



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Samuel Henrique dos Santos van Riel

**Desenvolvimento de uma ferramenta de análise orbital para investigação de
problemas em mancais de deslizamento**

Florianópolis
2023

Samuel Henrique dos Santos van Riel

Desenvolvimento de uma ferramenta de análise orbital para investigação de problemas em mancais de deslizamento

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.

Supervisor: Tiago Matsuo, Eng.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Riel, Samuel Henrique dos Santos van
Desenvolvimento de uma ferramenta de análise orbital
para investigação de problemas em mancais de deslizamento /
Samuel Henrique dos Santos van Riel ; orientador, Hector
Bessa Silveira, coorientador, Tiago Kaoru Matsuo, 2023.
98 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Usinas
hidroelétricas. 3. Análise de vibrações. 4. Mancais de
deslizamento. 5. Análise de órbita. I. Silveira, Hector
Bessa. II. Matsuo, Tiago Kaoru. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e
Automação. IV. Título.

Samuel Henrique dos Santos van Riel

Desenvolvimento de uma ferramenta de análise orbital para investigação de problemas em mancais de deslizamento

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 14 de dezembro de 2023.

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/DAS

Tiago Kaoru Matsuo, Eng.
Supervisor
AQTech Power Prognostic

João Paulo Zomer Machado, Eng.
Avaliador
Labmetro

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado a todas as pessoas que tornaram minha jornada possível. Em especial à minha família, pelo amor incondicional e apoio constante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial a minha mãe Cibele, pela sua incansável busca e incentivo ao meu sucesso, sem a sua ajuda nunca teria chegado até aqui. Agradeço ao meu pai Marcos, que sempre apoiou e incentivou os meus sonhos. Agradeço ao meu irmão, às minhas avós e aos meus tios e tias, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e comemorando as minhas conquistas.

Agradeço aos amigos que fiz durante a faculdade, que tornaram toda essa minha trajetória fácil e leve. Todos os momentos felizes, divertidos e animados que passamos juntos nestes anos me ajudaram a continuar e não desistir, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço também as instituições que contribuíram para minha jornada acadêmica, a todos os docentes da UFSC, ao Fórum UFSC e ao laboratório de metrologia e automatização (Labmetro), pelos três anos em que pude evoluir profissional e academicamente.

Por fim, agradeço à AQTech, empresa que me proporcionou o desenvolvimento deste trabalho, e ao meu supervisor na empresa, o Engenheiro Tiago Kaoru Matsuo pela confiança. E também agradeço a todos os colaboradores da AQTech que de algum modo contribuíram para o desenvolvimento desse projeto.

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

(Sir Isaac Newton)

“Se eu não puder fazer coisas grandiosas, posso fazer pequenas coisas de forma grandiosa.”

(Martin Luther King)

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 14 de dezembro de 2023.

Na condição de representante da AQTech Power Prognostic na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.

Tiago Kaoru Matsuo
AQTech Power Prognostic

RESUMO

No Brasil, as energias renováveis representam aproximadamente 92% de toda a matriz energética, sendo que cerca de 58% dessa energia é gerada por usinas hidrelétricas distribuídas em 1330 empreendimentos de diferentes portes. Com o intuito de garantir a operação contínua desses ativos de geração, as empresas do setor estão investindo cada vez mais em sistemas de monitoramento de condição das máquinas. Dentre as partes dos hidrogeradores que geralmente requerem maior atenção em termos de manutenção, destacam-se os mancais de deslizamento, componentes críticos que sustentam e guiam o movimento do eixo principal de uma unidade geradora. Os mancais suportam todos os esforços mecânicos da turbina e do gerador, incluindo cargas axiais e radiais. Os principais problemas associados a esses componentes incluem desalinhamento, desbalanceamento, folgas excessivas, roçamento e rodopio de óleo. Para detectar e avaliar esses problemas, a norma ISO 20816-5 propõe um método de análise de sinais baseado no monitoramento de dois sensores de proximidade instalados no mancal para medir o deslocamento do eixo. Além disso, a norma apresenta a técnica de análise de órbita, uma ferramenta de diagnóstico relevante para máquinas rotativas. A análise de órbita é uma técnica que permite avaliar a condição e o comportamento dinâmico de componentes rotativos de uma unidade geradora, sendo particularmente útil para identificar os principais problemas associados aos mancais de deslizamento. Essa análise envolve a medição e o estudo das oscilações do eixo durante a rotação da máquina. Atualmente, o sistema de análise de sinais da AQTech não dispõe de ferramentas específicas para a análise de defeitos em mancais de deslizamento. Buscando aprimorar essa capacidade, foi desenvolvido um novo módulo de análise de órbitas em WPF integrado ao software Insight. Essa ferramenta proporciona a visualização dos sinais de órbita dos mancais no domínio do tempo e da frequência. Para a visualização do espectro de frequência da órbita, foi utilizado o algoritmo de *Full Spectrum*, sendo a primeira ferramenta da empresa a implementar esse algoritmo. Com a conclusão da implementação do projeto, obteve-se uma ferramenta capaz de atender os requisitos e objetivos propostos, proporcionando aos analistas de vibrações, usuários da ferramenta de análise da empresa, novos recursos para auxiliar na investigação e determinação de defeitos em mancais de deslizamento, contribuindo assim na melhoria da eficiência do processo de manutenção de unidades geradoras.

Palavras-chave: Monitoramento de usinas hidroelétricas. Mancais de deslizamento. Análise de vibrações. Análise de órbita. Full Spectrum.

ABSTRACT

In Brazil, renewable energies account for approximately 92% of the entire energy matrix, around 58% of this energy is generated by hydroelectric plants from 1330 projects of various sizes. To ensure the continuous operation of these generation assets, companies in the sector are increasingly investing in machine condition monitoring systems. Among the components of hydro generators that typically require more attention in terms of maintenance, sliding bearings stand out as critical components that support and guide the movement of the main shaft of a generating unit. Bearings bear all the mechanical loads of the turbine and generator, including axial and radial loads. The main issues associated with these components include misalignment, imbalance, excessive clearances, rubbing, and oil whirl. To detect and evaluate these issues, ISO 20816-5 proposes a signal analysis method based on monitoring two proximity sensors installed on the bearing to measure the displacement of the shaft. Additionally, the standard introduces the orbit analysis technique, a relevant diagnostic tool for rotating machinery. Orbit analysis is a technique that allows the evaluation of the condition and dynamic behavior of rotating components in a generating unit, particularly useful for identifying the main problems associated with sliding bearings. This analysis involves measuring and studying the shaft's oscillations during the rotation of the machine. Currently, AQTech signal analysis system lacks specific tools for analyzing defects in sliding bearings. To enhance this capability, a new orbit analysis module integrated into the Insight software was developed using WPF. This tool provides visualization of the orbit signals of the bearings in both the time and frequency domains. For the visualization of the frequency spectrum of the orbit, the Full Spectrum algorithm was used, making it the company's first tool to implement this algorithm. With the completion of the project implementation, a tool capable of meeting the proposed requirements and objectives was obtained. This tool provides vibration analysts, users of the company's analysis tool, with new features to assist in the investigation and determination of defects in sliding bearings, thereby contributing to the improvement of the efficiency of the maintenance process for generating units.

Keywords: Hydroelectric plant monitoring. Sliding bearings. Vibration analysis. Orbit analysis. Full Spectrum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes na capacidade instalada	15
Figura 2 – Usina hidrelétrica.	19
Figura 3 – Principais componentes de uma unidade hidrogeradora.	20
Figura 4 – Tipos de mancais guia.	22
Figura 5 – Desbalanceamento estático.	24
Figura 6 – Desbalanceamento acoplado.	24
Figura 7 – Desbalanceamento dinâmico.	25
Figura 8 – Tipos de desalinhamento.	25
Figura 9 – Mancal desalinhado.	26
Figura 10 – Órbita de desalinhado.	26
Figura 11 – Órbita característica de rodopio de óleo.	28
Figura 12 – Análise de Vibrações.	29
Figura 13 – Posição de instalação dos transdutores de vibração.	30
Figura 14 – Posição de instalação de sensores de proximidade.	31
Figura 15 – Sensor de proximidade indutivo.	32
Figura 16 – Curva de resposta do sensor indutivo de proximidade.	33
Figura 17 – Órbita resultante da medição da variação temporal do centro do eixo por cada transdutor.	34
Figura 18 – Deslocamento do centro do eixo para diferentes rotações da unidade geradora.	36
Figura 19 – Procedimento matemático para obter o <i>Full Spectrum</i>	37
Figura 20 – Elipse formada pela rotação de dois fasores com mesma frequência, girando em sentidos opostos.	38
Figura 21 – Diferentes órbitas com os respectivos espectros.	40
Figura 22 – Transformada rápida de Fourier (FFT).	41
Figura 23 – Funções de janelamento.	42
Figura 24 – Janela Hanning no domínio do tempo e da frequência.	43
Figura 25 – Solução VibraOne.	46
Figura 26 – Pacote de software AQTech.	46
Figura 27 – Ferramenta de análise de sinais (<i>Insight</i>).	47
Figura 28 – Diagrama conceitual da solução proposta.	52
Figura 29 – Diagrama de casos de uso "Importar sinais".	55
Figura 30 – Diagrama de casos de uso "Configuração e processamento".	56
Figura 31 – Diagrama de casos de uso "Janela de visualização".	57
Figura 32 – Interface de programação Visual Studio.	58
Figura 33 – Código XAML de uma aplicação Windows.	59
Figura 34 – Diagrama abstrato da arquitetura MVVM.	62

Figura 35 – Arquitetura das interfaces de visualização.	63
Figura 36 – Implementação da interface genérica de gráficos.	65
Figura 37 – Diagrama de sequência de configuração dos sinais de órbita.	68
Figura 38 – Diagrama da classe de uma configuração de órbita.	69
Figura 39 – Diagrama lógico de processamento dos sinais de órbita.	70
Figura 40 – Posição dos sensores e respectivas visualizações gráficas não compensadas.	71
Figura 41 – Gráfico dos sinais analisados. Sinal do sensor de referência de fase (Azul) e sinais dos proxímetros (Vermelho e Verde).	72
Figura 42 – Concentricidade em mancais de deslizamento.	73
Figura 43 – Exemplo gráfico do valor pico a pico dos sinais de uma órbita.	75
Figura 44 – Implementação da visualização do <i>full spectrum</i>	76
Figura 45 – Importação de registro de sinais.	78
Figura 46 – Menu de contexto.	79
Figura 47 – Visualização inicial da ferramenta de análise de órbita com menu de ferramentas expandida.	80
Figura 48 – Janela de configuração de sinais da ferramenta de análise.	81
Figura 49 – Janela de configuração da visualização da ferramenta de análise.	82
Figura 50 – Visualização do sinal de órbita.	83
Figura 51 – Resultados obtidos ao selecionar o sinal de órbita.	83
Figura 52 – Visualizações complementares (Circulo de folga e indicação de rpm).	85
Figura 53 – Múltiplos sinais de órbita.	85
Figura 54 – Visualização da linha central do eixo (<i>Shaft Centerline</i>).	86
Figura 55 – Visualização do espectro de órbita (<i>Full spectrum</i>).	87
Figura 56 – Órbita simulada.	88
Figura 57 – Espectro de órbita do sinal simulado.	88
Figura 58 – Sinal de órbita com ruído de alta frequência.	89
Figura 59 – Sinal de órbita filtrado com características de rodopio de óleo.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisito funcional para importação dos registros de sinais.	49
Tabela 2 – Requisito funcional para configuração dos sinais.	49
Tabela 3 – Requisito funcional para visualização dos sinais de órbita.	50
Tabela 4 – Requisito funcional para processamento dos sinais de órbita.	51
Tabela 5 – Requisito funcional para visualização espectral da órbita.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	USINA HIDRELÉTRICA	19
2.2	UNIDADE GERADORA	20
2.2.1	Turbinas hidráulicas	21
2.2.2	Geradores elétricos	21
2.2.3	Mancais	21
2.3	PRINCIPAIS PROBLEMAS DE MANCAIS DE DESLIZAMENTO	23
2.3.1	Desbalanceamento	23
2.3.2	Desalinhamento	25
2.3.3	Rozamento	26
2.3.4	Folga excessiva	27
2.3.5	Rodopio do óleo	27
2.4	ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	28
2.4.1	Aplicação em mancais de deslizamento	29
2.4.1.1	Sensor de Proximidade	31
2.4.1.2	Referência de fase	33
2.5	ÓRBITA	33
2.5.1	Shaft Centerline	35
2.5.2	Espectro da órbita - Full Spectrum	36
2.6	FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE SINAIS	40
2.6.1	Fast Fourier Transform (FFT)	40
2.6.2	Função de janelamento	41
2.6.2.1	Janelamento Hanning	42
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, REQUISITOS TÉCNICOS E SOLUÇÃO PROPOSTA	44
3.1	VISÃO GERAL	44
3.2	SOBRE A EMPRESA	45
3.3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	47
3.4	REQUISITOS TÉCNICOS E FUNCIONAIS	48
3.5	SOLUÇÃO PROPOSTA	52
4	DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO	54

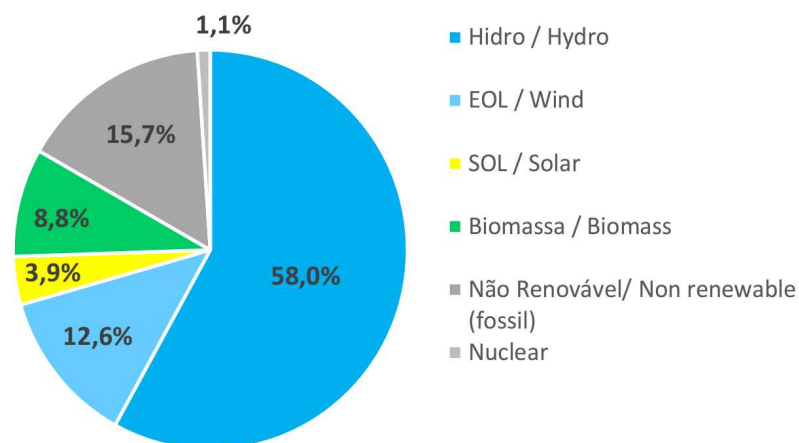
4.1	DIAGRAMAS	54
4.1.1	Diagrama de casos de uso	54
4.2	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO	57
4.2.1	WPF - Windows Presentation Foundation	58
4.2.2	Programação C#	59
4.2.3	MVVM	61
4.2.4	Versionamento de código	62
4.3	IMPLEMENTAÇÃO	63
4.3.1	Infraestrutura do software	63
4.3.2	Dados	66
4.4	VISUALIZAÇÃO	66
4.4.1	Configuração	67
4.5	PROCESSAMENTO	69
4.5.1	Cálculo da componente média do sinal (DC)	72
4.5.2	Concentricidade	73
4.5.3	Máximo deslocamento do eixo e valor pico a pico	74
4.6	FULL SPECTRUM	75
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
5.1	DADOS TESTE	78
5.2	CONFIGURAÇÃO	78
5.3	VISUALIZAÇÃO CARTESIANA DA ÓRBITA	82
5.4	ESPECTRO COMPLETO DA ÓRBITA (FULL SPECTRUM)	86
5.5	ANÁLISES AVANÇADAS	89
5.6	TESTES	90
6	CONCLUSÃO	91
6.1	TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Dentre todas as formas de energia produzidas e consumidas pela humanidade, a energia elétrica tornou-se uma das mais importantes, visto que está presente em praticamente todas as nossas atividades do cotidiano e tem um papel fundamental para o desenvolvimento econômico do país. Desde a revolução industrial, a energia elétrica tem desempenhado um papel central na sociedade moderna, impulsionando avanços tecnológicos e promovendo o crescimento nas áreas industriais, comerciais, agrícolas e sociais (GUENA; AQUINO, 2007). Com o avanço tecnológico, crescimento populacional e das mudanças climáticas, a demanda por energias limpas e renováveis vem crescendo em um ritmo acelerado.

Diferentemente da maioria dos países, que dependem amplamente de fontes não renováveis de energia, o Brasil se destaca positivamente por possuir uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo. Segundo o balanço energético nacional de 2022, aproximadamente 92,1% da energia elétrica produzida no país foi proveniente de fontes renováveis, um aumento de 10,2% da renovabilidade em relação a 2021 (EPE, 2023). Desse total, aproximadamente 58% foi gerada por usinas hidroelétricas em 1.330 empreendimentos que totalizam 109 GW de capacidade instalada, como ilustrado na Figura 1. Isso evidencia a importância de estudos relacionados à geração hidroelétrica para o Brasil.

Figura 1 – Participação das fontes na capacidade instalada



Fonte: (EPE, 2023).

Como mencionado, a energia elétrica é de extrema importância para o Brasil, especialmente a gerada por usinas hidrelétricas. Assim, a indisponibilidade de qualquer ativo por manutenção, problema técnico ou outros motivos, resulta em um déficit de energia produzida, fazendo com que a demanda seja suprida por outras fontes de

geração, com custos diferentes. Isso impacta diretamente os ganhos financeiros das empresas responsáveis pela operação desses ativos.

Nesse contexto, cabe às equipes de manutenção assegurar o desempenho adequado desses ativos de geração. Apesar disto, o que se tem visto na área é que o investimento em equipes de operação e manutenção é cada vez menor. Para reduzir custos operacionais, empresas trabalham com equipes enxutas que acabam sendo sobrecarregadas. Por este motivo, técnicas que auxiliem essas equipes nas atividades de manutenção, reduzindo horas de engenharia e minimizando as horas de indisponibilidade do ativo, têm bastante relevância para o setor. Para isso, uma das técnicas empregadas é o monitoramento online das condições, utilizada para inferir a saúde desses sistemas (MATSUO, 2017).

O monitoramento das condições permite avaliar o estado de envelhecimento dos ativos e identificar a necessidade de ações de manutenção, reparo ou substituição, evitando paradas não planejadas e reduzindo a probabilidade de falhas graves que poderiam causar interrupções na geração de energia, aumentando, assim, a vida útil dos ativos. Na geração hidroelétrica, os componentes que exigem maiores cuidados são o estator, as pás das turbinas e os mancais, especialmente os de deslizamento.

Os mancais sustentam todo o peso da unidade geradora por meio do rotor, permitindo seu movimento suave durante a operação da máquina. A falha em um mancal guia ou de escora pode comprometer toda a operação de uma unidade geradora. Através da análise de sinais, é possível aplicar diferentes técnicas para inferir a condição operativa da máquina, como, por exemplo, através da análise de órbita de mancais de deslizamento.

De acordo com Bently Donald (2002), a órbita representa a trajetória do eixo da máquina no plano de leitura do par de sensores de proximidade instalados em quadratura. Esses sensores fornecem informações avançadas sobre o estado de operação do componente analisado, através da trajetória do rotor em relação à estrutura interna do mancal. A análise de órbita possibilita que especialistas em vibrações identifiquem visualmente problemas, como desequilíbrios, desalinhamentos e folgas excessivas em mancais de deslizamento.

1.1 MOTIVAÇÃO

As tendências atuais do mercado de geração hidroelétrica mostram que cada vez mais as usinas serão operadas remotamente, por equipes enxutas, para reduzir os custos de operação (MATSUO, 2017). Por causa disso, sistemas de monitoramento de condições remoto de máquinas vêm recebendo cada vez mais investimentos do setor, visto que a parada súbita de qualquer unidade geradora pode implicar em multas por indisponibilidade de fornecimento e os próprios custos associados à manutenção corretiva.

Nesse contexto, a AQTech se insere como uma empresa especializada em fornecer soluções avançadas de monitoramento e diagnósticos de falhas para ativos de geração elétrica, como aerogeradores e usinas hidrelétricas. Como meta, a empresa busca se manter como referência nacional, prestando serviços de excelência e desenvolvendo soluções inovadoras para o setor elétrico. Com a intenção de inovar, atualmente o sistema de análise de sinais offline da empresa não possui ferramentas de análise específicas para o conjunto eixo-mancal.

Assim, este trabalho visa desenvolver ferramentas para identificação de problemas ou defeitos em mancais de deslizamento a partir de sinais provenientes de sensores de deslocamento instalados sobre os mancais. A norma de referência é a ISO 10817-1 (*Rotating shaft vibration measuring systems — Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration*), que fornece detalhes sobre como realizar o monitoramento e análises de vibração em eixos de máquinas de grande porte, como grupos geradores de turbina a vapor, turbinas a gás e máquinas hidráulicas, por meio da técnica de análise de órbita.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é desenvolver e integrar diversas ferramentas de análise de órbita para mancais de deslizamento no software de análise de sinais "Insight" da empresa AQTech Power Prognostics, a partir do processamento dos registros de sinais de sensores de deslocamento instalados em quadratura sobre os mancais de uma unidade geradora, tendo como propósito final possibilitar que analistas de vibrações consigam identificar problemas prejudiciais à operação do mancal e da máquina, como folgas excessivas, desalinhamento, desbalanceamento, roçamento e o rodopio de óleo, por meio das ferramentas desenvolvidas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Do objetivo geral, derivam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento dos requisitos do sistema com a equipe de desenvolvimento;
- Melhorar estrutura de interfaces do "Insight", para receber novas implementações futuras mais facilmente;
- Desenvolver interface gráfica de configuração dos sinais do mancal e a interface de visualização das órbitas em coordenadas cartesianas;

- Desenvolver algoritmos de processamento de dados para extrair informações relevantes das órbitas dos mancais de deslizamento;
- Implementar algoritmo de processamento do espectro de frequência da órbita (*Full Spectrum*);
- Realizar testes e validações do sistema em condições de operação reais, visando assegurar a confiabilidade dos resultados das órbitas e do espectro;
- Documentar e apresentar as ferramentas para a empresa, visando assegurar a correta utilização das ferramentas de análise implementadas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta monografia está dividida da seguinte forma: O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica, respaldando o problema e o desenvolvimento do trabalho com base em literatura especializada. São destacados conceitos fundamentais relacionados à utilização de mancais em usinas hidrelétricas, monitoramento remoto e análise de defeitos, incluindo aspectos específicos da técnica de análise de órbita em mancais de deslizamento. No Capítulo 3 é apresentado a descrição do problema abordado no trabalho, juntamente com a definição dos requisitos técnicos a serem atendidos pela ferramenta, além da descrição da solução proposta. No Capítulo 4 é apresentado as atividades desenvolvidas no projeto, desde a modelagem do software até a implementação das funcionalidades, destacando as tecnologias utilizadas. O Capítulo 5 apresenta e analisa os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho e possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

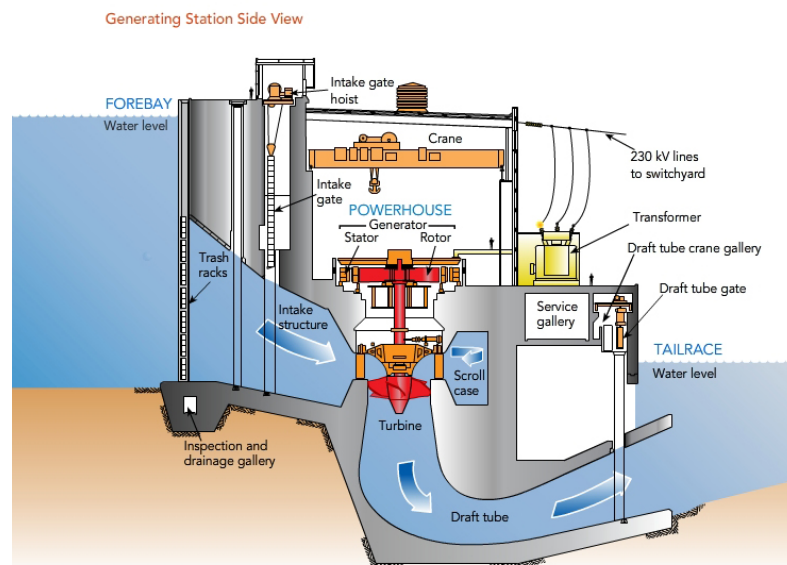
Este capítulo visa apresentar e explicar os conceitos utilizados no desenvolvimento do projeto, que incluem aspectos conceituais sobre o funcionamento de usinas hidrelétricas (Seção 2.1), os principais problemas observados em mancais de deslizamento (Seção 2.3), os fundamentos da análise de vibrações (Seção 2.4) e da técnica de análise de órbita (Seção 2.5) e todo o aparato necessário para realizar esse tipo de análise.

2.1 USINA HIDRELÉTRICA

Segundo Soares Júnior (2013), uma usina hidrelétrica pode ser definida como um conjunto de obras e equipamentos, que tem por finalidade a geração de energia elétrica a partir da energia potencial ou gravitacional da água, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

Uma usina hidrelétrica pode ser construída de diversas formas. Diversos fatores influenciam no projeto e construção, tais como a topografia e a geologia do local. No entanto, mesmo o projeto mudando de acordo com cada local, alguns componentes se mantêm. Na Figura 2 é ilustrado um exemplo de uma usina hidrelétrica e seus componentes: barragem, tomada d'água, vertedouro, comporta, casa de força, turbina e gerador.

Figura 2 – Usina hidrelétrica.



Fonte: (MANITOBA HYDRO, 2018).

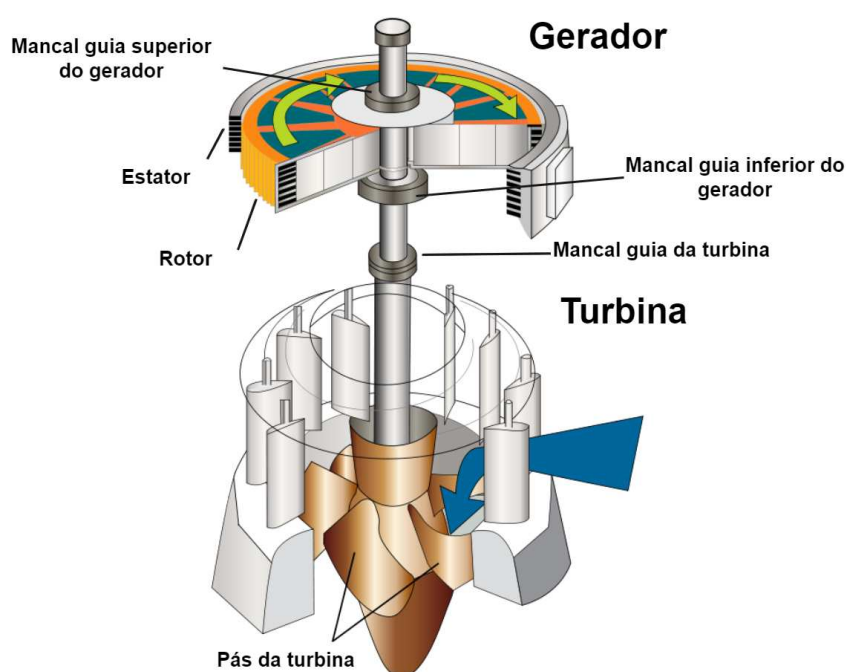
Conforme Gerhard (1977), uma usina hidrelétrica é composta basicamente por um reservatório d'água, criado por uma barragem, sistema de captação, casa de força, subestação e vertedouro. No reservatório a água é capturada pela tomada d'água que conduz a água para dentro do conduto forçado. No conduto forçado a água flui em alta pressão até a turbina, convertendo a energia potencial gravitacional da água em energia cinética para movimentar o rotor. Ao passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio através do tubo de sucção e pelo canal de fuga ao nível jusante.

No coração da usina hidroelétrica encontra-se a casa de força que abriga o conjunto turbina-gerador, denominado de unidade geradora. A composição da unidade geradora depende primeiramente do tipo da turbina, sendo que os mais utilizados são as turbinas Pelton e Francis de eixo horizontal e as turbinas Kaplan e Francis de eixo vertical. Cada tipo de turbina é adequado para uma determinada altura de queda e vazão volumétrica.

2.2 UNIDADE GERADORA

Resumidamente, as unidades hidrogeradoras podem ser subdivididas em três principais componentes: turbina, gerador e mancal. Esses componentes são fundamentais para a operação de qualquer tipo de usina hidrelétrica. Na Figura 3 é apresentado o exemplo de uma unidade geradora e seus componentes principais sobre uma turbina do tipo Kaplan.

Figura 3 – Principais componentes de uma unidade hidrogeradora.



Fonte: Arquivo pessoal.

2.2.1 Turbinas hidráulicas

A turbina é o componente que transforma a energia potencial hidráulica em energia mecânica através da força d'água. Geralmente, as turbinas são formadas por pás ou hélices. Segundo Soares Júnior (2013, p. 6): “[...] a água ao atingir a turbina a faz girar, ocorrendo assim, a transformação da energia hidráulica em mecânica”. Existem variados tipos e modelos de turbinas, as principais são as turbinas de impulso, de reação e as de hélice, além das variações de instalação com rotor vertical ou horizontal.

Mesmo existindo variados tipos e modelos de turbinas, todas possuem o mesmo princípio de funcionamento, a água entra na turbina vinda de um reservatório ou de um nível mais alto e escapa para um canal de nível mais baixo. A água que entra é conduzida por um duto fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transformam a energia hidráulica (energia de pressão e/ou energia cinética) do fluxo de água em potência mecânica, fazendo o rotor da turbina girar. O eixo acoplado ao rotor da turbina, transmite o movimento de rotação para o rotor do gerador (CARVALHO, 1985).

2.2.2 Geradores elétricos

O gerador é o componente que converte a energia mecânica em energia elétrica. De acordo com Gerhard (1977), a maioria das usinas hidrelétricas utiliza geradores síncronos, nos quais a velocidade de rotação do gerador é constante e sincronizada com a frequência e a fase da rede elétrica.

Em um gerador síncrono, para produzir eletricidade, um campo magnético é gerado no rotor, por meio de um ímã permanente ou de um eletroímã, onde se aplica uma corrente contínua no enrolamento do rotor. Em seguida, o rotor é acionado mecanicamente por uma máquina motriz, no caso em questão, pela turbina hidráulica. Os enrolamentos excitados do rotor irão produzir um campo magnético giratório no gerador. Este campo rotativo, por sua vez, irá induzir um conjunto de tensões trifásicas, defasadas de 120° entre si, nos enrolamentos de estator do gerador (CHAPMAN, 2013).

Na maioria das instalações hidrelétricas, os geradores são acoplados diretamente ao eixo da turbina, em casos especiais são conectados indiretamente, por meio de uma caixa de engrenagens. Em ambas as aplicações, tanto o gerador quanto a turbina são sustentadas vertical ou horizontalmente por mancais.

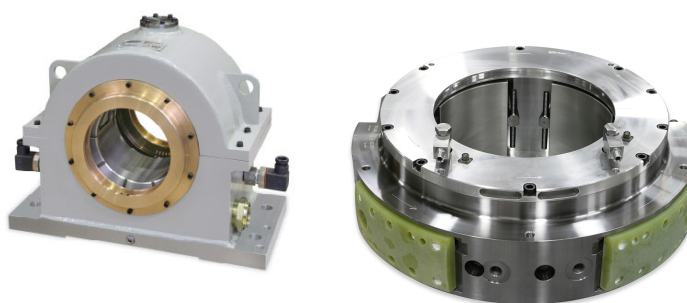
2.2.3 Mancais

Nesse contexto, os mancais são componentes utilizados para sustentar e guiar o movimento do eixo principal da máquina. Em uma unidade geradora os mancais suportam todos os esforços mecânicos da turbina e do gerador tanto por cargas axi-

ais quanto por cargas radiais. Em função dos altos esforços mecânicos, os mancais mais utilizados em usinas hidrelétricas são os de deslizamento. Devido seu princípio construtivo, mancais de deslizamento conseguem suportar grandes cargas de trabalho.

O mancal de deslizamento funciona basicamente a partir do princípio de lubrificação que é a formação de uma película de óleo durante o movimento do eixo da máquina. O filme de óleo tem a finalidade de reduzir o atrito entre a parte girante e as sapatas do mancal (parte estacionária). Na Figura 4, são mostrados dois exemplos de mancais guia, um projetado para máquinas horizontais e outro para máquinas verticais, respectivamente.

Figura 4 – Tipos de mancais guia.



(a) Mancal guia horizontal. (b) Mancal guia vertical.

Fonte:(WAUKESHA, 2021).

Quando a unidade geradora está parada, o eixo da máquina encosta nas sapatas do mancal devido ao peso do conjunto turbina-gerador, uma vez que a pressão de sustentação do filme de óleo só se forma quando a máquina está em funcionamento. Devido a isso, em cada partida e parada da máquina ocorre um desgaste entre o eixo e sapata, causando o aumento da folga do mancal.

A folga entre o eixo e o mancal afeta diretamente a rigidez e a operação da máquina em geral. Mancais muito flexíveis fazem com que o eixo da máquina apresente oscilações em relação ao centro do mancal, levando ao contato entre a superfície do eixo e as paredes internas do mancal. Por consequência, a instabilidade do eixo causa o aumento dos níveis de vibrações observadas em toda a máquina (SAN ANDRES; VANCE, 1988).

Contudo, os mancais são os componentes que mais apresentam problemas durante a operação de uma unidade geradora, devido ao eixo da unidade geradora estar totalmente apoiado sobre os mancais, qualquer problema de outro componente mecânico afeta diretamente os mancais e conseqüentemente a segurança da operação do ativo. No próximo tópico serão apresentados os principais problemas observados em mancais de deslizamento e os seus impactos na vida útil desse componente.

2.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS DE MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Como discutido anteriormente, os mancais são componentes críticos e propensos a diversas falhas e defeitos em uma unidade geradora. A presença de qualquer problema impacta significativamente a vida útil de um mancal, observado pela elevação dos níveis de vibração, por exemplo. Os principais problemas associados a esse componente são: folgas excessivas, desalinhamento, desbalanceamento, roçamento e o rodopio de óleo (*whirl oil*).

2.3.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento pode ser definido como uma perturbação que ocorre na movimentação de rotores devido à divergência entre o eixo de rotação e o eixo principal de inércia do rotor (AG, 1993). Em outras palavras, quando o centro de massa do rotor não está alinhado perfeitamente com o eixo de rotação, isso gera um desbalanceamento que pode resultar em vibrações indesejadas e prejudicar o funcionamento da máquina. Essas vibrações podem levar a problemas de desgaste prematuro, danos nos mancais e até mesmo falhas na máquina.

De outro modo, o desbalanceamento é a distribuição de massa desuniforme em volta do centro de massa do eixo. Havendo um excesso de massa de um lado do rotor, a força centrífuga desse lado supera a força atuante no lado oposto, fazendo com que o lado mais leve se mova em direção ao lado mais pesado (MÜHLE *et al.*, 2000).

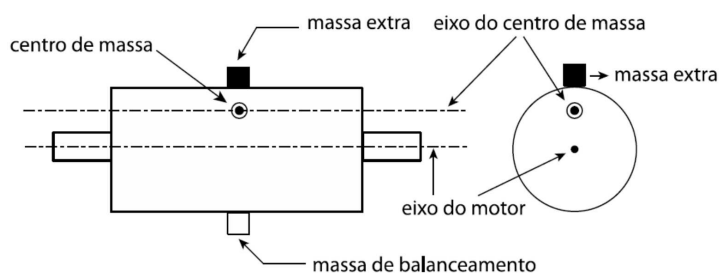
Segundo Jesus Silva (2013), o eixo do centro de massa é o eixo sobre o qual o rotor deveria girar se ele não fosse restringido pelos mancais, também conhecido como eixo principal de inércia. Quando o eixo do centro de massa coincide com o eixo geométrico do rotor, dizemos que o rotor está balanceado.

Além disso, o desbalanceamento pode ser dividido em três tipos principais: estático, acoplado e dinâmico. Sendo o desbalanceamento dinâmico a forma mais comum de desbalanceamento encontrado em máquinas rotativas. Os três tipos são definidos abaixo:

Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático ocorre quando o eixo do centro de massa e o eixo geométrico são paralelos. A Figura 5 apresenta um exemplo didático, onde se tem uma massa extra acoplada ao corpo do eixo no plano que é perpendicular ao eixo de giro do rotor e que passa pelo centro de massa (MATSUO, 2017).

Figura 5 – Desbalanceamento estático.

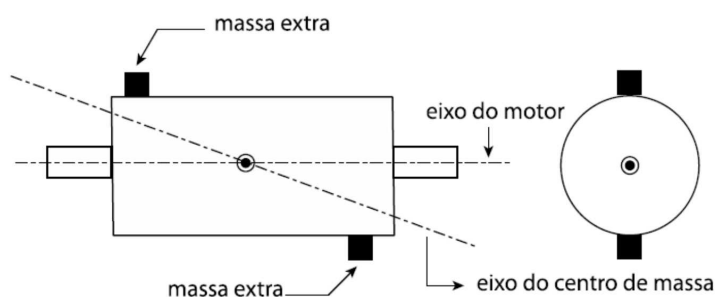


Fonte: (MATSUO, 2017).

Desbalanceamento acoplado

O desbalanceamento acoplado é caracterizado pela interceptação dos eixos do centro de massa e geométrico no centro de massa do rotor. A Figura 6 apresenta um exemplo de desbalanceamento acoplado, onde pode-se notar duas massas desequilibradas posicionadas diametralmente opostas uma da outra e em planos distintos do rotor (MATSUO, 2017).

Figura 6 – Desbalanceamento acoplado.

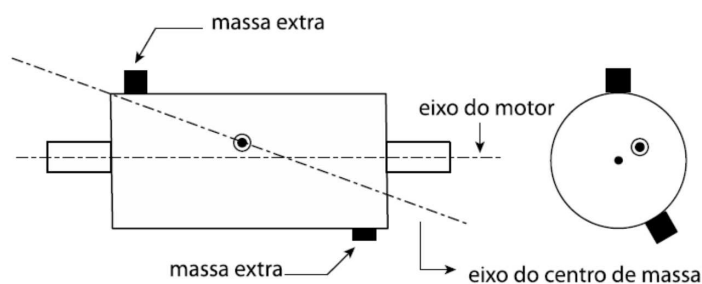


Fonte: (MATSUO, 2017).

Desbalanceamento dinâmico

O desbalanceamento dinâmico ocorre quando os eixos do centro de massa e o eixo geométrico não se tocam ou coincidem. Na Figura 7, é apresentado um exemplo desse tipo de desbalanceamento, caracterizado pelo desequilíbrio de massas em múltiplos planos do rotor, em posições radiais não opostas (MATSUO, 2017).

Figura 7 – Desbalanceamento dinâmico.

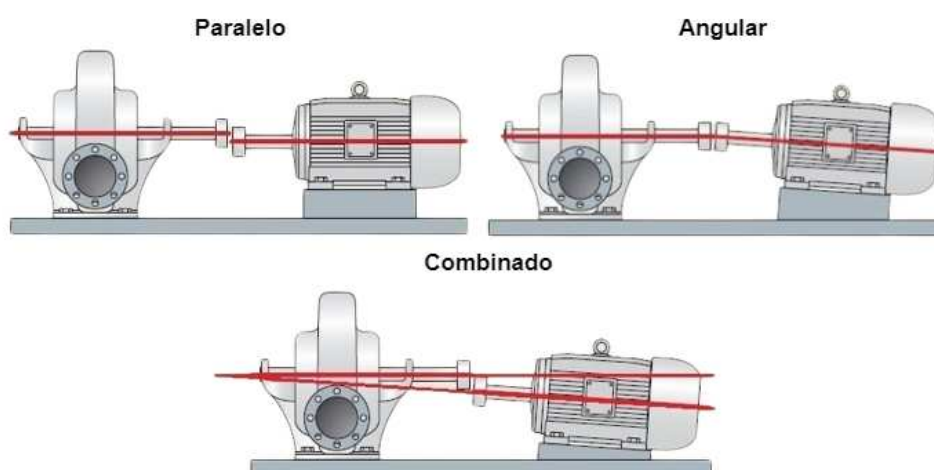


Fonte: (MATSUO, 2017).

2.3.2 Desalinhamento

Assim como o desbalanceamento, o desalinhamento também é um dos grandes causadores de vibrações em equipamentos (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004). Máquinas rotativas, geralmente requerem que o eixo da máquina primária (exemplo a turbina hidráulica), suportada por mancais, e o eixo de carga (exemplo o rotor do gerador), estejam na mesma linha de referência. Porém, devido a problemas construtivos ou falhas de acoplamento, os eixos podem estar não concêntricos por um deslocamento linear ou angular, conforme ilustra a Figura 8.

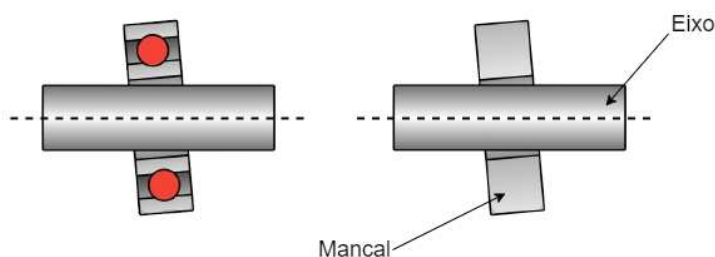
Figura 8 – Tipos de desalinhamento.



Fonte: Arquivo pessoal.

Além disso, mesmo em um eixo sem acoplamento pode existir desalinhamento. Isso é observado em eixos apoiados sobre mancais não alinhados, conforme apresentado na Figura 9. Neste caso, ocorrerá aquecimento excessivo do mancal devido à fricção constante entre o eixo e o interior do mancal (JESUS SILVA, 2013).

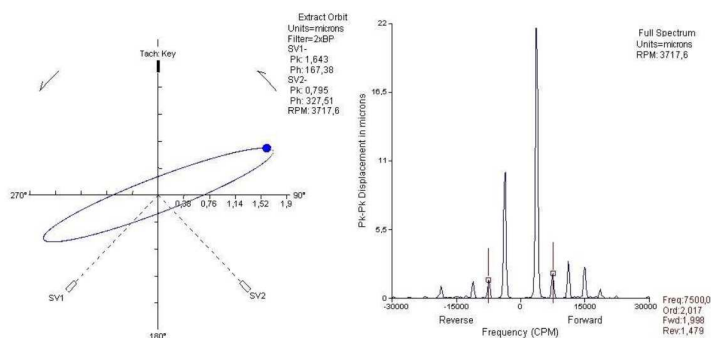
Figura 9 – Mancal desalinhado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Um dos sintomas observados quando existe um desalinhamento é a presença de vibrações na direção radial dos mancais. Em cargas radiais elevadas, é possível observar em gráficos de órbita de deslocamento do eixo um sinal mais achatado, com formato elipsoidal. Na medida que as cargas radiais aumentam, a partir de um ponto, o sinal de órbita pode apresentar laços internos com tamanhos variados (JESUS SILVA, 2013).

Figura 10 – Órbita de desalinhado.



Fonte: (FELÍCIO, 2015).

2.3.3 Roçamento

Outro problema observado em mancais de deslizamento é o roçamento. O roçamento ocorre quando o rotor entra em contato com partes estacionárias do mancal, na maioria das vezes, surge como efeito secundário de outros problemas. Geralmente o roçamento é indicado pelo aumento dos níveis de vibração e pela alteração na forma da órbita.

Existem dois tipos de roçamento, parcial e anelar. O roçamento parcial ocorre quando o rotor toca eventualmente as partes estacionárias do mancal. Já o roçamento

anelar ocorre quando toda a circunferência do mancal interfere na rotação do rotor. No caso do roçamento anelar, pode-se observar altos níveis de vibração de precessão reversa ao sentido de rotação do eixo, esse padrão pode ser observado no espectro de frequência da órbita do mancal (JESUS SILVA, 2013).

2.3.4 Folga excessiva

O mancal de deslizamento, devido ao seu próprio princípio de funcionamento, possui folgas. Porém, quando essa folga se torna excessiva (fora das tolerâncias de projeto), a capacidade do mancal de absorver forças dinâmicas é reduzida, e o menor desbalanceamento ou desalinhamento ocasiona altas vibrações. Isto ocorre devido à redução na rigidez do filme de óleo em virtude das folgas maiores (JESUS SILVA, 2013). A folga excessiva geralmente ocorre devido a problemas de montagem ou como resultado do desgaste avançado do mancal.

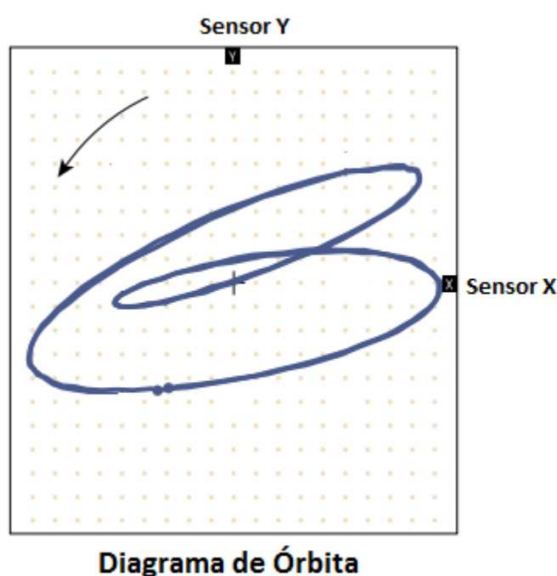
2.3.5 Rodopio do óleo

O rodopio de óleo é uma forma de vibração causada pela excitação do filme de óleo, comumente observada em máquinas que utilizam mancais de deslizamento com óleo pressurizado e operam a altas velocidades. Durante a operação da unidade geradora, o eixo gira a uma velocidade ω , enquanto os mancais permanecem estáticos. Em condições ideais de projeto, a velocidade do óleo dentro do mancal deveria ser $0,5\omega$, no entanto, devido a perdas por fricção, o filme de óleo rotaciona a uma frequência entre $0,42\omega$ e $0,48\omega$ (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004).

Tipicamente, em operação normal, o eixo atingiria uma posição de equilíbrio conforme a rotação e peso do rotor e da pressão e viscosidade do óleo. Quando o mancal não consegue sustentar o rotor em equilíbrio, vibrações excessivas são observadas. Esse problema pode surgir devido a desgastes, variações na viscosidade e na pressão do óleo (MATSUO, 2017).

O rodopio do óleo pode ser identificado tanto por meio de gráficos de órbita, observando o surgimento de laços internos no sinal, conforme ilustrado na Figura 11, como através do espectro de órbita, ao identificar o surgimento de componentes na faixa de frequência do fenômeno.

Figura 11 – Órbita característica de rodopio de óleo.



Fonte: (JESUS SILVA, 2013).

Além disso, quando a frequência do rodopio coincide com uma de ressonância do rotor, o rodopio de óleo se torna instável, resultando em uma forma de falha mais grave, chamada de chicoteamento de óleo (JESUS SILVA, 2013). A principal característica é o pico na frequência de ressonância do rotor. Esse fenômeno é altamente instável e destrutivo para o mancal.

De modo geral, a maneira mais usual de detectar problemas em máquinas rotativas é por meio da técnica de análise de vibrações, baseada em normas. Para dar base ao projeto desenvolvido, no próximo capítulo serão apresentados os fundamentos da análise de vibrações e sua aplicação na análise de mancais de deslizamento.

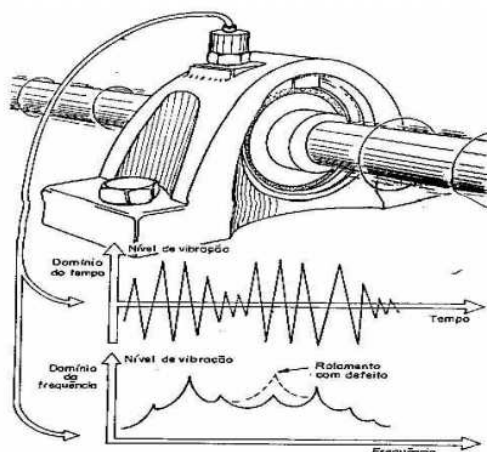
2.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

A vibração ou oscilação é um termo que descreve um movimento que se repete ao longo de um período de tempo em relação a uma referência. Vários exemplos de sistemas vibratórios estão presentes em nosso cotidiano, como o movimento de uma corda de violão ou o balançar de um pêndulo (RAO, 2009).

A vibração é normalmente medida em Hertz (Hz), que descreve o número de vezes que o movimento oscilatório completa um ciclo em um segundo. Um exemplo comum de vibração é o diapásão. Ele produz uma componente contínua e constante de frequência mesmo com o passar do tempo. Na maioria dos componentes mecânicos, especialmente componentes rotativos e móveis, não veremos apenas uma componente de frequência, mas sim diversas componentes em variadas frequências. Normalmente,

um espectrograma de frequência é utilizado para visualizar a intensidade da vibração nesses casos.

Figura 12 – Análise de Vibrações.



Fonte: Arquivo pessoal.

Estudos relacionados à análise de vibrações em equipamentos rotativos, buscam encontrar relações entre o sinal medido por sensores com diversas falhas, tanto mecânicas, hidráulicas ou elétricas. A análise de vibração é utilizada como uma ferramenta para determinar a condição de operação dos equipamentos a partir de diferentes técnicas (ARAÚJO BEZERRA, 2004).

De acordo com Mohanty (2014) e Matsuo (2017), a vibração da máquina é um dos sinais mais convencionais para engenheiros de manutenção medir e analisar, pois fornece informações valiosas para avaliar o estado operacional de diferentes componentes. O monitoramento da vibração, permite o diagnóstico de falhas e defeitos e o acompanhamento da condição do ativo, possibilitando a otimização do processo de manutenção, reduzir os custos de manutenções corretivas.

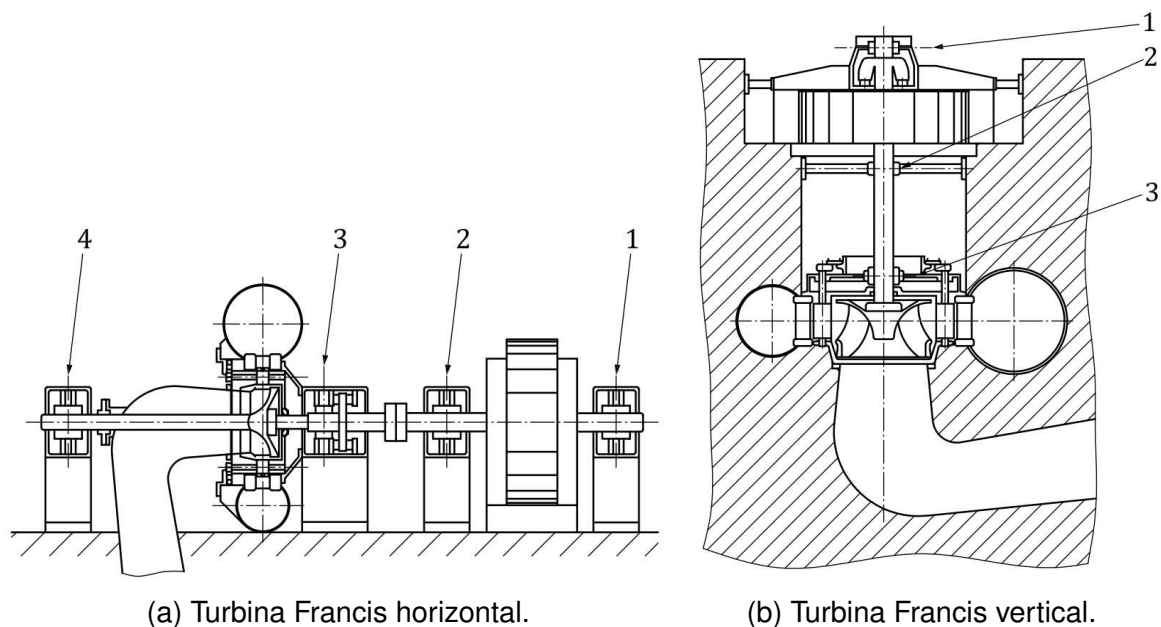
2.4.1 Aplicação em mancais de deslizamento

Em mancais de deslizamento, a medição de vibração é realizada através da medida de deslocamento do eixo, sendo a unidade de medida preferencial o micrometro (μm). Essa medida de deslocamento pode ser relativa ou absoluta.

Conforme sugerido por norma, para o monitoramento de vibrações de mancais de deslizamento sugere-se o uso de sensores de proximidade para medir o deslocamento relativo do eixo (ISO 20816-5, 2018). Segundo a norma, é recomendado que os sensores de monitoramento de vibrações sejam posicionados nos mancais, conforme indicado nos números das Figuras 13a (horizontal) e 13b (vertical) (MATSUO, 2017).

Embora haja diferentes tipos de unidades geradoras com diferentes turbinas, geradores e mancais, a orientação para a instalação dos sensores é bastante semelhante.

Figura 13 – Posição de instalação dos transdutores de vibração.



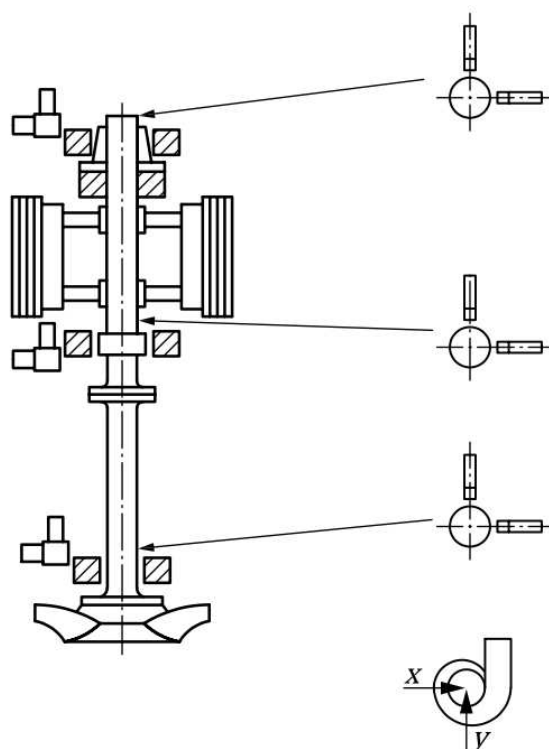
(a) Turbina Francis horizontal.

(b) Turbina Francis vertical.

Fonte: (ISO 20816-5, 2018).

Segundo a norma ISO 10817-1, para determinar o deslocamento relativo do eixo no tempo dois transdutores ortogonais são necessários. Os transdutores devem ser posicionados em duas direções perpendiculares em um mesmo plano de medição, conforme ilustra a Figura 14. A partir dos sinais dos sensores perpendiculares é possível visualizar o deslocamento do eixo no plano de medição através dos gráficos de órbita.

Figura 14 – Posição de instalação de sensores de proximidade.



Fonte: (ISO 10817-1, 1998).

O gráfico de órbita mostra o movimento do centro do eixo em relação ao mancal. A partir da órbita pode-se visualizar diversos problemas como o desbalanceamento, rodopio do filme de óleo e atritos entre o eixo e o mancal (Roçamento).

Logo, ao medir o deslocamento do rotor no mancal, diversas informações podem ser obtidas para indicar a existência de diferentes problemas. A medição do deslocamento do eixo é geralmente realizada de maneira indireta, utilizando sensores de proximidade em conjunto com um sensor de referência de fase. Nas próximas seções serão detalhadas as principais características dos sensores utilizados no monitoramento de mancais de deslizamento.

2.4.1.1 Sensor de Proximidade

Utilizado no monitoramento de mancais de deslizamento, o sensor de proximidade é um dispositivo eletrônico projetado para detectar a presença ou ausência de um objeto, ou determinar sua distância em relação ao sensor. Entre os sensores de proximidade, temos os sensores capacitivos e indutivos.

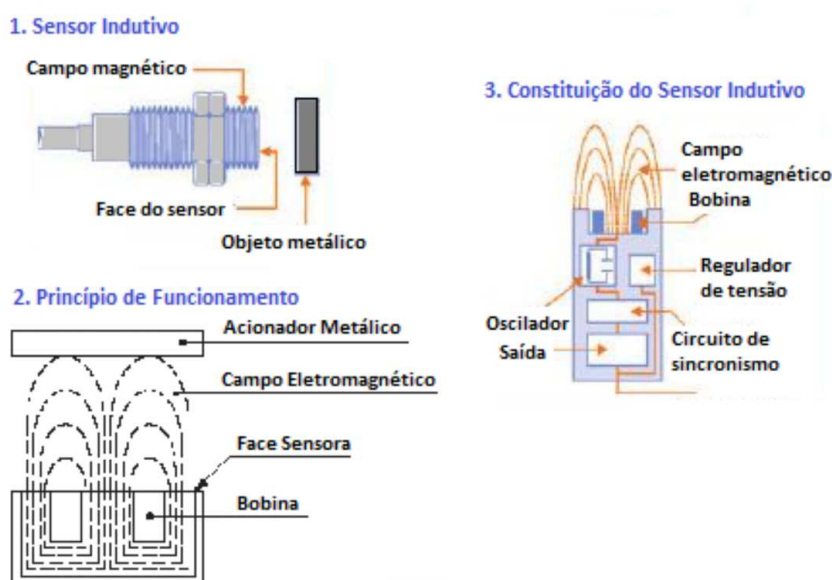
Os sensores capacitivos são tipicamente empregados na medição de distâncias na faixa de 10 μm a 10 mm, porém, sua sensibilidade é afetada pelo material

presente no espaço entre o sensor e o objeto medido, ou seja, não é recomendado para ambientes que possam conter líquidos.

Por sua vez, os sensores indutivos podem operar em meio líquido sem sofrer interferências de partículas em suspensão ou de qualquer fluido presente entre o sensor e o objeto a ser medido. No entanto, sua sensibilidade está relacionada ao material do objeto medido, uma vez que diferentes metais reagem de maneiras distintas ao campo eletromagnético gerado pelo transdutor.

O funcionamento de sensores indutivos baseia-se nas mudanças no campo magnético entre o sensor e o objeto, que ocorrem devido às correntes de Foucault induzidas. A Figura 15 exemplifica um sensor de proximidade indutivo, apresentando seu funcionamento e estrutura interna.

Figura 15 – Sensor de proximidade indutivo.

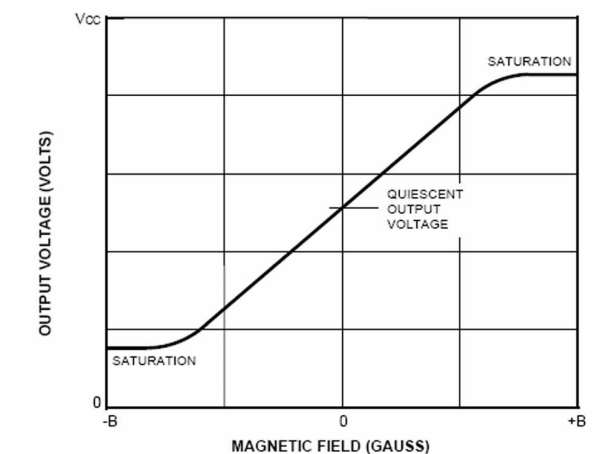


Fonte: (JESUS SILVA, 2013).

Na Figura 16, temos um exemplo da curva de resposta de um sensor de proximidade indutivo. O sinal de saída do sensor varia linearmente em relação à distância do objeto medido, limitado pelo intervalo de medição do transdutor.

Devido ao princípio de funcionamento dos sensores indutivos, a utilização desses sensores é amplamente empregada em sistemas de monitoramento de mancais de deslizamento. Onde podem ser instalados diretamente na estrutura dos mancais, em furos roscados ou em suportes fixados na carcaça do mancal.

Figura 16 – Curva de resposta do sensor indutivo de proximidade.



Fonte: Arquivo pessoal.

2.4.1.2 Referência de fase

Outro sensor crucial na análise de vibrações é o sensor de referência de fase, também conhecido como *Keyphasor*. O sensor de referência de fase é um sensor de proximidade que detecta o início de cada rotação realizada pelo eixo da máquina. O sinal gerado por esse sensor é utilizado para medir a velocidade de rotação da máquina e proporciona um ponto de sincronização para as medições do sistema, possibilitando análises vetoriais e de fase entre elas.

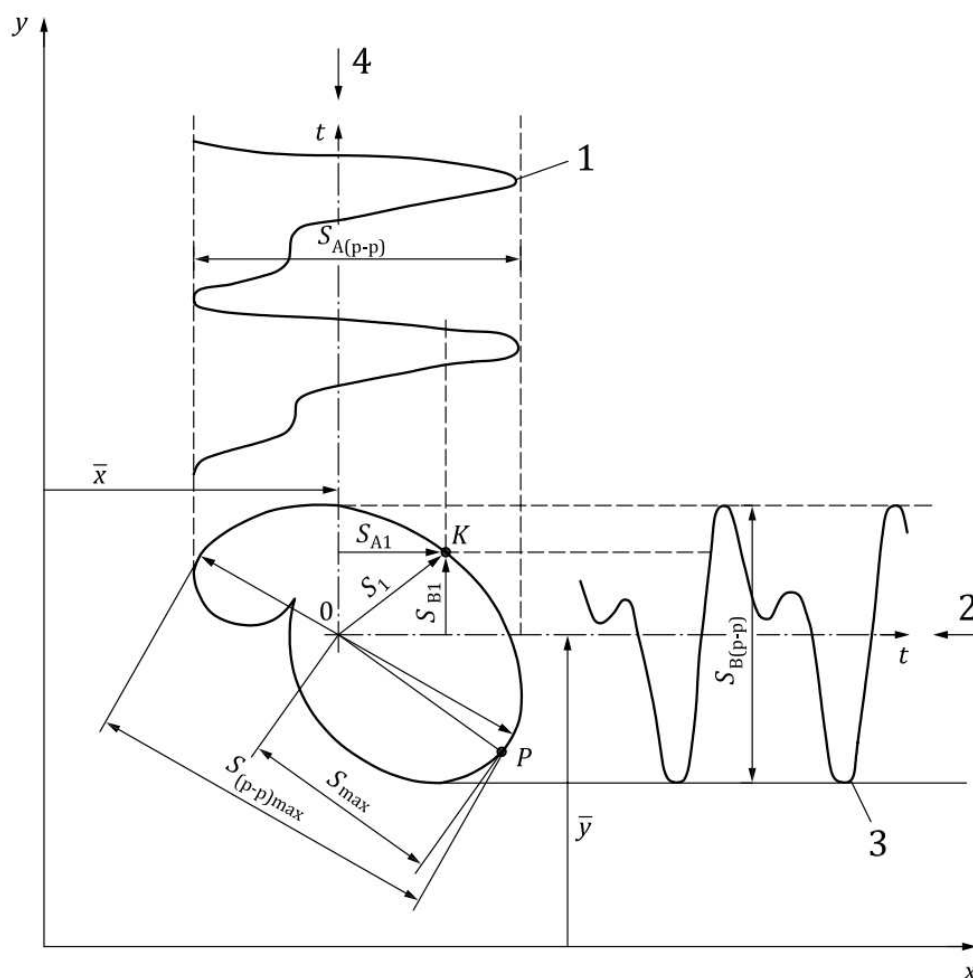
Para medir o sinal de referência, o sensor é posicionado de modo a detectar um pequeno sulco no eixo ou uma *tag* instalada sobre o eixo. Quando o ponto de referência passa pelo sensor, um pico é gerado no sinal de saída. A partir deste sinal, a velocidade (ou frequência) de rotação é calculada invertendo o tempo entre dois picos do *Keyphasor* (JESUS SILVA, 2013).

2.5 ÓRBITA

Como mencionado anteriormente, para a análise de vibrações relativas no eixo, a técnica mais adequada é a baseada em gráficos de órbita. Segundo Scheffer e Girdhar (2004), as órbitas são padrões de Lissajous de sinais no domínio do tempo que são plotados simultaneamente no plano de coordenadas XY.

O sinal de órbita é obtido através da medição do deslocamento relativo do rotor utilizando dois sensores de proximidade em quadratura instalados rigidamente na estrutura dos mancais. De modo que, a órbita representa a trajetória do centro do eixo relativamente à estrutura do mancal. A Figura 17 apresenta um exemplo tipo de um gráfico de órbita.

Figura 17 – Órbita resultante da medição da variação temporal do centro do eixo por cada transdutor.



Fonte: (ISO 20816-5, 2018).

Devido à fácil interpretação e quantidade de informação que o gráfico contém, a órbita, conciliada com o sensor de referência de fase, é um gráfico eficaz para o diagnóstico de diversas avarias em mancais de deslizamento, como desbalanceamento, desalinhamento, rodopio do filme de óleo e atritos entre o eixo e o mancal (Roçamento).

Segundo Jesus Silva (2013), algumas informações podem ser extraídas de um diagrama de órbita, como, por exemplo: raio máximo da órbita, raio mínimo, centro da órbita, diâmetro máximo, etc. Uma das operações básicas realizadas em gráficos de órbita é o cálculo da amplitude pico-a-pico, que representa a diferença entre o pico máximo e mínimo do sinal, oferecendo uma avaliação da oscilação do eixo na direção de leitura dos sensores.

Além disso, é possível extrair outras informações matemáticas dos sinais de órbita, conforme descritas na norma ISO 10817-1 e apresentadas a seguir.

Máximo valor pico-a-pico

O máximo valor pico-a-pico é o valor máximo entre as medidas pico-a-pico dos dois sensores:

$$(p-p)_{max}(k) = \max \left(S_{A(p-p)}(k); S_{B(p-p)}(k) \right) . \quad (1)$$

onde $S_{A(p-p)}(k)$ e $S_{B(p-p)}(k)$ são os valores pico-a-pico de cada sensor instalado em quadratura para cada rotação da máquina.

Valor resultante de pico-a-pico

O valor resultante pico-a-pico para os dois sensores em quadratura pode ser determinado pela equação:

$$S_{(p-p)max}(k) = \sqrt{S_{A(p-p)}(k)^2 + S_{B(p-p)}(k)^2} . \quad (2)$$

Deslocamento máximo no plano de medição (Smax)

Considerando-se que o sinal é obtido simultaneamente dos sensores em quadratura, o deslocamento instantâneo do eixo no plano de medição é determinado por:

$$S(k) = \sqrt{S_A(k)^2 + S_B(k)^2} , \quad (3)$$

onde $S_A(k)$ e $S_B(k)$ correspondem aos sinais dos sensores instalados em quadratura para cada rotação da máquina.

Conforme apresentado na Figura 17, existe um ponto na órbita onde o deslocamento do eixo é máximo e que não coincide necessariamente com os pontos onde os sensores A e B tem sua maior amplitude. O deslocamento máximo no plano de medição é definido por:

$$S_{max} = \max \left(\sqrt{S_A(k)^2 + S_B(k)^2} \right) . \quad (4)$$

O máximo deslocamento vibratório pode ser utilizado como indicador de severidade de vibração no eixo. Cartas de severidade podem ser encontradas na literatura, padronizando os limites de vibração absoluta ou amplitude máxima de deslocamento do eixo conforme a velocidade de rotação da máquina.

2.5.1 Shaft Centerline

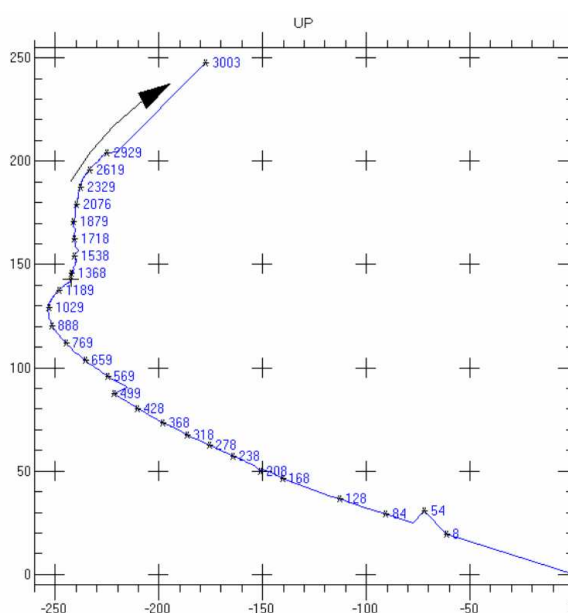
Além da visualização da trajetória da máquina por rotação, também é possível traçar a linha de centro do eixo, utilizando o valor instantâneo do deslocamento relativo do eixo, através do cálculo da componente média dos sinais, em função da velocidade da máquina. Essa abordagem permite analisar o deslocamento do centro do eixo

para diferentes velocidades da máquina no mesmo gráfico, visto que a mudanças na posição do eixo em relação à estrutura do mancal regime permanente pode indicar problemas de funcionamento da máquina, como desgaste ou desalinhamento.

De acordo com Jesus Silva (2013), a técnica do *Shaft Centerline* ou, em português, “Linha Central do Eixo,” visa monitorar a posição do centro do eixo ao longo do tempo, através do cálculo da componente média dos sinais provenientes dos sensores de proximidade instalados no mancal. Quando a máquina está em funcionamento, calcula-se o valor médio dos sinais de cada sensor em cada rotação da máquina, resultando nas coordenadas do centro de rotação do eixo. Esses resultados possibilitam o acompanhamento das variações na posição do centro do eixo ao longo da operação da máquina, contribuindo para a detecção de deslocamentos e mudanças no comportamento do sistema.

A Figura 18 ilustra um exemplo da técnica do *Shaft Centerline*, exibindo o deslocamento do centro do eixo dentro do mancal durante o processo de partida da máquina.

Figura 18 – Deslocamento do centro do eixo para diferentes rotações da unidade geradora.



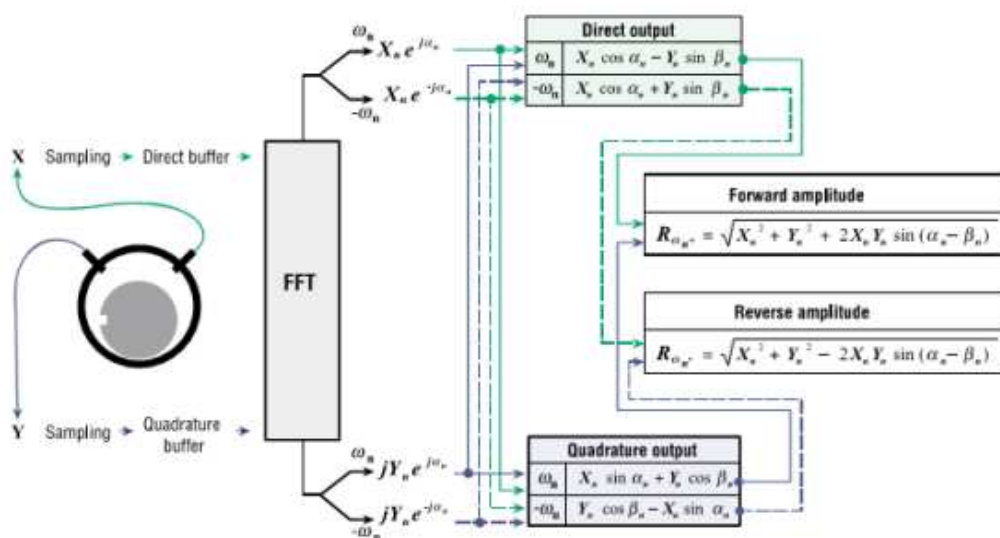
Fonte: (KALHARA *et al.*, 2017).

2.5.2 Espectro da órbita - Full Spectrum

Além das visualizações das órbitas no tempo e espaço, também é possível realizar a análise no domínio da frequência. Conforme destacado por Reges Junior *et al.* (2022), o sinal da órbita de máquinas rotativas é composto por múltiplos componentes de frequência, os quais podem ser individualmente observados no domínio da frequên-

cia a partir do sinal complexo da órbita. Essas componentes de frequência são obtidas através da técnica conhecida como *full spectrum* ou espectro da órbita. Em termos gerais, o cálculo do espectro da órbita pode ser realizado por meio do procedimento matemático apresentado na Figura 19, o qual será melhor elucidado nos próximos parágrafos.

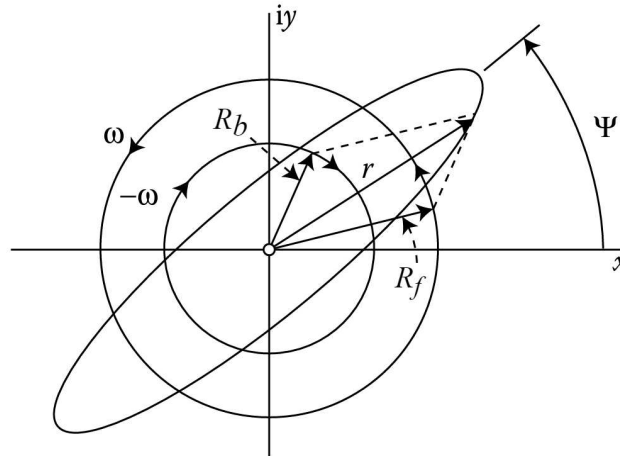
Figura 19 – Procedimento matemático para obter o *Full Spectrum*.



Fonte: (GOLDMAN; MUSZYNSKA, 1999).

A análise do *full spectrum* parte do princípio de que a órbita é formada somando-se elipses com frequências específicas. Uma elipse pode ser construída utilizando dois fasores, com amplitudes e fases distintas, girando à mesma velocidade, porém em sentidos contrários, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Elipse formada pela rotação de dois fasores com mesma frequência, girando em sentidos opostos.



Fonte: (ADAMS, 2009).

Para isso, dados dois sinais ortogonais, $x(t)$ e $y(t)$, pode-se descrever o sinal de órbita como

$$s(t) = x(t) + iy(t) . \quad (5)$$

Segundo os conceitos básicos da análise de Fourier, de descrever sinais como uma soma de componentes senoidais, os sinais $x(t)$ e $y(t)$ podem ser definidos por:

$$\begin{aligned} x(t) &= A_x \cos(\omega t + \theta_x) \\ y(t) &= A_y \cos(\omega t + \theta_y) \end{aligned} \quad (6)$$

onde A é a amplitude de cada sinal, ω é a frequência angular e θ é fase. Com base na fórmula de Euler, as formas exponenciais complexas para as funções seno e cosseno são:

$$\text{sen}\omega t = \frac{(e^{i\omega t} - e^{-i\omega t})}{2i} , \quad \text{cos}\omega t = \frac{(e^{i\omega t} + e^{-i\omega t})}{2} . \quad (7)$$

Substituindo as equações (7) nas equações (6) e depois na equação (5), o sinal de órbita pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} s(t) &= \frac{1}{2} [(A_x \cos\theta_x - A_y \sin\theta_y) + i(A_x \sin\theta_x + A_y \cos\theta_y)] e^{i\omega t} \\ &+ \frac{1}{2} [(A_x \cos\theta_x + A_y \sin\theta_y) + i(-A_x \sin\theta_x + A_y \cos\theta_y)] e^{-i\omega t} , \end{aligned} \quad (8)$$

Na dedução do *full spectrum* apresentado por Adams (2009), cada sinal de órbita $s(t)$ pode ser expresso como duas componentes de rotação direta e reversa da seguinte forma:

$$s(t) = R_f e^{j\omega t + \beta_f} + R_b e^{-j\omega t + \beta_b}, \quad (9)$$

tal que:

$$R_f = \frac{1}{2} \sqrt{(A_x \cos \theta_x + A_y \sin \theta_y)^2 + (-A_x \sin \theta_x + A_y \cos \theta_y)^2}$$

$$R_f = \frac{1}{2} \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + 2A_x A_y \sin(\theta_x - \theta_y)}, \quad (10)$$

$$R_b = \frac{1}{2} \sqrt{(A_x \cos \theta_x - A_y \sin \theta_y)^2 + (A_x \sin \theta_x + A_y \cos \theta_y)^2}$$

$$R_b = \frac{1}{2} \sqrt{A_x^2 + A_y^2 - 2A_x A_y \sin(\theta_x - \theta_y)}, \quad (11)$$

$$\beta_f = \arctan \left(\frac{-A_x \sin \theta_x + A_y \cos \theta_y}{A_x \cos \theta_x + A_y \sin \theta_y} \right) \quad (12)$$

e

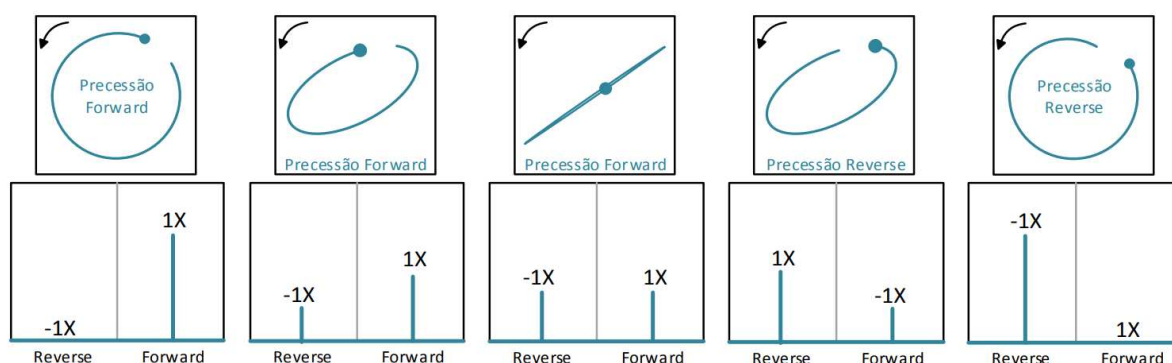
$$\beta_b = \arctan \left(\frac{A_x \sin \theta_x + A_y \cos \theta_y}{A_x \cos \theta_x - A_y \sin \theta_y} \right). \quad (13)$$

A equação (9) demonstra que uma órbita elíptica se decompõe em dois vetores de rotação síncrona, um rotacional com amplitude R_f e outro contrarrotacional com amplitude R_b , ambos com velocidade angular ω . Quando $R_f > R_b$ a órbita tem sentido de rotação para frente (*forward*), e quando $R_f < R_b$ o sentido é inverso (*reverse*) (REGES JUNIOR *et al.*, 2022).

Segundo Jesus Silva (2013), para cada frequência do *full spectrum* a amplitude da componente positiva representa a magnitude de um fasor girando no sentido de rotação da máquina, sendo a fase da componente igual ao ângulo de partida do fasor. A amplitude da componente negativa representa a magnitude do fasor que gira no sentido contrário, como mostra a Figura 20. Para cada par de componentes de frequência (*forward* e *reverse*) descreve uma sub-órbita (circular, elíptica ou reta) com sentido e frequência particulares. A órbita final é formada pela soma das componentes orbitais da mesma forma que uma simples forma de onda é expressa como a soma das suas componentes senoidais (GOLDMAN; MUSZYNSKA, 1999).

Na Figura 21 pode-se ver a trajetória de várias órbitas compostas por uma frequência, com sentidos de precessão diferentes, indicados pela sequência "espaço/ponto" e com a rotação indicada pela seta no canto superior esquerdo. De acordo com Goldman e Muszynska (1999), uma única componente, seja *forward* ou *reverse*, produzirá uma órbita circular. Quanto menor a diferença entre a componente *forward* e *reverse*, mais elíptica será a órbita, enquanto componentes iguais resultarão em uma reta simples.

Figura 21 – Diferentes órbitas com os respectivos espectros.



Fonte: (FELÍCIO, 2015).

O *full spectrum* é uma promissora ferramenta de análise, para a detecção de falhas e também para obter órbitas filtradas a partir de certas componentes de frequências. Além disso, fornecem informação sobre o estado da máquina, como o sentido de precessão e a elipticidade do rotor. No projeto, o espectro da órbita será integrado ao conjunto de ferramentas de análise de órbita desenvolvido para o software de análises da AQTech, com a intenção de enriquecer o conjunto de recursos disponíveis no sistema para os usuários.

2.6 FERRAMENTAS DE ANÁLISE DE SINAIS

Este capítulo visa apresentar brevemente os conceitos das ferramentas de análise de sinais utilizadas na implementação do algoritmo de *full spectrum*. Uma das técnicas empregadas é a transformada de Fourier, que converte um sinal no tempo em uma série de funções seno e cosseno complexo. Para calcular a transformada de Fourier foi utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT), apresentada na próxima seção.

2.6.1 Fast Fourier Transform (FFT)

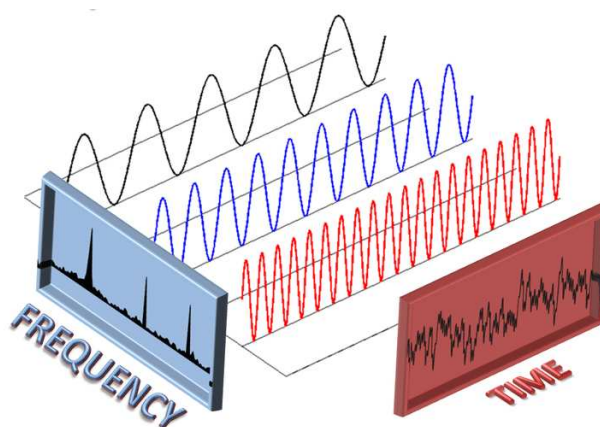
A Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, abreviado FFT) é um algoritmo que calcula a Transformada discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa (Teorema inverso de Fourier). A DFT é obtida pela decomposição de uma sequência de valores em componentes de diferentes frequências.

Além disso, a FFT é um algoritmo otimizado para calcular a Transformada Discreta de Fourier de forma mais eficiente, reduzindo a complexidade computacional de N^2 para aproximadamente $N \log_2(N)$ operações. Essa otimização resulta em uma

diferença significativa de velocidade, especialmente ao lidar com conjuntos de dados extensos, nos quais o valor de N pode atingir a casa dos milhares ou milhões.

Ao aplicar a FFT a um sinal no domínio do tempo, é possível decompor o sinal em diferentes senoides. Para isso, o sinal é amostrado durante um período de tempo e dividido em componentes de frequência. Essas componentes são oscilações sinusoidais únicas em frequência distintas, cada um com a sua própria amplitude e fase. Quando a FFT é aplicada corretamente, é possível recriar o sinal original do domínio da frequência para o domínio do tempo (HEINZEL; RÜDIGER; SCHILLING, 2002).

Figura 22 – Transformada rápida de Fourier (FFT).



Fonte: (KALHARA *et al.*, 2017)

Na Transformada de Fourier, parte-se do pressuposto de que o trecho do sinal amostrado se repete periodicamente ao longo de um período de tempo infinito. No entanto, a aplicação da FFT é mais apropriada para sinais periódicos, o que implica que o sinal discreto amostrado deve conter um número inteiro de períodos. Entretanto, toda amostragem de um sinal é realizada durante um período finito. Mesmo em casos de sinais periódicos em estado estacionário, a amostra é considerada apenas uma instância, resultando em um sinal aperiódico. Isso pode ocasionar erros na transformação, comumente denominados vazamento espectral ou 'manchas' nos picos, levando a uma distorção na intensidade das frequências. Para compensar esses erros na transformação, realiza-se um pré-condicionamento no domínio do tempo do sinal original, empregando funções de janelamento.

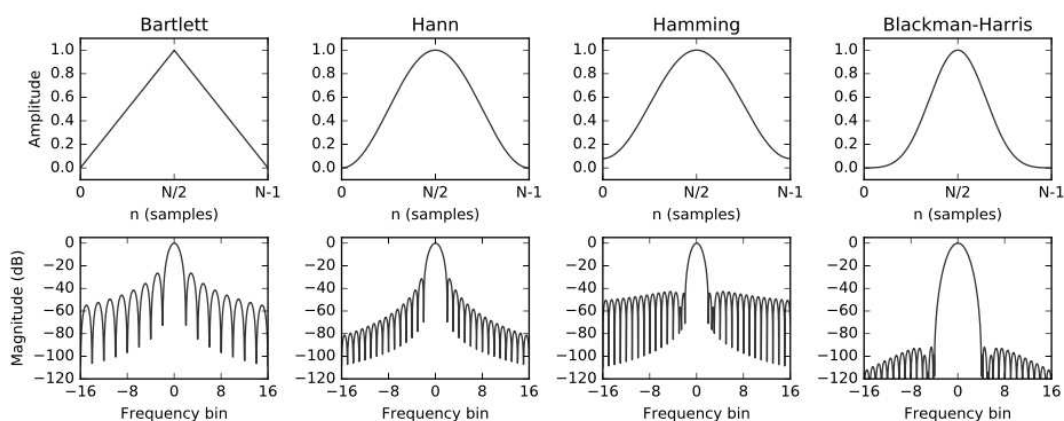
2.6.2 Função de janelamento

As funções de janelamento são funções matemáticas que aproximam rapidamente as bordas de um sinal amostrado a zero. Isso significa que é responsabilidade

das funções de janelamento fazerem com que o sinal se comporte periodicamente, evitando descontinuidades e removendo as bordas afiadas, reduzindo o vazamento espectral (LATHI, 1998).

Quando funções de janelamento são aplicadas, algumas informações do sinal são perdidas. Por exemplo, funções de janelamento podem reduzir a amplitude de todo o espectro de frequência. Para limitar a perda de dados nas bordas, as janelas são sobrepostas. O fator de sobreposição é baseado tanto na função de janelamento quanto na intenção de isolar as frequências na FFT. Uma janela menor, como a janela Flat-top, precisará de um fator de sobreposição mais alto do que janelas maiores, como as janelas de Hanning e Hamming.

Figura 23 – Funções de janelamento.



Fonte: (WIKIPEDIA, 2022).

A Figura 23 mostra o efeito das funções Flat top, Hann e Hamming em um sinal gerado no domínio do tempo. Estas são algumas das funções de janelamento mais comuns. Cada janela tem sua própria resposta de frequência e características que a tornam adequada para aplicações específicas.

Inúmeras funções de janelamento com a capacidade de reduzir a descontinuidade são apresentadas na literatura. Para o projeto, a função de janelamento utilizada será explorada no próximo tópico.

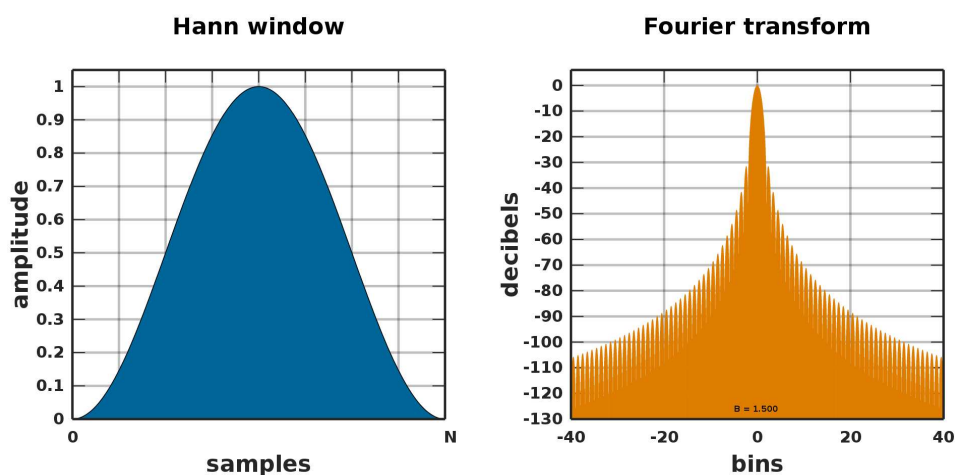
2.6.2.1 Janelamento Hanning

A janela de Hanning, é uma função de janela normalmente usada no processamento digital de sinais. A função usa uma forma senoidal que vai a zero nas bordas. Por usar uma forma senoidal, a função permite que grande parte do sinal passe. Isso é tanto uma vantagem quanto uma desvantagem. Com o alargamento do lóbulo principal,

a resolução da frequência é reduzida. A grande vantagem da janela de Hann é o seu baixo efeito de aliasing e o baixo vazamento espectral (SMITH III, 2011).

A janela de Hanning é conhecida por ser altamente aplicável a sinais que são senoidais ou uma combinação de senoides. A função também é utilizada para sinais de banda estreita e quando o conteúdo do sinal é desconhecido.

Figura 24 – Janela Hanning no domínio do tempo e da frequência.



Fonte: (WIKIPEDIA, 2022)

A fim de visualizar e analisar os gráficos de órbita gerados pelos sensores de deslocamento instalados nos mancais de uma unidade geradora usando o software de análise de sinais da AQTech, será necessário considerar certos requisitos técnicos definidos pela equipe de desenvolvimento da empresa, os quais serão discutidos no próximo capítulo.

3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA, REQUISITOS TÉCNICOS E SOLUÇÃO PROPOSTA

O presente capítulo se dedica a detalhar o problema abordado no trabalho, bem como, apresentar as características e requisitos essenciais para alcançar o objetivo geral do projeto.

3.1 VISÃO GERAL

Nos últimos anos, há uma crescente preocupação com a operação contínua e confiável do fornecimento de eletricidade. Nesse contexto, os investimentos em sistemas capazes de analisar defeitos de maneira não invasiva e online têm aumentado. Visto que, a produção de energia elétrica é uma atividade que exige altos investimentos por parte das concessionárias de energia. Para garantir o retorno desses investimentos, torna-se é essencial maximizar a vida útil das máquinas e equipamentos das plantas de geração. Isso coloca as equipes de operação e manutenção (O&M) como peças fundamentais para o sucesso desses empreendimentos.

Recordamos do capítulo anterior que uma usina hidroelétrica é composta por diversos componentes elétricos e mecânicos. A turbina, o gerador e os mancais compõem o conjunto responsável pela conversão da energia cinética da água em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Dentro desse conjunto, os mancais são os componentes mais propensos a falhas; a avaria em um mancal guia ou de escora pode comprometer toda a operação de uma unidade geradora. Uma solução eficaz para elevar a confiabilidade operacional dos mancais é a implementação de sistemas de monitoramento remoto de sinais.

O monitoramento remoto de sinais possibilita a realização de diversas análises para avaliar a condição dos componentes e uma unidade geradora como um todo. Através da análise de sinais, é possível determinar a condição de uma máquina, utilizando, por exemplo, o nível de vibração global obtido por meio de um acelerômetro. No entanto, a análise de vibração global fornece apenas informações sobre o comportamento geral de vibração da máquina, sem oferecer detalhes específicos sobre a causa raiz do problema causador das vibrações.

Para isso, a norma ISO 7919-5 apresenta diferentes metodologias de análise de condição por meio de sensores de deslocamento instalados nos mancais de uma unidade geradora. A norma apresenta uma técnica de análise de condição de mancais baseada na forma de onda de dois sinais em quadratura, chamado de órbita. A órbita representa a oscilação do eixo da máquina no plano de leitura dos sensores de deslocamento. Nessa técnica, os sensores fornecem informações avançadas do estado de operação da componente através da trajetória do centro do rotor em relação à estrutura da máquina.

A partir do sinal de órbita é possível analisar o espectro de frequência da órbita. A análise parte do princípio de que a órbita é formada pela soma de diversas elipses com frequências específicas. Através do espectro da órbita é possível analisar todo o conjunto de órbitas. Apesar disso, o *full spectrum* ainda é pouco utilizado, visto que os seus resultados podem ser contraintuitivos, pois não é possível aplicar técnicas de análise convencionais devido às amplitudes não corresponderem diretamente com os limites de vibração padronizados em norma.

A partir dessas diferentes técnicas de análise da condição, a empresa AQTech constatou a necessidade de aprimorar sua atual ferramenta de análise de sinais para facilitar as atividades dos analistas de vibração e das equipes de manutenção para a investigação de problemas em mancais de deslizamento.

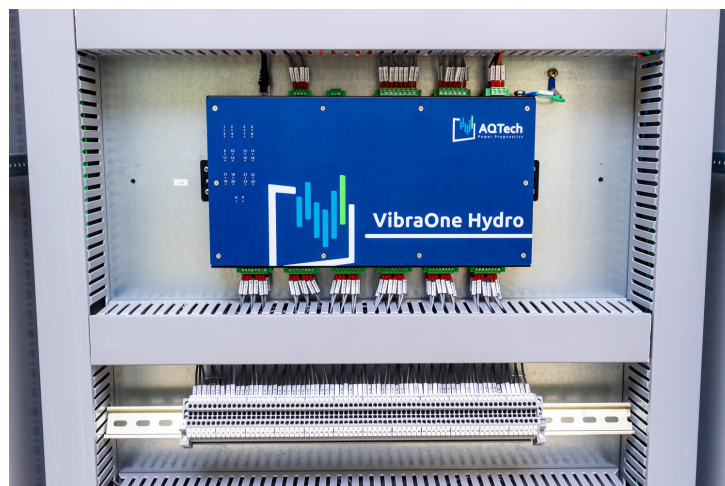
3.2 SOBRE A EMPRESA

A AQTech Engenharia e Instrumentação S. A é uma empresa catarinense de engenharia fundada no ano de 2004 em Florianópolis. Durante os anos a empresa cresceu desenvolvendo soluções de monitoramento e diagnóstico para o mercado de geração elétrica. A empresa desenvolve e implanta soluções que viabilizam a implementação de políticas de manutenção preditiva baseada na condição do ativo, visando o aumento da produtividade e da lucratividade dos negócios dos seus clientes (AQ-TECH, 2022).

A empresa conta com mais de 10GW de potência instalada, monitorada por seus equipamentos, com mais de 100 clientes espalhados pelo Brasil e América Latina, dando os primeiros passos para atender o mercado dos Estados Unidos, Europa e Ásia.

Atualmente a empresa desenvolve tanto o Hardware e o Software para o monitoramento de ativos. A solução destinada à aquisição de dados dos sensores instalados nas unidades geradoras é chamada de VibraOne, conforme ilustrado na Figura 25. O VibraOne é um equipamento composto por uma central de processamento com 24 entradas analógicas e 4 entradas digitais, que realiza a aquisição e tratamento dos sinais dos sensores acoplados à unidade geradora e os fornece para as demais aplicações da empresa.

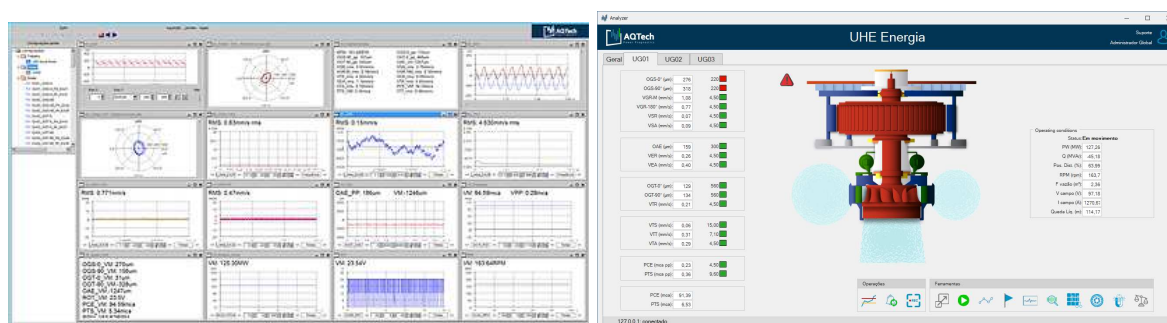
Figura 25 – Solução VibraOne.



Fonte: (AQTECH, 2022).

O hardware, em conjunto com os demais softwares da empresa, processa e apresenta os dados para torná-los manipuláveis e compreensíveis para o usuário. Entre os sistemas desenvolvidos pela empresa, destacamos o "Aquisição" que permite a visualização em tempo real das formas de onda dos sinais dos sensores, bem como o registro desses sinais para análises posteriores conforme apresentado na Figura 26a. Além do "Aquisição", a empresa desenvolve o software "Analyzer" focado no monitoramento de parâmetros em forma de supervisor, conforme ilustrado na Figura 26b.

Figura 26 – Pacote de software AQTech.



(a) Software Aquisição.

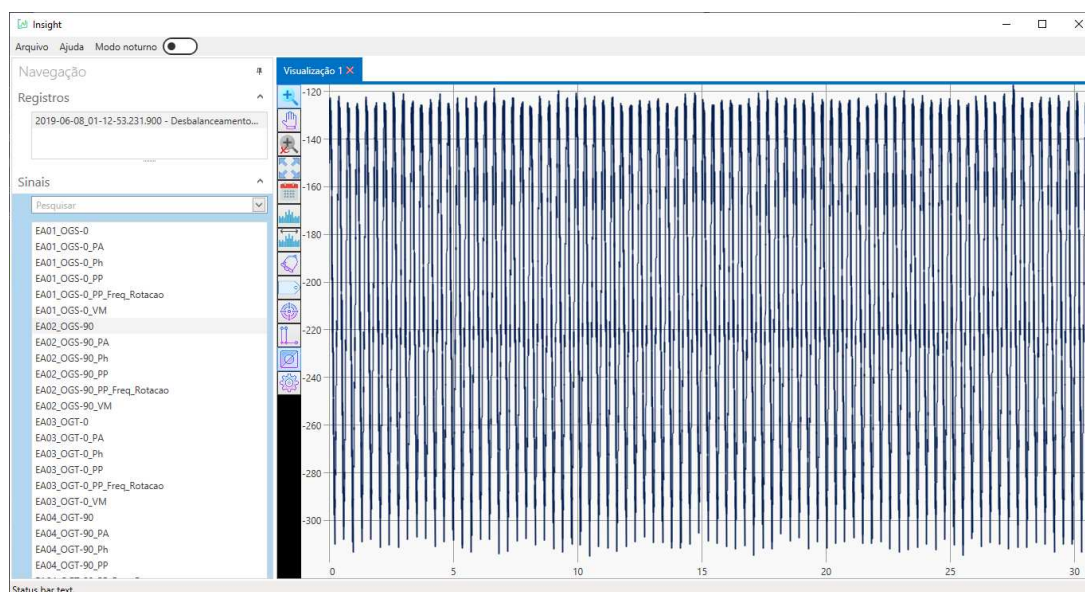
(b) Software Analyzer.

Fonte:(AQTECH, 2022).

Por último, temos o "Insight" desenvolvido para realizar a análise de sinais de dinâmica rápida registrados pelo VibraOne, conforme apresentado na Figura 27. O software possibilita a abertura de arquivos de registro exportados pelo "Analyzer" e "Aquisição". Além disso, consegue abrir registros diretamente da base de dados,

eliminando a necessidade de exportação prévia. O "Insight" oferece uma gama de funcionalidades para análise de sinais individualmente, abrangendo tanto o domínio do tempo quanto o domínio da frequência. Nesse contexto, houve a demanda de expandir o software para possibilitar a análise de mancais de deslizamento, através da combinação de sinais para a visualização de gráficos e espectros de órbitas.

Figura 27 – Ferramenta de análise de sinais (*Insight*).



Fonte: (AQTECH, 2022).

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os mancais de deslizamento representam um dos subsistemas de maior importância em uma usina hidrelétrica. Esse componente suporta e orienta o eixo do rotor da turbina e do gerador, permitindo seu movimento suave durante sua operação. Diversos problemas podem influenciar negativamente a atuação desse componente como, por exemplo, o desalinhamento, folga excessiva, desgaste das paredes internas, temperatura ou falta de lubrificação.

Com o avanço do monitoramento da condição de máquinas elétricas nos últimos anos, diversos trabalhos, normas e padrões de vibração foram publicados. Dentre as principais publicações, temos a norma ISO 10817-1, que apresenta diferentes técnicas de análise de sinais provenientes de acelerômetros e sensores de proximidade instalados em uma usina hidrelétrica. Dentre as técnicas apresentadas na norma, damos destaque à técnica de análise de órbita de eixos rotativos em mancais de deslizamento.

A órbita é uma representação do deslocamento relativo do eixo rotativo no plano de leitura do par de sensores de proximidade. Para realizar a análise de órbita,

os sensores são fixados de maneira rígida na estrutura dos mancais de deslizamento, assegurando que a órbita reflita a trajetória do centro do eixo em relação à estrutura do mancal. Por meio da análise do movimento do eixo, o analista de vibrações pode identificar diversas falhas de operação na unidade geradora, como desbalanceamento, desalinhamento, rodopio do óleo e folgas excessivas.

No contexto da empresa AQTech, identificou-se a necessidade de aprimorar o software de análise de sinais, conhecida como "*Insight*", para realizar análises de órbitas de mancais, visto que concorrentes da empresa já possuem ferramentas dedicadas a essa finalidade. Com o objetivo de transformar o "*Insight*" um aliado dos analistas de vibração e das equipes de manutenção na identificação de falhas e problemas em mancais de deslizamento, a próxima seção apresentará os requisitos técnicos, funcionais e não funcionais que o projeto deve atender.

3.4 REQUISITOS TÉCNICOS E FUNCIONAIS

Em conjunto com a equipe de desenvolvimento da empresa, foi estabelecido que a ferramenta de análise de órbita deverá apresentar individualmente os gráficos de órbita para cada rotação da máquina. Para isso, será necessário utilizar um algoritmo para identificar as rotações da máquina através dos pulsos medidos pelo sensor de fase da máquina.

Para o processamento e apresentação dos sinais de órbita, será necessário realizar a estruturação do *Insight* para receber a nova ferramenta e também será necessário a implementação de uma interface de configuração dos sinais instalados no mancal de forma que seja possível definir os sensores ortogonais, o sensor de referência de fase e suas posições de instalação.

Além disso, a ferramenta deve apresentar ao usuário as órbitas com suas informações individuais na interface possibilitando alterar a órbita apresentada. Por fim, a ferramenta deve apresentar o espectro de frequência da órbita em uma interface dedicada.

A partir dos requisitos técnicos descritos acima, foram definidos os requisitos funcionais e não funcionais das ferramentas a serem desenvolvidas. Os requisitos funcionais descrevem as funcionalidades específicas que a ferramenta deve realizar para atingir os resultados esperados e os requisitos não-funcionais descrevem as restrições que o sistema precisa atender para cumprir os requisitos funcionais.

O primeiro requisito demanda que o software consiga importar os registros de sinais necessários para realizar a análise de órbita. Essa funcionalidade engloba tanto os arquivos de registro proprietários da empresa no formato ".rfx" quanto os registros importados do banco de dados dos clientes. Os critérios para a importação dos registros de sinais estão detalhados na Tabela 1. Nessa tabela, cada requisito não funcional é categorizado com base no tipo de restrição (Segurança, Performance,

Confiabilidade e Usabilidade), indicando se é considerado obrigatório ou desejável, além de especificar se o requisito é permanente ou transitório.

Tabela 1 – Requisito funcional para importação dos registros de sinais.

RF1 - Importação dos registros de sinais

O sistema deve permitir que o usuário importe os registros de sinais provenientes dos três sensores (dois sensores de proximidade e um sensor de referência de fase) para a análise de órbita.

Requisitos não funcionais

Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório	Permanente
NF1.1	Permitir importação de registro provenientes de arquivo proprietário da empresa	Usabilidade	(X)	(X)
NF1.2	Permitir importação de registro provenientes do banco de dados	Usabilidade	(X)	(X)

Fonte: Arquivo pessoal.

Seguindo os requisitos funcionais, a ferramenta de análise de órbita precisa ser configurável de modo que o usuário tenha controle da configuração dos parâmetros da ferramenta. A Tabela 2 apresenta os requisitos funcionais e não funcionais para a configuração dos sinais de órbita.

Tabela 2 – Requisito funcional para configuração dos sinais.

RF2 - Configuração dos sinais

O usuário deve ser capaz de configurar os sensores e suas posições de instalação. Isso inclui a configuração dos sensores X e Y e o sinal de referência de fase.

Requisitos não funcionais

Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório	Permanente
NF2.1	Somente apresenta a interface de configuração se houver uma janela de visualização de órbita.	Usabilidade	(X)	(X)
NF2.2	A interface de configuração deve ser intuitiva e fácil de usar, permitindo que o usuário configure os sensores e suas posições de forma clara e eficiente.	Usabilidade	(X)	(X)
NF2.3	O sistema deve permitir a configuração flexível dos sensores proporcionando liberdade ao usuário para ajustar conforme necessário.	Usabilidade	(X)	(X)
NF2.4	O sistema deve poder lidar com falhas de configuração.	Confiabilidade	(X)	(X)

Fonte: Arquivo pessoal.

Para a visualização dos gráficos de órbita, o *Insight* deve poder apresentar concisamente as órbitas do mancal juntamente com informações quantitativas, como valor pico-a-pico, máximo deslocamento no plano de medição e concentricidade, explicados na Seção 2.5. Além disso, a visualização da órbita deve apresentar ao usuário botões para retirar a componente média do sinal e também retirar o *gap* de instalação dos sinais. A Tabela 3 apresenta os requisitos funcionais e não funcionais da visualização cartesiana do sinal de órbita.

Tabela 3 – Requisito funcional para visualização dos sinais de órbita.

RF3 - Visualização das órbitas

O usuário deve poder visualizar os gráficos de órbita individualmente com as informações quantitativas da órbita além de poder alterar a órbita visualizada e realizar operações.

Requisitos não funcionais

Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório	Permanente
NF3.1	A ferramenta deve possuir uma interface de usuário intuitiva e amigável, que facilite a visualização dos resultados da análise de órbita.	Usabilidade	(X)	(X)
NF3.2	Com base nos registros de sinais e nas configurações dos sensores, o sistema deve ser capaz de desenhar a órbita do eixo em rotação.	Usabilidade	(X)	(X)
NF3.3	A visualização dos sinais deve ser compatível com diferentes tamanhos de tela e dispositivos.	Usabilidade	(X)	(X)
NF3.4	O gráfico de órbita deve respeitar as proporções físicas do orbital sem distorções.	Confiabilidade	(X)	(X)
NF3.5	O desenho da órbita deve ser preciso e detalhado, garantindo que as oscilações do eixo sejam representadas com exatidão.	Confiabilidade	(X)	(X)
NF3.6	O sistema deve conseguir desenhar a órbita rapidamente sem gargalos, de modo que o usuário tenha uma visualização fluida e rápida.	Performance	(X)	(X)
NF3.7	A interface deve ser intuitiva e fácil de usar, proporcionando uma experiência amigável ao usuário.	Usabilidade	(X)	(X)

Fonte: Arquivo pessoal.

Para o processamento dos sinais de órbita, o software deve poder delimitar o sinal de órbita por rotação da máquina a partir do processamento das amostras do sensor de referência de fase. Além disso, é crucial que o processamento dos sinais de órbita seja rápido e eficiente. A Tabela 4 apresenta os requisitos necessários para o processamento dos sinais de órbita.

Tabela 4 – Requisito funcional para processamento dos sinais de órbita.

RF4 - Processamento dos sinais de órbita

A ferramenta deve implementar os cálculos matemáticos necessários para parametrizar a condição da máquina com base nas informações obtidas do sinal de órbita.

Requisitos não funcionais

Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório	Permanente
NF4.1	O sistema deve poder processar registros de sinais rapidamente, mesmo quando o tamanho dos arquivos for grande.	Confiabilidade	(X)	(X)
NF4.2	Os cálculos matemáticos devem ser realizados com alta precisão, evitando, erros e imprecisões nas métricas obtidas.	Confiabilidade	(X)	(X)
NF4.3	Os cálculos devem ser eficientes, permitindo uma análise rápida e eficaz dos dados.	Performance	(X)	(X)

Fonte: Arquivo pessoal.

Por fim, o *Insight* deve poder apresentar o espectro completo dos sinais de órbita. A visualização do espectro de órbita deve ser apresentar de forma clara e correta as componentes de frequência diretas e reversas, conforme explicado na Seção 2.5.2. A Tabela 5 apresenta os requisitos funcionais e não funcionais destinados à visualização do espectro de órbita (*Full spectrum*).

Tabela 5 – Requisito funcional para visualização espectral da órbita.

RF5 - Visualização espectral da órbita (Full spectrum)

O usuário deve ser capaz de visualizar as frequências diretas e reversas dos sinais de órbita de um registro de sinal.

Requisitos não funcionais

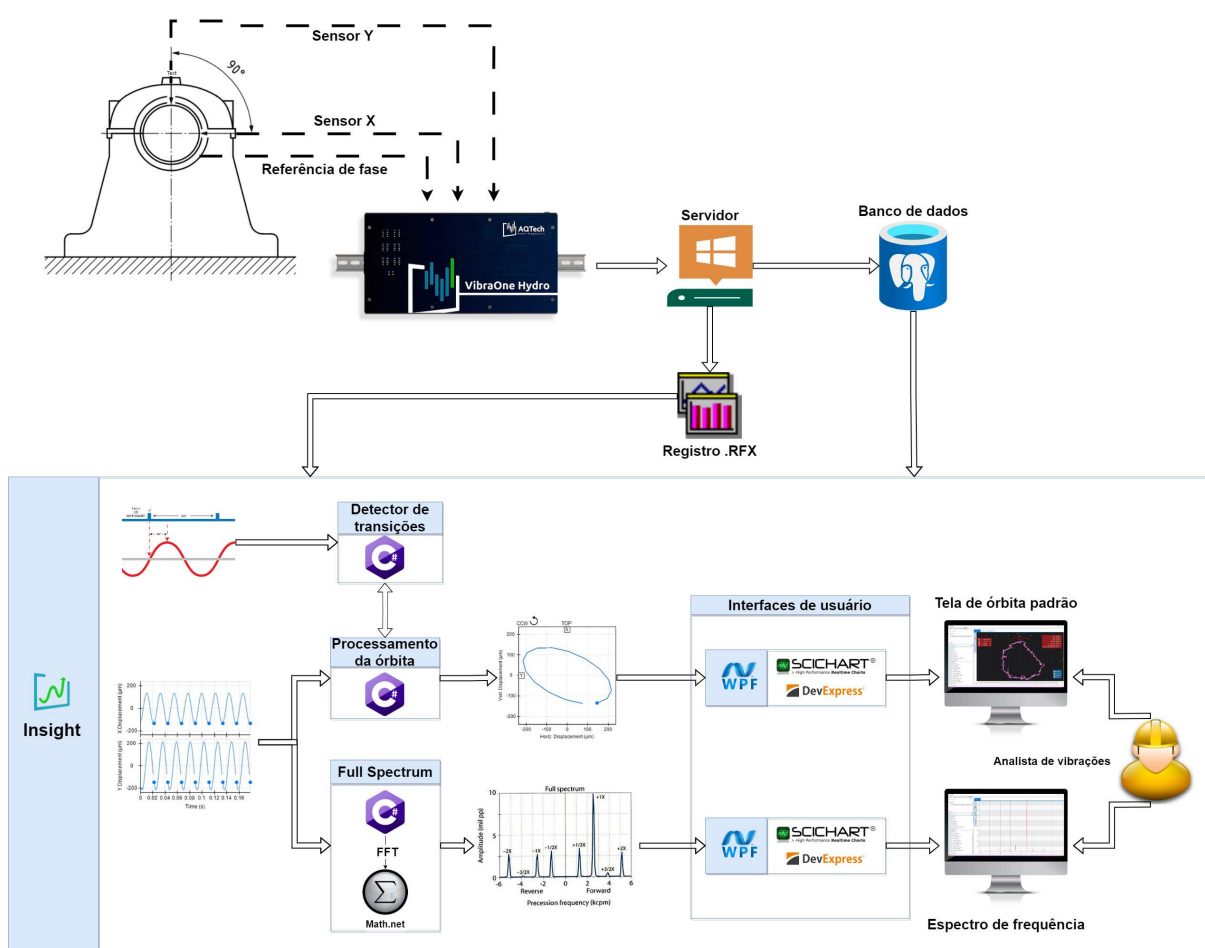
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório	Permanente
NF5.1	O sistema deve identificar o espectro de frequência da órbita corretamente.	Confiabilidade	(X)	(X)
NF5.2	A interface deve ser intuitiva, fácil e amigável ao usuário.	Usabilidade	(X)	(X)

Fonte: Arquivo pessoal.

3.5 SOLUÇÃO PROPOSTA

Tomando como base a descrições realizadas, o projeto proposto visa criar uma ferramenta analítica para engenheiros e técnicos de manutenção, capaz de processar e apresentar graficamente a órbita de mancais separadamente por rotação da máquina, a partir de registros de sinais capturados pelos equipamentos da AQTech. Para isso, será implementado no software *Insight*, um módulo onde será possível configurar e visualizar os sinais de órbita no domínio do tempo e da frequência, além de outras informações quantitativas tomando como base o gráfico de órbita.

Figura 28 – Diagrama conceitual da solução proposta.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 28, apresenta-se um esquemático da solução proposta para a realização da análise de órbita no software *Insight*. Na solução apresentada, os dados registrados pelo equipamento VibraOne Hydro, armazenados em um servidor, serão acessados pelo software através de um arquivo ".rfx" ou por meio de um banco de dados PostgreSQL que contém os dados históricos gerados pelo equipamento. No *Insight*, serão implementados três novos algoritmos. O primeiro processará os sinais

de cada sensor com o auxílio do algoritmo de detecção de transições do sinal de referência de fase, gerando os gráficos de órbita por rotação da máquina. O terceiro algoritmo gerará o espectro de frequência da órbita, utilizando o algoritmo de *full spectrum*. Todos esses algoritmos serão programados em C#. Por fim, para apresentar os resultados gerados pelos algoritmos ao analista de vibrações, será necessário implementar duas interfaces distintas no software, desenvolvidas em WPF com o uso das bibliotecas DevExpress e SciChart.

4 DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

O presente capítulo visa apresentar e descrever as atividades realizadas para a implementação da solução proposta, conforme detalhado no capítulo anterior. Na Seção 4.1, são apresentados os diagramas utilizados na modelagem do projeto, visando atender aos requisitos técnicos descritos na Seção 3.4. Na Seção 4.2, são discutidas as tecnologias empregadas no desenvolvimento do projeto, incluindo linguagens de programação, bibliotecas, frameworks, entre outros. Por fim, a Seção 4.3 apresenta a concepção da ferramenta, desde a estruturação do sistema até os métodos e algoritmos utilizados.

4.1 DIAGRAMAS

No contexto deste trabalho, a modelagem de software é essencial para compreender e representar a estrutura, comportamento e interações do sistema que está sendo desenvolvido. Para isso, será utilizado diagramas UML (Unified Modeling Language) para modelar a ferramenta desenvolvida.

Os diagramas UML oferecem uma linguagem visual consistente e reconhecida para humanos e por máquinas, que permite uma representação clara e precisa para modelar dados, funções de transformação dos dados e as restrições aplicáveis aos dados e as funções, como regras de negócio, por exemplo (WAZLAWICK, 2016).

Para desenvolvimento dos diagramas de caso de uso e de atividades, foi utilizado o software Astah Community, desenvolvido pela Change Vision. Este software é de uso gratuito para estudantes, e apresenta uma série de funcionalidade para modelar sistemas em UML.

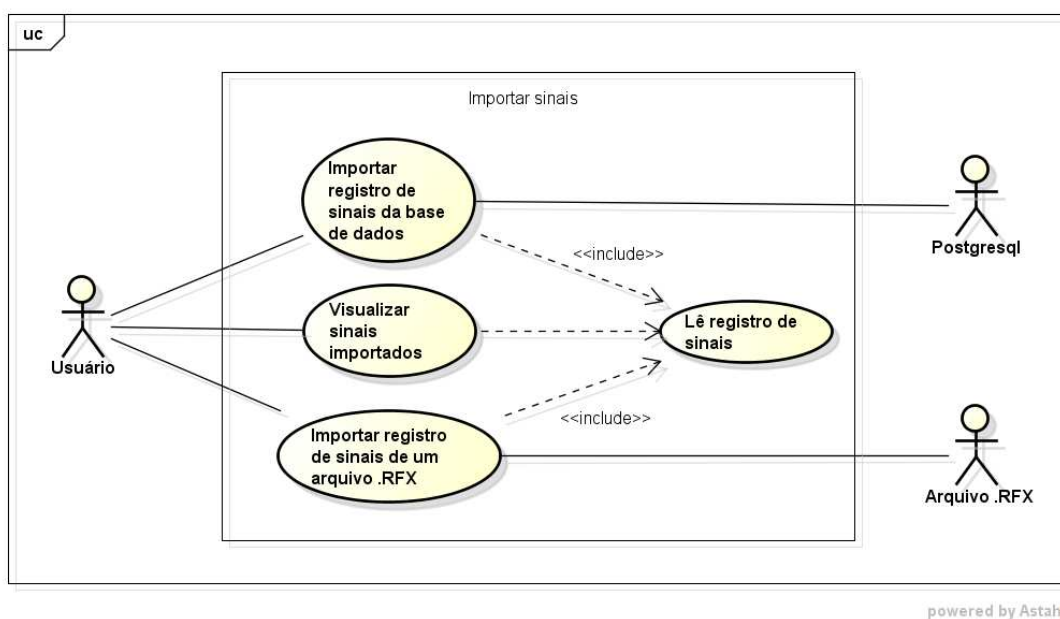
4.1.1 Diagrama de casos de uso

O diagrama de caso de uso ajuda a determinar a funcionalidade e as características do software do ponto de vista do usuário. Um caso de uso descreve como um usuário interage com o sistema definindo os passos necessários para atingir um objetivo específico. Por meio da descrição textual de cada caso de uso, consegue-se formar uma ideia clara dos objetivos do sistema que se está desenvolvendo (WAZLAWICK, 2016).

Segundo os requisitos levantados anteriormente pode-se desenvolver uma série de diagramas de casos de uso. O diagrama apresentado na Figura 29, resume as funcionalidades necessárias para importar os registros de sinais adquiridos pelo VibraOne que possuem os sinais que o usuário deseja analisar através do software *Insight*. Para isso, é de responsabilidade do ator "Usuário" escolher o registro de sinais a ser importado, existem duas maneiras de se importar um registro de sinais. O usuário

pode importar um registro de sinais guardado no banco de dados ou através do arquivo de registro salvo no formato ".rfx", formato de arquivo proprietário da AQTech. Após escolher um registro para importar, o *Insight* lê o registro e apresenta ao usuário os sinais importados.

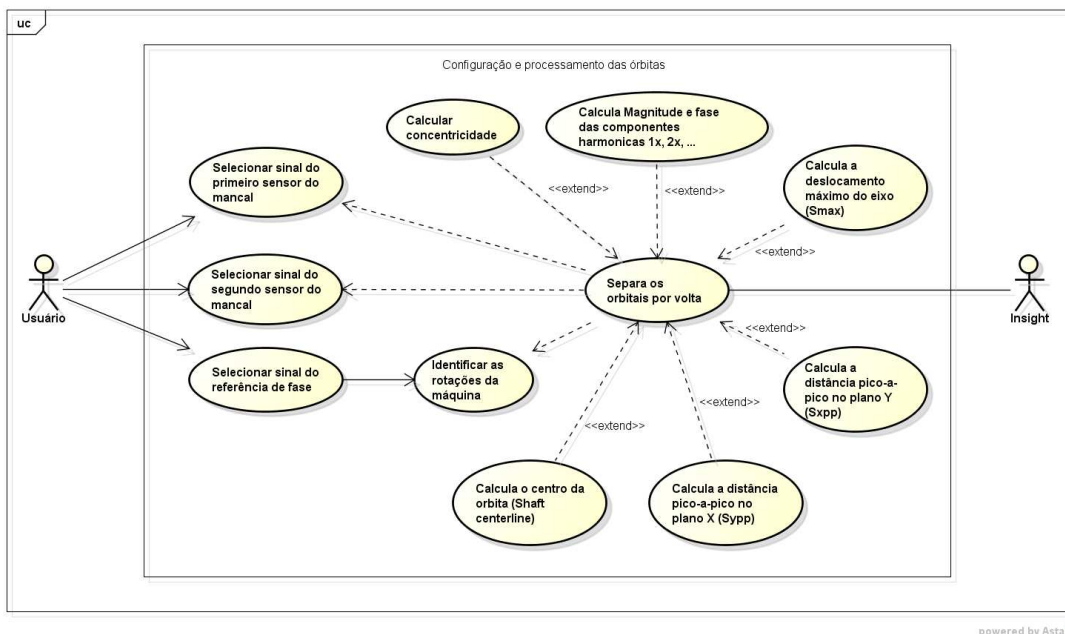
Figura 29 – Diagrama de casos de uso "Importar sinais".



Fonte: Arquivo pessoal.

O diagrama apresentado na Figura 30, exibe as funcionalidades necessárias para realizar a configuração e o processamento dos sinais de órbita através do *Insight*. Primeiramente, o usuário deve selecionar os sinais dos sensores em quadratura e do sensor de referência de fase para realizar os cálculos. Após o usuário definir os sinais o processo de identificar os sinais de órbitas por rotação da máquina inicia, nesse processo outros cálculos também são realizados em conjunto como o cálculo dos valores pico-a-pico dos sinais XY, a coordenada do centro da órbita, o máximo deslocamento do eixo e a concetricidade da órbita.

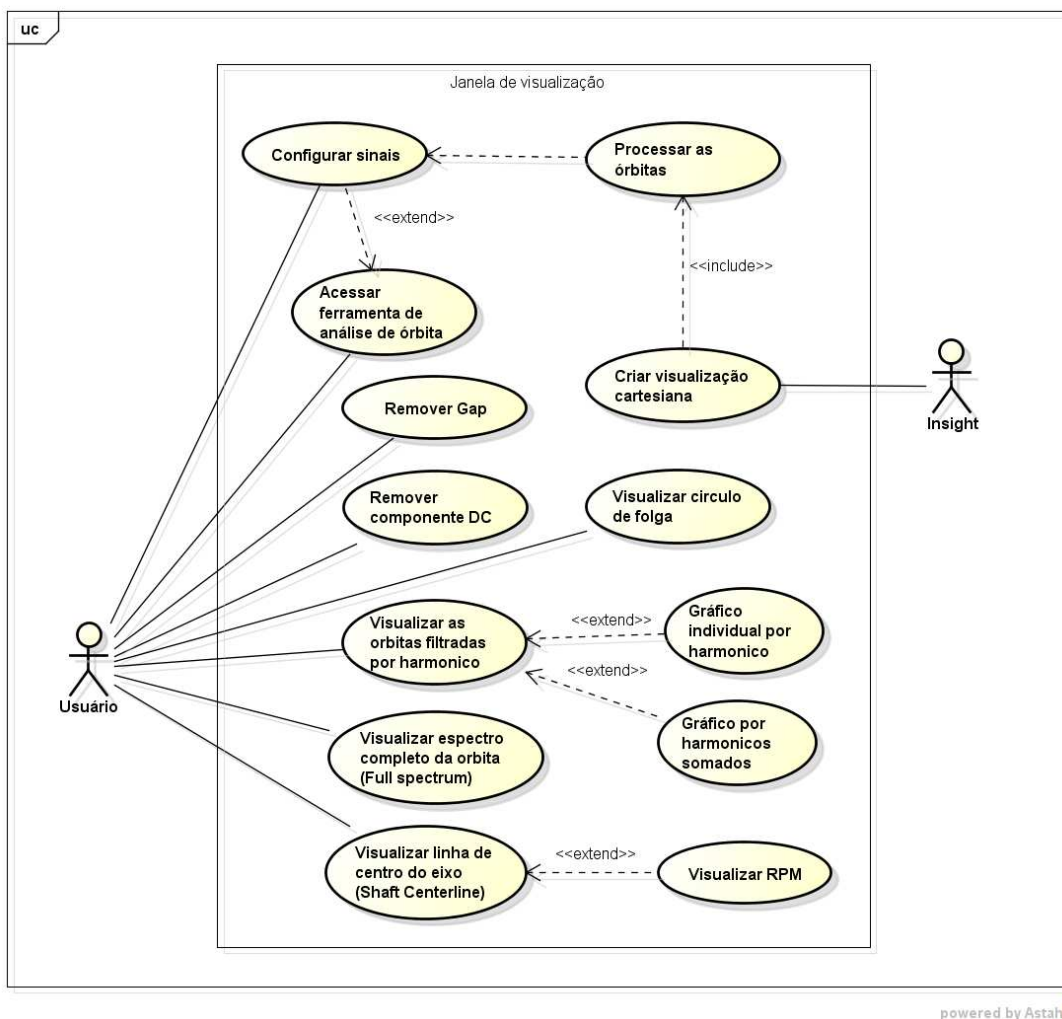
Figura 30 – Diagrama de casos de uso "Configuração e processamento".



Fonte: Arquivo pessoal.

Por fim, o diagrama apresentado na Figura 31 resume de maneira visual as operações que a janela de visualização da ferramenta deve ser capaz de realizar. Neste diagrama, o usuário realiza diversas ações relacionadas a visualização dos orbitais, sendo elas a visualização das órbitas separadas por rotação, a visualização do círculo de folga, a visualização do espectro completo da órbita (*full spectrum*) e a visualização da linha de centro do eixo (*Shaft Centerline*), além das opções de remoção da componente média e do *gap* do sinal de órbita. Aqui também é apresentado as relações de dependência, inclusão e extensão dos casos de uso necessários para acessar a ferramenta de análise de órbita no *Insight*.

Figura 31 – Diagrama de casos de uso "Janela de visualização".



Fonte: Arquivo pessoal.

Após a modelagem da estrutura do software necessária para se realizar a análise de órbita a partir dos sensores instalados nos mancais de uma unidade geradora, o próximo passo foi levantar e definir as ferramentas necessárias para desenvolver a aplicação. Na próxima seção será apresentado as tecnologias utilizadas para desenvolver o projeto.

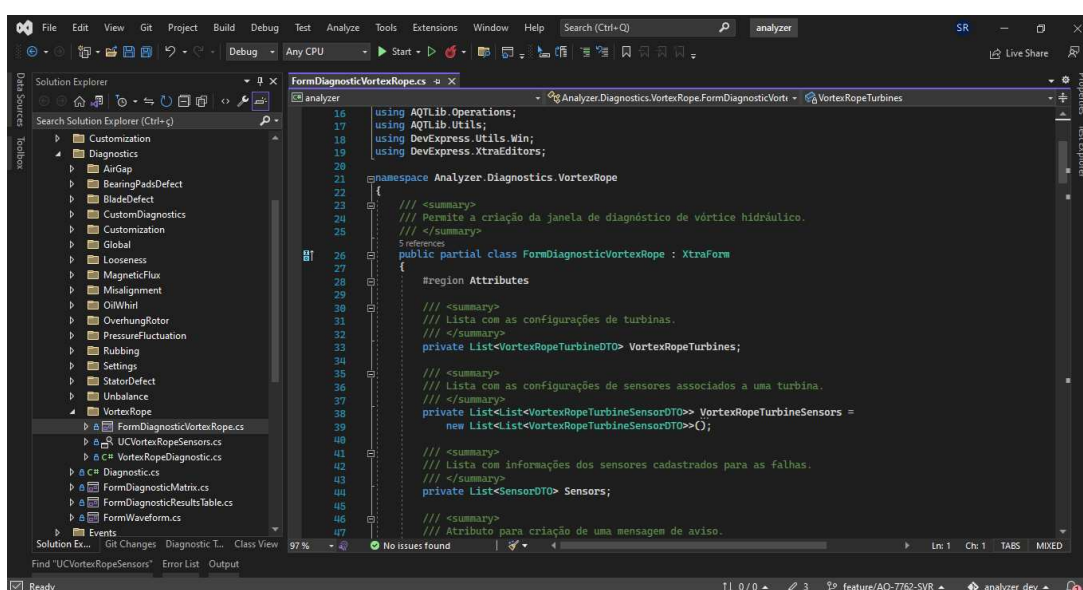
4.2 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

Para a implementação e desenvolvimento do projeto foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da Microsoft, o software Visual Studio 2022. A escolha do Visual Studio foi favorecida pelo seu uso generalizado pela equipe de desenvolvimento, em comparação com outras ferramentas disponíveis e também na sua reputação consolidada com uma plataforma de desenvolvimento de software robusta

e versátil para aplicações Windows.

O Visual Studio oferece suporte para várias linguagens de programação como C#, Visual Basic, Visual C++ e JavaScript, e conta com um conjunto de ferramentas que auxiliam na elaboração e edição de códigos estruturados de forma elegante e integrada. Além disso, o Visual Studio conta com bibliotecas de classe gráfica (GUI) que possibilita também o desenvolvimento de aplicações com interface gráfica em Windows Forms e WPF (Windows Presentation Foundation).

Figura 32 – Interface de programação Visual Studio.



Fonte: Arquivo pessoal.

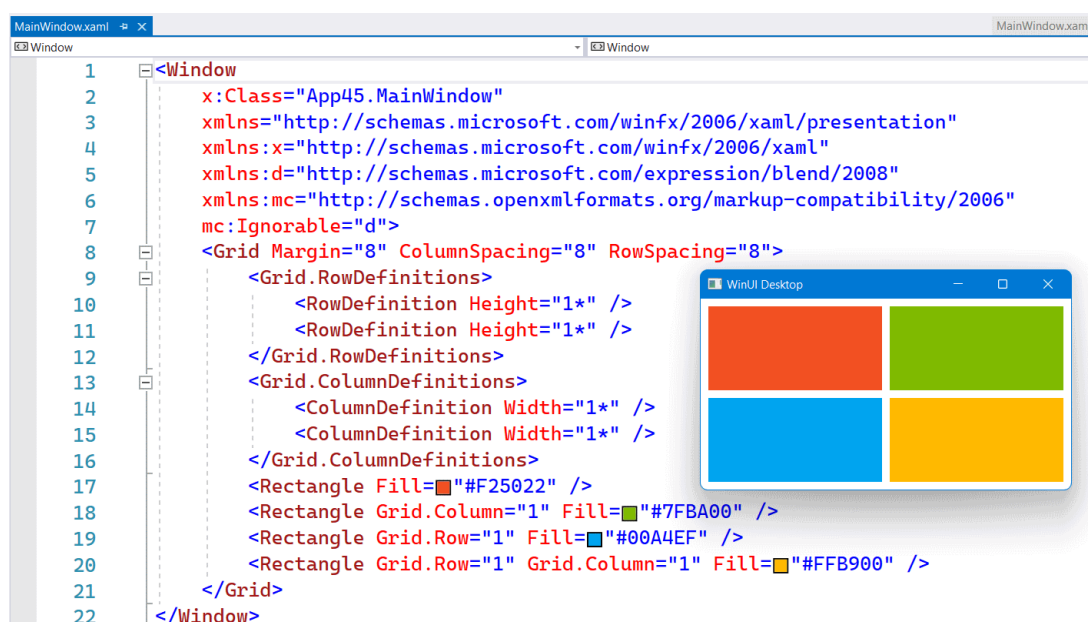
4.2.1 WPF - Windows Presentation Foundation

A escolha de utilizar o WPF (Windows Presentation Foundation) como uma das tecnologias utilizadas neste projeto foi fundamentada em diversas vantagens que a plataforma oferece. O WPF é uma robusta e flexível estrutura para a criação de interfaces gráficas para computadores Windows. Possibilitando o desenvolvimento de aplicações visualmente ricas e interativas, o WPF oferece uma ampla gama de recursos para aprimorar a experiência do usuário.

Com suporte a recursos de vinculação de dados, estilos e modelos, o WPF facilita a construção de interfaces dinâmicas e personalizadas. Além disso, sua integração com o Visual Studio 2022 proporciona um ambiente de desenvolvimento unificado e eficiente. A utilização do WPF contribui significativamente para a criação de interfaces de usuário atraentes, intuitivas e responsivas, enriquecendo a experiência do usuário ao interagir com o sistema desenvolvido.

Para desenvolver as interfaces gráficas em WPF foi utilizado a linguagem de programação XAML (Extensible Application Markup Language), conforme apresentado na Figura 33. O XAML é uma linguagem declarativa baseada em XML que permite descrever a hierarquia de elementos visuais, estilos, comportamentos e interações da aplicação. Isso inclui a disposição dos controles na janela, a definição de propriedades visuais, como cores e fontes, e a associação de eventos aos manipuladores de código em C#. Com essa linguagem, podemos separar a representação visual da lógica de programação, promovendo uma abordagem de desenvolvimento mais organizada e fácil de manter.

Figura 33 – Código XAML de uma aplicação Windows.



```
1 <Window
2     x:Class="App45.MainWindow"
3     xmlns="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml/presentation"
4     xmlns:x="http://schemas.microsoft.com/winfx/2006/xaml"
5     xmlns:d="http://schemas.microsoft.com/expression/blend/2008"
6     xmlns:mc="http://schemas.openxmlformats.org/markup-compatibility/2006"
7     mc:Ignorable="d">
8     <Grid Margin="8" ColumnSpacing="8" RowSpacing="8">
9         <Grid.RowDefinitions>
10            <RowDefinition Height="1*" />
11            <RowDefinition Height="1*" />
12        </Grid.RowDefinitions>
13        <Grid.ColumnDefinitions>
14            <ColumnDefinition Width="1*" />
15            <ColumnDefinition Width="1*" />
16        </Grid.ColumnDefinitions>
17        <Rectangle Fill="#F25022" />
18        <Rectangle Grid.Column="1" Fill="#7FBA00" />
19        <Rectangle Grid.Row="1" Fill="#00A4EF" />
20        <Rectangle Grid.Row="1" Grid.Column="1" Fill="#FFB900" />
21    </Grid>
22 </Window>
```

Fonte:(SONNEMANS, 2021)

4.2.2 Programação C#

O desenvolvimento lógico das implementações foram todas baseadas em C#. O C# é uma linguagem de programação orientada a objeto que suporta os conceitos de encapsulamento, heranças e polimorfismos. Além disso, essa linguagem foi a primeira da família C/C++, a seguir os padrões de programação orientada a objetos (POO).

O C# é uma linguagem que visa facilitar muito o desenvolvimento, alinhado ao Visual Studio, possui uma vasta gama de recursos que podem proporcionar uma grande produtividade para desenvolvedores que a utilizam. Além dos recursos como sua sintaxe e programação orientada a objetos, que fazem dela uma linguagem poderosa para se trabalhar. Aliada ao uso do framework .NET, é possível criar diversos tipos de aplicações, e ainda ter um ambiente onde é possível focar na sua lógica o

tempo todo, sem se preocupar com a gerência de recursos, ficando a cargo do .NET framework realizar o controle de memória.

Além disso, possui a Language Integrated Query (LINQ) que permite a realização de consultas internas entre uma variedade de fontes de dados. Por meio desse recurso é possível efetuar tarefas comuns como localizar um objeto, somar e contar dados, ordenar listas, etc.

Um exemplo de uma implementação em C# pode ser observado no Código 4.1. Inicialmente todas as bibliotecas, heranças e atributos são definidos. Além disso, temos o construtor da classe que é um método especial usado para criar e inicializar o objeto "CartesianPlotUserControl", quando instanciado usando a palavra reservada *new*.

Código Fonte 4.1 – Exemplo de programação de classes - parte 1.

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using Insight.MWM.Model;
using SciChart.Charting;

namespace Insight.MWM.UserControls
{
    // Permite a criação de um user control para um sensor.
    public partial class CartesianPlotUserControl : UserControl
    {
        #region Properties

        // Sinais associados ao controle.
        public ObservableCollection<Signal> Signals
        {
            get { return
                (ObservableCollection<Signal>)GetValue(SignalsProperty); }
            set { SetValue(SignalsProperty, value); }
        }

        // Nome da visualização.
        public string VisualizationName
        {
            get { return (string)GetValue(VisualizationNameProperty); }
            set { SetValue(VisualizationNameProperty, value); }
        }

        #endregion

        // Construtor do objeto da interface CartesianPlotUserControl.
        public CartesianPlotUserControl()
        {
```

```
        InitializeComponent();  
    }
```

Após a classe ser instanciada, os métodos são declarados. No Código 4.2, temos o exemplo da declaração do método do evento "OnSettingsButtonClick", acionado quando o botão de propriedades da janela de órbita é pressionado. Ao ser chamado, o método verifica se a lista de sinais importados esta vazia, se a lista não é nula, existem sinais para configurar, em seguida cria a classe de controle da interface e adiciona uma cópia da configuração de órbita para restaurar configurações antigas. Por fim, a janela de configuração da órbita é instanciada e os parâmetros do objeto são passados.

Código Fonte 4.2 – Exemplo de programação de classes - parte 2.

```
#region Events  
  
// Evento disparado quando o botão de propriedades é pressionado.  
private void OnSettingsButtonClick(object sender, EventArgs e)  
{  
    // Verifica se há sinais para configurar.  
    if (Signals is null) return;  
  
    // Viewmodel.  
    OrbitSettingsViewModel viewModel =  
        DependencyInjector.Retrieve<OrbitSettingsViewModel>();  
  
    // Cria uma cópia da configuração da órbita.  
    viewModel.SignalOrbits = new List<OrbitSettings>  
    {  
        (OrbitSettings)OrbitSettings.Clone(),  
    };  
  
    // Abre a janela de configuração da órbita.  
    Window window = new OrbitSettingsWindow { DataContext =  
        viewModel, };  
    window.ShowDialog();  
}  
#endregion  
}
```

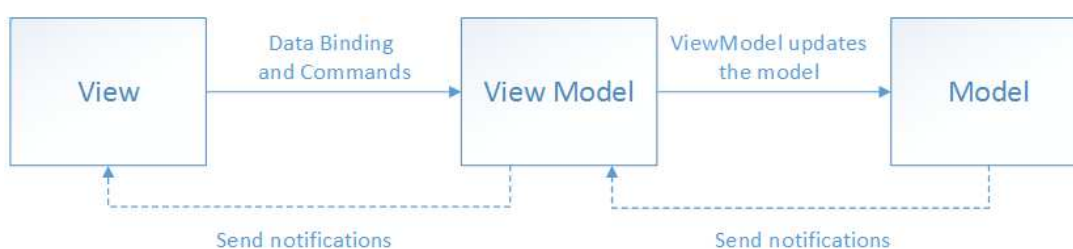
4.2.3 MVVM

O padrão MVVM (Model-View-ViewModel) foi adotado neste projeto devido aos benefícios que oferece para o desenvolvimento de aplicações WPF. Através da separação clara de responsabilidades entre o Model (modelo de dados), a View (interface

gráfica) e o ViewModel (lógica de apresentação), o MVVM proporciona uma arquitetura bem estruturada e de fácil compreensão.

A estrutura do modelo Model-View-ViewModel (MVVM) pode ser melhor entendida através do diagrama apresentado na Figura 34. Neste modelo, a componente View assume a responsabilidade pela camada de apresentação, focando exclusivamente na aparência da interface do usuário e na aquisição de entrada de dados. Este componente exibe os dados recebidos da camada de negócios, sem realizar processamento ou armazenamento de informações. A componente ViewModel, é responsável pela camada de negócios, encarregando de gerenciar a lógica da aplicação, armazenando e processando o estado da interface do usuário. Por fim, a componente Model é responsável pela camada de dados da aplicação, onde os dados são mantidos e persistidos adequadamente.

Figura 34 – Diagrama abstrato da arquitetura MVVM.



Fonte: (MICROSOFT, 2023).

A divisão das camadas no modelo MVVM permite a reutilização de código, simplifica a realização de testes unitários e torna o software escalável e flexível para futuros desenvolvimentos. O uso do MVVM também otimiza a manutenção do código, uma vez que as modificações na interface do usuário não interferem na lógica de negócios e vice-versa. A escolha desse modelo proporcionou um desenvolvimento organizado e eficiente, resultando em um software mais estável.

4.2.4 Versionamento de código

Para esse projeto foi utilizada a ferramenta Git, para gerenciar o versionamento de código ao longo do desenvolvimento do trabalho. Além disso, optou-se pelo BitBucket para armazenar os códigos elaborados de forma remota e também para a gestão do projeto. A escolha do BitBucket foi respaldada pelo fato que esse serviço já é amplamente adotado pela equipe de desenvolvimento em outros projetos.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO

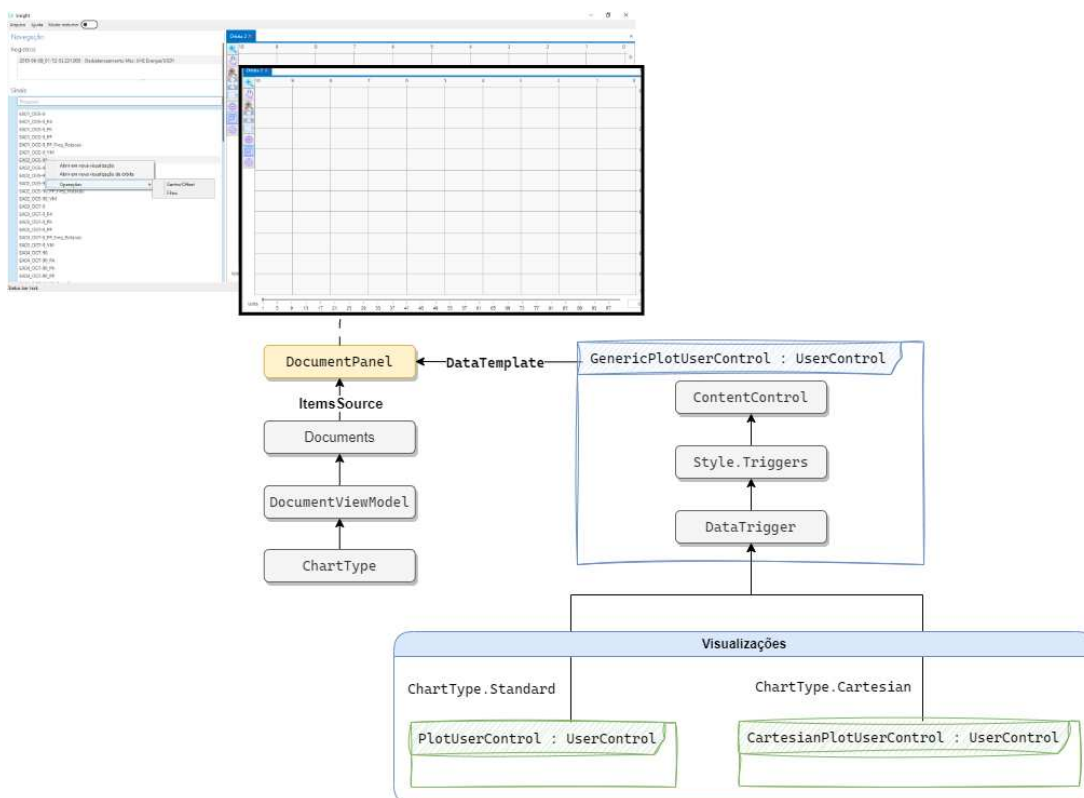
A implementação do projeto foi realizada em diversas etapas. Partindo da preparação da infraestrutura do software para acomodar as novas funcionalidades até a implementação da ferramenta de análise de órbita.

4.3.1 Infraestrutura do software

A preparação da infraestrutura do software partiu da necessidade de elaborar uma arquitetura de software capaz de integrar facilmente novas funcionalidades. Não foi escopo deste trabalho criar uma estrutura totalmente nova, com todas as funcionalidades e camadas genéricas de baixo acoplamento e de alta potencialização de reutilização. O trabalho trata de um ponto de partida para a integração da ferramenta de análise de órbita e de outras ferramentas utilizando o *Insight*, de modo a permitir a evolução do software.

Para possibilitar a intercambialidade entre diferentes tipos de visualizações, preservando as implementações anteriores, a arquitetura desenvolvida pode ser visualizada na Figura 35.

Figura 35 – Arquitetura das interfaces de visualização.



Fonte: Arquivo pessoal.

Antes do projeto, o *Insight* possuía apenas um único módulo de visualização. Esse módulo de visualização foi construído utilizando uma solução de gerenciamento de layout do DevExpress, o Layout Management. Esse componente do DevExpress, ajuda a criar layouts de aplicativos de qualquer tipo e complexidade de interfaces de janela do tipo "Dock Container" inspiradas no Visual Studio. Este controle de usuário e permite encaixar formulários filhos em regiões definidas, além de suportar ações de arrastar e soltar, janelas flutuantes, entre outros recursos.

No entanto, mesmo utilizando um componente avançado de layout, o software não possuía uma estrutura para gerenciar múltiplas interfaces de visualização de dados. Para isso, foi necessário adaptar o componente gerenciador de painéis, o DockLayoutManager para trabalhar com múltiplos controles de usuário. O primeiro passo foi adicionar a classe "*DocumentViewModel*" um parâmetro que representa o tipo de visualização atribuído ao objeto que fornecem as informações para gerar e inicializar os painéis no DockLayoutManager. O parâmetro ChartType foi criado usando um enumerador (do tipo *enum*), sendo um tipo de dado usado para definir um conjunto de constantes nomeadas.

Para definir a enumeração em C#, foi utilizado a palavra-chave *enum* e seu nome e em seguida foi especificado cada membro da enumeração conforme apresentado no Código Fonte 4.3.

Código Fonte 4.3 – Enumeração com os tipos gráficos do Insight.

```
/// <summary>
/// Tipos de gráfico.
/// </summary>
public enum ChartTypes
{
    Undefined ,
    Standard ,
    Cartesian ,
    Polar ,
}
```

Com a implementação do atributo ChartType, o segundo passo foi criar um UserControl genérico para hospedar cada visualização, chamado de "*GenericPlotUserControl*". Esse novo componente toma como base o tipo de gráfico selecionada na inicialização do objeto da visualização para definir o controle que será apresentado ao usuário, utilizando DataTrigger. Em C#, o DataTrigger representa um gatilho que executa ações quando os dados associados atendem a uma condição especificada. Essa abordagem permitiu a definição de modelos dinâmicos da visualização baseados no ChartType.

Na Figura 36 é apresentado uma parte da implementação do componente "*GenericPlotUserControl*" em XAML. Observa-se que os DataTriggers foram configurados

para responder ao tipo de `ChartType` definido pela propriedade `Value`. No exemplo, caso o tipo de gráfico for padrão (*Standard*) o controle de conteúdo (*ContentControl*) instância a visualização padrão de sinais baseado no tempo.

Figura 36 – Implementação da interface genérica de gráficos.

```
<UserControl
  x:Class="Insight.MVVM.UserControls.GenericPlotUserControl"
  xmlns:res="clr-namespace:Insight.MVVM.UserControls">
  <UserControl.Resources>
    <Style x:Key="UserControlStyle" TargetType="{x:Type ContentControl}">
      <Style.Triggers>
        <DataTrigger Binding="{Binding ChartType}" Value="Standard">
          <Setter Property="Content">
            <Setter.Value>
              <res:PlotUserControl
                RefreshDisplay="{Binding RefreshDisplay}" Signals="{Binding Signals}"
                VisualizationName="{Binding DisplayName}" TriggerList="{Binding Triggers}"
                FFTModeOn="{Binding FFTModeOn}">
                <i:Interaction.Triggers>
                  <i:EventTrigger EventName="FFTOverAreaRequested"/>
                  <i:EventTrigger EventName="DropRequested"/>
                </i:Interaction.Triggers>
              </res:PlotUserControl>
            </Setter.Value>
          </Setter>
        </DataTrigger>
        <DataTrigger Binding="{Binding ChartType}" Value="Cartesian"/>
        <DataTrigger Binding="{Binding ChartType}" Value="Polar"/>
      </Style.Triggers>
    </Style>
  </UserControl.Resources>
  <Grid >
    <ContentControl Style="{StaticResource UserControlStyle}" />
  </Grid>
</UserControl>
```

Fonte: Arquivo pessoal.

Para definir cada `ChartType`, ao clicar em um dos itens do menu de contexto de seleção da visualização, um tipo específico de gráfico é atribuído a cada nova visualização. No caso da visualização de órbita, um item foi adicionado ao menu de contexto onde o evento de seleção cria um novo "*DocumentViewModel*" atribuindo o tipo de gráfico cartesiano. Isso é realizado por um código similar ao apresentado no Código Fonte 4.4.

Código Fonte 4.4 – Evento de clique no menu de contexto para abrir uma nova visualização de órbita.

```
public void ContextMenuClickedOpenOrbit ()
{
  // Abre uma nova visualização.
  DocumentViewModel doc = new DocumentViewModel ()
  {
    DisplayName = "Visualização de órbita",
    ChartType = DocumentViewModel.ChartTypes.Cartesian ,
```

```
};  
  
// Adiciona à lista de documentos abertos e desenha o gráfico..  
Documents.Add(doc);  
doc.RefreshDisplay = true;  
}
```

4.3.2 Dados

Para a configuração e visualização da ferramenta de análise de órbita é necessário que os sinais tenham sido previamente importados e formatados pela aplicação. Para isso, foi utilizado as estruturas já desenvolvidas no software para implementar as funcionalidades de importar registros.

Conforme delimitado pelo diagrama de casos de uso apresentado na Figura 29, existem dois métodos possíveis para importar os sinais adquiridos pelos equipamentos da AQTech. Através do *Insight*, importar arquivos de registro exportados por outras aplicações da empresa, gravados em um formato proprietário ".rfx".

Ou abrir os registros diretamente do banco de dados a partir do Analyzer como interface. No Analyzer o usuário seleciona o registro que deseja analisar e através de um comando terminal a software abre o *Insight* passando todas as informações para acessar o registro no banco de dados. Para isso, as duas aplicações devem estar no mesmo domínio de rede do banco de dados do equipamento.

4.4 VISUALIZAÇÃO

O desenvolvimento dos componentes visuais da ferramenta de análise de órbita iniciou com a criação de *mockups* de telas, para validar os conceitos e avaliar a viabilidade de implementação das funcionalidades desejadas. Após o levantamento de ideias com a equipe de desenvolvimento da empresa, uma série de esboços foram desenvolvidos para validarmos a interface de visualização dos gráficos de órbita e a janela de configuração dos sinais. Concluindo o processo de design das interfaces, o desenvolvimento efetivo dos módulos começou.

Como comentado na Seção 4.2.1, a implementação das interfaces gráficas de usuário foi realizada utilizando a tecnologia WPF através da linguagem de programação XAML para definir as hierarquias dos elementos gráficos e as vinculações de dados (Data Binding).

Na interface de visualização cartesiana foram integrados diversos elementos gráficos específicos do WPF, como o TextBlock, ToggleButton, CheckBox, entre outros. Para a visualização dos gráficos de órbita, foi utilizado a biblioteca de gráficos do SciChart para WPF. O SciChart foi utilizado, por ser uma biblioteca capaz de exibir milhões de pontos de dados em gráficos sem comprometer o desempenho do software. Além

disso, técnicas de vinculação de dados foram aplicadas, para permitir a sincronização entre a apresentação e os dados internos. Isso facilitou a atualização em tempo real dos gráficos e das informações apresentadas ao usuário conforme ações são realizadas. Um exemplo da implementação da interface de visualização cartesiana pode ser vista no Código Fonte 4.5.

Código Fonte 4.5 – Implementação da interface de visualização cartesiana da órbita.

```
<UserControl
  x:Class="Insight.MWM.UserControls.CartesianPlotUserControl"
  xmlns:s="http://schemas.abtsoftware.co.uk/scichart">
  <Grid>
    <Grid.ColumnDefinitions>
      <ColumnDefinition Width="Auto" />
      <ColumnDefinition Width="*" />
      <ColumnDefinition Width="150" />
    </Grid.ColumnDefinitions>
    <Button
      Content="Configuração"
      Command="{Binding OnSettingsButtonClick}">
    <s:SciChartSurface Grid.Column="1"
      HorizontalAlignment="Stretch"
      VerticalAlignment="Stretch" .... >
    </s:SciChartSurface>
    <StackPanel Grid.Column="2" Orientation="Horizontal">
      <TextBlock Text="Deslocamento máximo: " />
      <TextBlock Text="{Binding TextAnnotationSmax}" />
    </StackPanel>
  </Grid>
</UserControl>
```

Para gerar os gráficos de órbita e obter informações do mancal, foi necessário desenvolver uma janela específica destinada à configuração de determinados parâmetros.

4.4.1 Configuração

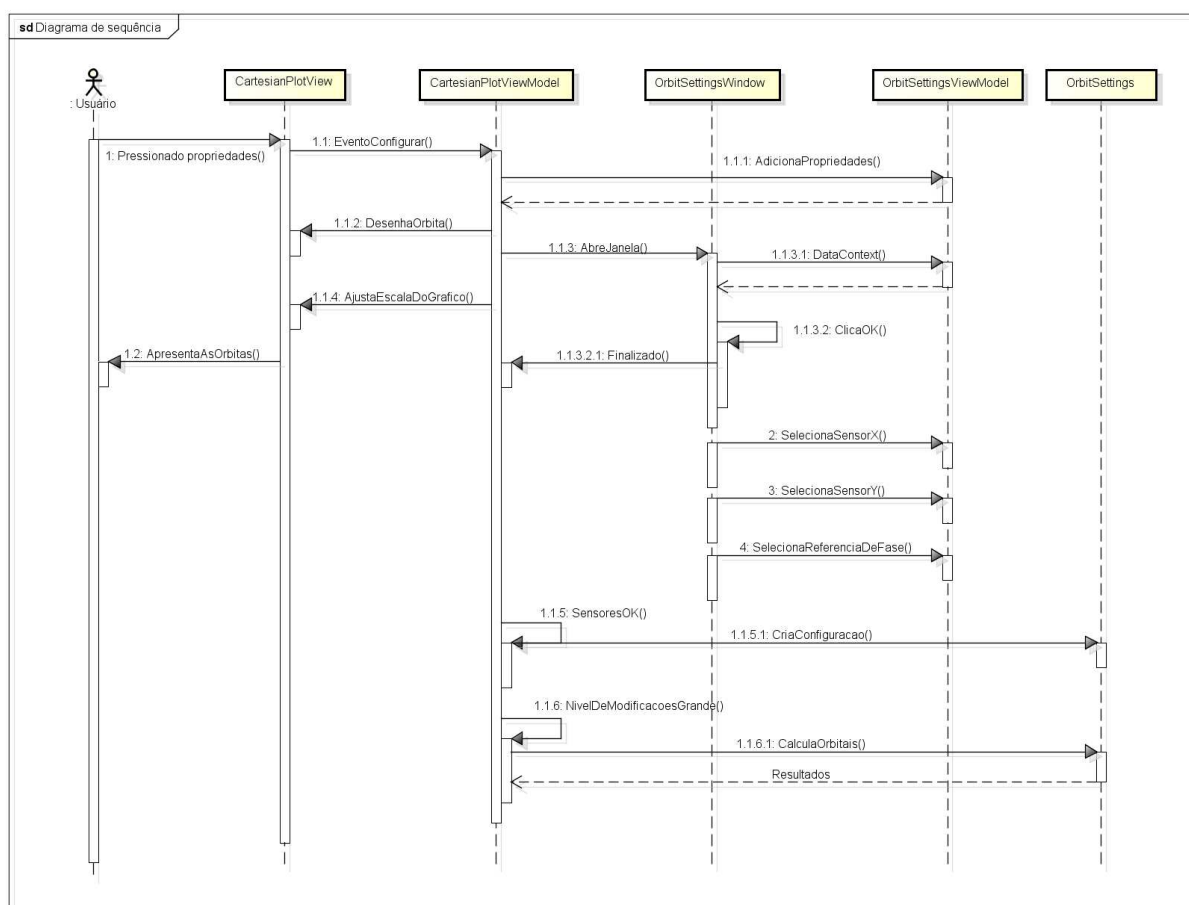
A configuração da ferramenta de análise é realizada através da configuração manual das informações do mancal, definindo os sensores de deslocamento instalados e suas posições, o sensor de referência de fase referente ao eixo analisado, entre outras informações.

Para facilitar a interpretação do comportamento do sistema, o diagrama de atividade apresentado na Figura 37, demonstra o fluxo de ações entre o usuário e o sistema durante a configuração dos parâmetros necessários para o processamento dos sinais de órbita no *Insight*. Vale ressaltar que, por simplificação, o diagrama não apresentada

todas as funcionalidades de configuração presentes na interface de configuração como, cor do sinal, limite máximos e mínimos dos eixos, entre outros.

Através do diagrama desenvolvido, observa-se o uso da arquitetura MVVM, evidenciado pelo uso das classes "OrbitSettingsWindow" responsável por apresentar a parte visual do módulo, a classe "OrbitSettingsViewModel" responsável por implementar as lógicas de atividade e pela classe "OrbitSettings" que implementa toda a lógica de processamento.

Figura 37 – Diagrama de sequência de configuração dos sinais de órbita.

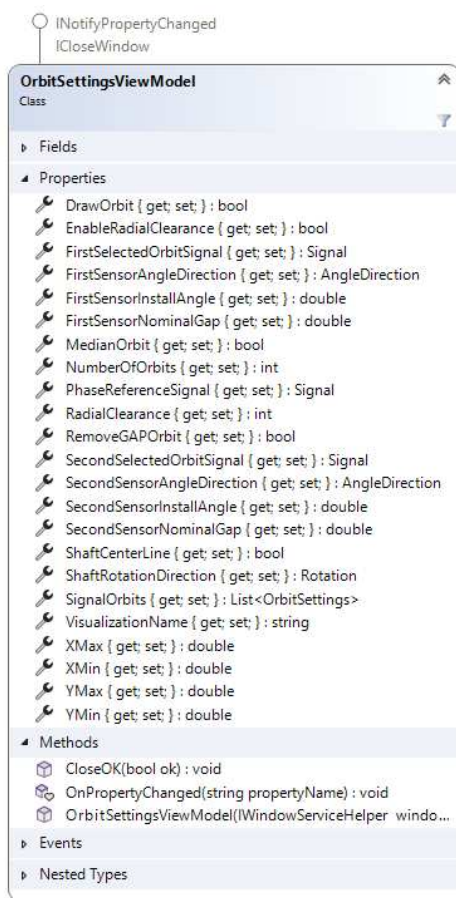


powered by Astah

Fonte: Arquivo pessoal.

Todos os parâmetros configuráveis da classe "OrbitSettingsViewModel" pode ser visualizados no diagrama de classes apresentando na Figura 38. Na janela de configuração o usuário pode habilitar ou desabilitar a visualização do sinal de órbita, apresentando somente o centro do eixo, definir a quantidade de órbitas visualizadas ao mesmo tempo, definir a folga radial do mancal e também habilitar a visualização do círculo de folga, além de configurar os limites máximos e mínimos dos eixos X e Y.

Figura 38 – Diagrama da classe de uma configuração de órbita.



Fonte: Arquivo pessoal.

Assim que uma configuração é finalizada pela "*OrbitSettingsViewModel*" duas verificações são realizadas pela classe "*CartesianPlotViewModel*". A primeira verificação é realizada para determinar se houve modificações significativas na configuração, caso mudanças foram realizadas a próxima verificação é realizada. A última verificação determina se a configuração está completa, caso confirmado e mudanças maiores foram encontradas o sinal de órbita é processado.

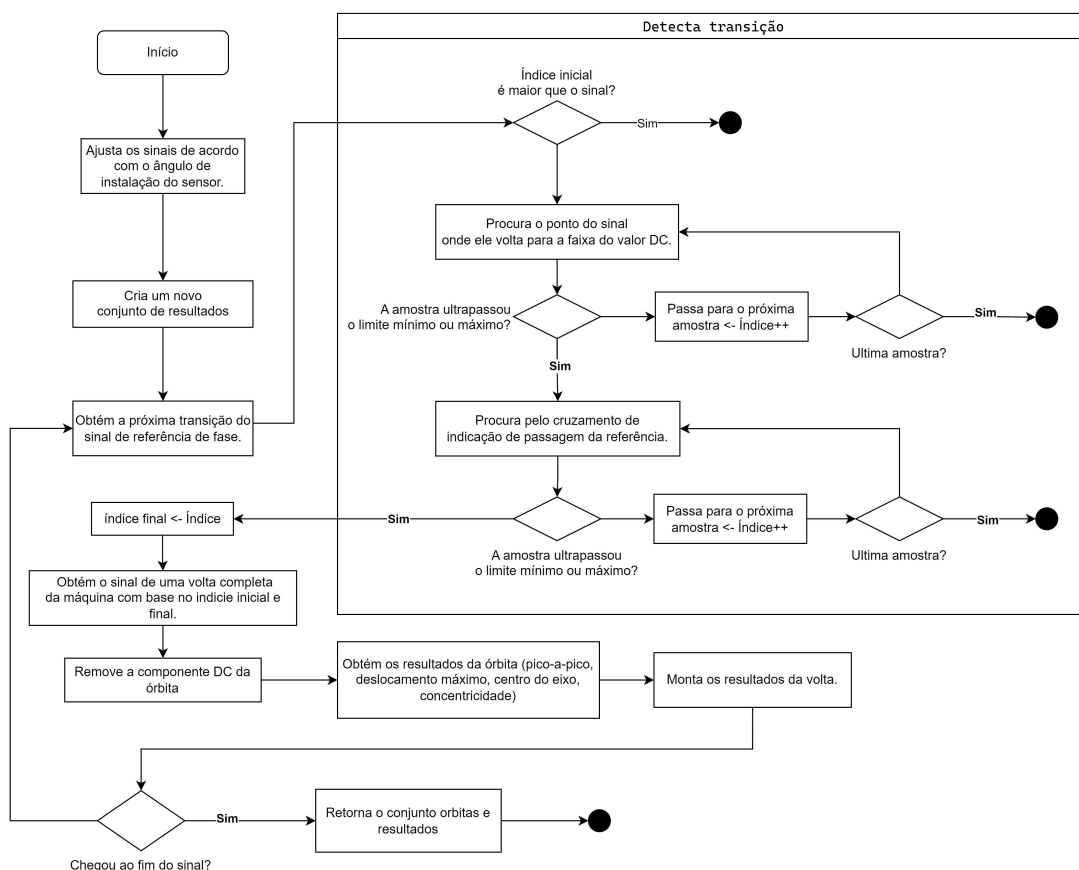
4.5 PROCESSAMENTO

Como descrito anteriormente, ferramentas de análise de órbita utiliza de dois sensores de proximidade, instalados em quadratura, para criar gráficos que exibem o movimento do eixo do mancal em duas dimensões através do sincronismo desses sinais com a rotação da máquina. Resumidamente, o algoritmo aqui desenvolvido concentra-se principalmente no processamento dos sinais registrados pelo sistema de monitoramento da AQTech, com o intuito de gerar o gráfico da órbita de rotação da

máquina, identificada pela trajetória dos sinais entre dois pulsos medidos pelo sensor de referência de fase (*keyphasor*).

O diagrama da Figura 39 apresenta a lógica básica do algoritmo de identificação dos sinais de órbita para cada rotação da máquina. A explicação detalhada de cada bloco de processo será abordada nos próximos parágrafos.

Figura 39 – Diagrama lógico de processamento dos sinais de órbita.



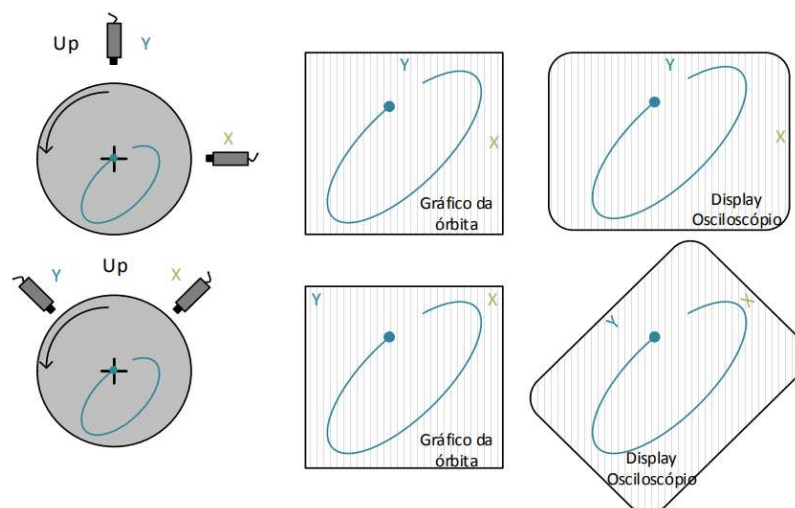
Fonte: Arquivo pessoal.

O algoritmo inicia com o ajuste dos sinais conforme o ângulo de instalação dos sensores. Caso a orientação dos eixos XY do gráfico não coincida com a orientação de instalação dos sensores, semelhante ao apresentado na Figura 40, o sinal da órbita será compensado para exibir a órbita com a orientação correta, obedecendo ao plano de referência do gráfico. Para realizar esse ajuste, efetua-se a mudança de coordenadas do sinal de órbita pelo ângulo de instalação do sensor, resultando em um novo sinal de órbita rotacionado. Esse procedimento é realizado aplicando a rotação dos eixos coordenados da seguinte maneira (DELGADO; FRENSEL; CRISSAFF, 2013):

$$\begin{cases} X(n) = \bar{X}(n) \cos(\theta) - \bar{Y}(n) \sin(\theta) \\ Y(n) = \bar{X}(n) \sin(\theta) + \bar{Y}(n) \cos(\theta) \end{cases}, \quad (14)$$

sendo \bar{X} e \bar{Y} o sinal do par de sensores em quadratura e θ o ângulo de instalação dos sensores.

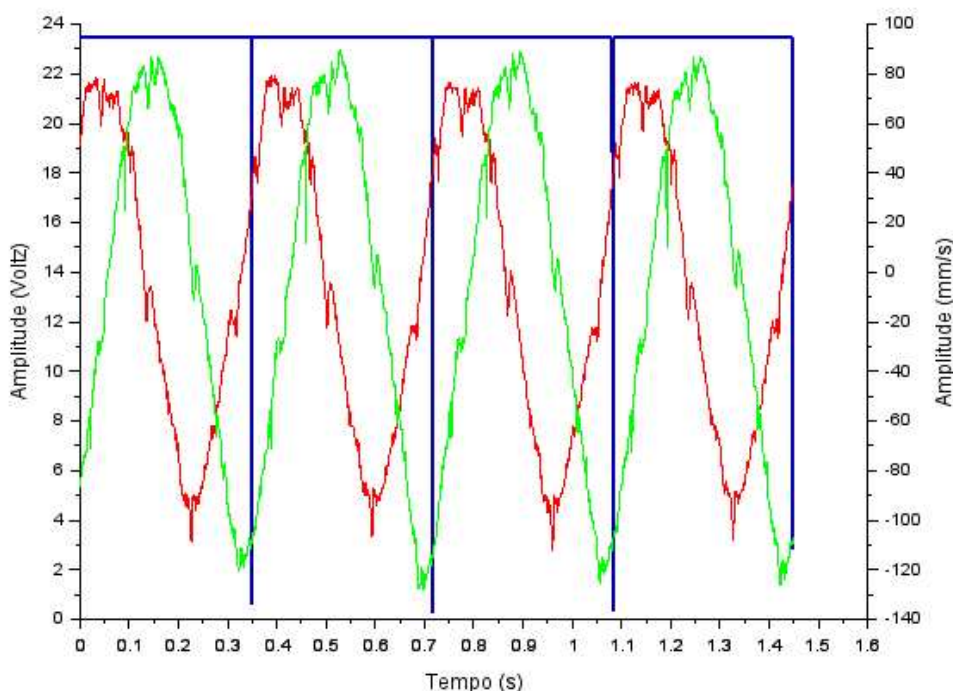
Figura 40 – Posição dos sensores e respectivas visualizações gráficas não compensadas.



Fonte: (FELÍCIO, 2015).

Após o ajuste dos sinais, o processo de sincronismo dos sinais de órbita com o giro mecânico do eixo inicia. A identificação dos giros mecânicos é baseada no sensor de referência de fase, que identifica cada volta do eixo através de uma marca no eixo. A Figura 41 apresenta em azul o sinal de referência de fase ideal, em verde e vermelho os sinais de deslocamento de eixo. Como apresentado no Diagrama 39, a detecção dos impulsos é realizado através de um algoritmo que percorre todo o registro do sinal de fase, identificando o intervalo de tempo entre duas transições do sinal. Com base no período entre os dois pulsos do *keyphasor* os sinais são particionados, separando assim as órbitas para cada rotação do eixo da máquina.

Figura 41 – Gráfico dos sinais analisados. Sinal do sensor de referência de fase (Azul) e sinais dos proximetros (Vermelho e Verde).



Fonte: Arquivo pessoal.

Após identificar uma órbita, uma série de cálculos é realizada para identificar a componente média do sinal, a concetricidade, o deslocamento pico-a-pico e o deslocamento máximo da órbita no plano de medição. Por fim, ao terminar todos os cálculos, os resultados são guardados em uma lista separados por rotação da máquina para apresentar na interface de visualização rapidamente.

4.5.1 Cálculo da componente média do sinal (DC)

Para o cálculo da componente média do sinal de órbita, foi utilizado o cálculo da média aritmética simples do sinal complexo, somando as partes reais e imaginárias separadamente da seguinte forma:

$$\text{Média}_{DC} = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^N x(n) + i \sum_{n=0}^N y(n) \right), \quad (15)$$

em que $x(n)$ e $y(n)$ são as amostras individuais dos sensores de deslocamento e N o número total de pontos do sinal de uma órbita da máquina. Com isso, obtemos a componente média horizontal e a componente média vertical do sinal de órbita.

O resultado desse cálculo fornece a posição do centro da órbita para cada rotação. Com esse parâmetro, é possível desenhar o eixo central do rotor e também

construir o gráfico de linha de centro de eixo (*Shaft Centerline*), para mostrar a dinâmica do centro do eixo com o aumento da velocidade da máquina.

4.5.2 Concentricidade

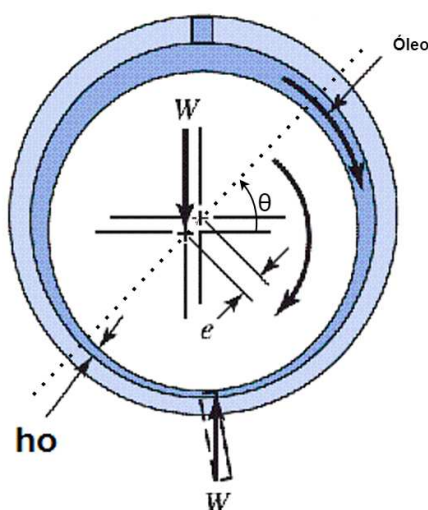
A concentricidade é uma medida que descreve o quão alinhado e concêntrico está o centro do eixo em relação ao centro do mancal. Através dessa métrica, é possível identificar a amplitude e a direção do desalinhamento de um eixo. Para realizar esse cálculo, foi necessário desenvolver uma solução capaz de calcular o desvio e o ângulo de deslocamento do centro do eixo.

O primeiro passo para determinar a concentricidade é necessário calcular a componente média do sinal de órbita filtrada pela folga entre o mancal e o sensor do seguinte modo:

$$Conc = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^N (x(n) - Gap_x) + i \sum_{n=0}^N (y(n) - Gap_y) \right), \quad (16)$$

em que Gap_x e Gap_y é a folga nominal de instalação dos sensores em relação ao eixo e à parede do mancal quando a máquina está em operação. Ao subtrair a folga do sinal de órbita é possível determinar o desvio do eixo em relação à origem, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 42 – Concentricidade em mancais de deslizamento.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para apresentar os resultados ao analista de vibrações são calculados o módulo e a fase da concentricidade, da seguinte forma

$$a = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^N (x(n) - Gap_x) \right), \quad b = \frac{1}{N} \left(\sum_{n=0}^N (y(n) - Gap_y) \right) \quad (17)$$

$$\begin{cases} e = \sqrt{a^2 + b^2} \\ \theta = \text{arc tg} \left(\frac{b}{a} \right) \end{cases}$$

onde e é a distância do eixo ao ponto de referência, e θ o ângulo de concentricidade, conforme ilustrado na Figura 42.

4.5.3 Máximo deslocamento do eixo e valor pico a pico

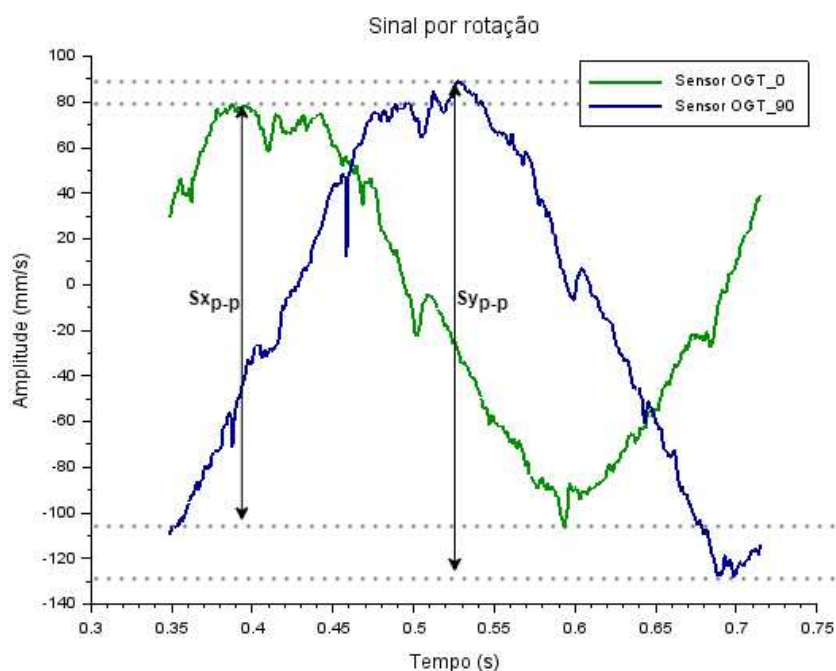
Com o intuito de analisar o desempenho dos mancais através do sinal de órbita, parâmetros quantitativos são calculados para fornecer informações valiosas sobre a condição do mancal. Ao final do processamento do sinal de órbita é calculado o valor pico a pico do sinal de órbita XY. Além disso, é calculado o máximo deslocamento do eixo no plano de medição do mancal.

O cálculo da componente pico a pico do sinal de órbita, foi extremamente simples de implementar devido ao fato de apenas processarmos órbitas individuais por rotação do eixo, ou seja, apenas um pico e um vale são identificados nesse sinal. Para calcular o valor pico a pico do sinal de órbita, foi necessário primeiro dividir o sinal de órbita na sua parte real e imaginária S_x e S_y , respectivamente. Com os sinais individualizados foi possível identificar o valor máximo (pico) e mínimo (vale) do vetor que representa o ponto mais alto e mais baixo da forma de onda (Figura 43). Com isso, o valor pico a pico foi obtido calculando a diferença entre o pico e o vale da seguinte maneira:

$$\begin{cases} S_{x_{p-p}} = \text{máx}(x(n)) - \text{min}(x(n)) \\ S_{y_{p-p}} = \text{máx}(y(n)) - \text{min}(y(n)) \end{cases}, \quad (18)$$

sendo $x(n)$ e $y(n)$ as amostras individuais dos sensores de deslocamento e, $S_{x_{p-p}}$ e $S_{y_{p-p}}$ o valor pico-a-pico na direção do eixo XY, respectivamente. Em termos de código, os passos mencionados são implementados no método "*CalculatePeakToPeak*" da forma como apresentado pela equação.

Figura 43 – Exemplo gráfico do valor pico a pico dos sinais de uma órbita.



Fonte: Arquivo pessoal.

Além do valor pico a pico, também é calculado o máximo deslocamento do eixo do mancal no plano de medição, visto que o máximo deslocamento no caso de sinais de órbita não coincide necessariamente com os valores de máximo deslocamento dos sensores, pois o valor de S_{max} independe da posição de medição do sensor. Para isso, foi utilizado a seguinte equação:

$$S_{max} = \left[\sqrt{S_x(k)^2 + S_y(k)^2} \right]_{max} \quad (19)$$

onde $S_x(k)$ e $S_y(k)$ correspondem a parte real e imaginária do sinal de órbita, respectivamente.

No software, para calcular o máximo deslocamento foi implementado o método "CalculateSmax" que de maneira iterativa calcula o módulo do sinal de órbita ponto a ponto. A partir do conjunto de resultados, o método obtém o maior valor calculado, que representa o maior deslocamento do eixo dentro do mancal.

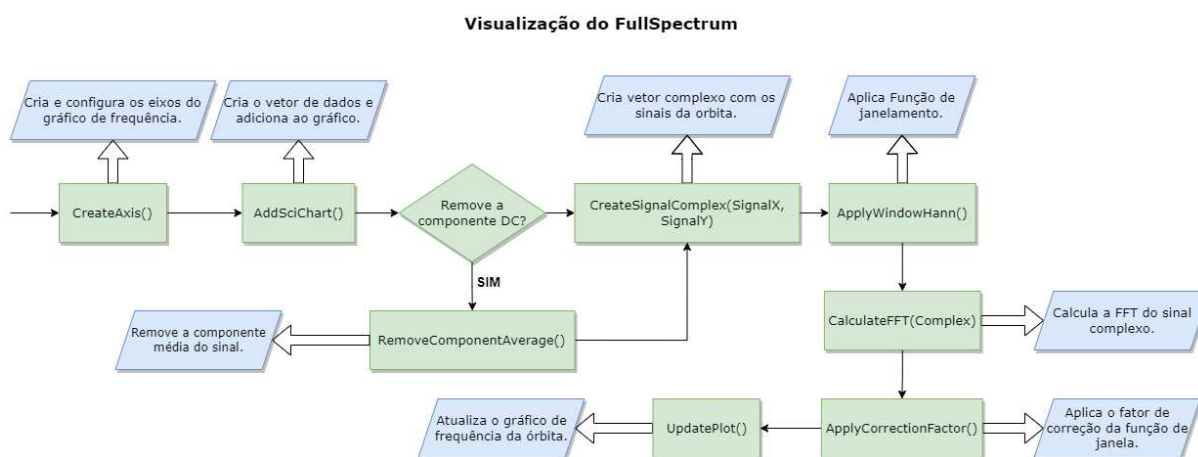
4.6 FULL SPECTRUM

Além da visualização cartesiana do sinal de órbita, também foi implementado a visualização do espectro de frequências do sinal órbita, conhecido como *full spectrum*. Para gerar o espectro de frequência foi utilizado como base o procedimental matemá-

tico apresentado na seção 2.5.2, onde o espectro é calculado através da aplicação da transformada rápida de Fourier sobre o sinal complexo da órbita.

Uma síntese da implementação do algoritmo de *full spectrum* do sinal de órbita é apresentada na Figura 44. O processo inicia-se com a configuração do gráfico de frequência na interface, estabelecendo os eixos de frequência e associando o vetor de dados ao gráfico. Em seguida, caso necessário, é removida a componente média do sinal de órbita. Posteriormente, o vetor complexo da órbita é gerado, e a função de janelamento do tipo Hann é aplicada para reduzir o vazamento espectral. A FFT (Transformada Rápida de Fourier) do sinal complexo é calculada, seguida pela aplicação do fator de correção da distorção causada pela função de janelamento. Ao finalizar esse processo, o espectro de órbita calculado é utilizado para atualizar a interface gráfica.

Figura 44 – Implementação da visualização do *full spectrum*.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para gerar espectros de frequências de sinais individuais, o algoritmo primeiro cria o vetor complexo do sinal de órbita, concatenando os sinais dos sensores em um único vetor. Em seguida, antes de calcular a transformada de Fourier é aplicada uma função de janelamento do tipo Hann sobre o sinal utilizando a equação

$$w(k) = 0,5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{k}{N} \right) \right), 0 \leq k \leq N-1, \quad (20)$$

em que N é a quantidade de amostras do sinal que será janelado e k é o índice da amostra. O janelamento $c(k)$ é dado pela multiplicação das amostras de cada sinal $x(k)$ e $y(k)$, pela janela Hann:

$$c(k) = (x(k) + iy(k)) \cdot w(k). \quad (21)$$

Para gerar o *full spectrum* é calculado o DFT do sinal complexo $c(k)$ utilizando o algoritmo de FFT. No software desenvolvido, para o cálculo da FFT, foi utilizado a

biblioteca de ferramentas matemáticas de código aberto "MathNet.Numerics", que processa de maneira simples o vetor complexo da órbita $c(k)$ no espectro de frequência completo (*full spectrum*). Um exemplo de implementação dessa biblioteca pode ser vista no Código Fonte 4.6.

Código Fonte 4.6 – Cálculo do espectro de frequência de um sinal complexo.

```
using System.Linq;
using System.Numerics;
using MathNet.Numerics.IntegralTransforms;

namespace Exemplo
{
    public class FFT
    {
        /// <summary>Espectro FFT completo.</summary>
        /// <param name="signal">Sinal de órbita.</param>
        /// <returns>Espectro FFT completo.</returns>
        public void FullSpectrum(Complex[] signal)
        {
            // FFT.
            Fourier.Forward(signal, FourierOptions.NoScaling);

            // Transforma a escala para os valores reais de amplitude.
            signal = signal.Select(c => c / signal.Count()).ToArray();
            return signal.Select(x => x.Magnitude * 2).ToArray();
        }
    }
}
```

Por fim, pelo fato de utilizarmos a função de janelamento para prevenir vazamentos espectrais, a energia do sinal original é atenuada, resultando na perda de energia na maioria das componentes de frequência do espectro, proporcionalmente aos coeficientes da função de janelamento utilizada. Para compensar essa perda de energia ocasionada pela janela de Hanning, aplicou-se o fator de correção de aproximadamente $\sqrt{8/3}$ ao resultado da FFT, conforme sugerido por Cimbala (2010).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na implementação da ferramenta de análise de órbita de mancais de deslizamento no software *Insight*. Ao longo do capítulo, apresentaremos todas as interfaces de usuário desenvolvidas e detalharemos a validação das funcionalidades, utilizando dados de teste para simular a utilização por um analista de vibrações.

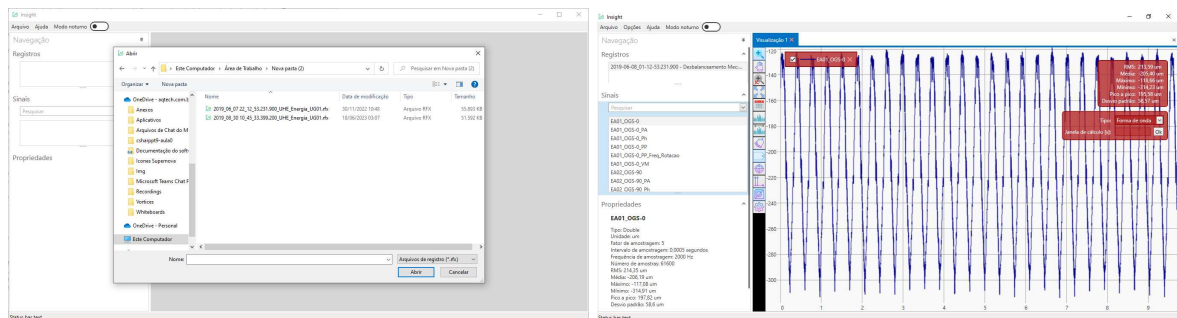
5.1 DADOS TESTE

Com o intuito de testar e validar as funcionalidades da ferramenta de análise de órbita, foram utilizados registros de sinais reais disponibilizados pela empresa através de uma base de dados de demonstração utilizada para testar implementações. A base de dados dispõe de registros de sinais reais de uma usina hidrelétrica, monitorada pela AQTech, com 3 unidades geradoras composta por turbinas do tipo Francis vertical. Para a avaliação da ferramenta de análise, somente os registros de sinais dos sensores de deslocamento instalados nos mancais da máquina foram utilizados.

5.2 CONFIGURAÇÃO

Como comentado no capítulo anterior, existem distintas formas de configurar a ferramenta de análise de órbita no *Insight*. Primeiramente, o usuário deve escolher um registro que contenha os sinais necessários para realizar a configuração, para isso, é possível importar um arquivo de registro ".rfx" diretamente no software (Figura 45a) ou importar da base de dados externamente pelo *Analyzer*.

Figura 45 – Importação de registro de sinais.



(a) Janela de importação.

(b) Sinais importados.

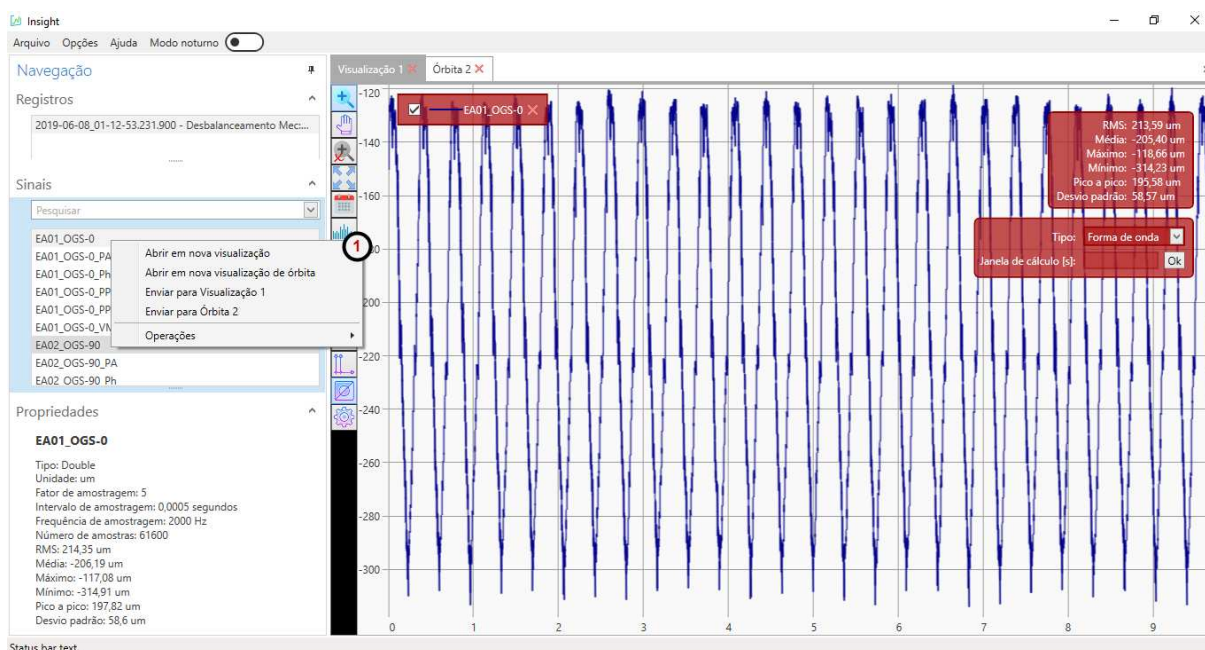
Fonte: Arquivo pessoal.

Após importar o registro de sinais, o software realiza o tratamento das informações, transformando-as em uma apresentação visual acessível ao usuário. Para facilitar essa interação, no painel de navegação do *Insight*, a seção de registros exibe

todos os registros de sinais importados. Ao selecionar um registro específico, a lista de sinais é atualizada, apresentando todos os sinais contidos no registro em questão, como ilustrado na Figura 45b.

Para utilizar a ferramenta de análise de órbita, na lista de sinais foi adicionado no menu de contexto dos sinais a opção de visualização do sinal em órbita, como mostra a Figura 46. Ao selecionar os sinais dos sensores do mancal e clicando com o botão direito do mouse, o menu de contexto é aberto apresentando as diferentes opções de visualização para os sinais.

Figura 46 – Menu de contexto.



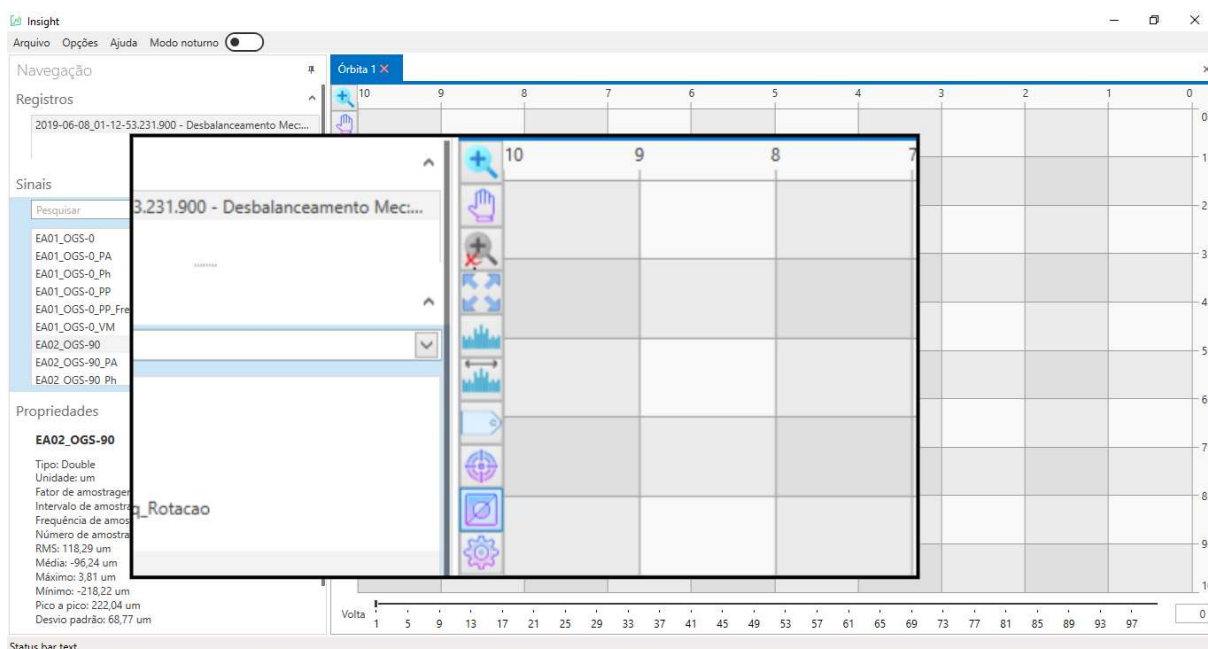
Fonte: Arquivo pessoal.

Ao abrir uma nova visualização de órbita, a região de visualização do gráfico aparecerá no lado direito da janela principal. Na Figura 47 é apresentado a interface inicial da ferramenta de análise de órbita, nela temos primeiramente uma barra de ferramentas no canto esquerdo do gráfico com uma série de botões de interação, como:

1. Botão de zoom: habilita o zoom da área selecionada no gráfico. Para aplicar o zoom é necessário selecionar a área desejada do gráfico pressionando o botão esquerdo do mouse e arrastando.
2. Botão de pan: habilita mover a área visualizada do gráfico. Para utilizar o pan é necessário pressionar o botão esquerdo do mouse e arrastar para a área desejada.

3. Botão de zoom no eixo X: Habilita o zoom somente na horizontal.
4. Botão de reinicia ampliação: reinicia a ampliação do gráfico. Os limites dos eixos do gráfico voltam aos padrões para visualizar completamente o orbital em escala.
5. Botão de análise de frequência: muda o gráfico de órbita para o domínio da frequência, calculando o *full spectrum*.
6. Botão de legenda: mostra a legenda do gráfico. No painel da legenda é possível habilitar/desabilitar a visualização das órbitas e alguns indicadores como o ponto de início da órbita, o centro do eixo e o ponto de origem.
7. Botão de mostrar cursor: mostra um cursor no gráfico que indica o ponto selecionado assim como os seus valores nos eixos X e Y.
8. Botão de inverter cor de fundo: inverte a cor de fundo do gráfico de escuro para claro e vice-versa.
9. Botão de configurações do gráfico.

Figura 47 – Visualização inicial da ferramenta de análise de órbita com menu de ferramentas expandida.



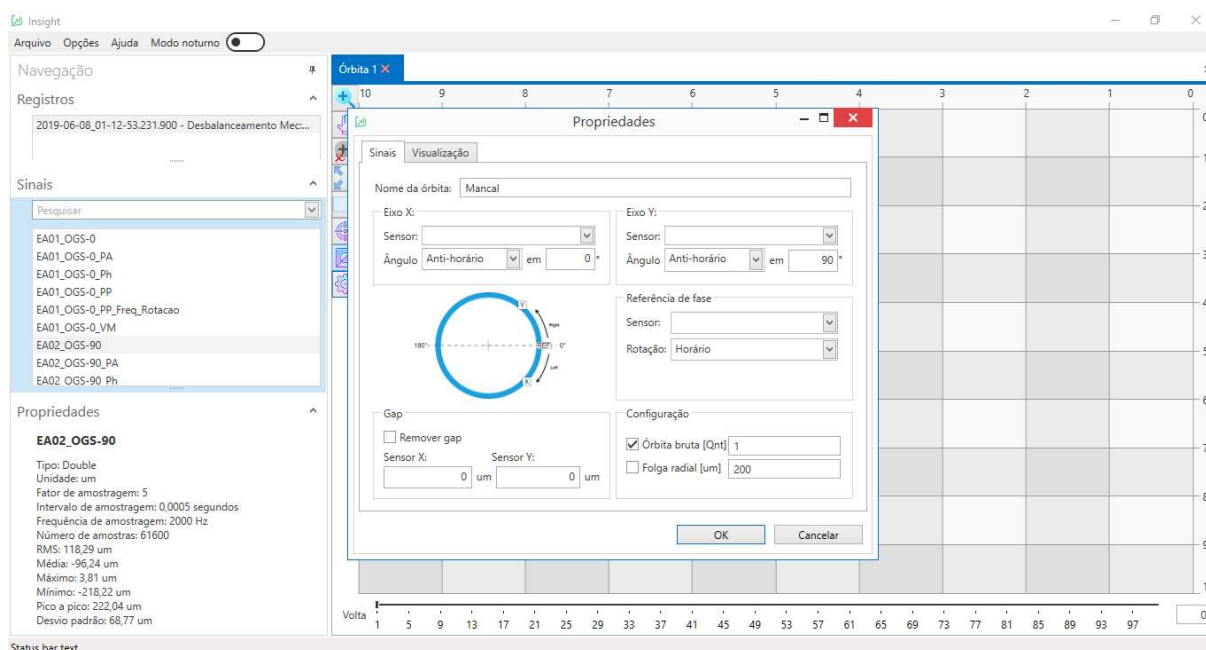
Fonte: Arquivo pessoal.

Para a configuração da visualização de órbita, clicando sobre o botão de configurações do gráfico, a janela de configuração da órbita é apresentada ao usuário, conforme ilustrado na Figura 48. Na janela de configuração, é exibido primeiramente a

aba de “Sinais” dividido em painéis, onde é realizada a configuração dos sinais utilizados para criar os orbitais:

1. Painel de configuração do sensor X e Y: nos dois campos é possível seleccionar os sinais que serão utilizados para criar os gráficos de órbita e também definir a orientação de instalação dos sensores em relação ao ponto de referência;
2. Painel de configuração do sensor de referência de fase: permite configurar um sinal como referência de fase, utilizado para sincronizar os demais sinais com a rotação da máquina. Além da configuração do sensor, também é possível configurar a direção de rotação da máquina. Com isso, uma seta é desenhada no gráfico para indicar a direção de rotação do eixo;
3. Painel de configuração de *gap*: permite configurar a distância de instalação dos dois sensores ao rotor (*gap*). Ao adicionar o *gap* de instalação dos sensores, é possível visualizar o deslocamento relativo do rotor em relação ao seu estado parado;
4. Painel de configuração geral: é possível habilitar/desabilitar a visualização da órbita e a visualização do círculo de folga radial. Além disso, é possível configurar a quantidade de órbitas desenhadas simultaneamente no gráfico e também ajustar o valor da folga radial exibida no gráfico, expressa em micrômetros.

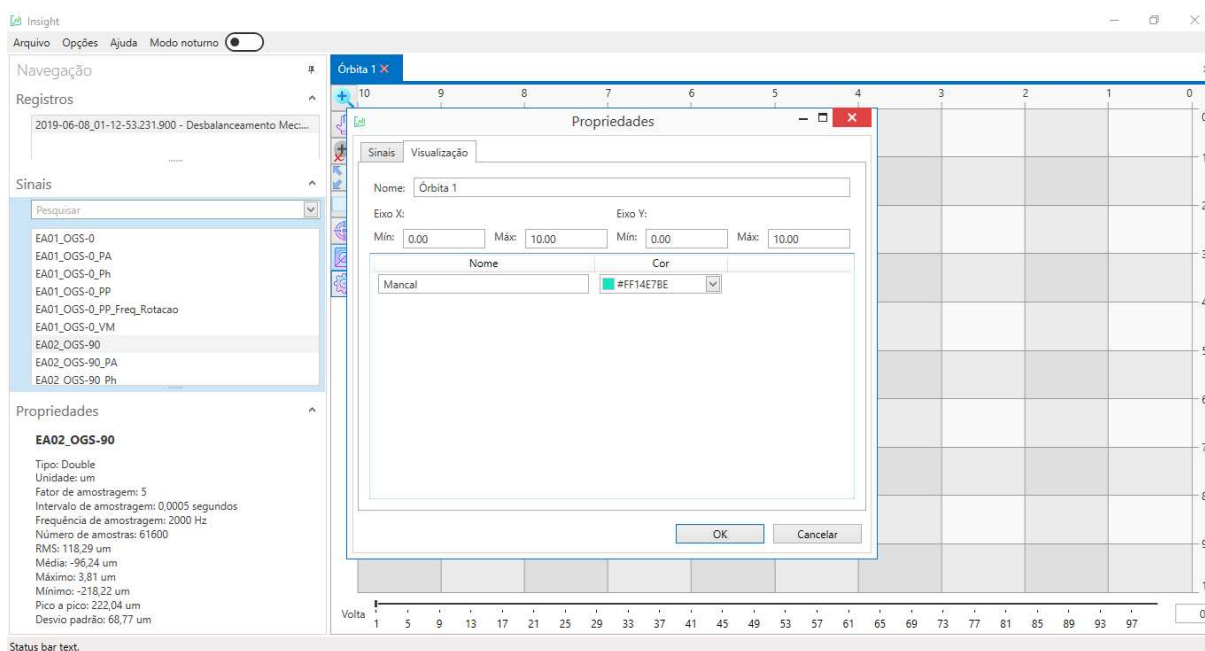
Figura 48 – Janela de configuração de sinais da ferramenta de análise.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na aba "Visualização", além das opções já disponíveis na aba "Sinais", foram implementadas funcionalidades que possibilitam modificar o nome da visualização, definir valores máximos e mínimos para os eixos, e ajustar a cor do sinal de órbita no gráfico conforme apresenta na Figura 49.

Figura 49 – Janela de configuração da visualização da ferramenta de análise.



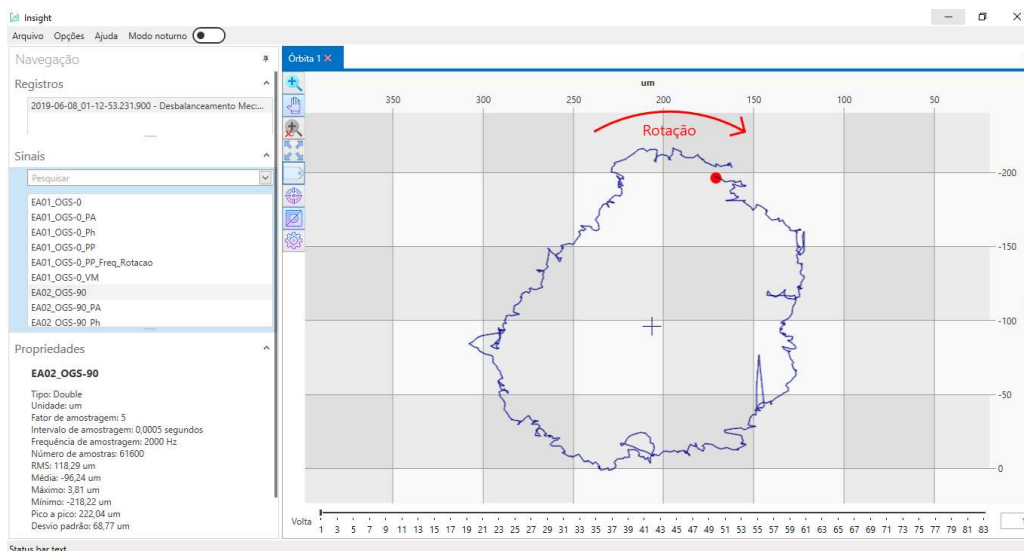
Fonte: Arquivo pessoal.

Quando a configuração dos parâmetros é finalizado, a janela de configuração é fechada e a interface de visualização é atualizada tomando como base a configuração feita pelo usuário.

5.3 VISUALIZAÇÃO CARTESIANA DA ÓRBITA

Após a conclusão da configuração e processamento dos gráficos de órbita, os resultados para cada rotação da máquina são apresentados ao usuário conforme apresentado na Figura 50. Através da interface de visualização é possível verificar o comportamento dinâmico do rotor para cada rotação da máquina. Para a análise do comportamento da órbita ao longo das rotações da máquina, o usuário pode alterar a volta analisada através do controle deslizante na parte inferior do gráfico. Ao alterar a volta, a interface é atualizada apresentando o novo gráfico de órbita.

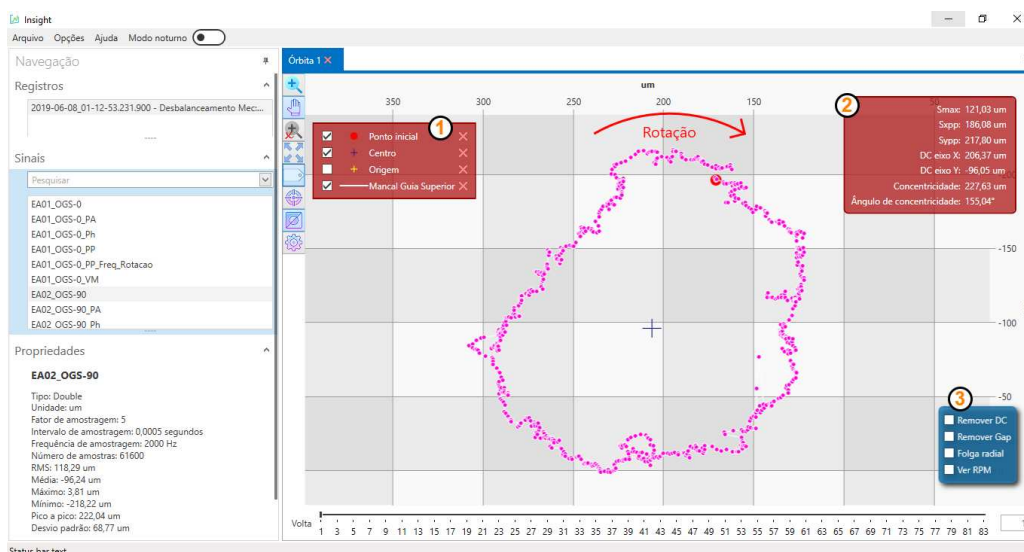
Figura 50 – Visualização do sinal de órbita.



Fonte: Arquivo pessoal.

Além disso, para uma análise mais aprofundada da órbita, ao selecionar qualquer ponto do sinal, uma interface é apresentada ao usuário no canto superior esquerdo e duas interfaces no canto direito do gráfico (Figura 51). A primeira interface (Item 1) exibe as legendas dos elementos adicionados na interface de visualização, na interface também é possível habilitar e desabilitar a visualização desses elementos e também remover da visualização.

Figura 51 – Resultados obtidos ao selecionar o sinal de órbita.



Fonte: Arquivo pessoal.

A segunda interface (Item 2) exibe as informações calculadas para cada órbita, que incluem:

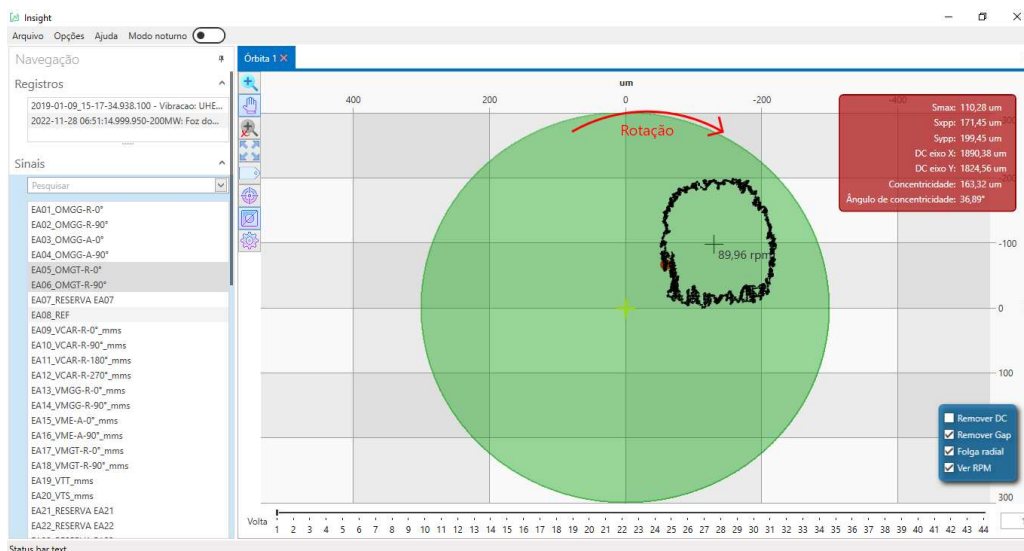
1. S_{max} : indica o deslocamento máximo do rotor. Essa medida representa a amplitude máxima da órbita em uma direção específica;
2. $S_{x_{p-p}}$ e $S_{y_{p-p}}$: representam o deslocamento pico-a-pico do rotor nas direções X e Y, respectivamente. Essas medidas fornecem informações sobre a variação de deslocamento do rotor em cada direção;
3. DC_x e DC_y : Refere-se ao deslocamento do centro do rotor em relação aos eixos X e Y. Essas informações indicam a posição relativa do centro do rotor;
4. Concentricidade: Refere-se ao desvio da posição central do rotor em relação ao ponto de referência do mancal.
5. Ângulo de concentricidade: indica a direção do deslocamento da posição do rotor.

Na terceira interface (Item 3), é possível executar diferentes ações no gráfico de órbita, tais como:

1. Remover DC: essa opção retira a componente média do sinal, alinhando o centro da órbita com o ponto de origem do gráfico;
2. Remover Gap: essa opção permite retirar a distância de instalação dos sensores de deslocamento. Ao remover o *gap*, é possível visualizar a órbita em relação a um referencial mais próximo do centro do eixo real;
3. Folga radial: essa opção desenha no gráfico a região de folga do mancal. Isso permite visualizar a folga radial entre o eixo e o mancal, fornecendo informações sobre o desgaste ou a condição dos mancais;
4. Ver rpm: essa opção desenha no gráfico, próximo ao centro da órbita, a indicação da rotação da máquina. Isso proporciona uma referência visual da velocidade de rotação do eixo em partida ou parada.

Caso o usuário tenha configurado corretamente a folga radial do mancal e os *gap's* dos sensores na janela de configuração, ao selecionar as opções de visualizar o rpm, a folga radial e remover o *gap* dos sensores o usuário visualizará o gráfico de órbita conforme a Figura 52. No gráfico, o círculo de folga foi desenhado em verde e o sinal de órbita sem o *gap* em preto.

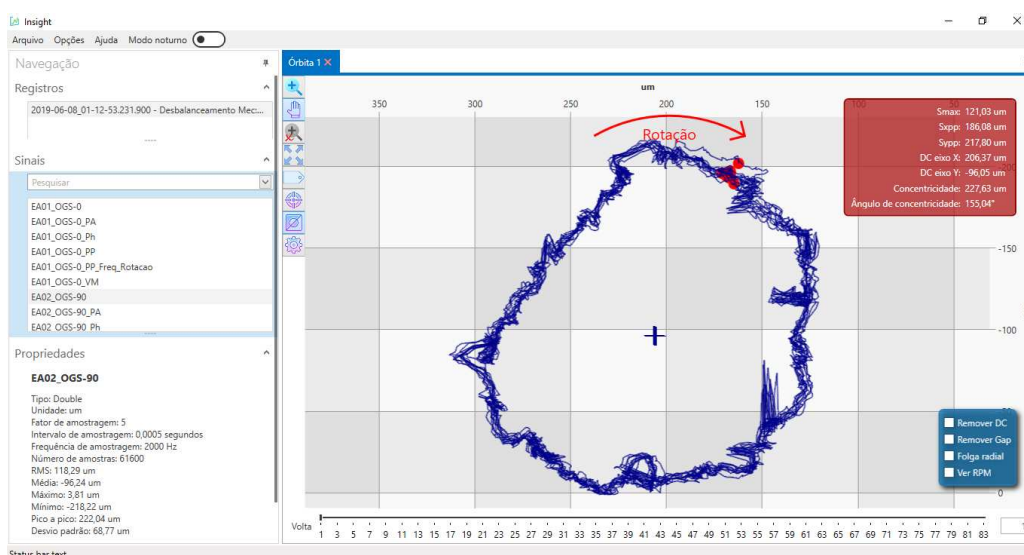
Figura 52 – Visualizações complementares (Circulo de folga e indicação de rpm).



Fonte: Arquivo pessoal.

Outra visualização implementada é a visualização de múltiplos círculos de órbita. Na janela de configuração é possível editar a quantidade de órbitas desenhadas simultaneamente na visualização. Ao definir um número maior que um, o usuário visualizará um gráfico de órbita semelhante ao apresentado na Figura 53. Essa opção permite visualizar possíveis problemas aleatórios nas oscilações do eixo ao longo do registro analisado.

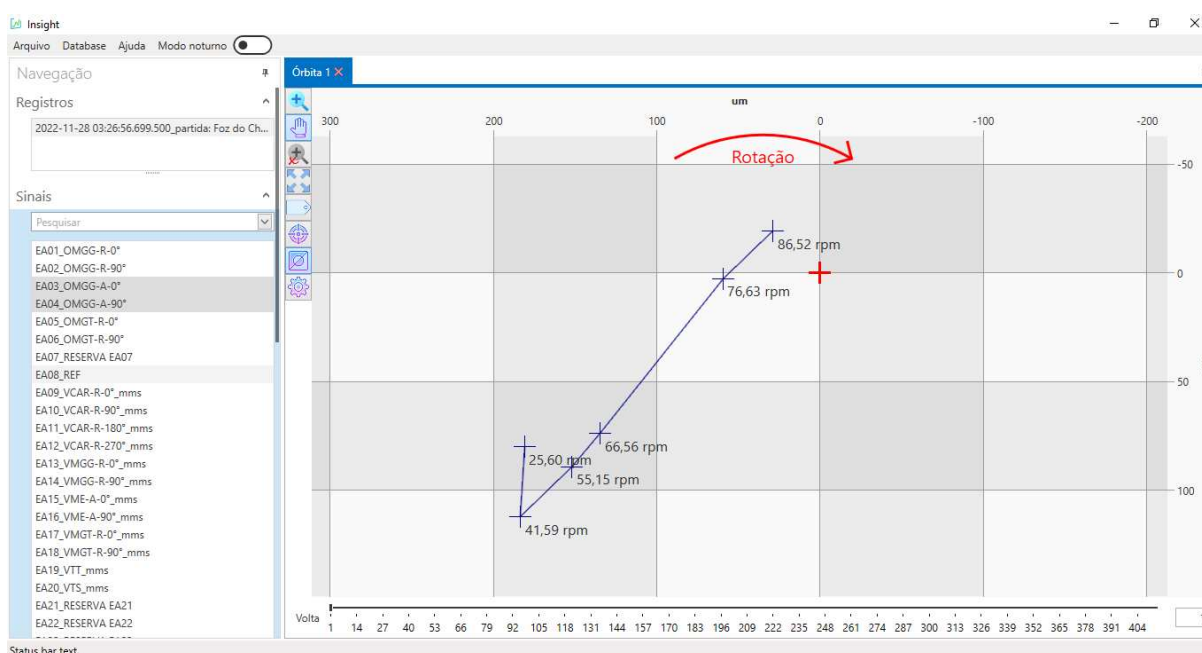
Figura 53 – Múltiplos sinais de órbita.



Fonte: Arquivo pessoal.

Além da visualização dos círculos de órbita, o usuário também pode visualizar o gráfico de linha de centro (*Shaft Centerline*). Essa visualização permite verificar a dinâmica do centro do rotor em relação à velocidade durante o processo de partida ou parada da máquina. A Figura 54 apresenta um exemplo utilizando um registro de sinais gravado durante o processo de partida da máquina monitorada. Para não poluir a visualização apenas alguns pontos são adicionados ao gráfico, no algoritmo do *Shaft Centerline* foi definido que apenas quando a rotação da máquina varia 15% um novo ponto é adicionado ao gráfico, verificado pelo exemplo.

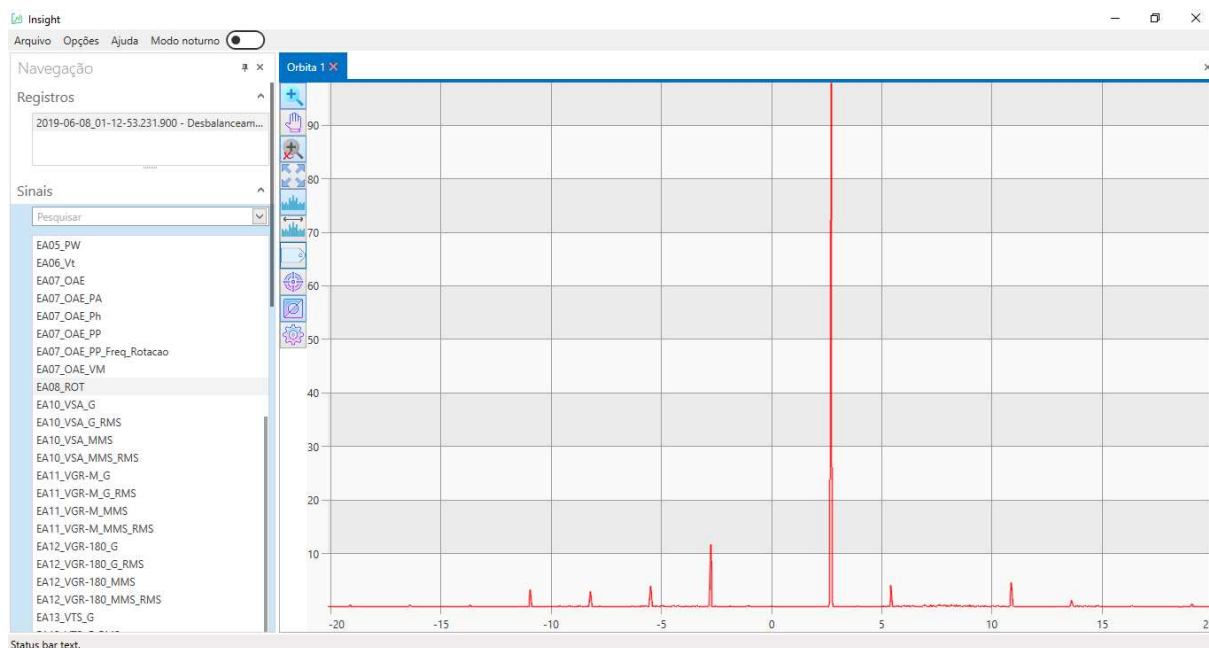
Figura 54 – Visualização da linha central do eixo (*Shaft Centerline*).



Fonte: Arquivo pessoal.

5.4 ESPECTRO COMPLETO DA ÓRBITA (FULL SPECTRUM)

Assim que o gráfico de órbita é exibido na interface de visualização, clicando sobre a opção de visualização no domínio da frequência, a interface é alterada apresentando agora o espectro de frequência completa da órbita (Figura 55). O *full spectrum* permite ao usuário verificar e analisar as componentes de frequência diretas e reversas dos sinais de órbita para o diagnóstico de possíveis defeitos.

Figura 55 – Visualização do espectro de órbita (*Full spectrum*).

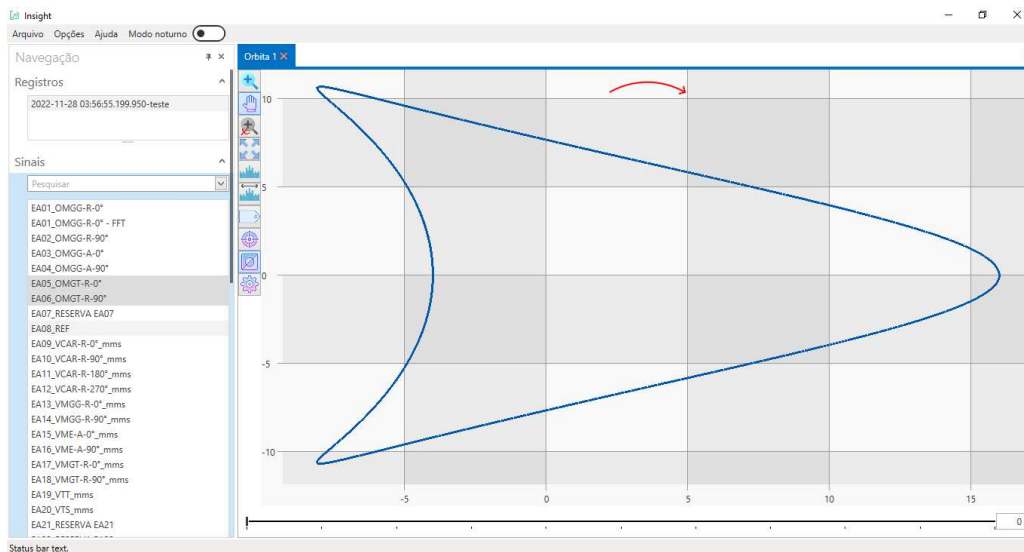
Fonte: Arquivo pessoal.

Para testar o funcionamento do algoritmo desenvolvido, uma órbita artificial foi gerada a partir de dois sinais $x(t)$ e $y(t)$ tomando como base o sinal apresentado por (JESUS SILVA, 2013):

$$\begin{aligned}x(t) &= 10\cos(2\pi ft) + 6\cos(4\pi ft) \\y(t) &= 10\sin(2\pi ft) + 2\sin(4\pi ft)\end{aligned}\quad (22)$$

A partir dos sinais simulados foi obtido a órbita apresenta na Figura 56. Nessa órbita, temos somente duas componentes de frequência: a harmônica fundamental ($1x$) e a segunda harmônica ($2x$).

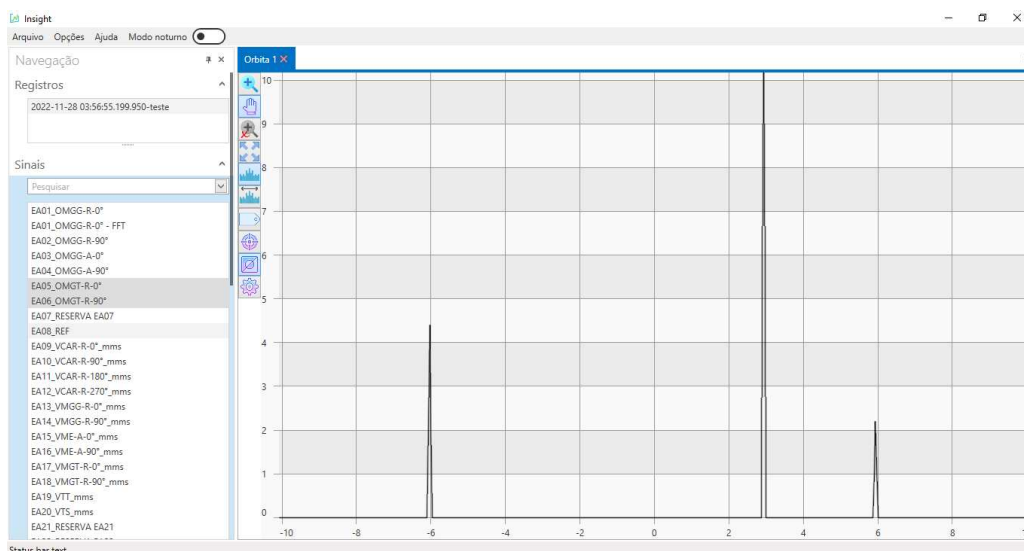
Figura 56 – Órbita simulada.



Fonte: Arquivo pessoal.

De modo geral, a órbita artificial foi projetada para ser uma forma circular simples na componente de frequência harmônica fundamental, que conforme apresentado na seção 2.5.2, existirá apenas uma componente (direta ou reversa) para essa frequência. A Figura 57 ilustra o resultado previsto para as componentes harmônicas 1x e 2x com base no *full spectrum*, validando assim a eficácia do algoritmo proposto.

Figura 57 – Espectro de órbita do sinal simulado.

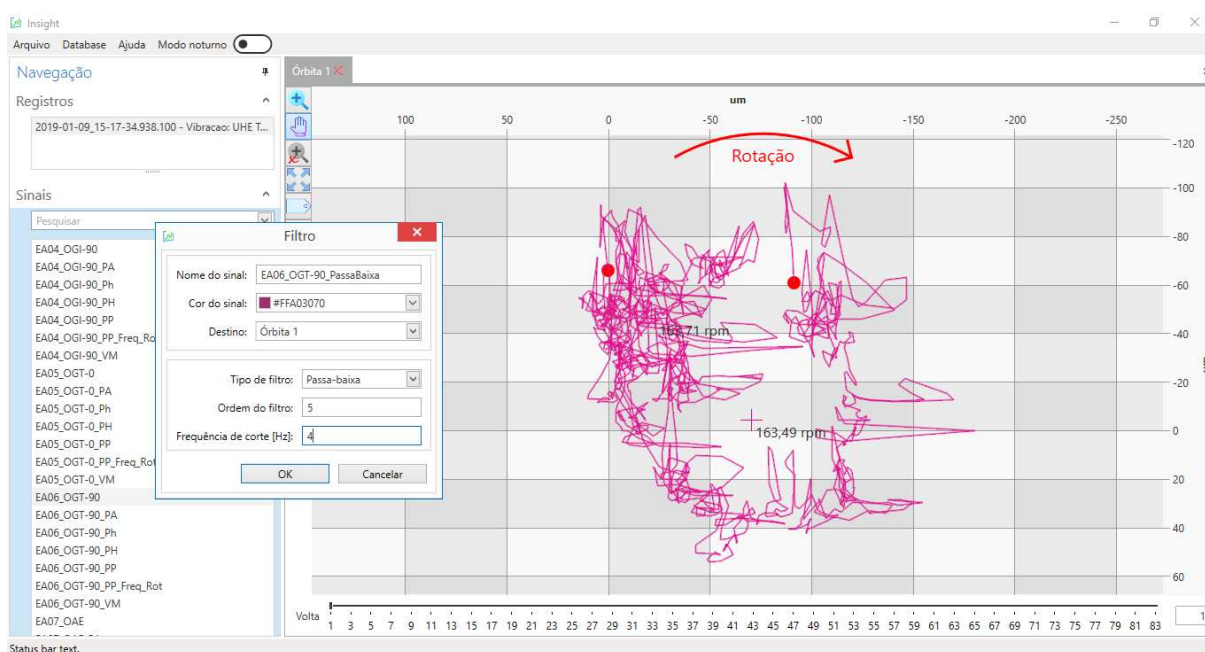


Fonte: Arquivo pessoal.

5.5 ANÁLISES AVANÇADAS

Para análises mais avançadas, a ferramenta de análise de órbita mantém a compatibilidade com as outras ferramentas já implementadas no *Insight*, como o filtro Butterworth. No painel de configuração do filtro (Figura 58), o usuário pode escolher o tipo de filtro utilizado passa-alta, passa-baixa, passa-faixa ou rejeita-faixa, determinar a ordem e a frequência de corte do filtro com o intuito de visualizar faixas de frequências desejadas e também reduzir ruídos no sinal.

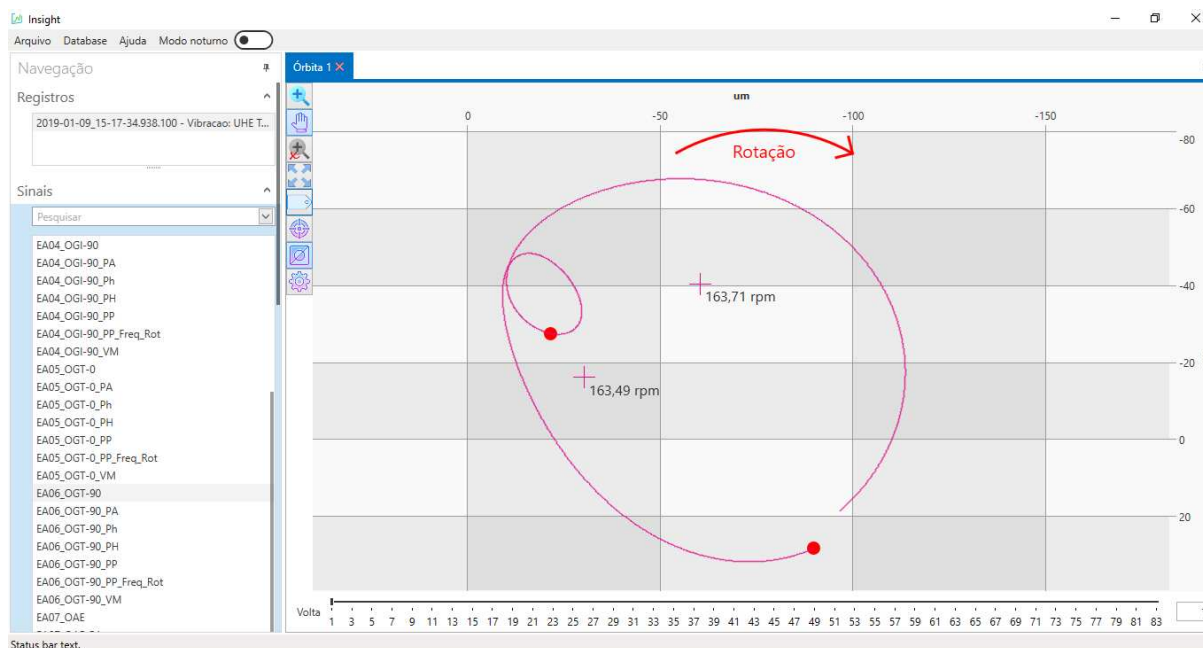
Figura 58 – Sinal de órbita com ruído de alta frequência.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após configurar o filtro, o sinal filtrado é direcionado para visualização de órbita definida, permitindo gerar o sinal de órbita filtrado. Na Figura 59 pode-se observar o resultado da órbita filtrada por um filtro passa-baixa de 5º ordem com frequência de corte em 2 vezes a frequência nominal da máquina (2.8Hz). Visualizando o sinal filtrado, percebe-se que agora é possível verificar o sinal característico de rodopio de óleo no gráfico de órbita, que não era possível anteriormente devido aos ruídos de alta frequência na órbita apresentada na Figura 58.

Figura 59 – Sinal de órbita filtrado com características de rodopio de óleo.



Fonte: Arquivo pessoal.

Para análises mais refinadas, a integração com o filtro de sinais é extremamente útil para isolar padrões de interesse em frequências específicas e eliminar distorções na visualização da órbita.

5.6 TESTES

Por fim, seguindo os passos da metodologia de projetos em cascata, depois da finalização do desenvolvimento, testes foram realizados pelo *Tester* (Testador) da empresa com a intenção de encontrar inconformidades nas implementações. Durante a realização dos testes, nenhuma inconformidade foi identificada na implementação. Com isso, a ferramenta de análise de órbita desenvolvida foi integrada ao pacote de software da empresa em partes. Estando atualmente em sua primeira versão, com apenas as funcionalidades de visualização de órbita pura liberada. As visualizações complementares como o espectro de órbita e a visualização da linha central do eixo estão para integração em um segundo momento.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e a implementação de uma ferramenta de análise de órbita em mancais de deslizamento utilizados em usinas hidrelétricas. Como no Brasil grande parte das usinas hidrelétricas utilizam mancais de deslizamento, este trabalho mostrou como se pode aprimorar o monitoramento de vibrações desse componente para uma maior confiabilidade dos ativos.

Com o levantamento de artigos científicos e normas técnicas, foram estudadas formas para se realizar a análise de órbita em mancais de deslizamento. Para o desenvolvimento da ferramenta de análise proposta, escolheu-se trabalhar com o processamento de sinais de deslocamento, alinhado com a norma ISO 10817-1.

O desenvolvimento da ferramenta envolveu primeiramente o levantamento dos requisitos técnicos e funcionais, a fim de delimitar o escopo do projeto. Com isso, o objetivo central consistiu em criar uma ferramenta capaz de processar e apresentar graficamente a órbita de mancais por rotação da máquina, calculando informações quantitativas sobre a condição do mancal. No software, diversas interfaces e algoritmos de processamento foram desenvolvidos.

Após a conclusão do desenvolvimento, a ferramenta de análise de órbita foi submetida a uma rigorosa bateria de testes, utilizando tanto dados reais quanto dados simulados, visando validar as modificações e implementações realizadas. Notavelmente, durante essa fase de testes, não foram identificados problemas significativos relacionados à implementação das novas funcionalidades. Com isso, ao término desse processo, os resultados obtidos atenderam as expectativas e os objetivos iniciais estabelecidos para a ferramenta.

Por fim, espera-se que o projeto aprimore significativamente os processos de manutenção de mancais de deslizamento conduzidos pelas equipes de manutenção, contribuindo para o aumento da segurança operacional nas usinas hidroelétricas dos atuais e futuros clientes da AQTech. Através das ferramentas de análise de órbita no domínio do tempo e da frequência, dando destaque a primeira ferramenta de análise de *full spectrum* dedica a mancais de deslizamento no Brasil.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Uma sugestão para trabalhos futuros é aprimorar e simplificar a configuração da ferramenta de análise. Uma possível melhoria seria a modificação do software para segmentar os sinais conforme o local de instalação, como agrupar os sensores em cada mancal. Essa abordagem simplificaria a configuração da visualização da órbita.

Segue como sugestão de trabalhos futuros, a extrapolação da análise do *full spectrum* para a detecção de defeitos automaticamente, semelhante aos diagnósticos de falhas baseados em norma. Uma possibilidade interessante seria a implementa-

ção de algoritmos de inteligência artificial capazes de identificar padrões e realizar diagnósticos automatizados com base nas formas das órbitas.

REFERÊNCIAS

ADAMS, Maurice L. **Rotating machinery vibration: from analysis to troubleshooting**. [S.l.]: CRC Press, 2009.

AG, KARL SCHENCK. **Field balancing: Methods of measuring and eliminating unbalance in rotors under operating conditions**. [S.l.]: Catálogo, 1993.

AQTECH, ENGENHARIA E INSTRUMENTAÇÃO. **AQTech Hydro**. 2022. Disponível em: <https://www.aqtech.com/>. Acesso em: 9 abr. 2023.

ARAÚJO BEZERRA, Roberto de. **Deteção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração**. 2004. Tese (Doutorado) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.

BENTLY DONALD, E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Library of Congress Control Number 2002094136. **Bently Pressurized Bearing Company, printed in Canada**, 2002.

CARVALHO, Djalma Francisco. **Usinas hidroelétricas: Turbinas**. [S.l.]: FUMARC, 1985.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH editora, 2013.

CIMBALA, John M. Fourier Transforms, DFTs, and FFTs. **Penn State University, State College**, 2010.

DELGADO, Jorge; FRENSEL, Katia; CRISSAFF, Lhaylla. Geometria analítica. **Rio de Janeiro: SBM**, 2013.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional, 2023.

FELÍCIO, Gonçalo Miguel Godinho. **Diagnóstico de avarias em máquinas rotativas utilizando a análise de órbitas**. 2015. Tese (Doutorado) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

GERHARD, P Schreiber. Usina Hidrelétricas. **Engevix SA-Editora Edgard Blücher Ltda-1977**, 1977.

GOLDMAN, Paul; MUSZYNSKA, Agnes. **Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics**. 1999. Tese (Doutorado) – Bently Rotor Dynamics Research Corporation.

GUENA, Ana Maria de Oliveira; AQUINO, Afonso Rodrigues de. **Avaliação ambiental de diferentes formas de geração de energia elétrica**. 2007. Diss. (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

HEINZEL, Gerhard; RÜDIGER, Albrecht; SCHILLING, Roland. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows, 2002.

ISO 10817-1, International Organization for Standardization. ISO 10817 - Rotating shaft vibration measuring systems - Relative and absolute sensing of radial vibration. International Organization for Standardization, 1998.

ISO 20816-5, International Organization for Standardization. ISO 20816-5 - Mechanical vibration—Measurement and evaluation of machine vibration—Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants. International Organization for Standardization, 2018.

JESUS SILVA, Derick Henrique de. Processamento de sinais para monitoramento de vibrações em unidades geradoras hidrelétricas. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

KALHARA, P.; JAYASINGHEARACHCHID, V.; DIAS, A.; RATNAYAKE, V.; JAYAWARDENA, Chandimal; KURUWITAARACHCHI, Nuwan. TreeSpirit: Illegal logging detection and alerting system using audio identification over an IoT network. *In*: p. 1–7. DOI: 10.1109/SKIMA.2017.8294127.

LATHI, Bhagawandas Pannalal. **Signal Processing e Linear System**. [S.l.]: Berkeley-Cambridge Press, 1998. ISBN 941413357.

MANITOBA HYDRO. **Producing electricity**. 2018. Disponível em: https://www.hydro.mb.ca/corporate/teachers/producing_electricity/.

MATSUO, Tiago Kaoru. **Método de análise de vibrações para identificação de falhas em máquinas rotativas de geração de energia elétrica**. 2017. Tese (Doutorado).

MICROSOFT. **Model-View-ViewModel - .NET | Microsoft Learn**. [S.l.: s.n.], 2023. acessado 08-setembro-2023. Disponível em:
<https://learn.microsoft.com/pt-br/dotnet/architecture/maui/mvvm>.

MOHANTY, Amiya Ranjan. **Machinery condition monitoring: Principles and practices**. [S.l.]: CRC Press, 2014.

MÜHLE, Henrique Brüggmann *et al.* Mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento. Florianópolis, SC, 2000.

RAO, S.S. **Vibrações mecânicas (4a. ed.)**. [S.l.]: Pearson Educación, 2009. ISBN 9788581435978. Disponível em:
https://books.google.com.br/books?id=0mQ%5C_tAEACAAJ.

REGES JUNIOR, Galdir Damasceno *et al.* Estimativa de amplitude de vibração de máquinas rotativas. Universidade Federal da Bahia, 2022.

SAN ANDRES, LA; VANCE, JM. Effect of fluid inertia on the performance of squeeze film damper supported rotors, 1988.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. [S.l.]: Elsevier, 2004.

SMITH III, Julius O. **Spectral Audio Signal Processing**. [S.l.]: W3K, 2011. ISBN 9780974560731.

SOARES JÚNIOR, Ricardo Luiz. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. 2013. Monografia (Trabalho de conclusão de graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro.

SONNEMANS, Fons. **XAML inline RowDefinitions and ColumnDefinitions - Reflection IT**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:
<https://reflectionit.nl/blog/2021/xaml-inline-rowdefinitions-and-columndefinitions>. acessado 11-outubro-2023.

WAUKESHA. **Horizontal Bearing Assemblies - Waukesha Bearings**. 2021. Disponível em: <https://www.waukbearing.com/en/products/fluid-film-bearings/horizontal-assemblies.html>. acessado 11-outubro-2023.

WAZLAWICK, Raul. **Análise e design orientados a objetos para sistemas de informação: Modelagem com UML, OCL e IFML**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2016.

WIKIPEDIA. **Window function**. 2022. Disponível em:

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Window_function&oldid=1117292479.
acessado 17-Novembro-2022.