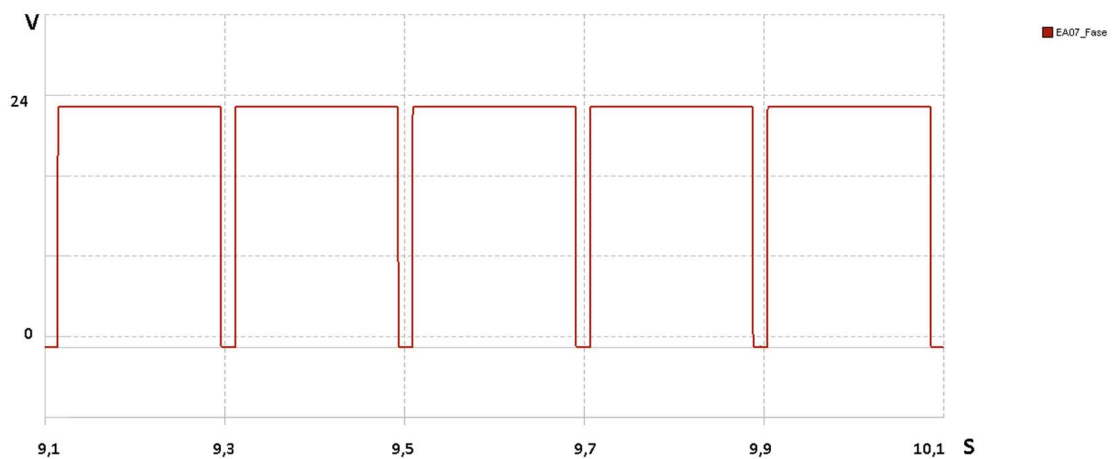
Após a configuração inicial do sistema de monitoramento e aquisição de dados, foi realizado um ensaio com o eixo mecânico em rotação, porém sem adição de nenhuma massa de desbalanceamento, para verificação da operação da bancada e identificação da assinatura dos sinais de vibração em uma condição considerada saudável.

Parâmetros configurados:

- Faixa de frequência de defeitos: $f_{min}=0,2$ Hz e $f_{max}=500$ Hz;
- Frequência de amostragem: $f_s=7,681$ kHz;
- Tempo de registro: $T=20$ s;
- Número de amostras: $n=153.611$;
- Resolução da FFT: $\Delta f=0,05$ Hz;
- Frequência saída inversor: $f_s=10$ Hz;
- Velocidade do rotor: $N_r=5$ Hz (300 RPM);
- Tipo de desbalanceamento: Nenhum.

A figura 20 apresenta o sinal de saída do sensor de referência de fase, em uma janela de 01 segundo, com tensão alternando em degrau nos valores de 0,03 e 22,90 Vcc, indicando 05 rotações do eixo conforme esperado para $N_r=5$ Hz.

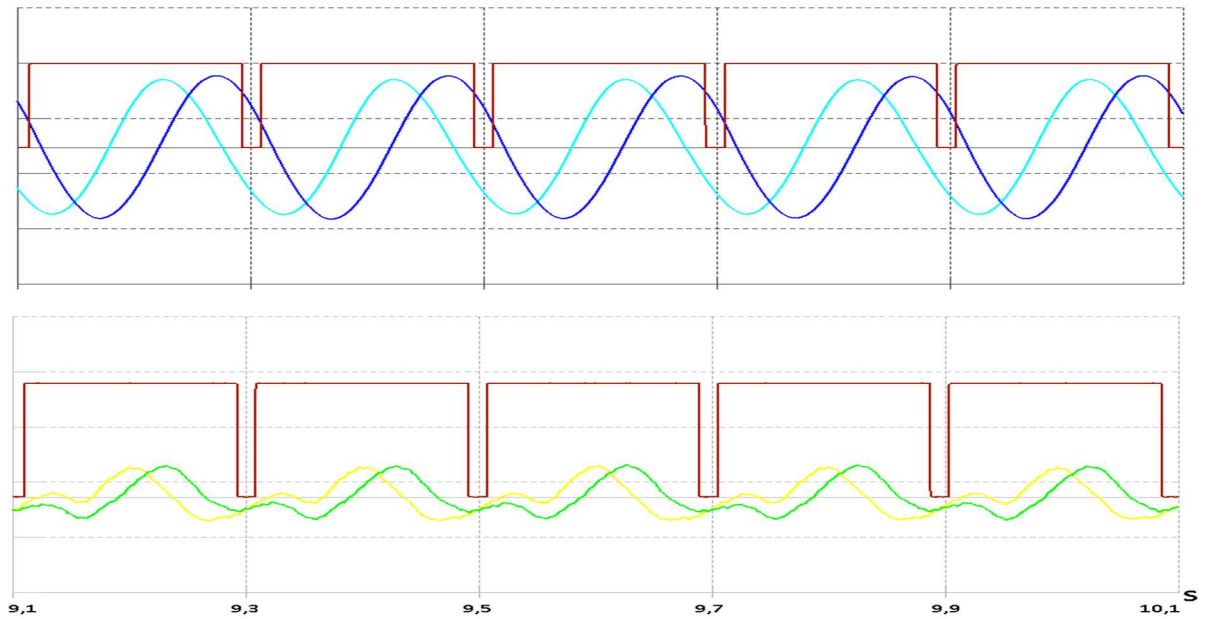
Figura 20 - Sensor de fase, máquina em rotação 5 Hz



Fonte: Autoria própria (2022).

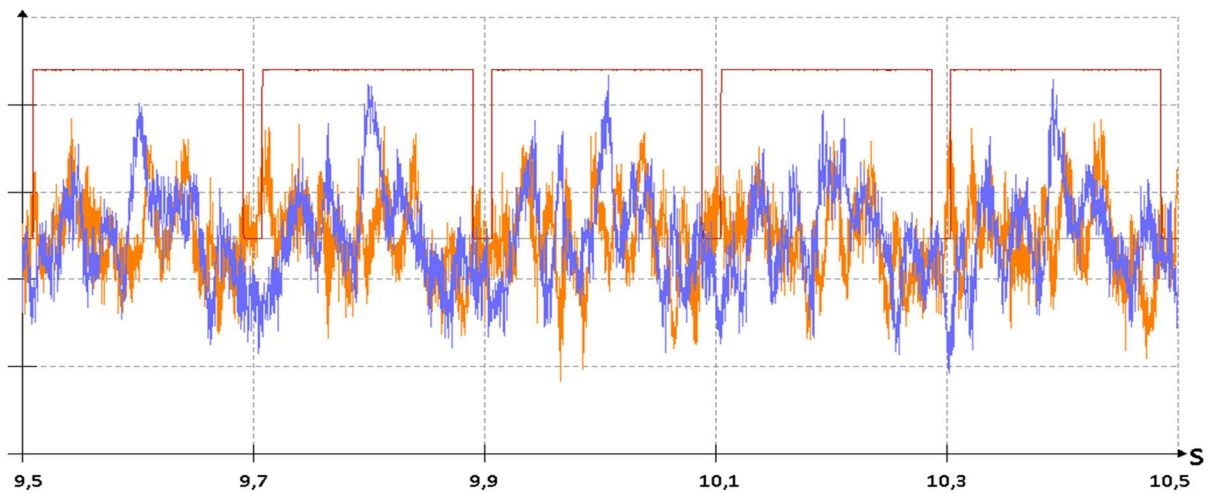
Utilizando o sinal de referência de fase é possível agrupar os dados dos sensores para cada rotação do eixo mecânico. A figura 21 apresenta os sinais obtidos para os sensores de proximidade nos mancais M1 e M2 em conjunto com o sinal de referência de fase, identificando os padrões de deslocamento nas direções de medição durante as rotações mecânicas, e a figura 22 apresenta os sinais obtidos para os sensores de aceleração nos mancais M1 e M2 em conjunto com o sinal de referência de fase, identificando os padrões de aceleração da vibração dos mancais durante as rotações mecânicas do eixo.

Figura 21 - Sensor de fase e sensores de proximidade, mancais M1 e M2



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 22 - Sensor de fase e sensores de aceleração, mancais M1 e M2



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir dos dados obtidos do sensor de referência de fase, sensores de aceleração e sensores de proximidade foram aplicadas as 03 técnicas de análise de vibração propostas na metodologia obtendo os parâmetros de saída de cada técnica.

3.2.1 Análise de valores globais, condição saudável

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.1, obtendo os parâmetros de saída para cada sensor.

Sensores de aceleração:

- Valor eficaz médio de aceleração do mancal M1: $a1_{rms} = 0,0005g$
- Valor eficaz médio de aceleração do mancal M2: $a2_{rms} = 0,0006g$

Sensores de proximidade:

- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M1: $S(p-p)_0 = 37,63 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M1: $S(p-p)_{90} = 40,18 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M2: $S(p-p)_0 = 11,28 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M2: $S(p-p)_{90} = 11,20 \mu m$.

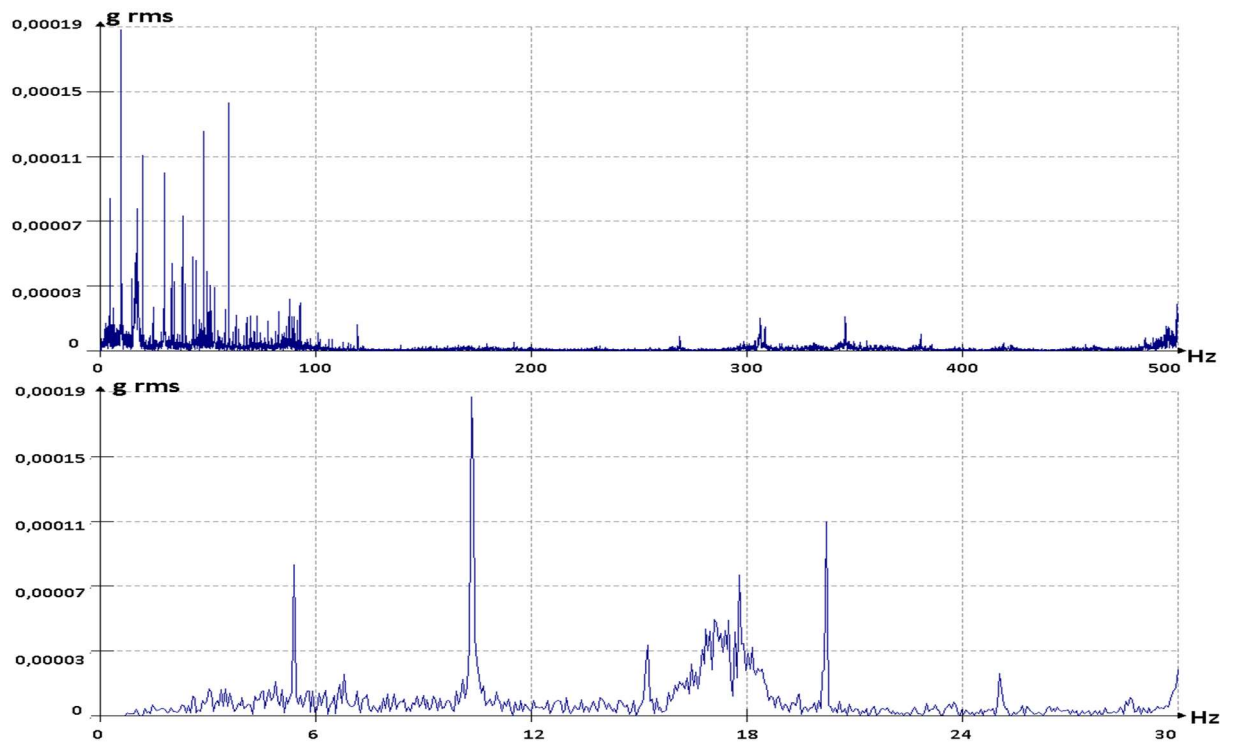
3.2.2 Análise de frequências notáveis, condição saudável

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.2, obtendo a representação da janela da FFT e os parâmetros de saída para cada sensor. Para análise de desbalanceamento do eixo, conforme indicado na posição 4 da tabela 02 de frequências notáveis, será considerado apenas a amplitude da componente na frequência de rotação do eixo.

Sensores de aceleração:

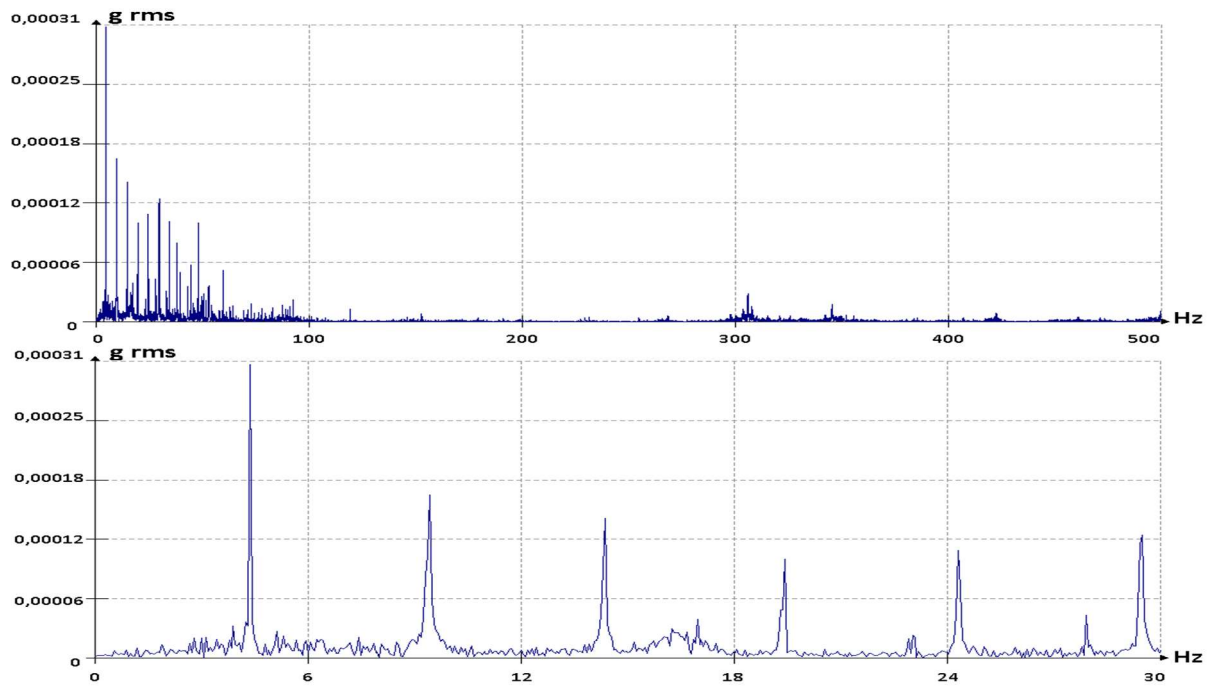
As figuras 23 e 24 apresentam as janelas de FFT obtidas para os sinais dos sensores de aceleração dos mancais M1 e M2, com cortes para visualização da janela entre 0 e 500 Hz e entre 0 e 30 Hz, respectivamente.

Figura 23 - FFT sensor de aceleração, mancal M1



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 24 - FFT sensor de aceleração, mancal M2



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com as janelas de FFT obtidas, é possível verificar a presença de componentes com amplitudes elevadas em determinadas frequências do espectro,

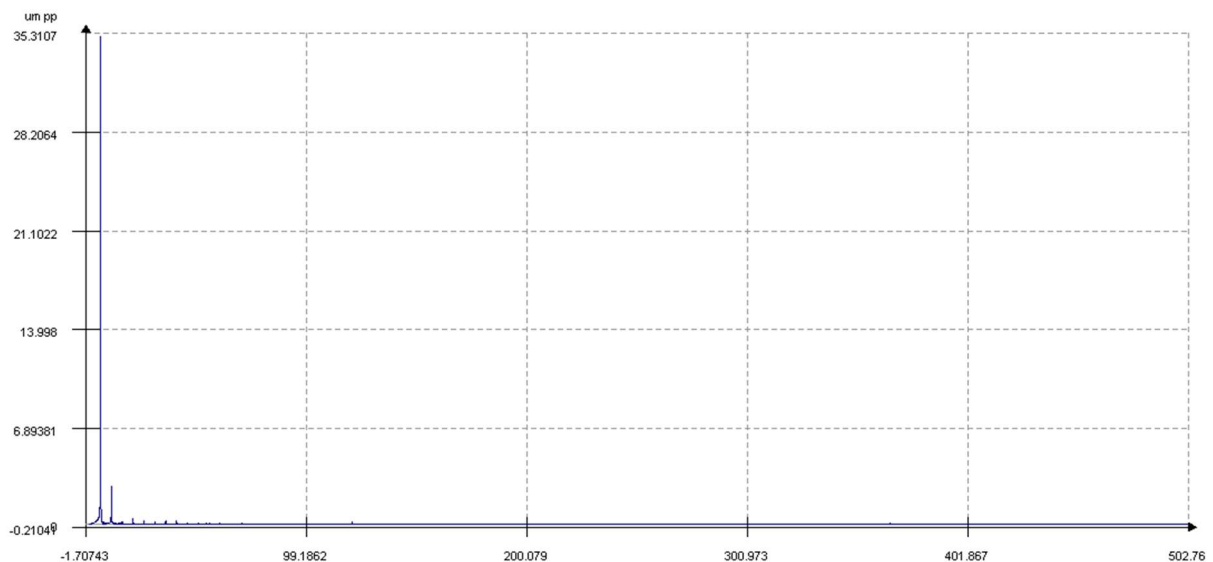
podendo sinalizar a presença de ruídos interferindo na medição e/ou outros tipos de defeitos elétricos e mecânicos na bancada. Porém, para análise de desbalanceamento, foi considerada apenas a amplitude de aceleração RMS do mancal na frequência de rotação do eixo ($N_r = 5$ Hz).

- Amplitude RMS de aceleração do mancal M1: $FFT1_{rms} = 0,0001g$
- Amplitude RMS de aceleração do mancal M2: $FFT1_{rms} = 0,0003g$

Sensores de proximidade:

A figura 25 apresenta a janela de FFT obtida para o sinal do sensor de proximidade EA01_M1d0 do mancal M1, com corte para visualização da janela entre 0 e 500 Hz. Como é possível verificar, não foram identificadas componentes significativas em frequências acima de 30 Hz.

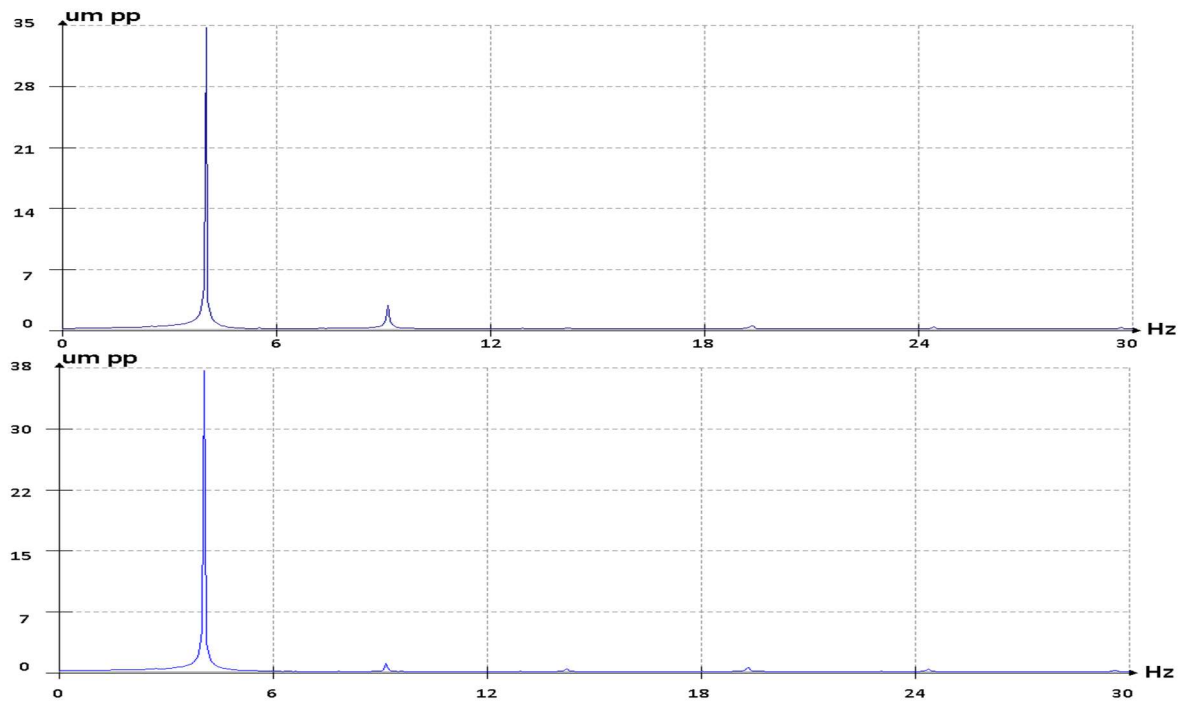
Figura 25 - Espectro completo FFT sensor de proximidade 0°, mancal M1



Fonte: Autoria própria (2022).

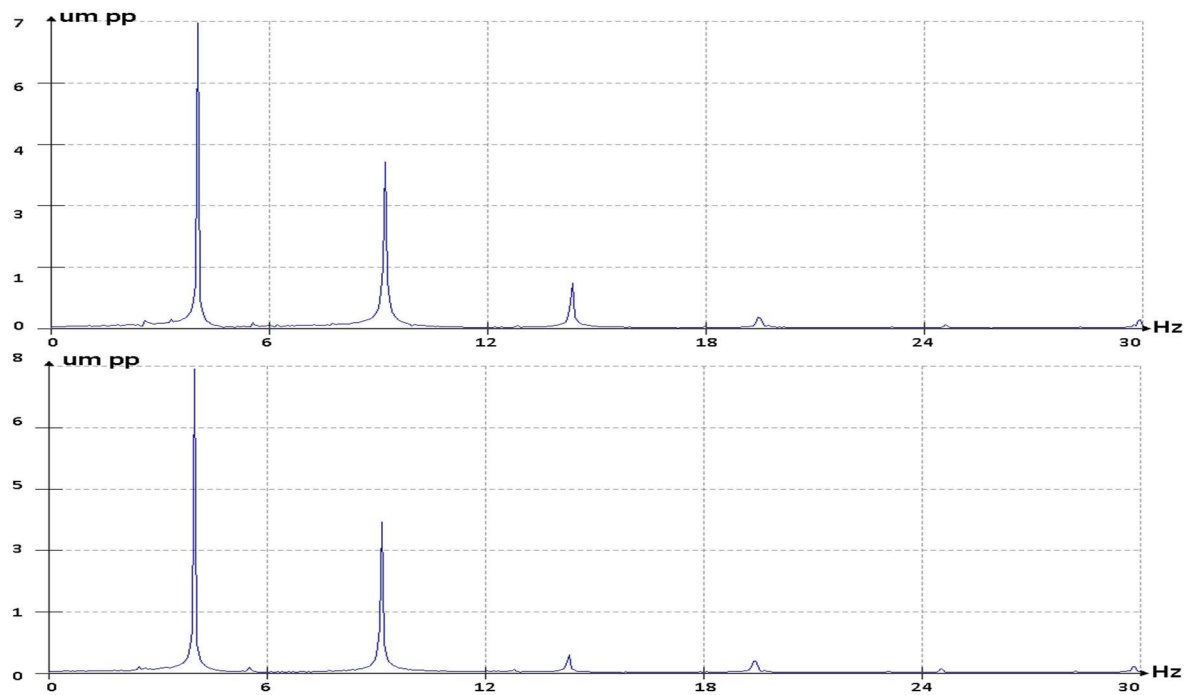
O mesmo resultado ocorreu para os sinais dos demais sensores de proximidade utilizados. Desta forma, foram utilizadas janelas de FFT com corte entre 0 e 30 Hz para melhor visualização. As figuras 26 e 27 apresentam as janelas de FFT obtidas para os sinais dos sensores de proximidade dos mancais M1 e M2, respectivamente.

Figura 26 - FFT sensores de proximidade, mancal M1



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 27 - FFT sensores de proximidade, mancal M2



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com as janelas de FFT obtidas, é possível verificar a presença de algumas poucas componentes com amplitudes elevadas, principalmente no

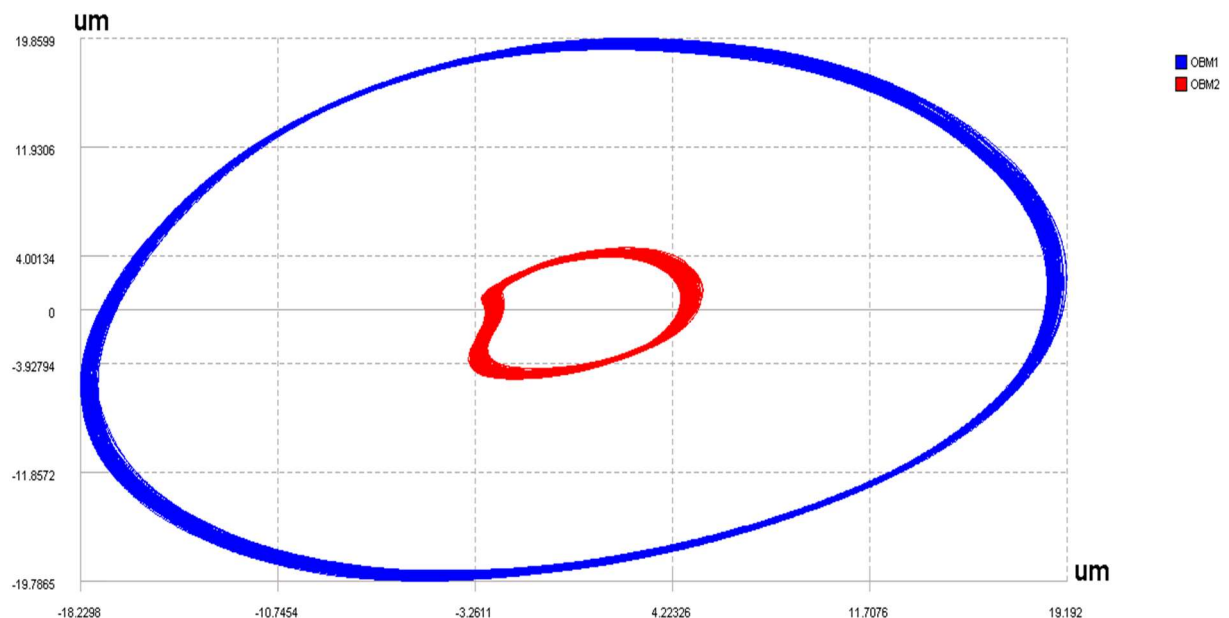
mancal M2 na frequência de 10 Hz, podendo sinalizar a presença de ruídos interferindo na medição na frequência de saída do inversor ($f_s=10$ Hz) e/ou outros tipos de defeitos elétricos e mecânicos na bancada, como por exemplo o desalinhamento do eixo que é uma frequência notável em $2 \times N_r$. Porém, para análise de desbalanceamento, foi considerada apenas a amplitude pico a pico de deslocamento do eixo na frequência de rotação ($N_r=5$ Hz).

- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M1: $\text{FFT}(p-p)_0 = 35,25 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M1: $\text{FFT}(p-p)_{90} = 37,62 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M2: $\text{FFT}(p-p)_0 = 07,38 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M2: $\text{FFT}(p-p)_{90} = 07,79 \mu\text{m}$.

3.2.3 Análise de orbitais, condição saudável

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.3, obtendo a representação da órbita do eixo e os parâmetros de saída dos mancais, através da combinação dos sinais dos sensores de proximidade de cada mancal. A figura 28 apresenta o diagrama de órbita contendo as órbitas descritas pelo eixo no mancal M1 (azul) e no mancal M2 (vermelho) durante as rotações do ensaio.

Figura 28 - Diagrama de órbitas, mancais M1 e M2



Fonte: Autoria própria (2022).

É possível verificar diferenças tanto na amplitude do deslocamento quanto no formato da órbita descrita pelo eixo nos mancais M1 e M2. Para este trabalho, foi

utilizado para análise o parâmetro de deslocamento máximo do eixo ($S_{\max(p-p)}$) no plano de medição dos sensores de cada mancal.

- Deslocamento máximo do eixo M1: $S_{\max(p-p)}_1 = 20,15 \mu\text{m}$;
- Deslocamento máximo do eixo M2: $S_{\max(p-p)}_2 = 06,73 \mu\text{m}$;

3.3 Condição de desbalanceamento

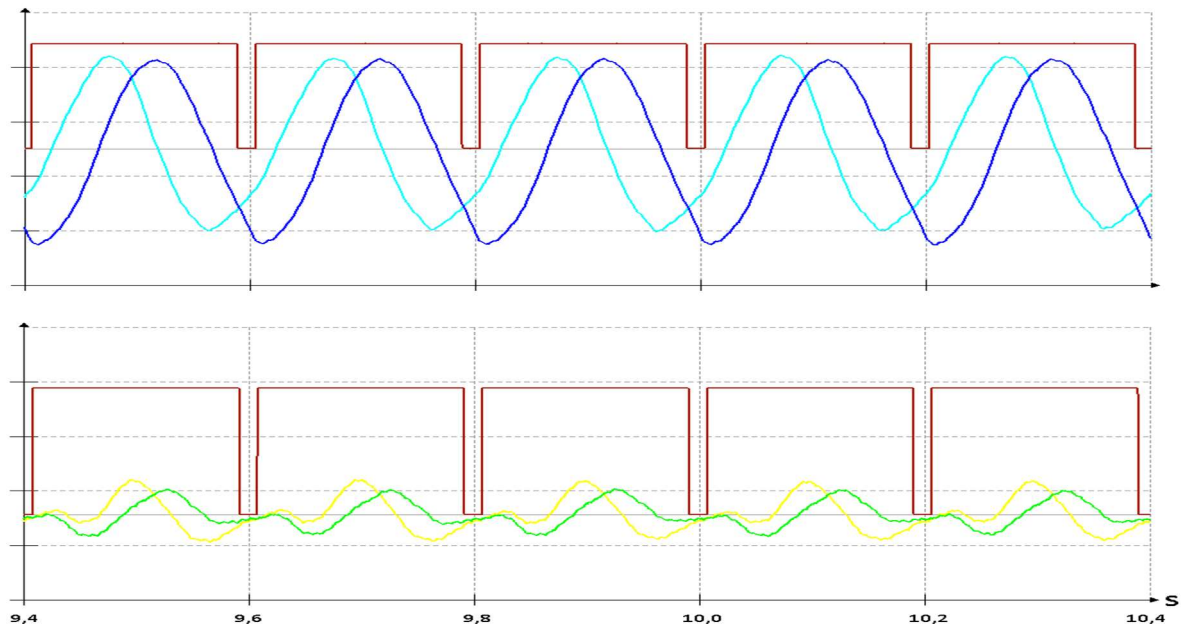
Após concluído o ensaio na condição saudável, foi realizado um ensaio com o eixo mecânico em rotação, porém com a adição de massas de desbalanceamento, na configuração de desbalanceamento dinâmico em nível 3, para verificação da operação da bancada e registro dos sinais de vibração em uma condição considerada de desbalanceamento.

Parâmetros configurados:

- Faixa de frequência de defeitos: $f_{\min}=0,2 \text{ Hz}$ e $f_{\max}=500 \text{ Hz}$;
- Frequência de amostragem: $f_s=7,681 \text{ kHz}$;
- Tempo de registro: $T=20\text{s}$;
- Número de amostras: $n=153.611$;
- Resolução da FFT: $\Delta f=0,05 \text{ Hz}$;
- Frequência saída inversor: $f_s=10 \text{ Hz}$;
- Velocidade do rotor: $N_r=5 \text{ Hz}$ (300 RPM);
- Tipo de desbalanceamento: Dinâmico, Nível 3 (66,1 g).

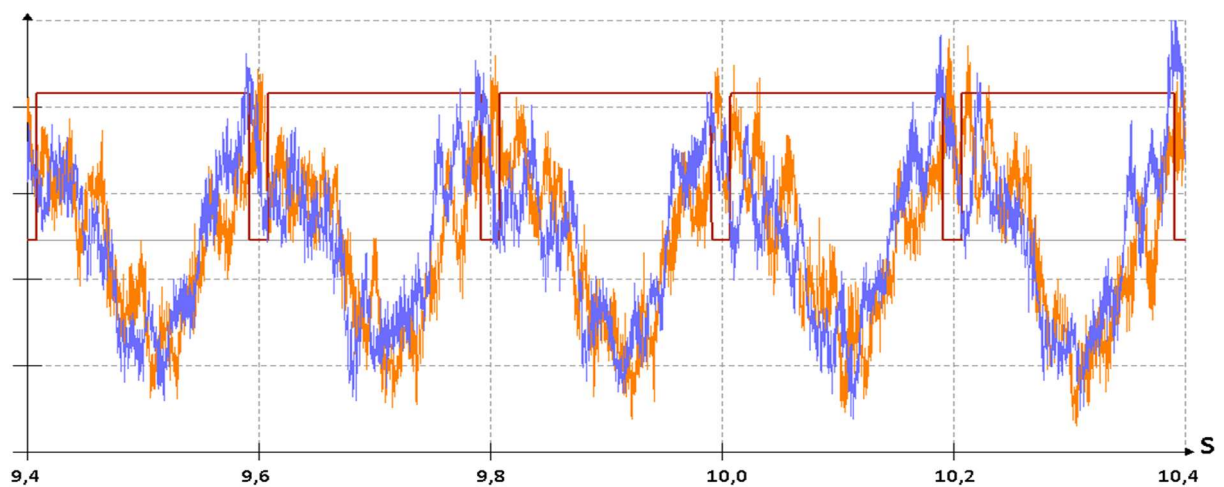
A figura 29 apresenta os sinais obtidos para os sensores de proximidade nos mancais M1 e M2 em conjunto com o sinal de referência de fase, identificando os padrões de deslocamento nas direções de medição durante as rotações mecânicas, e a figura 30 apresenta os sinais obtidos para os sensores de aceleração nos mancais M1 e M2 em conjunto com o sinal de referência de fase, identificando os padrões de aceleração da vibração dos mancais durante as rotações mecânicas do eixo.

Figura 29 - Sensor de fase e sensores de proximidade, mancais M1 e M2, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 30 - Sensor de fase e sensores de aceleração, mancais M1 e M2, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

A partir dos dados obtidos do sensor de referência de fase, sensores de aceleração e sensores de proximidade foram aplicadas as 03 técnicas de análise de vibração propostas na metodologia obtendo os parâmetros de saída de cada técnica.

3.3.1 Análise de valores globais, condição de desbalanceamento

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.1, obtendo os parâmetros de saída para cada sensor.

Sensores de aceleração:

- Valor eficaz médio de aceleração do mancal M1: $a1_{rms} = 0,0012g$
- Valor eficaz médio de aceleração do mancal M2: $a2_{rms} = 0,0012g$

Sensores de proximidade:

- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M1: $S(p-p)_0 = 38,24 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M1: $S(p-p)_{90} = 40,62 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M2: $S(p-p)_0 = 11,30 \mu m$;
- Valor pico a pico médio de deslocamento do eixo M2: $S(p-p)_{90} = 09,25 \mu m$.

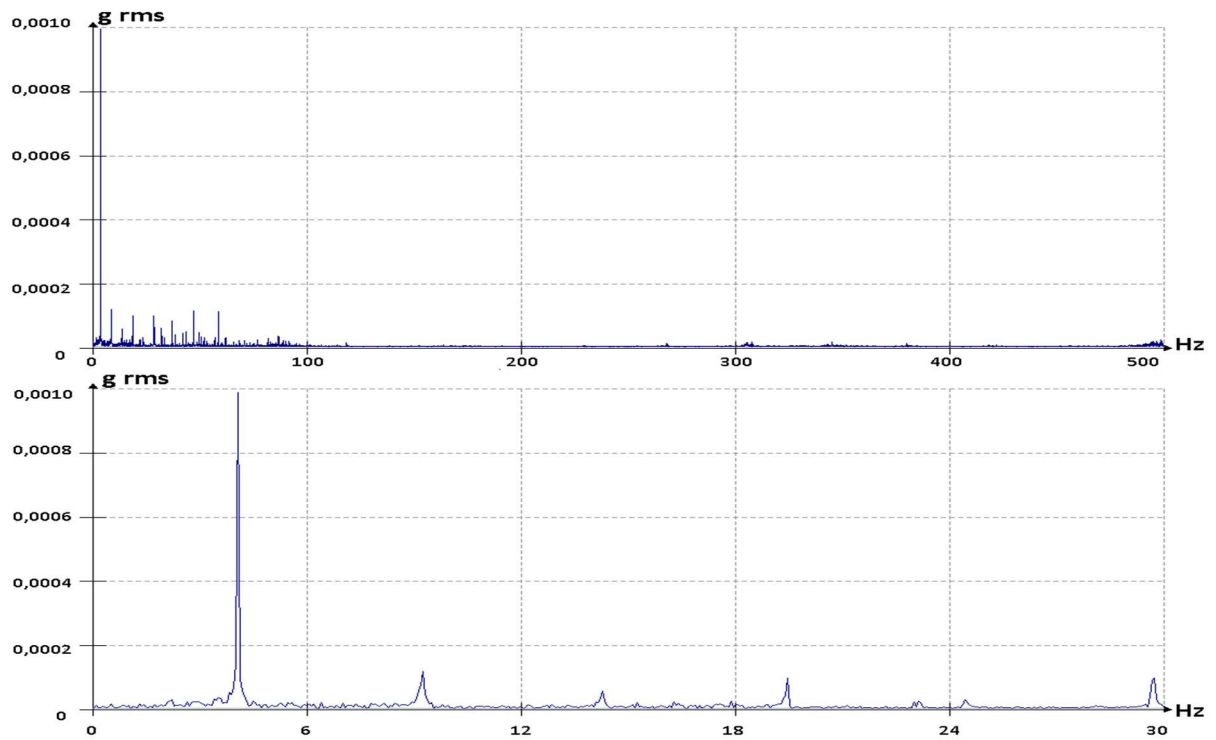
3.3.2 Análise de frequências notáveis, condição de desbalanceamento

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.2, obtendo a representação da janela da FFT e os parâmetros de saída para cada sensor. Para análise de desbalanceamento do eixo, conforme indicado na posição 4 da tabela 02 de frequências notáveis, será considerado apenas a amplitude da componente na frequência de rotação do eixo.

Sensores de aceleração:

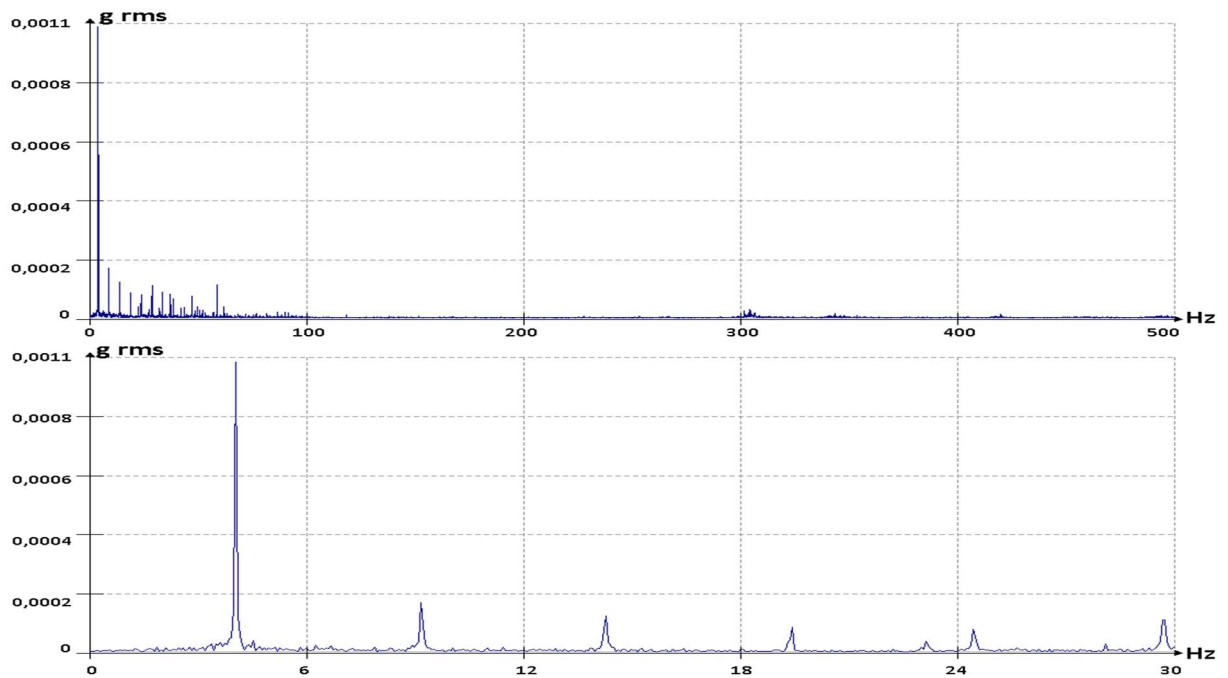
As figuras 31 e 32 apresentam as janelas de FFT obtidas para os sinais dos sensores de aceleração dos mancais M1 e M2, com cortes para visualização da janela entre 0 e 500 Hz e entre 0 e 30 Hz, respectivamente.

Figura 31 - FFT sensor de aceleração, mancal M1, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 32 - FFT sensor de aceleração, mancal M2, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com as janelas de FFT obtidas, é possível verificar a presença de componentes com amplitudes elevadas em determinadas frequências do espectro,

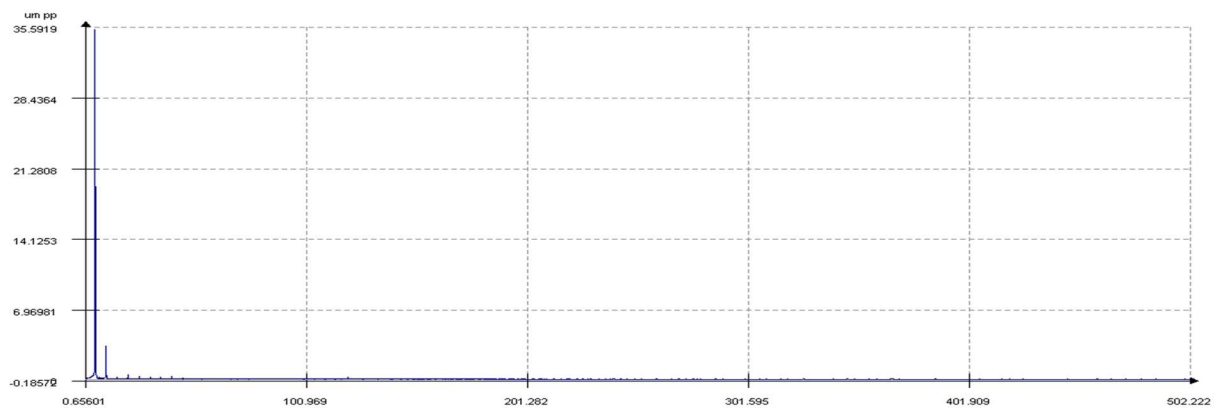
podendo sinalizar a presença de ruídos interferindo na medição e/ou outros tipos de defeitos elétricos e mecânicos na bancada. Porém, para análise de desbalanceamento, foi considerada apenas a amplitude de aceleração RMS do mancal na frequência de rotação do eixo ($N_r = 5$ Hz).

- Amplitude RMS de aceleração do mancal M1: $FFT1_{rms} = 0,0010g$
- Amplitude RMS de aceleração do mancal M2: $FFT1_{rms} = 0,0011g$

Sensores de proximidade:

A figura 33 apresenta a janela de FFT obtida para o sinal do sensor de proximidade EA01_M1d0 do mancal M1, com corte para visualização da janela entre 0 e 500 Hz. Como é possível verificar, não foram identificadas componentes significativas em frequências acima de 30 Hz.

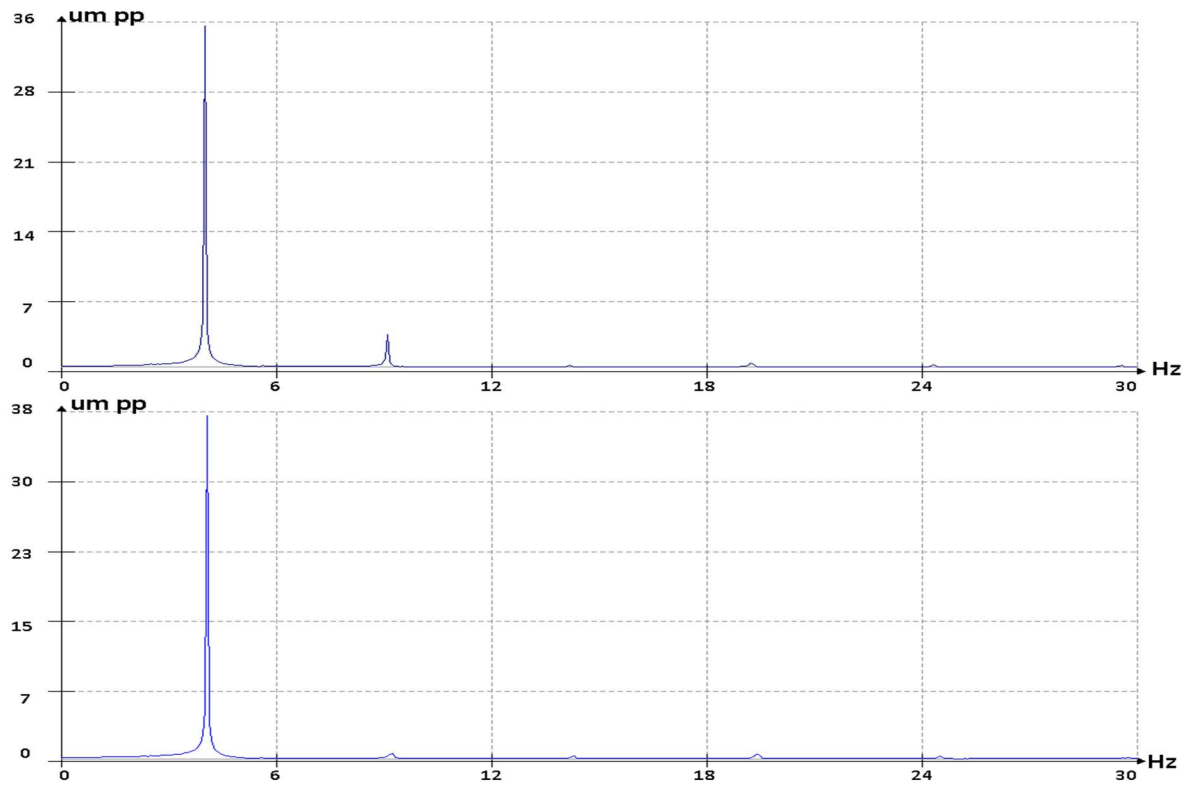
Figura 33 - Espectro completo FFT sensor de proximidade 0°, mancal M1, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

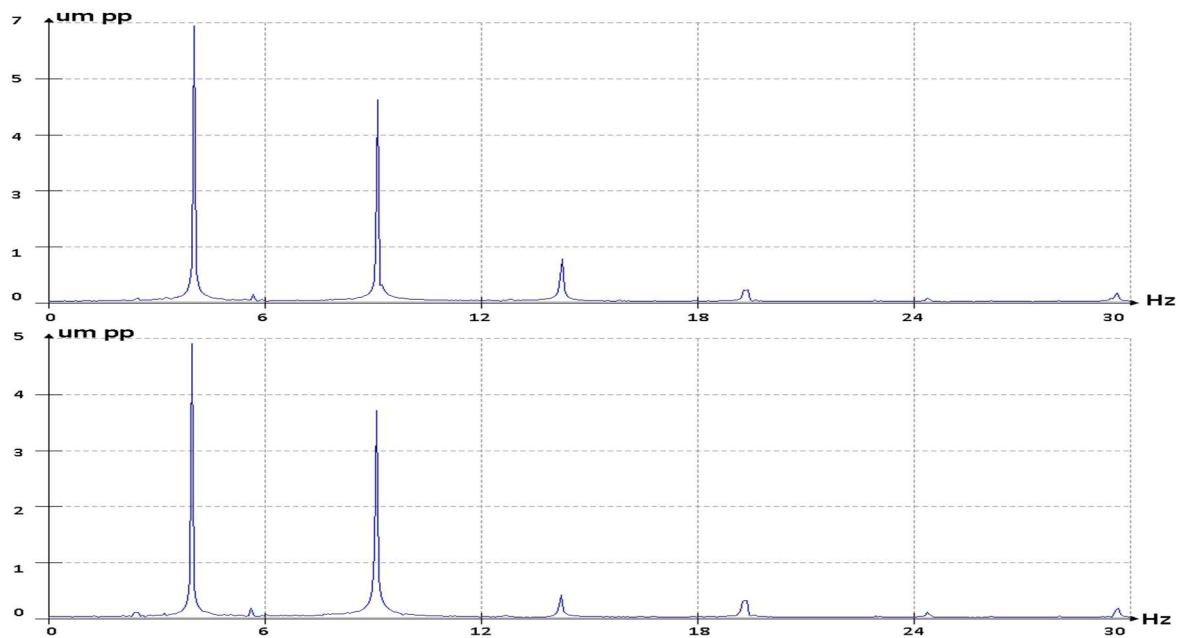
O mesmo resultado ocorreu para os sinais dos demais sensores de proximidade utilizados. Desta forma, foram utilizadas janelas de FFT com corte entre 0 e 30 Hz para melhor visualização. As figuras 34 e 35 apresentam as janelas de FFT obtidas para os sinais dos sensores de proximidade dos mancais M1 e M2, respectivamente.

Figura 34 - FFT sensores de proximidade, mancal M1, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 35 - FFT sensores de proximidade, mancal M2, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com as janelas de FFT obtidas, é possível verificar a presença de algumas poucas componentes com amplitudes elevadas, principalmente no

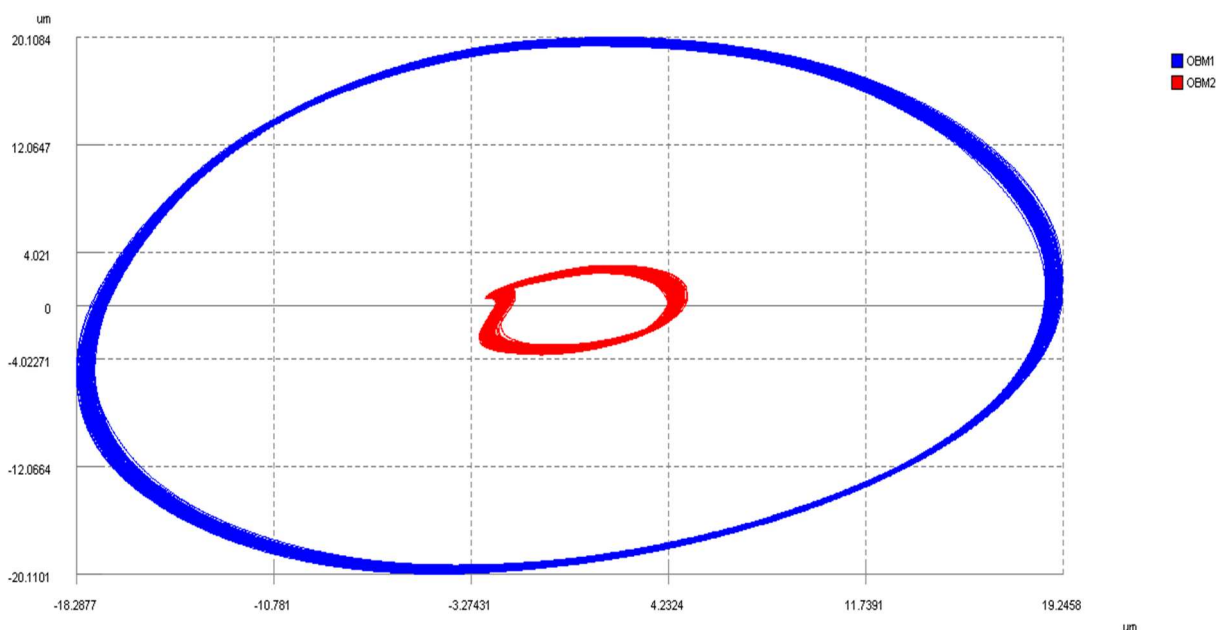
mancal M2 na frequência de 10 Hz, podendo sinalizar a presença de ruídos interferindo na medição na frequência de saída do inversor ($f_s=10$ Hz) e/ou outros tipos de defeitos elétricos e mecânicos na bancada, como por exemplo o desalinhamento do eixo que é uma frequência notável em $2 \times N_r$. Porém, para análise de desbalanceamento, foi considerada apenas a amplitude pico a pico de deslocamento do eixo na frequência de rotação ($N_r=5$ Hz).

- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M1: $\text{FFT}(p-p)_0 = 35,43 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M1: $\text{FFT}(p-p)_{90} = 38,20 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M2: $\text{FFT}(p-p)_0 = 06,48 \mu\text{m}$;
- Amplitude pico a pico de deslocamento do eixo M2: $\text{FFT}(p-p)_{90} = 05,01 \mu\text{m}$.

3.3.3 Análise de orbitais, condição de desbalanceamento

A técnica foi aplicada conforme definido no subitem 2.3.5.3, obtendo a representação da órbita do eixo e os parâmetros de saída dos mancais, através da combinação dos sinais dos sensores de proximidade de cada mancal. A figura 36 apresenta o diagrama de órbita contendo as órbitas descritas pelo eixo no mancal M1 (azul) e no mancal M2 (vermelho) durante as rotações do ensaio.

Figura 36 - Diagrama de órbitas, mancais M1 e M2, desbalanceamento



Fonte: Autoria própria (2022).

É possível verificar diferenças tanto na amplitude do deslocamento quanto no formato da órbita descrita pelo eixo nos mancais M1 e M2. Para este trabalho, foi

utilizado para análise o parâmetro de deslocamento máximo do eixo ($S_{\max(p-p)}$) no plano de medição dos sensores de cada mancal.

- Deslocamento máximo do eixo M1: $S_{\max(p-p)}_1 = 20,61 \mu\text{m}$;
- Deslocamento máximo do eixo M2: $S_{\max(p-p)}_2 = 05,72 \mu\text{m}$;

3.4 Comparação das condições

Inicialmente, é realizada a comparação entre os registros obtidos no ensaio de configuração, com o eixo parado, e os obtidos no ensaio em condição saudável, com o eixo em rotação e sem massas de desbalanceamento. A tabela 3 apresenta a comparação entre os parâmetros obtidos para cada sensor.

Tabela 3 - Comparação eixo parado x eixo em rotação

Origem do Sinal	Eixo parado	Eixo em rotação
Sensor de aceleração - M1a45	$a_{1\text{rms}}=0,0001\text{g}$	$a_{1\text{rms}}=0,0005\text{g}$
Sensor de aceleração - M2a45	$a_{2\text{rms}}=0,0000\text{g}$	$a_{2\text{rms}}=0,0006\text{g}$
Sensor de proximidade - M1d0	$S(p-p)_0=0,09 \mu\text{m}$	$S(p-p)_0=37,63 \mu\text{m}$
Sensor de proximidade - M1d90	$S(p-p)_{90}=0,10 \mu\text{m}$	$S(p-p)_0=40,18 \mu\text{m}$
Sensor de proximidade - M2d0	$S(p-p)_0=0,08 \mu\text{m}$	$S(p-p)_0=11,28 \mu\text{m}$
Sensor de proximidade - M2d90	$S(p-p)_{90}=0,09 \mu\text{m}$	$S(p-p)_0=11,20 \mu\text{m}$

Fonte: Autoria própria (2022).

Os valores da coluna “eixo parado” podem ser considerados para caracterizar uma condição sem vibrações, e os valores da coluna “eixo em rotação” podem ser caracterizados como o padrão saudável ou a assinatura normal de vibrações da bancada. Conforme podemos observar, houve alteração significativa entre os valores obtidos com o eixo parado e com o eixo em rotação. Estes resultados são esperados pois o eixo em rotação começa a apresentar valores de deslocamento nas direções de medição dos sensores de proximidade e os mancais passam a apresentar vibrações, detectadas pelos sensores de aceleração. Pode-se considerar que houve boa sensibilidade em todos os sensores utilizados.

Para a comparação entre os resultados dos ensaios de condição saudável e condição de desbalanceamento iremos utilizar os parâmetros obtidos em cada uma das técnicas de análise de vibrações aplicadas.

3.4.1 Análise de valores globais, comparação dos resultados

A técnica de análise de valores globais foi aplicada nos ensaios de condição saudável, com o eixo em rotação sem massas de desbalanceamento, e na condição de desbalanceamento dinâmico N3. A tabela 4 apresenta a comparação entre os parâmetros obtidos para cada sensor.

Tabela 4 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, valores globais

Origem do Sinal	Eixo saudável	Eixo desbalanceado	$\Delta\%$
Sensor aceleração - M1a45	$a1_{rms}=0,0005g$	$a1_{rms}=0,0012g$	+140,0%
Sensor aceleração - M2a45	$a2_{rms}=0,0006g$	$a2_{rms}=0,0012g$	+100,0%
Sensor proximidade - M1d0	$S(p-p)_0=37,63 \mu m$	$S(p-p)_0=38,24 \mu m$	+1,6%
Sensor proximidade - M1d90	$S(p-p)_{90}=40,18 \mu m$	$S(p-p)_{90}=40,62 \mu m$	+1,1%
Sensor proximidade - M2d0	$S(p-p)_0=11,28 \mu m$	$S(p-p)_0=11,30 \mu m$	+0,2%
Sensor proximidade - M2d90	$S(p-p)_{90}=11,20 \mu m$	$S(p-p)_{90}=09,25 \mu m$	-17,4%

Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme podemos observar, houve uma elevação significativa nos valores das medições dos sensores de aceleração, o que indica um aumento da vibração dos mancais M1 e M2 na condição de desbalanceamento. Com relação as medições dos sensores de proximidade, em maioria as mesmas se mantiveram estáveis. Estes resultados estão de acordo com o esperado pois o eixo em rotação com desbalanceamento tem seus valores de deslocamento nas direções de medição dos sensores de proximidade limitados pelos mancais de rolamento, de forma que os mancais passam a apresentar aumento nas amplitudes de vibrações, detectadas pelos sensores de aceleração. Como observação devemos registrar que houve uma diminuição moderada em uma das medições de deslocamento do eixo no mancal M2, o que pode indicar alguma alteração na dinâmica da rotação do eixo no mancal provocada pelo desbalanceamento.

De modo geral, a técnica de análise de valores globais foi capaz de detectar com boa sensibilidade o desbalanceamento do eixo mecânico através dos sinais dos sensores de aceleração.

3.4.2 Análise de frequências notáveis, comparação dos resultados

A técnica de análise de frequências notáveis foi aplicada nos ensaios de condição saudável, com o eixo em rotação sem massas de desbalanceamento, e na

condição de desbalanceamento dinâmico N3. A tabela 5 apresenta a comparação entre os parâmetros obtidos para cada sensor.

Tabela 5 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, frequências notáveis

Origem do Sinal	Eixo saudável	Eixo desbalanceado	$\Delta\%$
Sensor aceleração-M1a45	FFT1 _{rms} = 0,0001g	FFT1 _{rms} = 0,0010g	+900,0%
Sensor aceleração-M2a45	FFT2 _{rms} = 0,0003g	FFT2 _{rms} = 0,0011g	+266,7%
Sensor proximidade-M1d0	FFT(p-p) ₀ = 35,25 μm	FFT(p-p) ₀ = 35,43 μm	+0,5%
Sensor proximidade-M1d90	FFT(p-p) ₉₀ = 37,62 μm	FFT(p-p) ₉₀ = 38,20 μm	+1,5%
Sensor proximidade-M2d0	FFT(p-p) ₀ = 07,38 μm	FFT(p-p) ₀ = 06,48 μm	-12,2%
Sensor proximidade-M2d90	FFT(p-p) ₉₀ = 07,79 μm	FFT(p-p) ₉₀ = 05,01 μm	-35,7%

Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme podemos observar, com relação a amplitude da componente da frequência de rotação do eixo na FFT, houve uma elevação bastante significativa nos valores das medições dos sensores de aceleração, o que indica um aumento da vibração dos mancais M1 e M2 na condição de desbalanceamento. Com relação as medições dos sensores de proximidade, as mesmas se mantiveram estáveis no mancal M1 e com reduções moderadas no mancal M2. Estes resultados estão em parte de acordo com o esperado, devido a limitação do deslocamento do eixo pelos mancais de rolamento. Como observação devemos registrar que houve uma diminuição moderada nos valores das medições de deslocamento do eixo no mancal M2, o que pode indicar alguma alteração na dinâmica da rotação do eixo no mancal provocada pelo desbalanceamento, conforme também indicado nos resultados da técnica de valores globais.

De modo geral, a técnica de análise de frequências notáveis foi capaz de detectar com ótima sensibilidade o desbalanceamento do eixo mecânico através dos sinais dos sensores de aceleração.

3.4.3 Análise de orbitais, comparação dos resultados

A técnica de análise de orbitais foi aplicada nos ensaios de condição saudável, com o eixo em rotação sem massas de desbalanceamento, e na condição de desbalanceamento dinâmico N3. A tabela 6 apresenta a comparação entre os parâmetros obtidos para cada mancal através da combinação entre as medições dos sensores de proximidade.

Tabela 6 - Comparação condição saudável x desbalanceamento, orbitais

Origem do Sinal	Eixo saudável	Eixo desbalanceado	$\Delta\%$
Sensores proximidade-M1	$S_{\max}(p-p)_1 = 20,15 \mu\text{m}$	$S_{\max}(p-p)_1 = 20,61 \mu\text{m}$	+2,3%
Sensores proximidade-M2	$S_{\max}(p-p)_2 = 06,73 \mu\text{m}$	$S_{\max}(p-p)_2 = 05,72 \mu\text{m}$	-15,0%

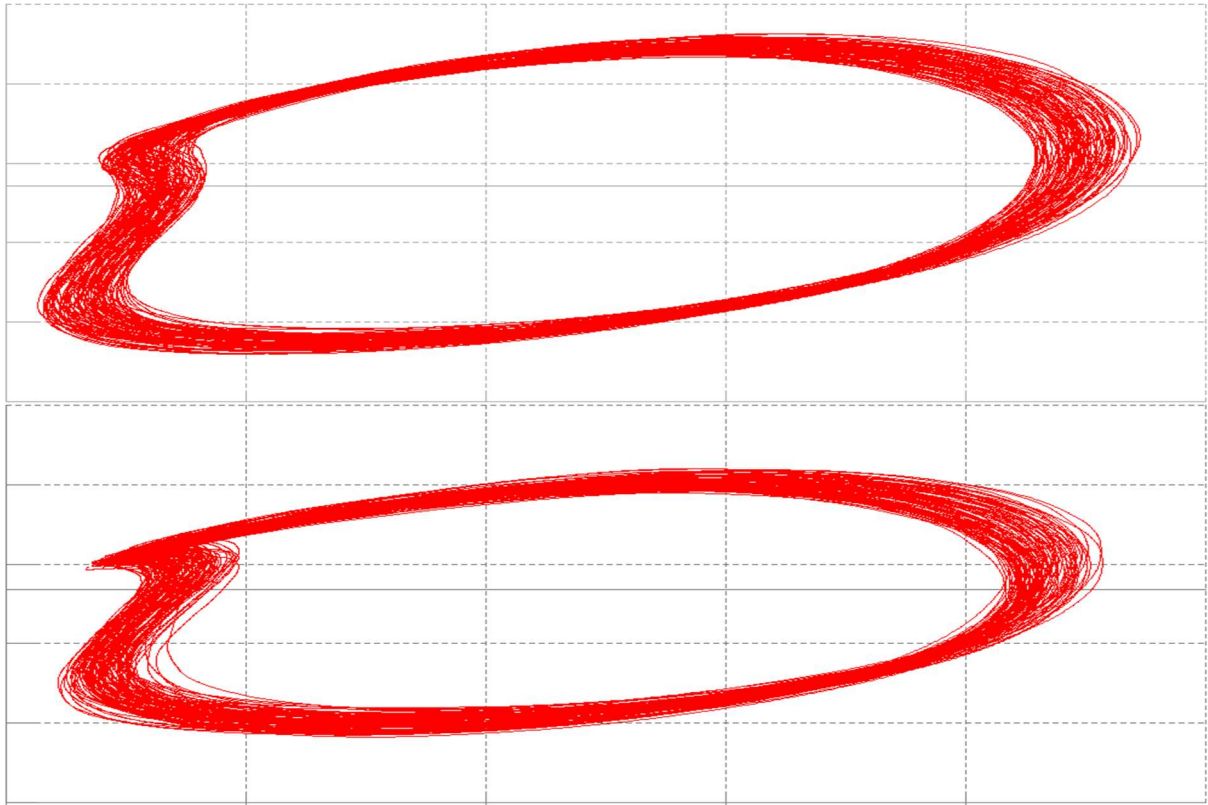
Fonte: Autoria própria (2022).

Conforme podemos observar, com relação as medições de deslocamento máximo do eixo nos mancais no plano de medição dos sensores de proximidade, a medição se manteve estável no mancal M1 e com redução moderada no mancal M2. Estes resultados estão em parte de acordo com o esperado, devido a limitação do deslocamento do eixo pelos mancais de rolamento. Como observação devemos registrar que houve uma diminuição moderada no valor da medição de deslocamento máximo do eixo no mancal M2, o que pode indicar alguma alteração na dinâmica da rotação do eixo no mancal provocada pelo desbalanceamento, conforme também indicado nos resultados das técnicas de valores globais e frequências notáveis.

Para verificação desta dinâmica, o diagrama de órbita é útil pois permite uma visualização gráfica da trajetória percorrida pelo eixo no plano do mancal. De acordo com as figuras 28 e 36 apresentadas anteriormente, é possível verificar que a órbita do mancal M1 é maior do que a órbita do mancal M2, com deslocamentos máximos de $S_{\max}(p-p)_1 = 20,61 \mu\text{m}$ e $S_{\max}(p-p)_2 = 5,72 \mu\text{m}$, respectivamente, na condição de desbalanceamento. As medições de deslocamento do eixo obtidas das outras técnicas também apontam maiores amplitudes no Mancal M1, o que indica uma possível diferença nas folgas dos mancais, podendo ser causadas por diferenças no torque de aperto dos parafusos ou diferenças de fabricação, ou ainda devido a posição de montagem do eixo na bancada, estando um mancal mais próximo e acoplado ao motor e o outro mais afastado e livre de acoplamentos. Além disso, a figura 35, vista anteriormente, mostra a presença de componentes da FFT na frequência de 10 Hz ($2X N_r$) no mancal M2, componente que costuma estar relacionada a defeitos de desalinhamento. E estas componentes não aparecem na FFT do mancal M1, conforme visto na figura 34. Alguns destes fatores citados, ou uma combinação deles, pode ser a causa para redução na amplitude do deslocamento no mancal M2. Também é possível verificar dos diagramas de órbita apresentados que existe uma diferença no formato da órbita entre os mancais, com uma órbita elíptica no mancal M1 e uma órbita com alterações no formato no mancal M2. A figura 37 apresenta uma comparação das órbitas do mancal M2 na condição saudável e na condição de

desbalanceamento, quando houve redução na amplitude de deslocamento e alterações no formato da órbita.

Figura 37 - Diagramas de órbita mancal M2



Fonte: Autoria própria (2022).

Para investigação de diagramas de órbitas e utilização desta técnica no monitoramento de vibrações, o PECCE publicou recentemente os artigos “*Diagnosis of Rotating Machine Unbalance Using Machine Learning Algorithms on Vibration Orbital Features*” (JABLON et al., 2020a) e “Análise de orbitais em máquinas rotativas para identificação da gravidade de desbalanceamentos mecânicos utilizando técnicas de aprendizado de máquina” (JABLON, AVILA, 2020b).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso contribuiu durante a fase de instalação e entrada em operação de uma bancada experimental localizada no laboratório do Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia (PECCE – IFSC). O objetivo da bancada experimental é permitir a realização de ensaios em ambiente controlado, simulando condições de desbalanceamento mecânico do eixo para testes das metodologias de monitoramento e análise de vibrações desenvolvidas em projetos do grupo de pesquisa, em parceria com empresas de tecnologia, para aplicação na indústria e em empreendimentos de geração de energia elétrica.

Através do informe técnico intitulado “Metodologia para o diagnóstico de defeitos em hidrogeradores através da análise de vibrações em sistemas de monitoramento permanente utilizando técnicas no domínio do tempo e frequência” (MATSUO et al., 2017b), de coautoria do graduando, apresentado no XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXIV SNPTEE), foram propostas uma metodologia para monitoramento de vibrações e as técnicas de análises de valores globais e análises de frequências notáveis, sendo aplicadas em registros de hidrogeradores e apresentando resultados positivos. Porém a metodologia e as técnicas ainda deveriam ser submetidas a maiores testes, e foi então iniciada a segunda fase, na qual este trabalho está inserido, para realização dos ensaios na bancada do PECCE. Para esta etapa foi também utilizada a técnica de análise de orbitais, encontrada através de pesquisa bibliográfica realizada para este trabalho.

Foram então realizados os ensaios para verificar o funcionamento da bancada, do sistema de monitoramento e obter os parâmetros dos resultados das técnicas de análise de desbalanceamento. No ensaio de configuração inicial, com o eixo mecânico parado, foram obtidos os sinais de saída dos sensores de aceleração, sensores de proximidade e sensor de referência de fase. Os sinais foram configurados para as unidades adequadas e foram aplicados filtros digitais para retirada de componentes cc, para retirada de ruídos de interferência elétrica e para adequação da análise na frequência de rotação do eixo.

Após a configuração foram obtidos os sinais caracterizando uma condição sem vibrações (eixo parado), e foram realizados os ensaios com o eixo mecânico em

uma condição saudável, em rotação e sem massas de desbalanceamento, e na condição de desbalanceamento dinâmico, em rotação e com adição de massas do tipo N3 (66,1 g). Foram aplicadas as técnicas de análise e obtidos os parâmetros de saída, conforme a metodologia proposta. Entre os principais resultados podemos destacar:

- A técnica de análise de valores globais detectou o desbalanceamento do eixo, com boa sensibilidade ($\Delta\% > 100\%$), através de variação na amplitude RMS dos sinais dos sensores de aceleração nos dois mancais, M1 e M2;
- A técnica de análise de frequências notáveis detectou o desbalanceamento do eixo, com ótima sensibilidade ($\Delta\% > 266\%$), através de variação na amplitude da componente da FFT na frequência de rotação do eixo dos sinais dos sensores de aceleração nos dois mancais, M1 e M2.

Com relação aos parâmetros obtidos pelos sensores de proximidade, não foi possível detectar o desbalanceamento do eixo. Foram obtidos os seguintes resultados:

- A técnica de análise de valores globais não detectou variações significativas na amplitude pico a pico dos sinais dos sensores de proximidade no mancal M1, porém detectou uma variação negativa moderada no mancal M2.
- A técnica de análise de frequências notáveis não detectou variações significativas na amplitude da componente FFT na frequência de rotação do eixo dos sinais dos sensores de proximidade no mancal M1, porém detectou uma variação negativa moderada no mancal M2.
- A técnica de análise de orbitais não detectou variações significativas na amplitude de deslocamento máximo do eixo dos sinais dos sensores de proximidade no mancal M1, porém detectou uma variação negativa moderada no mancal M2.

Com a inserção de massas de desbalanceamento nos discos do eixo, seria esperado, de forma geral, que ocorresse um aumento no deslocamento do eixo durante as rotações e um aumento na vibração dos mancais. Porém, devido a bancada ser composta por mancais do tipo rolamento, ocorre uma limitação no deslocamento do eixo, transferindo a vibração para os mancais.

De acordo com os resultados obtidos é possível concluir que a metodologia proposta, composta por topologia de sensoriamento com instalação de dois sensores de proximidade por mancal, em quadratura, um sensor de aceleração por mancal e um sensor de referência de fase, mais hardware para aquisição de sinais, conforme

especificados, foi suficiente para monitorar os padrões de vibração do eixo e mancais da bancada, com destaque para a utilização de sensores de aceleração para o caso particular de eixo instalado em mancais de rolamentos.

Quanto as técnicas de processamento dos registros, a análise de valores globais é simples de ser realizada, não demanda grandes esforços computacionais e pode ser utilizada para comparação dos parâmetros obtidos com valores presentes em normas, limites de projetos ou mesmo com uma condição considerada saudável para a máquina, permitindo a identificação de variações com relação aos valores normais de operação e violação de limites de severidade. Foi utilizada de forma satisfatória nos ensaios na bancada e detectou a condição de desbalanceamento utilizando os sensores de aceleração.

A técnica de análise de frequência notáveis permite a identificação de alterações nos padrões de vibração com relação a condições saudáveis de operação, e pode ser utilizada para classificação quanto ao tipo de defeito presente na máquina. Foi utilizada de forma satisfatória nos ensaios da bancada, apresentando maior sensibilidade para detecção de desbalanceamento do eixo em comparação à técnica de valores globais. Porém, não foi utilizada para classificação de defeitos e demanda capacidade de processamento para filtragem e análise espectral por FFT.

Por fim, a técnica de análise de orbitais utiliza os sinais combinados dos sensores de proximidade e permite uma visualização gráfica do diagrama de órbita que descreve a trajetória do eixo no plano dos mancais. Os diagramas de orbita contribuem na visualização do comportamento dinâmico do eixo durante as rotações e possuem informações que podem ser uteis no monitoramento das máquinas. Nos ensaios realizados na bancada não foi possível detectar a condição de desbalanceamento por esta técnica, devido a característica dos mancais de rolamentos, porém foi possível identificar alterações no formato da órbita do eixo do mancal M2. A técnica também permitiu o cálculo dos parâmetros de deslocamento máximo do eixo, que são semelhantes ao valor de raio máximo da órbita nos mancais. A utilização desta técnica em sistemas preditivos tem aumentado e novas ferramentas vem sendo desenvolvidas para aumentar sua eficácia, com uma linha de atuação do PECCE dedicada a este tema.

Porém, este trabalho se limitou ao monitoramento do desbalanceamento, sem abordar técnicas de inteligência computacional para a identificação e/ou classificação do tipo e do nível de desbalanceamento. Este tipo de abordagem foi realizada por outros pesquisadores do PECCE, como por exemplo “*Diagnosis of Unbalance in Lightweight Rotating Machines Using a Recurrent Neural Network Suitable for an Edge-Computing Framework*” (IMAMURA et al., 2022a), “*Rotor Unbalance Kind and Severity Identification by Current Signature Analysis with Adaptive Update to Multiclass Machine Learning Algorithms*” (SCHARBELE et al., 2021), “Rede neural recorrente leve para diagnóstico de desbalanceamento em máquinas rotativas complementares às usinas geradoras” (IMAMURA et al., 2022b) e “Identificação do tipo e da severidade do desbalanceamento de rotores por meio da análise da assinatura de corrente com aprendizado de máquina multiclass” (TOMINAGA, 2020).

De forma geral, este trabalho de conclusão de curso realizou uma investigação teórico-experimental e conseguiu avaliar a eficácia da metodologia de monitoramento de vibrações proposta e de três técnicas utilizadas para análise de desbalanceamento em máquinas elétricas de baixa rotação, formando uma base de conhecimento e contribuindo para o aperfeiçoamento de soluções tecnológicas aplicadas na indústria e no setor elétrico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 673**. Estabelece características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH. 4 de agosto de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração ANEEL SIGA**. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWWM2ZC00YjllWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 25 out. 2022.

ALMEIDA, F.R.V. **ANÁLISES ESTATÍSTICAS E RECONHECIMENTO DE PADRÃO APLICADOS EM DIAGNÓSTICOS DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**. 2007. 111 p. Tese (doutorado) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2007.

BALLUFF. Sensor de distância indutivo BAW001C. **Balluff**. [2022]. Disponível em: <<https://www.balluff.com/pt-br/products/BAW001C>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

BENBOUZID, M.E.H.; KLIMAN, G.B. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?. **IEEE Transactionson Energy Conversion**, vol.18, no.2, p. 238 - 244, Jun 2003.

EPE. **Matriz elétrica brasileira**. [2022]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#ELETRICA>>. Acesso em: 01 nov. 2022.

FELÍCIO, G.M.G. **DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS UTILIZANDO A ANÁLISE DE ÓRBITAS**. 2015. 84 f. Dissertação (mestrado) – Área Departamental de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2015.

FERRAZ, Ú.B. **SIMULADOR DE FALHAS MECÂNICAS PARA BANCADA DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES**. 2013. 100 p. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2006.

FREITAS, U.B.; et al. Estado-da-Arte de Monitoramento e Diagnóstico de Geradores de Energia. In: ENCONTRO NACIONAL DE MÁQUINAS ROTATIVAS, **Anais ENAM 2016**, Rio de Janeiro, maio 2016.

HONORATO, J.F. **ANÁLISE DE GRANDEZAS ELÉTRICAS PARA IDENTIFICAÇÃO DO DESBALANCEAMENTO DE MASSA EM CARGAS ACOPLADAS A MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS POR INVERSOR**. 2017. 143 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

GONÇALVES, A. A. **OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA ONLINE DE DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO**. Lisboa, 2013.

IMAMURA, L.Y., AVILA, S.L., PACHECO, F.S, F.S. et al. Diagnosis of Unbalance in Lightweight Rotating Machines Using a Recurrent Neural Network Suitable for an Edge-Computing Framework. **J Control Autom Electr Syst** 33, 1272–1285, 2022a.

IMAMURA, L.Y., AVILA, S.L., PACHECO, F.S. et al. Rede neural recorrente leve para diagnóstico de desbalanceamento em máquinas rotativas complementares às usinas geradoras, XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – **SNPTEE**, 2022b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7919**: Mechanical Vibration of Non-reciprocating Machines - Measurement on Rotating Shafts and Evaluation Criteria. Genebra, 2001a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10816**: Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-rotating Parts. Genebra, 2001b.

JABLON, L. S., AVILA, S. L., BORBA, B., MOURÃO, G. L., FREITAS, F. L., PENZ, C. A. “Diagnosis of Rotating Machine Unbalance Using Machine Learning Algorithms on Vibration Orbital Features,” In **Journal of Vibration and Control**, v. 110, pp. 2213–2225, 2020a.

JABLON, L. S., AVILA, S. L. Análise de orbitais em máquinas rotativas para identificação da gravidade de desbalanceamentos mecânicos utilizando técnicas de aprendizado de máquina, **IX ENAM CIGRE** - Encontro Nacional de Máquinas Rotativas, 2020b.

JALAN, A.K.; MOHANTY, A.R.; Model based fault diagnosis of a rotor-bearing system for misalignment and unbalance under steady-state condition. **Journal of Sound and Vibration**, vol. 327, p. 604-622, nov. 2009.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e Transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1991.

MATSUO, T.K.; GRANADO, M.; COSTA, G.P.; PENZ, C.A.; AVILA, S.L. Técnicas Matemáticas para Análise de Vibrações em Geradores de Energia Elétrica. In: SEMINÁRIO DE ENSINO, PESQUISA, EXTENSÃO E INOVAÇÃO DO IFSC. **Anais SEPEI 2016**, Criciúma, mês, 2016.

MATSUO, T.K. **MÉTODO DE ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM MÁQUINAS ROTATIVAS NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, VALIDADO COM DADOS HISTÓRICOS E SIMULAÇÃO**. 2017a. 158 f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Metal-Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2017a.

MATSUO, T.K.; DIAS, R.A.; AVILA, S.L.; PENZ, C.A.; GRANADO, M.; COSTA, G.P. Metodologia para o diagnóstico de defeitos em hidrogeradores através da análise de vibrações em sistemas de monitoramento permanente utilizando técnicas no domínio

do tempo e frequência. In: XXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anais SNPTEE 2017**, Curitiba, Out, 2017b.

PATEL, T.H.; DARPE, A.K. Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. **Mechanical Systems and Signal Processing**, vol. 23, p. 2236-2252, out. 2009.

PCB PIEZOTRONICS. Technical information. **PCB Piezotronics**. [2022]. Disponível em: < <https://www.pcb.com/resources/technical-information>>. Acesso em: 20 nov. 2022.

SOPETRA. Caixas SNA. **Catálogo Burguer**. [2022]. Disponível em: <<https://sopetra.com.br/produto-site/caixas-sna>>. Acesso em: 01 nov. 2022.

SCHARBELE, H. M., YOUSSEF, S., AVILA, S. L., PACHECO, F. S., PENZ, C. A. Rotor Unbalance Kind and Severity Identification by Current Signature Analysis with Adaptative Update to Multiclass Machine Learning Algorithms, In **Studies in Engineering and Technology**, v. 8, p. 28-39, 2021.

TOMINAGA, R.N. **IDENTIFICAÇÃO DO TIPO E DA SEVERIDADE DO DESBALANCEAMENTO DE ROTORES POR MEIO DA ANÁLISE DA ASSINATURA DE CORRENTE COM ALGORITMOS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA MULTICLASSES**. 2021. 109 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Instituto Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2021.

USP. **Introdução à Eletromecânica e à Automação**. [2006]. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/375427/mod_resource/content/1/MOTOR_DE_INDUCAO_PARTE_TEORICA.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022.

WEG. **Dados técnicos do motor W22 IR2**. [2018]. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Uso-Geral/W22/W22-IR2/W22-IR2-0-16-cv-2P-63-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B14D/p/11443516>>. Acesso em: 05 maio 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Relatório da Bancada Experimental de Ensaio

A Bancada Experimental de Ensaio de Desbalanceamento do Eixo está instalada no Laboratório do Grupo de Pesquisas em Computação Científica para Engenharia (PECCE), associado ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAE) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC).

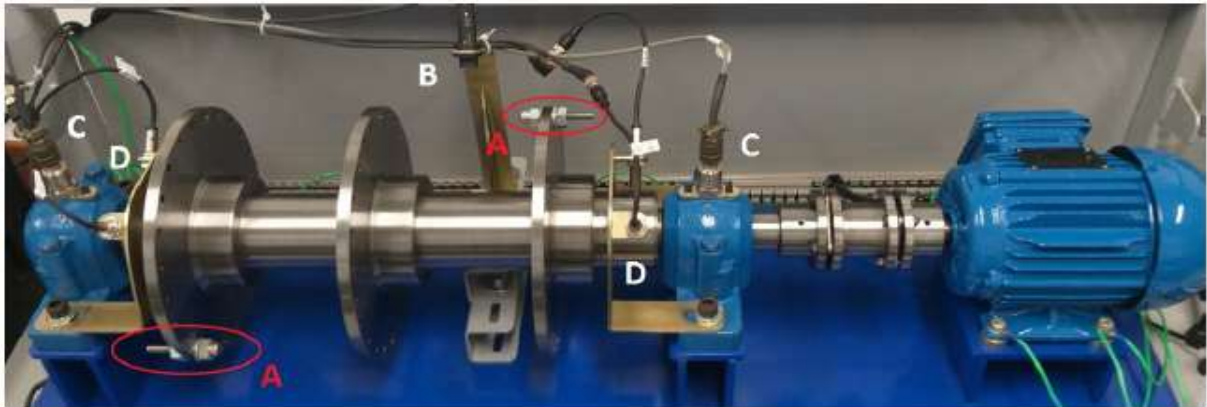
Possui uma estrutura base de aço com sistema vibrastop, para amortecimento mecânico de vibrações externas, e com dois níveis inferiores (prateleiras) e um nível superior (mesa). Sobre a estrutura do nível superior está fixada outra base metálica onde estão instalados o motor, os mancais do eixo mecânico e os suportes metálicos dos sensores, com uma cobertura de acrílico para proteção externa. Além disso, o inversor está instalado em uma caixa de comando, posicionada ao lado do motor, em um corte na estrutura superior da bancada. Os demais equipamentos ficam posicionados nas prateleiras dos níveis inferiores.

O eixo mecânico acoplado ao motor foi fabricado em aço 1050, é sustentado por dois mancais de rolamento (M1 e M2) e possui três discos radiais com perfurações nas extremidades para inserção de massas de desbalanceamento (parafusos e porcas). Através da adição de massas nos discos é possível provocar, de forma controlada, desbalanceamento estático, acoplado ou dinâmico no eixo.

Os sensores de aceleração são utilizados para medir o valor rms da velocidade de vibração absoluta dos mancais (V_{rms} , mm/s) e, portanto, estão instalados em suportes diretamente na parte superior dos mancais M1 e M2. Os sensores de proximidade estão instalados em dois pares de suportes metálicos próximos aos mancais, montados radialmente e perpendiculares entre si, para medir o deslocamento relativo pico a pico do eixo ($S(p-p)$, μm) em cada sensor. E o sensor de fase está instalado em um suporte metálico posicionado em uma posição central da bancada, radial ao eixo, para medir a passagem de uma fita adesiva reflexiva fixada no eixo e obter sua velocidade de rotação (N_r , rpm), e também estabelecer um ponto de referência (fase) para agrupar e analisar os dados dos sinais de vibrações.

A figura 38 apresenta em destaque um exemplo de inserção de desbalanceamento no disco do eixo (A), e a posição de instalação do sensor de referência de fase (B), do sensor de aceleração (C) e dos sensores de proximidade (D), de acordo com a topologia definida na metodologia proposta.

Figura 38 - Topologia Sensoriamento Bancada PECCE



Fonte: TOMINAGA (2021).

Neste relatório são apresentados a relação e especificação dos equipamentos, as características técnicas de operação e os projetos mecânico e elétrico da bancada.

RELAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos estão divididos em dois grupos principais: o conjunto eletromecânico inversor-motor-eixo e a instrumentação para monitoramento de vibrações.

Relação dos equipamentos

A tabela 7 apresenta a relação de equipamentos do conjunto eletromecânico inversor-motor-eixo e a tabela 8 apresenta a relação de equipamentos da instrumentação para monitoramento de vibrações.

Tabela 7 - Relação de equipamentos conjunto eletromecânico

Nº	Equipamento	Quantidade
1	Inversor WEG CFW500	01
2	Motor WEG W22 Plus	01
3	Eixo mecânico com discos de desbalanceamento	01
4	Mancal de rolamentos Burguer SNA 509	02

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 8 - Relação de equipamentos instrumentação

Nº	Equipamento	Quantidade
5	Fonte de alimentação CC - Minipa MPL-1303M	01
6	Sensor de aceleração IMI 601A01	02
7	Sensor de proximidade Balluff BAW001F	04
8	Sensor de fase Balluff BOS00JT	01

9	Cabo RKWT 4-225/5 M	05
10	Cabo Wilcoxon Research P/N J10	02
11	Conversor Phoenix MACX MCR	02
12	Bloco de terminais de contatos Phoenix UT	02
13	Unidade de aquisição de dados SMGer-GMG	01

Fonte: Autoria própria (2022).

Especificação dos equipamentos

Este item apresenta um resumo com as principais informações técnicas e a função dos equipamentos utilizados na bancada. As especificações detalhadas dos equipamentos podem ser encontradas nas folhas de dados (datasheets) dos equipamentos, disponíveis em arquivo localizado no laboratório do PECCE.

Especificação dos equipamentos do conjunto eletromecânico

Nº1 - Inversor WEG CFW500

O inversor de frequência CFW500 permite o controle de velocidade e torque de motores de indução trifásicos.

Função na Bancada: Controlar o sinal elétrico de alimentação do motor de indução trifásico, ajustando a frequência para alterar a velocidade de rotação (N_r) do eixo do motor.

Na figura 39 podemos visualizar o conjunto eletromecânico da bancada, com o inversor WEG CFW500 alimentando o motor WEG W22 Plus que proporciona o torque ao eixo mecânico acoplado ao motor.

Figura 39 - Conjunto eletromecânico da bancada



Fonte: Acervo pessoal (2022).

Dados do Inversor:

- Parâmetro P0023 – Versão de Software Principal: 1.87
- Parâmetro P0024 – Versão de Software Secundário: 1.01

Indicam as versões de software dos microprocessadores: principal, no cartão de controle CFW500 e secundário, no módulo plug-in. Esses dados estão contidos na memória EEPROM localizada no cartão de controle.

- Parâmetro P0027 – Configuração do Modo Plug-In: 1

Interface: CFW500-IO – Módulo Plug-In Padrão (IO Standart).

Esse parâmetro identifica o plug-in que se encontra conectado ao módulo de controle.

- Parâmetro P0029 – Configuração do Hardware de Potência: 3.

Tensão: 200-240 V;

Rede: Monofásico ou Mono/Tri;

Corrente: 4.3 A;

Mecânica: A.

Esse parâmetro identifica o modelo do inversor distinguindo a mecânica, tensão de alimentação e corrente nominal.

- Parâmetro P0295 – Corrente Nominal do Inversor: 4.3.

Este parâmetro apresenta a corrente nominal do inversor conforme apresentado no parâmetro P0029.

- Parâmetro P0296 – Tensão Nominal da Rede: 0.

Este parâmetro apresenta a tensão nominal de alimentação do inversor conforme apresentado no parâmetro P0029.

- Parâmetro P0297 – Frequência de Chaveamento: 15000.

Frequência de Chaveamento: 15000 Hz.

Pode-se definir através desse parâmetro, a frequência de chaveamento dos IGBT's do inversor.

A frequência de chaveamento do inversor pode ser ajustada de acordo com as necessidades de aplicação. Frequências de chaveamento mais altas implicam em menor ruído acústico no motor. Entretanto, a escolha da frequência de chaveamento

resulta em um compromisso entre o ruído acústico no motor, as perdas nos IGBT's do inversor e as máximas correntes permitidas.

A redução da frequência de chaveamento reduz efeitos relacionados à instabilidade do motor, que ocorrem em determinadas condições de aplicação. Além disso, reduz as correntes de fuga para a terra, podendo evitar a atuação das falhas F0074 (falta a terra) ou F0070 (sobrecorrente ou curto-circuito na saída).

Nº2 - Motor WEG W22 Plus

O W22 Plus WEG é um motor de indução trifásico, fabricado com carcaça de ferro fundido para uso geral. Os motores WEG da linha W22 Plus são motores de alta eficiência e possuem alto nível de rendimento, redução do consumo de energia elétrica e baixos níveis de ruído e vibração.

Função na Bancada: Fornecer o torque mecânico para a rotação do eixo mecânico com discos de desbalanceamento acoplado ao eixo do motor.

Na figura 40 podemos visualizar a plaqueta de identificação com as principais informações elétricas do motor.

Figura 40 - Plaqueta identificação Motor WEG



Fonte: Acervo pessoal (2022).

Dados do motor:

- Modelo do Motor: W22 IR2 1CV 4P 80 3F 220/380 60Hz;
- Grau de Proteção: IP55;
- Potência: 0,75 kW (1,0 HP);
- Carcaça: 80;
- Polaridade: 4 polos;
- Frequência: 60Hz;
- Rotação Nominal: 1730 rpm;
- Tensão Nominal: 220/380 V;

- Corrente Nominal: 3,02/1,75 A;
- Forma Construtiva: B3D;
- Grau de Vibração: A, de acordo com a IEC 60034-14;
- Classe de Isolamento: F (ΔT 80 K);
- Regime de Serviço: S1;
- Categoria: N;
- Aterramento: Dois pontos de aterramento na carcaça;
- Fator de serviço: 1,15;
- Cor: RAL 5009 – Azul;
- Rendimento: Plus.

Sistema de isolamento WISE® (WEG Insulation System Evolution): Apto a operar com inversores de frequência.

Nº3 - Eixo mecânico com discos de desbalanceamento

Eixo mecânico acoplado ao motor fabricado em liga de aço carbono 1050, com uma massa total de 38.78 kg. É sustentado por dois mancais de rolamento (M1 e M2) e possui três discos radiais com 24 perfurações nas extremidades para inserção de massas de desbalanceamento (parafusos e porcas). As dimensões do eixo mecânico estão especificadas na seção Projeto Mecânico.

Função na Bancada: Representa uma carga ou rotor acoplado a máquinas elétricas (Motores de Indução, Hidrogeradores). Permite a análise do deslocamento do eixo e da vibração dos mancais durante o movimento de rotação do eixo com a inserção de massas de desbalanceamento nos discos radiais da sua estrutura.

Informações técnicas:

- Volume: 0.00494023 m³;
- Densidade: 7850 kg/m³;
- Massa: 38.78 kg.

Nº4 - Mancal de rolamentos Burguer SNA 509

A bancada utiliza dois mancais do tipo mancal de rolamentos. As caixas para rolamentos SNA são bipartidas, com alojamento mais largo, definidas como série SNA 500, e possuem dois parafusos para ajuste do acoplamento das seções inferior e superior do mancal. A figura 41 ilustra o tipo de mancal utilizado.

Figura 41 - Mancal de rolamentos



Fonte: SOPETRA (2022).

Função na Bancada: Serve para o suporte e correto alinhamento do eixo mecânico, além de permitir a sua rotação.

Informações técnicas:

- Construção: Uma caixa para cada rolamento, alojamento largo;
- Vedador: Apenas Feltro;
- Lubrificação: Graxa.

Especificação dos equipamentos da instrumentação para monitoramento de vibrações

Nº5 - Fonte de alimentação CC - Minipa MPL-1303M

Fonte de alimentação CC variável, modelo MPL-1303M, com saída única, alta estabilidade, baixo ripple, ajustes de tensão e corrente e circuito de proteção de sobrecarga.

Função na Bancada: Alimentar em 24 Vcc os dois blocos de terminais de contatos (BM1 e BM2) onde estão conectados os sensores e a Unidade de Aquisição de Dados SMGer-GMG.

Especificações Gerais:

- Alimentação: 110/220V AC;
- Consumo Máximo: 160 W;
- Método de Resfriamento: Ventilação Forçada;
- Dimensões (mm)/Peso (g): 160x140x260/5k.

Especificações Técnicas:

- Saída Variável: Simples;
- Tensão/Corrente Variável: 0~32V/0~3A;
- Saída Fixa: Não;
- Proteção de Sobrecarga: Sim;
- Proteção de Inversão de Polaridade: Sim;
- Display: 3 Dígitos Duplo;
- Precisão Básica do Display: 1%;
- Ripple & Ruído (Tensão/Corrente): 1mV/3mA RMS.

Nº6 - Sensor de aceleração IMI 601A01

Sensor de aceleração ICP piezoelétrico, utilizado para converter a força exercida sobre ele por uma vibração (aceleração) em um sinal elétrico proporcional à intensidade da força.

Função na Bancada: Medir o valor RMS da velocidade de vibração absoluta (V_{rms} , mm/s) nos Mancais M1 e M2 no sentido vertical causado pelo movimento de rotação do eixo mecânico com discos de desbalanceamento.

Informações técnicas:

- Tensão de Alimentação: 18 a 28 Vcc;
- Corrente de Operação: 2 a 20 mA;
- Impedância de Saída: <150 Ω ;
- Tensão de Saída: 8 a 12 Vcc;
- Sensibilidade ($\pm 20\%$): 100 mV/g;
- Faixa de Medição: ± 50 g;
- Faixa de Frequência: 0.27 a 10000 Hz;
- Frequência de Ressonância: 16000 Hz;
- Faixa de Temperatura: -54 a +121 °C.

Nº7 - Sensor de proximidade Balluff BAW001F

Sensor de proximidade indutivo para detecção sem contato de objetos metálicos.

Função na Bancada: Medir o deslocamento relativo pico a pico do eixo mecânico ($S(p-p)$, μm) na direção de cada sensor.

Informações técnicas:

- Tensão de Alimentação: 10 a 30 Vcc;
- Tensão de Operação Efetiva: 24 Vcc;
- Corrente de Saída: 4 a 20 mA;
- Faixa de Medição: 0,50 a 2,00 mm;
- Limite de Frequência (-3 dB): 500 Hz;
- Faixa de Temperatura: 10 a 50 °C.

Nº8 - Sensor de fase Balluff BOS00JT

Sensor óptico (fotoelétrico) retro reflexivo com laser de luz vermelha. Possui a necessidade do uso de um espelho prismático, tal característica permite maiores distâncias de detecção, independentemente da cor do alvo. A luz emitida para o espelho prismático é polarizada e refletida retornando para o sensor. A polarização realizada pelo espelho prismático garante que o receptor do sensor detecte apenas a luz emitida, ignorando luzes não polarizadas.

Função na Bancada: Medir a passagem de uma fita adesiva reflexiva (espelho prismático) fixada no eixo mecânico para obter sua velocidade de rotação (N_r , rpm), e também estabelecer um ponto de referência (fase) para agrupar e analisar os dados dos sinais de vibrações.

Informações técnicas:

- Tensão de Alimentação: (10 a 30) Vcc;
- Tensão de Operação Efetiva: 24 Vcc;
- Corrente de Operação: 100 mA;
- Faixa de Medição: 0,10 a 16,00 m;
- Limite de Frequência Max.: 1500 Hz;
- Faixa de Temperatura: (-10 a +50) °C.

Nº9 - Cabo RKWT 4-225/5 M

Cabo de quatro polos para sensores e atuadores, com conector M12 fêmea em ângulo reto e grau de proteção IP 67/NEMA 6P.

Função na Bancada: Cabos condutores para conexão dos sensores de proximidade e do sensor de fase com os dois blocos de terminais de contatos (BM1 e BM2).

Informações técnicas:

- Faixa de Temperatura: (-25 a +80) °C;
- Grau de Proteção: IP67;
- Tipo de Cabo: RKWT;
- Conector 1 (sensor): M12;
- Conector 2 (terminal): Corte aberto;
- Resistência do contato: <5 mΩ;
- Corrente Nominal: 4 A;
- Tensão Nominal: 240 V;
- Revestimento: PUR (sem halogênios) cinza;
- Blindagem: Não;
- Comprimento: 5 m.

Nº10 - Cabo Wilcoxon Research R6-0-J10-16

Cabo bipolar com blindagem de pares trançados e conector R6 (MIL-C-5015) fêmea isolado por revestimento preto extra de eviroprene, para ser utilizado em sensores e atuadores.

Função na Bancada: Cabos condutores para conexão dos sensores de aceleração com os dois blocos de terminais de contatos (BM1 e BM2).

Informações técnicas:

- Faixa de Temperatura: (-50 a +125) °C;
- Grau de Proteção: IP67;
- Tipo de Cabo: J10;
- Conector 1 (sensor): R6 (MIL-C-5015);
- Conector 2 (terminal): Corte aberto;
- Capacitância: 30 pF/ft;
- Tensão Nominal: 600 V;
- Revestimento: Eviroprene cinza (Santoprene);
- Blindagem: Sim;
- Comprimento: 5 m (16ft).

Nº11 - Conversor Phoenix MACX MCR

Amplificador de separação de três vias com alimentação de faixa ampla (UP). O amplificador de três vias é aplicado para separação galvânica e conversão de sinais analógicos padrão. Os ajustes nas configurações do conversor devem ser realizados

através das chaves DIP S1, DIP S2 e DIP S3, conforme as instruções presentes no item 3.3.

Função na bancada: Converter os sinais de tensão bipolar (± 100 mV) dos sensores de aceleração em sinais de corrente unipolar (0 a 20 mA) para adequar ao padrão das entradas analógicas da Unidade de Aquisição de Dados SMGer-GMG.

Entrada de Medição:

- Sinal de Entrada (Uin): Configurável para bipolar ± 100 mV;
- Bornes de entrada: 4.2 (sinal) e 5.2 (GND);
- Sinal Máximo de Entrada: 30 V;
- Resistência de Entrada: 100 k Ω .

Dados de saída:

- Sinal de Saída (Iout): Configurável para unipolar de 0 a 20 mA;
- Corrente de curto-circuito: 40 mA.

Dados Gerais:

- Tensão de Alimentação (Ub): 24 a 230 V CA/CC (50/60 Hz);
- Frequência Limite: Ajustável para 10 kHz;
- Faixa de Temperaturas: (-20 a +70) °C;
- Bitola de Condutor: (0,2 a 2,5) mm²;
- Tensão de isolamento: 300 Vca.

Nº12 - Bloco de terminais de contatos Phoenix UT

Bloco de terminais de contatos duplos (dois bornes em cada via) e opção de contatos em ponte (jumper), para conexão entre condutores de circuitos elétricos.

Função na Bancada: Realizar a conexão elétrica entre os componentes do circuito da instrumentação para monitoramento de vibrações, contendo o barramento da fonte de alimentação CC - Minipa MPL-1303M (24 V e GND) e pontos de conexão entre os sinais do sensoramento e as entradas analógicas da Unidade de aquisição de dados SMGer-GMG.

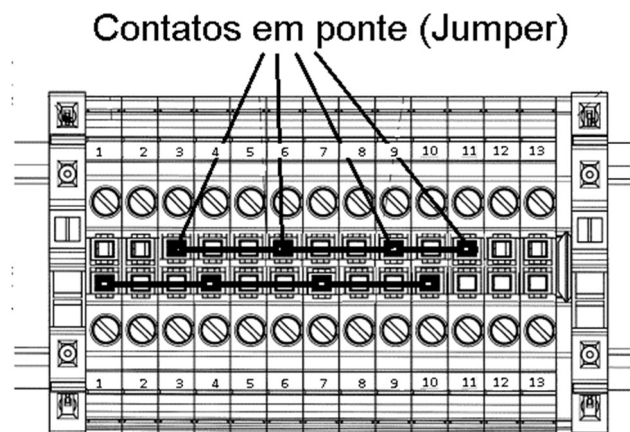
Informações Técnicas:

- Tensão Máxima: 690 V;
- Corrente Nominal: 22 A;
- Corrente Máxima: 28 A;
- Faixa de Temperatura: -60 a +110 °C;

- Resistência do Contato: 0,41 m Ω ;
- Seção do Condutor: 2,5 mm² (AWG 14);
- Seção Máxima do Condutor: 4 mm².

A figura 42 mostra uma representação de um dos blocos de terminais de contatos utilizados no circuito de instrumentação para monitoramento de vibrações, com 13 vias de contatos de dois bornes em cada e vias interligadas por contatos em ponte (jumper). Foi utilizado um bloco de contatos para cada mancal (BM1 e BM2).

Figura 42 - Bloco de contatos da instrumentação



Fonte: Autoria própria (2022).

Nº13 - Unidade de aquisição de dados SMGer-GMG

Unidade de aquisição de dados para monitoramento de grupos motor-gerador, do tipo conversor eletrônico analógico-digital.

Função na Bancada: Realizar a leitura dos sinais analógicos dos sensores de aceleração, dos sensores de proximidade e do sensor de referência de fase, convertendo em sinais digitais para análise e processamento computacional.

A figura 43 apresenta o conversor instalado na bancada do laboratório PECCE, utilizado nos ensaios de medição de desbalanceamento do eixo.

Figura 43 - Conversor analógico-digital



Fonte: Acervo pessoal (2022).

Informações Técnicas:

- Fabricante: AQTECH Engenharia e Instrumentação S.A;
- Tipo: Conversor analógico-digital;
- Número de Fabricação: NS0025;
- Faixa de Medição: 0 a 20 mA ou 0 a 30 V (ajustável);
- Resolução: 0,0001 mA (10 kHz);
- Incerteza de Medição: $\pm 1,0\%$ do VFE.

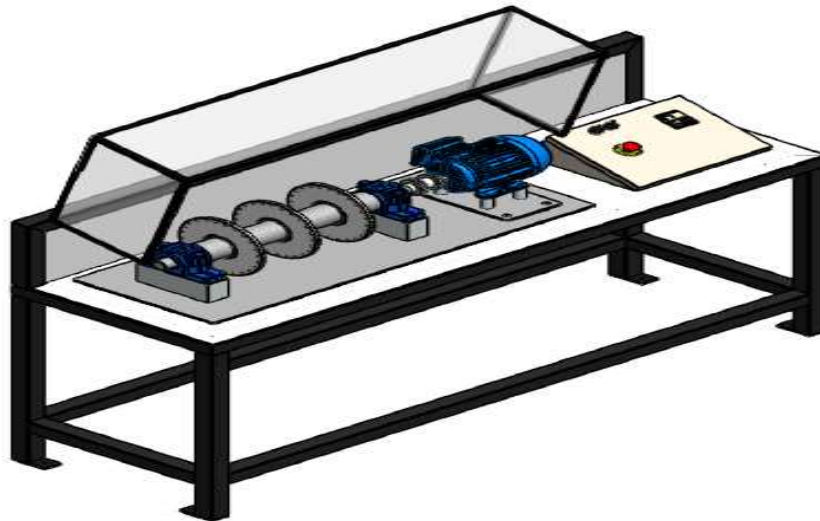
PROJETO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental do PECCE foi concebida para realização de ensaios de desbalanceamento do eixo em máquinas elétricas de baixa rotação. A estrutura mecânica da bancada e os equipamentos eletromecânicos do conjunto inversor-motor-eixo foram projetados e construídos através de parcerias com empresas de engenharia em projetos de pesquisa realizados pelo grupo do PECCE. Durante o desenvolvimento deste trabalho a bancada e o sistema de monitoramento de vibrações foram instalados e entraram em operação no laboratório do PECCE, sendo realizados os primeiros ensaios de desbalanceamento. Os itens a seguir apresentam alguns documentos relacionados ao projeto da bancada e do sistema de monitoramento de vibrações.

Projeto mecânico

A figura 44 apresenta uma ilustração do projeto de construção da bancada, elaborado através de software computacional.

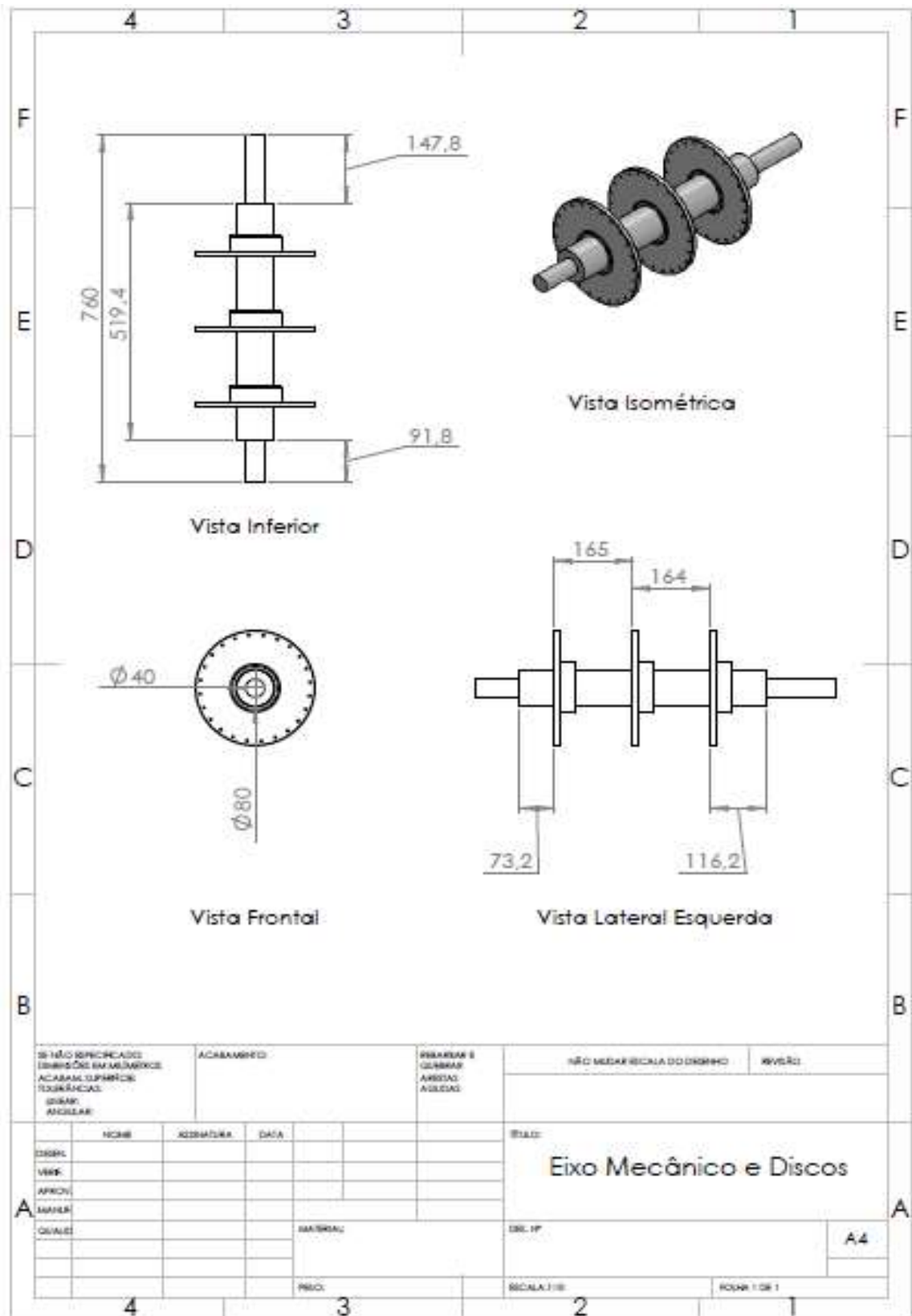
Figura 44 - Projeto de construção da bancada



Fonte: Acervo pessoal (2016).

A figura 45 apresenta uma ilustração com as vistas do projeto de construção do eixo mecânico da bancada e suas medidas, elaborado através de software computacional.

Figura 45 - Projeto do eixo mecânico



Fonte: Autoria própria (2016).

Projeto elétrico

O projeto elétrico da bancada está dividido em dois circuitos principais: o circuito de alimentação do inversor e motor e o circuito da instrumentação para monitoramento de vibrações.

Circuito de alimentação do inversor e motor

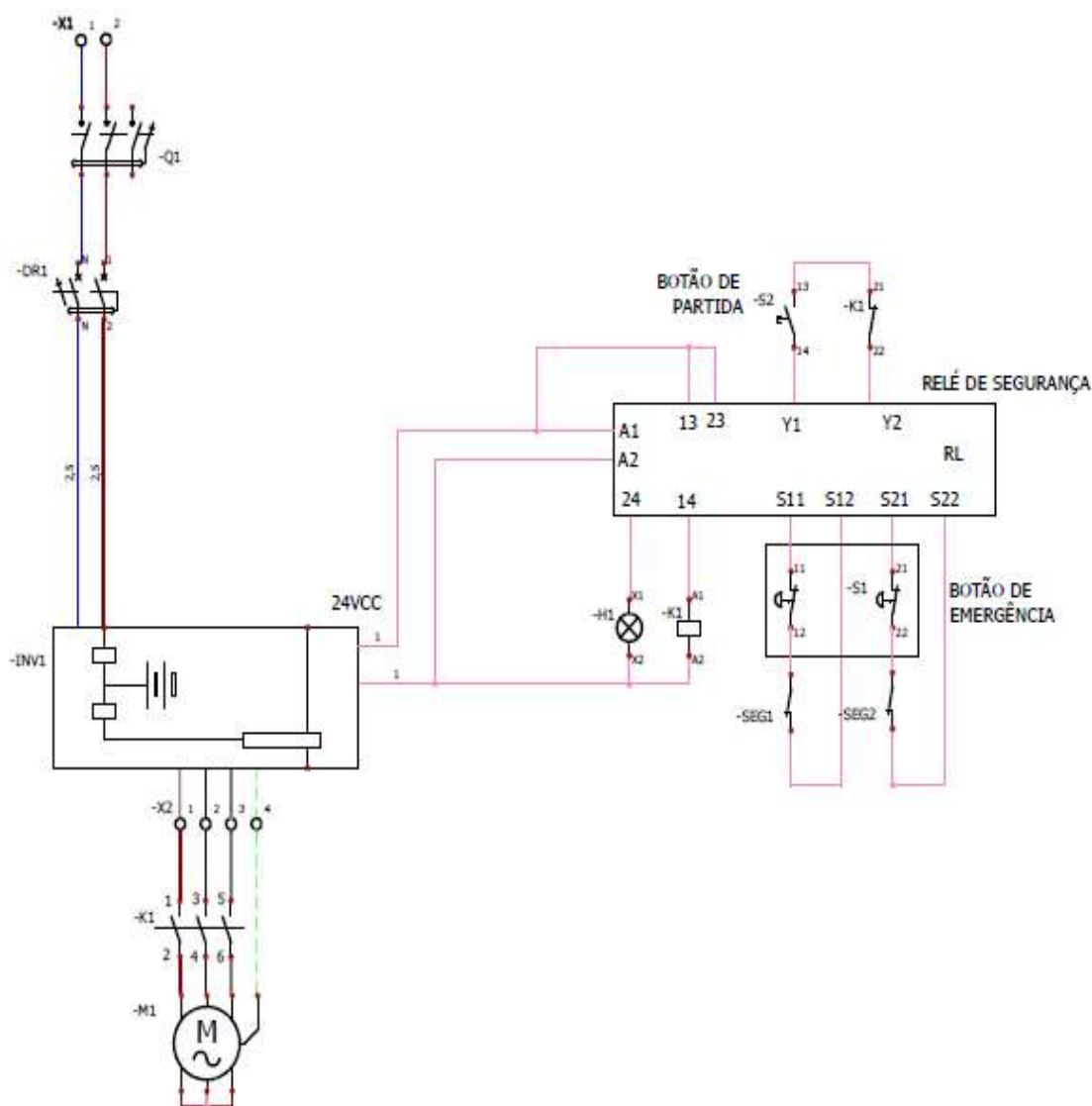
Para alimentação do circuito eletromecânico da bancada basta conectar o inversor a rede elétrica. As principais características do circuito de alimentação do conjunto comando-inversor-motor são descritas abaixo.

- Entrada de alimentação 220 Vac monofásico para o inversor;
- Alimentação do motor via inversor Weg CFW 500 220 Vac trifásico;
- Alimentação do circuito de comando via inversor Weg CFW 500 24 Vcc;
- Relé de segurança para proteção do operador.

A figura 46 apresenta o esquema elétrico do circuito de comando-inversor-motor da bancada.

Figura 46 - Circuito comando-inversor-motor

X1 - BORNEIRA DE ENTRADA DA ALIMENTAÇÃO



Fonte: Acervo pessoal (2016).

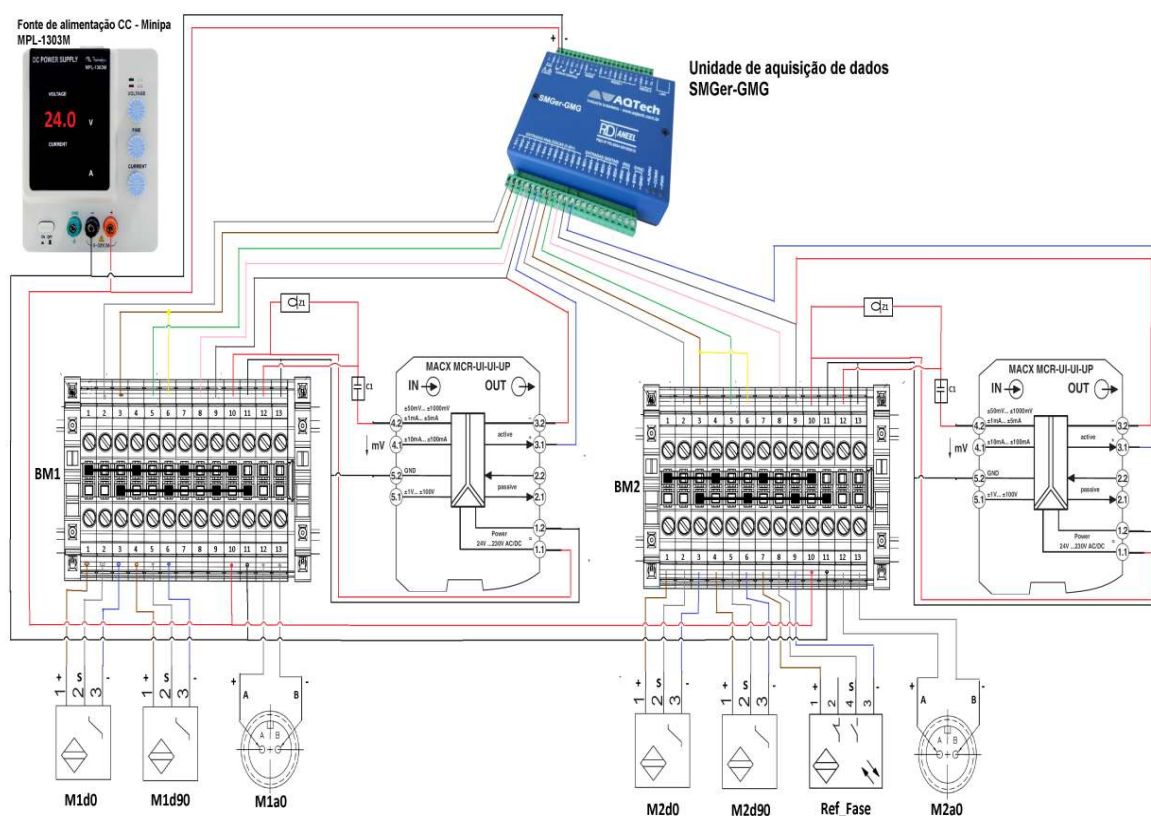
O inversor (INV1) é conectado à rede elétrica através da entrada de alimentação (X1) em 220 Vca, e alimenta o motor de indução trifásico (M1) por meio de um contator (K1), com sinal elétrico conforme configuração de modulação do inversor. Além disso, o inversor também alimenta em 24 Vcc o circuito de comando da bancada, composto por um relé de segurança (RL), botão de partida (S2), botão de emergência (S1) e lâmpada de sinalização de operação (H1).

Circuito da instrumentação

A alimentação do circuito de instrumentação para monitoramento ocorre através de uma fonte CA/CC, conectada diretamente a rede elétrica e com saída em 24 Vcc. A saída da fonte alimenta dois blocos de contatos (BM1 e BM2), que por sua vez distribuem a alimentação para os sensores de proximidade, sensores de aceleração, sensor de referência de fase, para os condicionadores de sinais e para o conversor analógico-digital. Os sinais de saída dos sensores e dos condicionadores são conectados nas entradas analógicas do conversor, e o conversor é conectado por cabo de rede ao hardware de aquisição (computador do laboratório).

A figura 47 apresenta um esquemático com a representação dos equipamentos e do circuito elétrico da instrumentação para monitoramento de vibrações, mostrando os pontos de contato (ligação elétrica) entre os componentes e as cores dos condutores utilizados na bancada.

Figura 47 - Esquemático do circuito de instrumentação



Fonte: Autoria própria (2017).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE OPERAÇÃO

Para a correta realização dos ensaios devem ser adotados determinados procedimentos técnicos de configuração e operação da bancada.

1 - Ajustar o torque de aperto dos parafusos dos mancais (bipartidos) no mesmo valor nos dois mancais, para evitar diferenças de folgas;

2 - Configurar o conversor Phoenix para converter os sinais de tensão dos acelerômetros em sinais de corrente, ajustando as chaves DIP S1, DIP S2 e DIP S3 na seguinte configuração:

- Chave DIP S1: Configurar o sinal de entrada para bipolar (± 100 mV), com entrada nos bornes de contato 4.2 (sinal) e 5.2 (GND).

Tabela 9 - Chave DIP S1

DIP S1							
1	2	3	4	5	6	7	8
	ON		ON	ON		ON	

Fonte: Autoria própria (2017).

- Chave DIP S2: Configurar a conversão do sinal de bipolar para unipolar e o limite de frequência em 10 kHz.

Tabela 10 - Chave DIP S2

DIP S2							
1	2	3	4	5	6	7	8
			ON				

Fonte: Autoria própria (2017).

- Chave DIP S3: Configurar o sinal de saída para unipolar (0 a 20 mA), com saída nos bornes de contato 3.1 (sinal) e 3.2 (GND), saída ativa.

Tabela 11 - Chave DIP S3

DIP S3			
1	2	3	4

Fonte: Autoria própria (2017).

3 - Configurar as entradas analógicas do hardware de aquisição de dados SMGer-GMG para entrada dos sinais dos sensores de aceleração e de proximidade em corrente (0-20 mA) e do sinal do sensor de fase em tensão (0-30 V).

Tabela 12 - Configuração das entradas analógicas do conversor

Entrada Analógica	Origem do Sinal	Configuração
EA01	Sensor de proximidade - M1d0	Corrente (0-20 mA)
EA02	Sensor de proximidade - M1d90	Corrente (0-20 mA)
EA03	Reserva (não utilizado)	-----
EA04	Sensor de aceleração - M1a45	Corrente (0-20 mA)
EA05	Sensor de proximidade - M2d0	Corrente (0-20 mA)
EA06	Sensor de proximidade - M2d90	Corrente (0-20 mA)
EA07	Sensor de fase - Ref. Fase	Tensão (0-30 V)
EA08	Sensor de aceleração - M2a45	Corrente (0-20 mA)

Fonte: Autoria própria (2017).

4 - Energizar o circuito da instrumentação para monitoramento de vibrações e regular a fonte cc em 24 Vcc;

5 - Configurar o software de aquisição e as telas de visualização dos sinais.

- Ajustar a conversão das grandezas dos sinais dos sensores de aceleração via software:

- Ajustar equação linear para converter o sinal de corrente (0-20 mA) em aceleração (a , m/s^2);

Coeficiente Angular: 0.1;

Coeficiente Linear: -1;

Unidade: g.

- Utilizar a função de integração para converter o sinal de aceleração (a , m/s^2) em velocidade (v , m/s).

- Ajustar a conversão das grandezas dos sinais dos sensores de proximidade:

- Ajustar equação linear para converter o sinal de corrente (4-20 mA) em deslocamento (S , μm);

Coeficiente Angular: 93.75;

Coeficiente Linear: 125;

Unidade: μm .

- Centralizar os sensores de proximidade ajustando a distância dos sensores ao eixo para metade da faixa de medição (12 mA).

6 - Energizar o circuito de comando-inversor-motor e realizar o ajuste da velocidade de rotação do eixo mecânico via inversor, sendo que a frequência de rotação do eixo será igual à metade da frequência de alimentação, por se tratar de um motor de indução trifásico de 4 polos (rotação nominal = $\frac{1}{2}$ frequência elétrica), como podemos deduzir da equação 2.3, desconsiderando o escorregamento e convertendo para rotação em Hz.

$$Nr(rpm) = \frac{120 \cdot fs}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.3)$$

$$Nr(Hz) = \frac{2 \cdot fs}{4} = \frac{fs}{2} \quad (5.1)$$

7 - Realizar a aquisição dos sinais via software.

8 - Parar o movimento de rotação do eixo desligando o inversor e interrompendo a alimentação do motor. Desenergizar o circuito de comando-inversor-motor. Fechar o software de aquisição interrompendo a comunicação com o hardware da unidade de aquisição de dados. E, por último, desligar a fonte de alimentação CC para desenergizar o circuito da instrumentação para monitoramento de vibrações.

9 - Inserir massas para desbalanceamento, conforme a figura 48, que apresenta um exemplo de inserção de massas de desbalanceamento.

Figura 48 - Massas de desbalanceamento



Fonte: Adaptado de TOMINAGA (2021).

As massas para desbalanceamento são introduzidas através de parafusos, arruelas e porcas fixados nos discos do eixo mecânico, conforme o tipo de desbalanceamento avaliado, e foram padronizadas em três níveis de severidade: N1 (18,5 g), N2 (36,3 g) e N3 (66,1 g). Por fim, repetir as etapas 4, 6, 7 e 8 até a conclusão dos ensaios.