



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

Felipe de Lima Rosa

**Implementação de um módulo de software para detecção do fenômeno de
cavitação em hidrelétricas**

Florianópolis
2023

Felipe de Lima Rosa

Implementação de um módulo de software para detecção do fenômeno de cavitação em hidrelétricas

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. Públio Macedo Lima, Dr.

Supervisor: Tiago Kaoru Matsuo, Eng.

Florianópolis

2023

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

ROSA, Felipe de Lima

Implementação de um módulo de software para detecção do fenômeno de cavitação em hidrelétricas / Felipe de Lima ROSA ; orientador, Públio Macedo Lima, coorientador, Tiago Kaoru Matsuo, 2023.

93 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. Cavitação. 3. Análise de vibrações. 4. Turbinas hidráulicas. I. Lima, Públio Macedo . II. Matsuo, Tiago Kaoru. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

Felipe de Lima Rosa

Implementação de um módulo de software para detecção do fenômeno de cavitação em hidrelétricas

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, 02 de Julho de 2023.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Públio Macedo Lima, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/DAS

Tiago Kaoru Matsuo, Eng.
Supervisor
AQTech Power Prognostics

Helton Fernando Scherer, Eng.
Avaliador
UNIOESTE/CECE

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

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe,
trabalho e principalmente aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o meu pai Elias dos Santos Rosa e minha mãe Ana Lucia Pires de Lima, pois sempre me deram todo o apoio necessário durante toda minha vida, incluindo na realização do presente trabalho.

Ao Tiago Kaoru Matsuo, meu supervisor na empresa AQTech por todos os ensinamentos que foram necessários para a realização do projeto. E a todos os meus colegas da AQTech que contribuíram para a construção desse trabalho.

*“Nós nos tornamos corajosos ao enfrentar nossos medos, e nos tornamos fortes ao enfrentar nossa fragilidade.”
(Tutu, Desmond)*

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 28 de Junho de 2023.

Na condição de representante da AQTech 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.



Documento assinado digitalmente

TIAGO KAORU MATSUO

Data: 03/07/2023 14:05:20-0300

CPF: ***.878.269-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Tiago Kaoru Matsuo
AQTech

RESUMO

A eletricidade é fornecida a cerca 92% dos domicílios em todo o país sendo a principal forma de geração de eletricidade fornecida por geradores de eletricidade do tipo hidráulicas. O Brasil possui atualmente um dos maiores potenciais de produção hidrelétrica do planeta, perdendo apenas para Rússia e China. Nesse contexto, percebe-se a dependência do consumo de energia elétrica, onde a falta de abastecimento pode ser catastrófica. Assim, procurando a qualidade da produção e do abastecimento, as empresas investem em métodos para assegurar e afirmar a sua qualidade, de forma a evitar a todo o custo interrupções. O trabalho considera propostas voltadas para o diagnóstico de cavitação em hidrelétricas. Este trabalho apresenta uma introdução a todo o contexto voltado para o desenvolvimento de diagnósticos, assim como o enquadramento teórico explicativo do funcionamento das unidades geradoras hidráulicas, bem como ferramentas matemáticas postas para aprontar diagnósticos. A empresa é descrita com exemplos de software e tecnologias utilizadas, pois o diagnóstico será implementado nos software proprietários da empresa. O relatório apresenta os aspectos conceituais relacionados à realização de um diagnóstico de cavitação e apresenta os métodos aplicados para calculá-lo. Serão apresentados os pré-requisitos funcionais e não funcionais dos sistemas de forma a obter as melhores medidas para a resolução do problema. O trabalho também demonstrou todos os desenvolvimentos e implementações do diagnóstico nas principais tecnologias utilizadas pela empresa. Por fim, são apresentados os resultados obtidos.

Palavras-chave: Cavitação. Análise de vibrações. Turbinas hidráulicas.

ABSTRACT

Electricity is supplied to approximately 92% of households across the country, with the main form of electricity generation being hydroelectric power plants. Brazil currently has one of the largest hydroelectric power potentials on the planet, second only to Russia and China. In this context, the dependence on electricity consumption is evident, as the lack of supply can be catastrophic. Therefore, in pursuit of production and supply quality, companies invest in methods to ensure and affirm their quality, aiming to avoid interruptions at all costs. However, this report considers proposals focused on the diagnosis of cavitation in hydroelectric power plants. This work provides an introduction to the entire context related to the development of diagnostics, as well as an explanatory theoretical framework of the operation of hydraulic generating units, along with mathematical tools employed for diagnosis preparation. The company is described with examples of software and technologies used, because the diagnostic will be implemented in company software. The report presents the conceptual aspects related to performing a cavitation diagnosis and outlines the methods applied for its calculation. Functional and non-functional prerequisites of the systems will be presented to obtain the best measures for problem resolution. The event also showcased all the developments and implementations of the diagnosis in the company's primary technologies. Finally, the obtained results are presented.

Keywords: Cavitation. Vibration analysis. hydraulic turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Total anual de gases emitidos por atividades antropogênicas entre 1970 e 2010.	19
Figura 2 – Contribuição na emissão de gases de efeito estufa, por setor.	20
Figura 3 – Perfil esquemático de usina hidrelétrica.	21
Figura 4 – Componentes da casa de máquinas: (a) Gerador; (b) Turbina.	22
Figura 5 – Corte da máquina - rotor e estator.	23
Figura 6 – Tipos de geradores.	24
Figura 7 – Componentes de um gerador.	25
Figura 8 – Exemplo de uma turbina Kaplan.	26
Figura 9 – Exemplo de uma turbina Francis.	27
Figura 10 – Componentes de um gerador.	28
Figura 11 – Gráfico do diagrama de fases da água.	31
Figura 12 – Exemplo de pás com erosão devido ao efeito de cavitação.	32
Figura 13 – Gráfico da influência da rugosidade na cavitação.	33
Figura 14 – (A) Diagrama de operação de uma turbina do tipo Francis. (B) Diagrama de vetores do fluxo no rotor.	35
Figura 15 – Cavitação em vórtice em uma turbina do tipo Francis.	36
Figura 16 – (A) Vetor de velocidade no rotor de uma turbina do tipo Francis. (B) Perfil de pressão associado a uma turbina Kaplan.	37
Figura 17 – Exemplo de cavitação no bordo de ataque de uma pá.	38
Figura 18 – Dinâmica do fenômeno de cavitação por bolhas em movimento.	39
Figura 19 – Sinal com período de 1 segundo.	40
Figura 20 – Sinal após a aplicação da FFT.	41
Figura 21 – Exemplo de um sinal modulado e seus componentes.	41
Figura 22 – Página principal do Analyzer.	45
Figura 23 – Página da unidade geradora do Analyzer.	45
Figura 24 – Janela de matriz de diagnóstico do Analyzer.	46
Figura 25 – Informações sobre o estado do diagnóstico.	46
Figura 26 – Diagnóstico de rotor em balanço.	47
Figura 27 – Janela de configuração de diagnósticos.	48
Figura 28 – Janela de configuração de um diagnóstico de rotor em balanço.	48
Figura 29 – Exemplo do DiagnosticService no console.	50
Figura 30 – Interface do software PostInstall.	51
Figura 31 – VibraOne.	52
Figura 32 – Sensor acústico utilizado para leitura de sinais sonoros.	52
Figura 33 – Exemplo de uma aplicação sendo criada pelo Windows Forms no Visual Studio.	55

Figura 34 – Resultado da aplicação implementada com Windows Forms no Visual Studio.	56
Figura 35 – Casos de usos para os Softwares.	60
Figura 36 – Diagrama de atividades para a configuração do diagnóstico no Analyzer.	62
Figura 37 – Diagrama de atividades para a visualização dos resultados do diagnóstico no Analyzer.	63
Figura 38 – Diagrama de classes para o diagnóstico de cavitação, e suas relações.	64
Figura 39 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.	68
Figura 40 – Diagrama de classes para que representa o diagnóstico de cavitação.	69
Figura 41 – Diagrama de classes que representa um sensor diagnóstico de cavitação.	70
Figura 42 – Diagrama de classes a interface gráfica para a configuração do diagnóstico.	71
Figura 43 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação na base de dados.	73
Figura 44 – Diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados do diagnóstico de cavitação.	74
Figura 45 – Diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados de cada sensor.	75
Figura 46 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.	77
Figura 47 – Diagrama de classe da classe Turbine	78
Figura 48 – Diagrama de classe da classe TurbineSensor	79
Figura 49 – Diagrama representando passo a passo o método "Process".	80
Figura 50 – Diagrama representando passo a passo o método "CalculateMagnitude".	81
Figura 51 – Diagrama de classes gerado pelo PostInstall.	83
Figura 52 – Tela de configuração do diagnóstico de cavitação.	84
Figura 53 – Tela de configuração do diagnóstico de cavitação com ênfase na configuração do sensor.	85
Figura 54 – Matriz de diagnósticos com o diagnóstico de cavitação implementado.	86
Figura 55 – Matriz de diagnósticos com o diagnóstico de cavitação implementado.	87
Figura 56 – Visualização do espectro FFT do envelope do sinal RAT.	88
Figura 57 – Visualização do espectro FFT do envelope do sinal RAS.	89
Figura 58 – Arquivo de log do DiagnosticService.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre os tipos de cavitação e frequências hidrodinâmicas.	43
Tabela 2 – Parâmetros configuráveis pelo rotor.	49
Tabela 3 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	49
Tabela 4 – Especificações do sensor acústico.	52
Tabela 5 – Requisitos funcionais e não funcionais para a configuração no Analyzer.	58
Tabela 6 – Requisito funcional para a visualização no Analyzer.	59
Tabela 7 – Requisitos funcionais e não funcionais para a análise espectral.	59
Tabela 8 – Requisitos funcionais e não funcionais para a detecção de padrões de cavitação.	59
Tabela 9 – Requisitos funcionais e não funcionais para a classificação da intensidade de cavitação.	60
Tabela 10 – Parâmetros configuráveis pela turbina.	61
Tabela 11 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	61
Tabela 12 – Diagrama de classes para CavitationDiagnostic	65
Tabela 13 – Diagrama de classes para CavitationResult	65
Tabela 14 – Diagrama de classes para CavitationTurbine	66
Tabela 15 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	66
Tabela 16 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	66
Tabela 17 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	67
Tabela 18 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.	68
Tabela 19 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa uma turbina no diagnóstico de cavitação.	69
Tabela 20 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa um sensor no diagnóstico de cavitação.	70
Tabela 21 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que a interface gráfica.	72
Tabela 22 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação e seus resultados.	73
Tabela 23 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes da tela principal para a apresentação dos resultados do diagnóstico de cavitação.	74
Tabela 24 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados dos cálculos de cada sensor.	76
Tabela 25 – Parâmetros e métodos de Cavitation	77
Tabela 26 – Parâmetros e métodos do diagrama de classe que representa uma turbina.	78

Tabela 27 – Parâmetros e métodos do diagrama de classe que representa um sensor de uma turbina.	79
Tabela 28 – Parâmetros configuráveis pela turbina.	85
Tabela 29 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS	19
2.2	UNIDADE GERADORA HIDRELÉTRICA	20
2.3	HIDROGERADOR	22
2.3.1	Tipos de geradores	23
2.3.2	Componentes gerais de geradores verticais	24
2.4	TURBINAS HIDRÁULICAS	25
2.4.1	Turbinas de reação	26
2.4.1.1	Kaplan	26
2.4.1.2	Francis	27
2.4.2	Turbinas de impulsão	27
2.4.2.1	Pelton	28
2.5	FILOSOFIAS DE MANUTENÇÃO	28
2.5.1	Manutenção corretiva	28
2.5.2	Manutenção preventiva	29
2.5.3	Manutenção preditiva	29
3	CAVITAÇÃO	30
3.1	COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO	33
3.2	GRÁFICO DE HILL	34
3.3	TIPOS DE CAVITAÇÃO	35
3.3.1	Cavitação em vórtices	36
3.3.1.1	Vórtice de núcleo	36
3.3.1.2	Vórtice nas pás	37
3.3.1.3	Bordo de ataque	37
3.3.1.4	Bolhas em movimento	38
4	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	40
4.1	OPERAÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	40
4.1.1	Espectro	40
4.1.2	Modulação e demodulação	41
4.1.3	Densidade Espectral de Potência	42
4.2	IDENTIFICAÇÃO DE CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS	42
4.2.1	Processamento do sinal	42
5	AQTECH POWER PROGNOSTICS	44
5.1	SOLUÇÕES DE SOFTWARE	44

5.1.1	Analyzer	44
5.1.2	DiagnosticService	49
5.1.3	PostInstall	50
5.2	SOLUÇÕES DE HARDWARE	51
5.2.1	VibraOne	51
5.2.2	Sensor	52
5.3	TECNOLOGIAS UTILIZADAS	53
5.3.1	Bitbucket	53
5.3.2	C#	53
5.3.3	Visual Studio	54
5.3.4	Windows Forms	54
5.3.5	PostgreSQL	56
6	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	58
6.1	MODELAGEM DO SOFTWARE	58
6.1.1	Requisitos	58
6.1.2	Casos de uso	60
6.1.3	Diagrama de atividades	61
6.2	DIAGRAMA DE CLASSES	64
6.2.1	Programação	67
6.2.1.1	Analyzer	67
6.2.1.1.1	<i>Configuração</i>	67
6.2.1.1.2	<i>VISUALIZAÇÃO</i>	72
6.2.1.2	DIAGNOSTICSERVICE	76
7	ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
7.1	BASE DE DADOS	82
7.2	POSTINSTALL	82
7.3	ANALYZER	83
7.3.1	Configuração	83
7.3.2	Visualização	86
7.4	DIAGNOSTICSERVICE	89
8	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

No final do século XIX foi iniciado a instalação de barragens para a construção de usinas hidrelétricas, mas foi somente após a Segunda Grande Guerra Mundial (1939-1945) que a adoção de hidrelétricas passou a ser relevante na matriz energética brasileira. Atualmente as usinas hidrelétricas correspondem a mais de 65% da energia elétrica produzida no país. O Brasil atualmente está atrás apenas da Rússia e da China em relação ao potencial energético produzido a partir de unidades geradoras hidrelétricas (UHE) (LEITE, 2023).

No Brasil há 147 centrais hidrelétricas com 667 turbinas hidráulicas e potência instalada de cerca de 94GW, o que corresponde a eletricidade destinada a satisfazer a demanda da população. Com o passar do tempo e o envelhecimento das UHE's, os equipamentos com mais de 20 anos apresentam defeitos frequentes com interrupção de funcionamento, já no caso dos equipamentos que tem mais de 40 anos, a frequência de desligamentos forçados são tão grandes que comprometem a continuidade das operações, problema que pode ser considerado grave, já que cerca de 30% das hidrelétricas brasileiras têm mais de 40 anos (NOGUEIRA; ALARCÓN, 2019). Ainda assim, o investimento em equipes de manutenção e operação é cada vez menor. Além de que o mercado brasileiro exija rentabilidade dos ativos e impondo limitações às instalações de transmissão e geração, com postergação de ampliações e consequentemente, ocasionando o aumento do risco operacional. Assim, as empresas acabam trabalhando com equipes menores e mais sobrecarregadas, com o intuito de reduzir os custos de operação. Então tem importância ao setor técnicas que auxiliem as equipes de manutenção, minimizando as horas de indisponibilidade do ativo.

Em equipamentos hidráulicos há a possibilidade de ocorrer um fenômeno chamado de cavitação, como em bombas, turbinas e hélices. O problema acontece quando a pressão local do fluido sendo transportado cai abaixo do seu ponto de vaporização, isso faz com que pequenas bolhas de vapor se formem no fluido que está sendo transportado, assim, durante o transporte as bolhas são arrastadas pela corrente para zonas de alta pressão. Como no transporte a pressão é relativamente baixa para a formação de bolhas, uma vez que entram em contato com zonas de alta pressão as bolhas colapsam, gerando ondas de choque que podem danificar o equipamento. Sendo assim, a cavitação pode levar à falha prematura do equipamento, diminuir a sua eficiência e gerar ruídos e vibrações que comprometem a sua operação.

A cavitação gera consequências negativas para a operação e vida útil do ativo. Para que sejam evitados os efeitos danosos da cavitação é necessário adotar medidas preventivas, assim como realizar a detecção precoce de cavitação por meio de técnicas de análise de vibração e acústica. Com a adoção dessas medidas pode-se garantir a operação segura e eficiente do ativo e prolongar a sua vida útil.

Assim, cabe para a engenharia de manutenção a responsabilidade de garantir o funcionamento adequado desses ativos de geração de energia elétrica. Para isso, uma das técnicas utilizadas é o monitoramento online dos parâmetros do ativo. A partir de uma abordagem de monitoramento de variáveis, são apresentadas as características de condição de uma unidade geradora, o que auxilia o profissional responsável pela manutenção na detecção de problemas (MATSUO, 2017).

Nesse contexto, o documento apresenta os resultados de uma implementação de uma técnica para detectar problemas causados em uma turbina pelo fenômeno de cavitação.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar o estudo do modelo e implementar em um Software um diagnóstico de falha em uma usina hidrelétrica, no que diz respeito ao fenômeno hidrodinâmico chamado de Cavitação.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura deste trabalho foi organizada em oito etapas distintas, cada uma contribuindo para a compreensão e análise de cavitação. Assim, será descrito todas as etapas:

- **Introdução:** Nesta etapa, é apresentado o contexto do estudo, destacando a importância da análise da cavitação em turbinas hidrelétricas. Também são delimitados os objetivos do trabalho e a estrutura do documento;
- **Fundamentação teórica sobre tipos de turbinas e hidrelétricas:** Nessa etapa, são abordados os diferentes tipos de turbinas utilizadas em usinas hidrelétricas, como turbinas Francis, Kaplan e Pelton. Também é apresentado um panorama geral sobre o funcionamento das usinas hidrelétricas e sua importância na geração de energia;
- **Fundamentação sobre o fenômeno de cavitação:** Aqui, é realizado um estudo aprofundado sobre o fenômeno da cavitação. São apresentados os mecanismos e as causas da cavitação, bem como os tipos mais comuns, como cavitação em bolhas, cavitação de vórtices e cavitação no bordo de ataque. Também são discutidos os efeitos danosos da cavitação nas turbinas;
- **Análise de vibração:** Nesta etapa, é explorado o uso da análise de vibração como uma ferramenta para detecção e diagnóstico da cavitação. São apresentados os princípios e as técnicas utilizadas nessa análise;

- Tecnologias utilizadas: Aqui, é apresentada a empresa AQTech e quais tecnologias são proporcionadas a resolver o diagnóstico;
- Atividades desenvolvidas: Nesta etapa, são descritas detalhadamente as atividades realizadas para o desenvolvimento do módulo de software destinado ao cálculo da cavitação. São abordadas desde a revisão bibliográfica até a implementação, destacando os requisitos funcionais atendidos;
- Análise dos resultados: Aqui, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do módulo de software;
- Conclusão: Na etapa final, é feita uma síntese dos principais pontos abordados ao longo do trabalho. São destacadas as contribuições e as limitações do estudo, bem como as perspectivas futuras para aprimorar a detecção e o diagnóstico da cavitação em turbinas hidrelétricas;

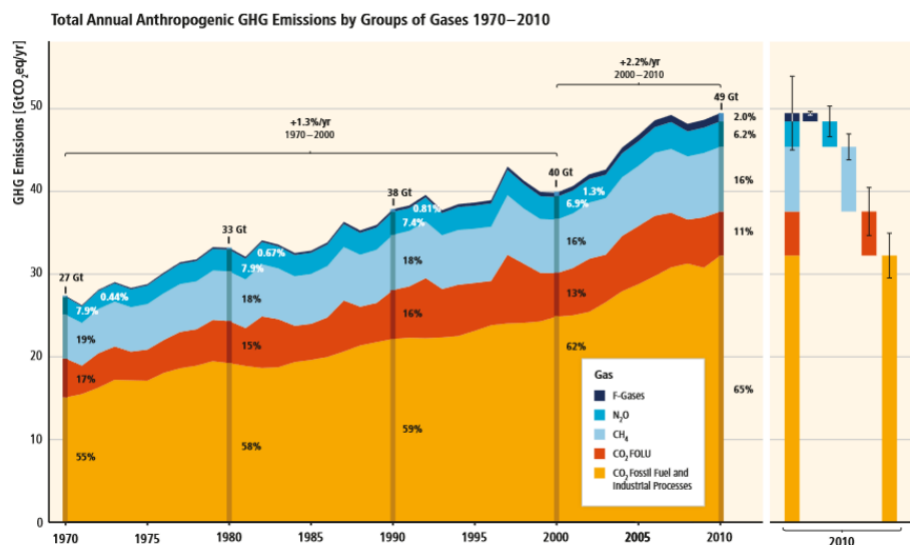
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

Atualmente é indiscutível perceber a importância do uso de geração de energias renováveis, seja na economia de recursos utilizando recursos naturais como fonte, até na preservação do meio ambiente por conta do aquecimento global em decorrência de décadas do uso de usinas termo elétricas como principal fonte de geração de energia.

Durante os anos entre 1970 e 2010, as emissões de gás carbônico pela queima de combustíveis fósseis e atividades industriais representaram 78% do total de gases que foram emitidos pelo ser humano, segundo (RIBEIRO, 2022). Mesmo com as políticas que de alguma forma buscam a limitação da utilização de combustíveis fósseis, estudos mostram que a emissão desses gases causam impacto no que diz respeito ao efeito estufa. A Figura 1 apresenta um gráfico que mostra o total de gases que são emitidos por atividades antropogênicas.

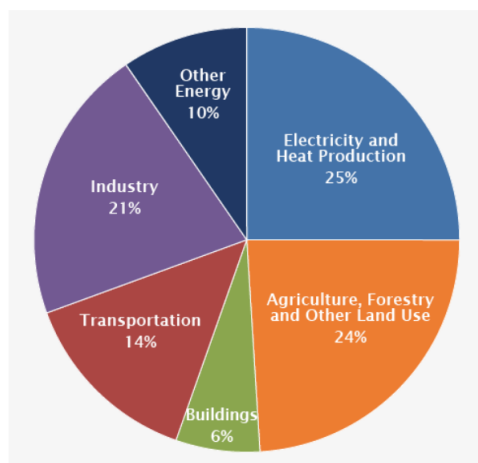
Figura 1 – Total anual de gases emitidos por atividades antropogênicas entre 1970 e 2010.



Fonte: (RIBEIRO, 2022).

A área de geração de energia representa 25% dos gases emitidos, assim sendo uma preocupação global em relação á crescente emissão de gases de efeito estufa. A Figura 2 representa um gráfico de contribuições na emissão de gases de efeito estufa.

Figura 2 – Contribuição na emissão de gases de efeito estufa, por setor.



Fonte: (RIBEIRO, 2022).

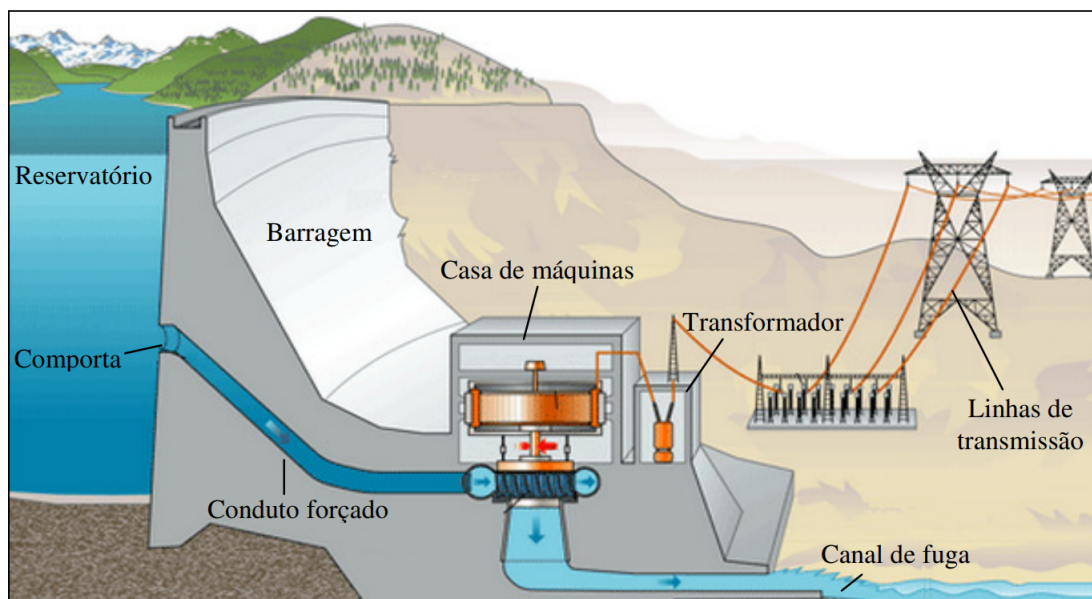
Conclui-se que é necessário, a utilização de meios de fontes de geração de energia renováveis, e com baixo impacto ambiental.

É chamado de energia renovável toda energia que seja derivada de fontes da natureza, principalmente aquela em que é reabastecida em uma taxa maior do que são consumidas. Como por exemplo geração de energia que tem como principal fonte a água, onde as fontes são reabastecidas a todo o momento.

2.2 UNIDADE GERADORA HIDRELÉTRICA

Uma usina hidrelétrica é um sistema com a finalidade de gerar energia elétrica através da energia hidráulica. Que por sua vez, apenas existirá quando tiver um desnível natural hidrológico. Deste modo, para manter o desnível, é construída uma barragem onde o controle de fluxo da água é feito através de uma comporta. A Figura 3 representa o esquema geral de uma hidrelétrica.

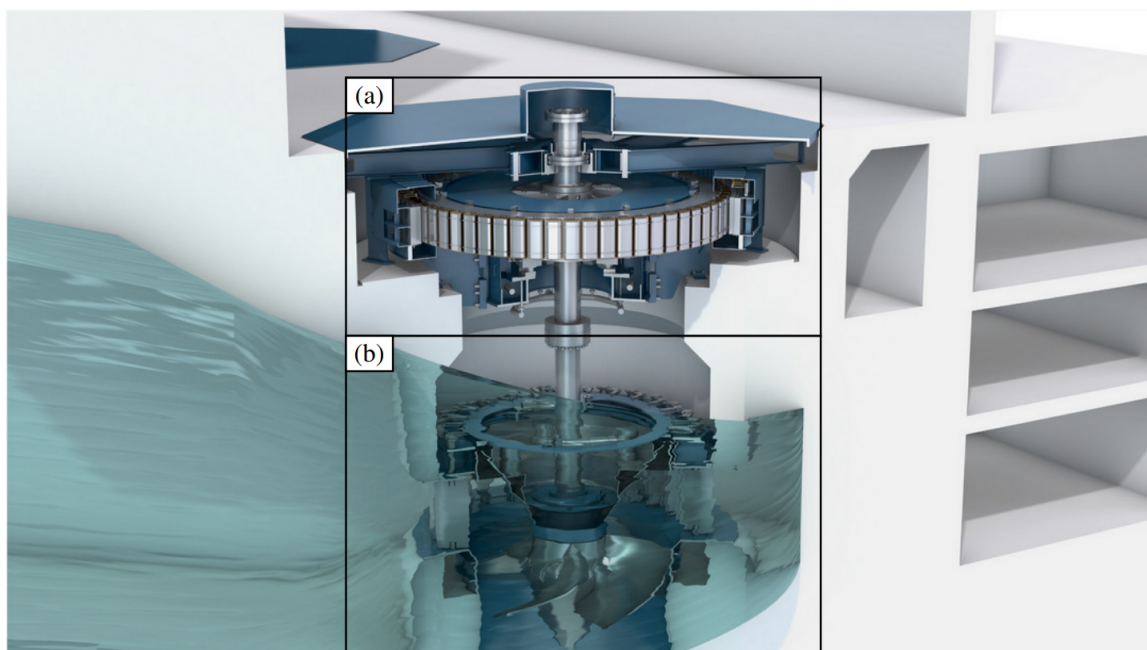
Figura 3 – Perfil esquemático de usina hidrelétrica.



Fonte: (PUTINI, 2015).

As máquinas de uma usina hidrelétrica são subdivididas em dois grandes grupos de componentes, são eles o gerador e a turbina, como é mostrado na Figura 4. Onde o fluxo de água que o desnível produz, faz pressão o suficiente para movimentar a roda turbina que é ligada mecanicamente através de eixos ao rotor do gerador, assim fazendo-o girar, com isso temos uma variação de fluxo magnético fazendo com que seja criado uma tensão em seus terminais, e posteriormente com o transformador e linhas de transmissão ocorre o fornecimento de energia elétrica (PUTINI, 2015).

Figura 4 – Componentes da casa de máquinas: (a) Gerador; (b) Turbina.

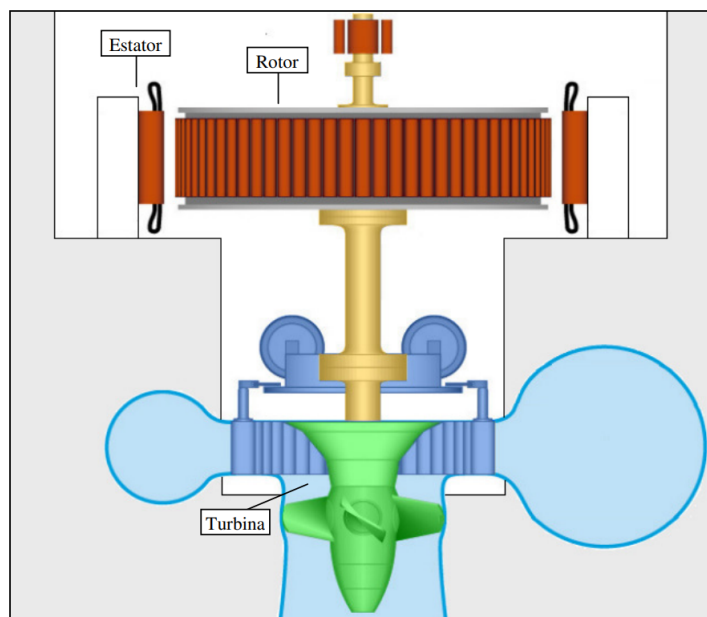


Fonte: (PUTINI, 2015).

2.3 HIDROGERADOR

Os geradores de hidroelétricas são máquinas síncronas, por possuírem rotação constante. O hidrogerador possui um conjunto de peças fixas, chamado de estator, e outros membros na parte rotativa, chamado de rotor, como pode-se ver na Figura 5.

Figura 5 – Corte da máquina - rotor e estator.



Fonte: (PUTINI, 2015).

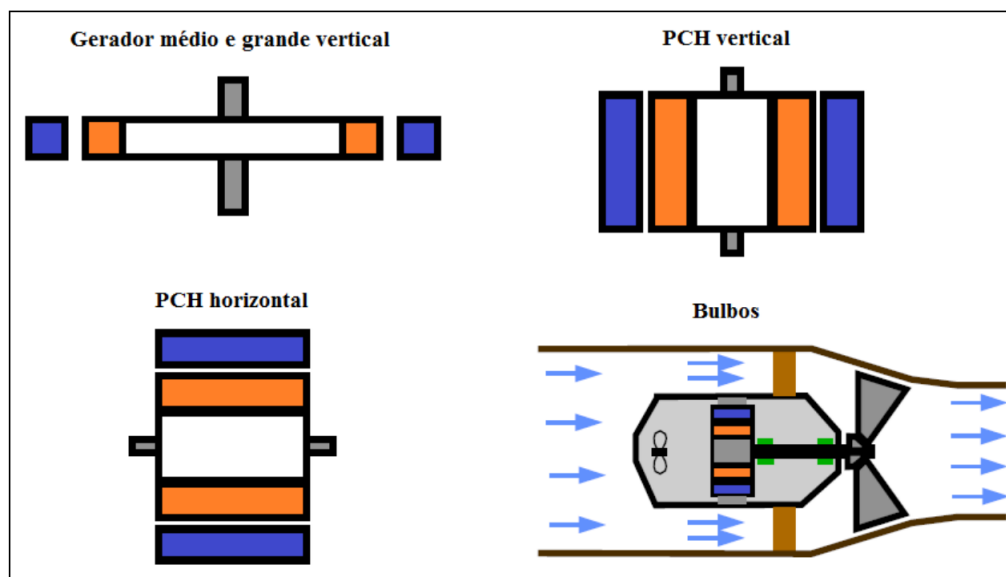
2.3.1 Tipos de geradores

São vários os fatores que influenciam na escolha do tipo de hidrogerador necessário para uma determinada aplicação. Sendo que estes elementos foram obtidos através de processos de aperfeiçoamento a medida que se adquirem experiências para construção deste tipo de máquinas. Alguns exemplos típicos são.

- Fabricação das peças;
- Arranjo dos mancais;
- Fluxo da água na turbina;
- Limites para transporte e montagem de peças grandes;
- Sistema de resfriamento;
- Capacidade de suportar abalos sísmicos.

Uma vez levantado os requisitos, levando em conta os fatores exemplificados. O projeto de concepção se iniciará a partir de um dos quatro tipos de geradores que estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6 – Tipos de geradores.



Fonte: (PUTINI, 2015).

Os geradores grandes e médios tem uma operação na faixa de potência acima de 40 [MVA], e contando com uma rotação menor em relação as PCHs. Sendo que dependendo do tamanho, algumas peças são montadas em obra e transportadas individualmente. No geral, eles são movidos por turbinas Francis, Kaplan e Pelton.

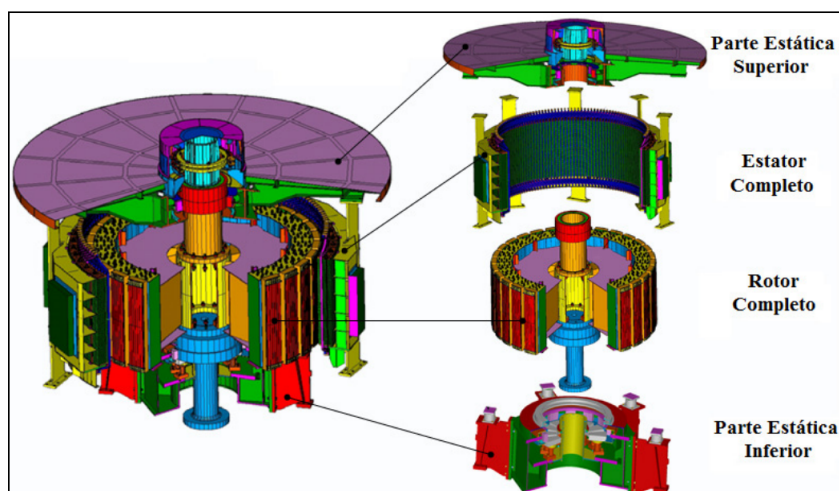
A operação das PCHs, varia com potência de até 30 [MVA].

Agora as máquinas Bulbo, são as únicas onde o gerador fica encapsulado e submerso no fluxo de água, assim não sendo necessário represar grandes áreas para a máquina ser utilizada.

2.3.2 Componentes gerais de geradores verticais

A Figura 7 exemplifica os elementos de um gerador médio ou grande vertical.

Figura 7 – Componentes de um gerador.



Fonte: (PUTINI, 2015).

Os componentes estáticos superiores possuem uma estrutura rígida o suficiente para suportar o mancal de guia e o esforço proveniente por esse mancal, assim garantindo a estabilidade da linha de eixo. Um de seus membros faz o fechamento da UG com o meio externo.

O estator completo é a parte fixa principal do gerador. Ele é dividido em duas estruturas, sendo um a carcaça do estator e o outro o núcleo do estator. A primeira tem como função apoiar o segundo, assim como também suportar e transmitir os esforços da unidade geradora para a fundação. A estrutura da carcaça permite uma diminuição de ruído e vibrações. Já o núcleo do estator é a parte ativa, onde ocorre a geração de energia elétrica por meio de corrente elétrica induzida pelo rotor. Ele é montado com segmentos de chapas ranhuradas que são empilhadas e compactadas para minimizar as perdas.

O rotor completo é a parte girante do hidrogenador. Sendo que o polo que é um dos seus componentes, seja responsável em gerar o campo magnético que irá induzir corrente elétrica no estator.

A parte estática inferior, é onde ocorre o suporte axial de toda parte rotativa. Dependendo da configuração da máquina, este membro poderá pertencer à parte da turbina.

2.4 TURBINAS HIDRÁULICAS

Uma turbina hidráulica tem a função de converter a energia hidrodinâmica do fluido em energia elétrica, através do gerador. Quando a dinâmica do fluido atinge as pás da turbina, força uma rotação que conseqüentemente é convertida em energia

elétrica.

Tem dois tipos principais de turbinas hidráulicas, sendo turbinas de reação e turbinas de impulso.

2.4.1 Turbinas de reação

Uma turbina de reação, gera energia através da combinação da força de pressão e da força da vazão da água. O conduto forçado é posto diretamente na água, permitindo que a água percorra nas pás da turbina. As turbinas de reação são postas geralmente em lugares com pouca queda líquida, mas vazões grandes (ENERGY, 2023).

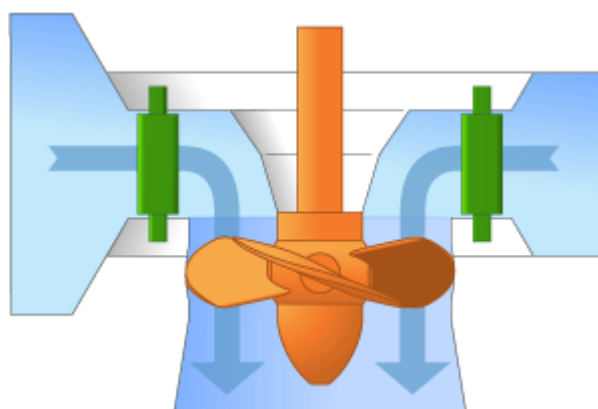
Serão exemplificados alguns tipos de turbinas de reação.

2.4.1.1 Kaplan

Inventada em 1913 pelo professor austríaco Viktor Kaplan. Representou-se um impulso tecnológico para a energia hidrelétrica e renovável (PLANAS, 2018b).

A turbina Kaplan utiliza gradientes de poucas dezenas de metros, mas com grandes vazões. A turbina do tipo kaplan tem pás que podem ser orientadas de acordo com a variação do fluxo de água. A turbina é equipada de estatores fixos de forma a orientar o fluxo, fazendo que a eficiência da turbina possa ser otimizada. A Figura 8 apresenta uma turbina Kaplan.

Figura 8 – Exemplo de uma turbina Kaplan.



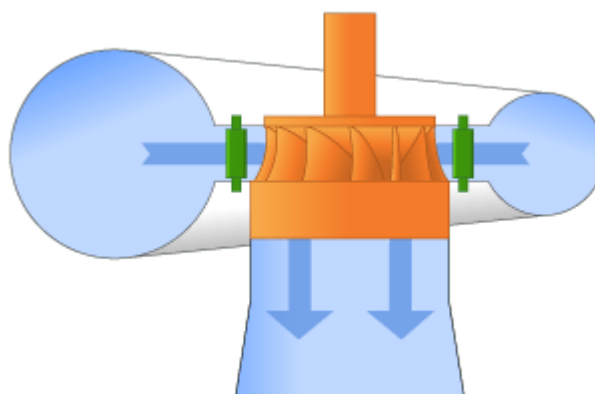
Fonte: (ENERGY, 2023).

A água é transportada para a turbina através de um conduto espiral, que preenche toda a circunferência da turbina. Assim, a água passando por palhetas diretrizes que dá ao fluxo uma rotação, transmitindo movimento e conseqüentemente, energia.

2.4.1.2 Francis

Desenvolvida por James Bicheno Francis a turbina Francis são centrípetas e utilizam o tubo de sucção para conduzir a água do rotor até a reserva de água jusante. A Figura 9 representa uma turbina Francis.

Figura 9 – Exemplo de uma turbina Francis.



Fonte: (ENERGY, 2023).

A água em alta pressão entra na turbina através de um conduto em forma de caracol, o que reduz a pressão da água dinamicamente pelo tubo. Após passar pelo conduto, a água flui através das palhetas diretrizes, regulando a vazão e variando a potência fornecida pela turbina. A água é desviada para um tubo de sucção, de forma a liberar o líquido para a reserva jusante.

As turbinas Francis são as turbinas hidráulicas mais utilizadas. Elas são as principais unidades de trabalho estáveis das usinas hidrelétricas. As turbinas Francis fornecem cerca de 60% da capacidade global de energia hidrelétrica, principalmente porque podem operar de maneira eficiente em uma ampla faixa de condições de trabalho (AN. . . , 2022).

2.4.2 Turbinas de impulso

As turbinas de impulso utilizam a velocidade da água para mover o rotor. Um fluxo de água atinge cada cubo do rotor.

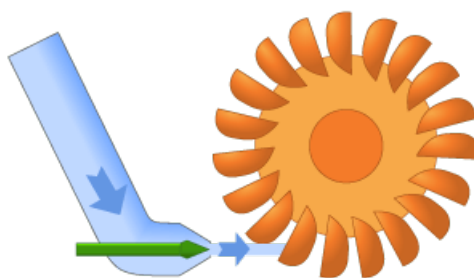
Sem sucção na parte inferior da turbina, diferentemente das turbinas Kaplan e Francis, a água flui para fora da parte inferior da carcaça da turbina após atingir o rotor.

Uma turbina de impulso é geralmente adequada para aplicações de alta queda e baixo fluxo.

2.4.2.1 Pelton

Inventado por Lester Allan Pelton, na década de 1870 e posteriormente melhorado por outros inventores. A turbina Pelton é uma turbina de impulso hidráulico, geralmente utilizada em usinas com grande altura vertical (PLANAS, 2018a). A Figura 10 representa uma turbina Pelton.

Figura 10 – Componentes de um gerador.



Fonte: (ENERGY, 2023).

2.5 FILOSOFIAS DE MANUTENÇÃO

É indiscutível a dependência de energia elétrica nos dias atuais, a grande maioria dos setores são totalmente dependentes de equipamentos que consomem energia elétrica. Assim, forçando as geradoras e distribuidoras de energia uma distribuição sem interrupção. A escolha da técnica mais adequada para cada tipo de equipamento na UHE deve levar em consideração fatores como: importância do equipamento para o processo produtivo; o seu custo de aquisição e a sua taxa de falha (MATSUO, 2017).

De forma geral, o trabalho visa contribuir para a maximização da disponibilidade e confiabilidade dos ativos, visando em reduzir os custos e os impactos negativos decorrentes de paradas não planejadas. A implementação do módulo de software para o cálculo de cavitação desempenha um papel fundamental nesse processo, fornecendo diagnósticos precisos e auxiliando na programação e agendamento de atividades de manutenção de forma eficiente.

2.5.1 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva consiste em não se preocupar nas condições de operação das máquinas e equipamentos, fazendo com que a sua manutenção ocorra somente após a falha, fazendo com que essa filosofia de manutenção seja mais simples de ser implantada na gestão dos ativos. Entretanto, é vista como ineficiente e dispendiosa no longo prazo, uma vez que as manutenções não são planejadas e os

reparos são feitos de forma apressada, se concentrando em solucionar os sintomas ao invés das falhas (MATSUO, 2017).

2.5.2 Manutenção preventiva

Na manutenção preventiva, as atividades deixam de ser reativas como aconteciam na manutenção corretiva e passam a ser proativas, já que essa filosofia de manutenção tem como objetivo atuar no ativo antes de uma parada indevida. O que trás benefícios em relação a redução de custo e tempo de manutenção, visto que as falhas são mitigadas antes que ocorram, o que amplia a vida útil do equipamento (MATSUO, 2017).

As atividades de manutenção preventiva geralmente são programadas periodicamente em função do tempo de operação do ativo. Se o ativo é parado muitas vezes para manutenção, sua disponibilidade pode ser menor que se adotada uma manutenção corretiva. Essa filosofia de manutenção é amplamente adotada pelas concessionárias de energia.

2.5.3 Manutenção preditiva

Como já explicado anteriormente, a ideia central da manutenção corretiva é na correção da falha após o ocorrido, já a ideia central da manutenção preventiva é o tempo de operação do ativo, agora, a manutenção preditiva é baseada em relação a condição do ativo. O objetivo central dessa filosofia de manutenção é estender ao máximo o tempo de funcionamento da máquina, planejando a parada para manutenção na iminência da falha. Entretanto, apenas é possível com realimentação de informações operacionais do sistema em análise como ferramenta para a tomada de decisões (MATSUO, 2017).

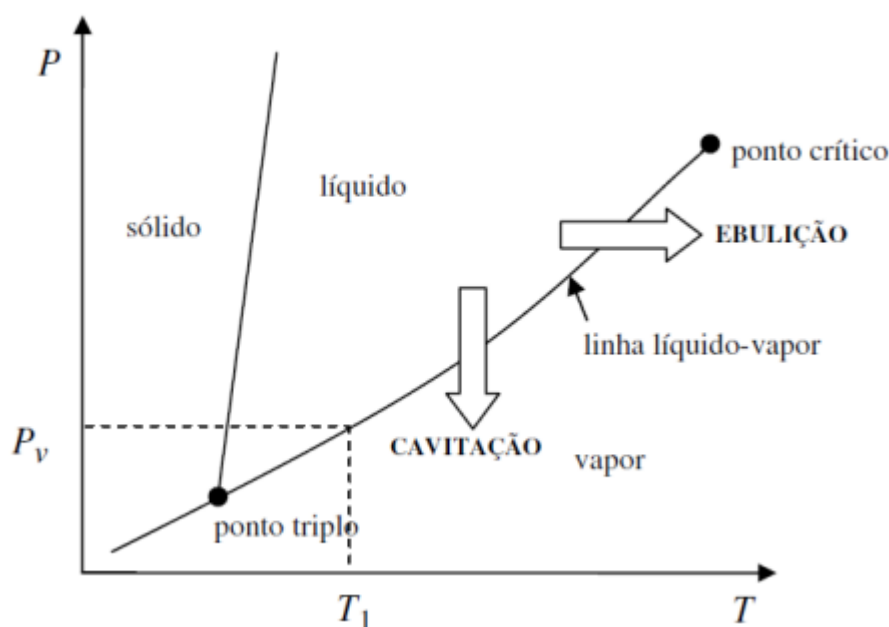
3 CAVITAÇÃO

A cavitação é um evento hidrodinâmico que ocorre em turbinas hidráulicas. De acordo com (BRENNEN, 2011), quando o fluido é sujeito a uma pressão menor que a sua pressão de vaporização (em uma dada temperatura uniforme) é chamado de baixa tensão. Sem a presença de vapor, o líquido puro pode manter pressões negativas grandes sem romper e formar bolhas de vapor. O processo de formação de bolhas é chamado de **nucleação homogênea**, e o limite correspondente pode ser predito através da teoria cinética. Durante o transporte do líquido em regiões denominadas de regiões de baixa pressão, as impurezas e rugosidades da região onde o líquido está sendo transportado pode fazer com que a pressão no líquido caia em situações em que a pressão é menor que a sua pressão de vaporização, formando bolhas de vapor, assim, uma vez em que o líquido e os vapores formados entram em contato com regiões denominadas de regiões de alta pressão, a pressão sobe e os vapores implodem nas superfícies rígidas.

Em turbinas do tipo Kaplan e Francis, o conduto forçado, região onde é feita a entrada do líquido, é uma região de baixa pressão, região de alta pressão é no rotor da turbina.

Existem dois processos químicos que transformam o fluido em estado líquido para o estado gasoso. A partir do gráfico apresentado na Figura 11 é possível perceber que com o aumento da temperatura, mas em pressão constante, esse fenômeno se chama de **ebulição**. Já quando a temperatura é constante e a pressão é reduzida, tem-se o fenômeno de cavitação (SANTOS, 2013).

Figura 11 – Gráfico do diagrama de fases da água.

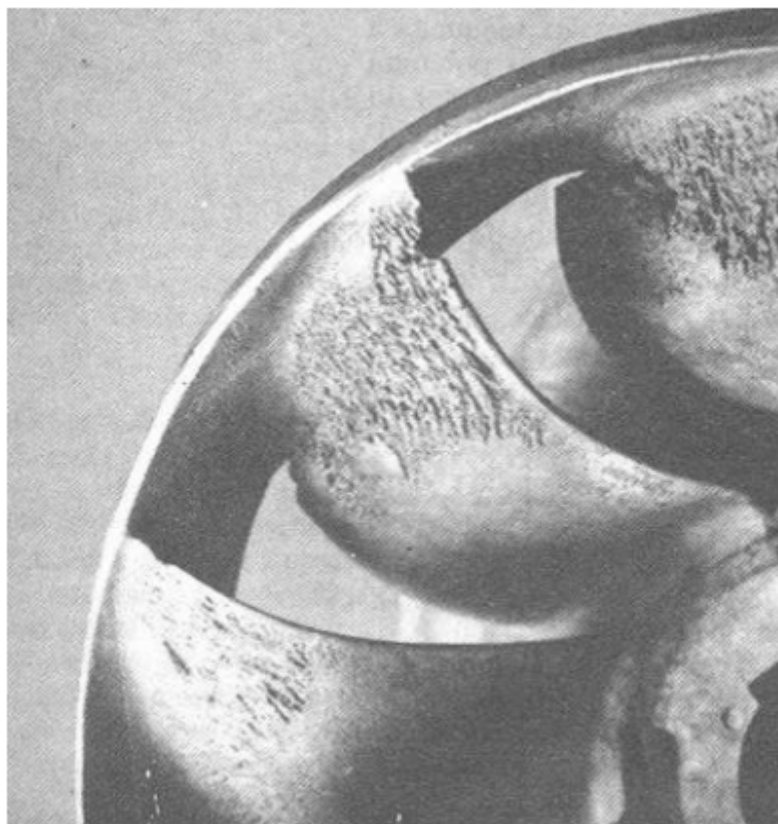


Fonte: (SANTOS, 2013).

No momento que as bolhas de vapor colapsam em regiões sólidas, as forças exercidas pelo líquido quando preenche os espaços uma vez ocupados pelas bolhas de vapor, criam pressões localizadas extremamente elevadas fazendo com que aconteça erosão na superfície sólida de contato. O fenômeno é acompanhado de ruídos e vibrações (JÚNIOR, 2015).

Os efeitos causados pelo fenômeno de cavitação são visíveis, mensuráveis e audíveis e provoca vários danos ao ativo, como corrosão que remove as partículas e danifica partes de rotores e do tubo de sucção que apresenta perda de rendimento, trepidação e vibração da máquina também é um dano causado pelo desbalanceamento que provoca o ruído característico. Sendo assim, as máquinas que sofrem danos acentuados por cavitação devem ser tiradas de operação para a realização da manutenção para a correção de falhas provocadas pelo fenômeno de cavitação. No rotor é realizado a manutenção a partir de preenchimento de solda e a esmerilhagem da superfície, e no tubo de extração é realizado concretagem (COLLET, 2004). A Figura 12 apresenta uma pá de uma turbina Francis com erosão devido à cavitação.

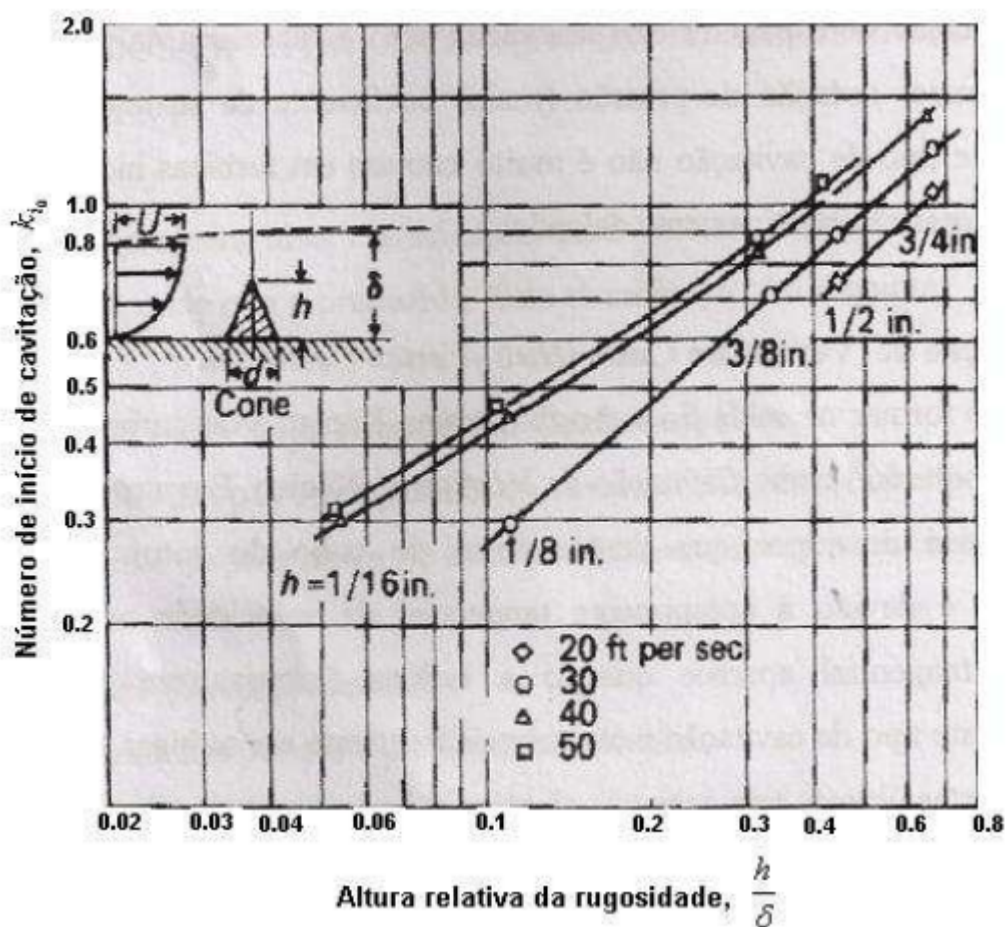
Figura 12 – Exemplo de pás com erosão devido ao efeito de cavitação.



Fonte: (QUEIROZ, 2012)).

De acordo com (QUEIROZ, 2012) a erosão causada pela cavitação contribui para o aumento da degradação do dano, porque uma rugosidade maior na superfície provoca maiores níveis de cavitação. A Figura 13 apresenta a influência da rugosidade no número de início de cavitação. As curvas são em função da velocidade que o líquido passa pelo cone e da altura do cone.

Figura 13 – Gráfico da influência da rugosidade na cavitação.



Fonte: (QUEIROZ, 2012).

Nota-se que ao aumentar a altura do cone maior é o número de início de cavitação, o que nos diz que quanto maior a rugosidade superficial, maior o número de cavitação.

3.1 COEFICIENTE DE CAVITAÇÃO

O trabalho de (JÚNIOR, 2015) cita que na região nominal de funcionamento da turbina, quando está trabalhando dentro dos parâmetros projetados para o seu funcionamento, a turbina Francis apresenta um bom comportamento, com o seu funcionamento de forma silenciosa e flutuações de pressão e potência desprezíveis.

A altura de sucção de uma turbina é a pressão atuante na sucção do rotor, é medida em metros de coluna d'água e é relativa para a pressão no nível d'água jusante. Assim, para cada máquina é decidido um número máximo para a altura de sucção para que a máquina não tenha cavitação. Portanto, a proteção contra o fenômeno de cavitação deve começar pelo projeto, com o objetivo de minimizar as possibilidades de

baixas pressões. O coeficiente de cavitação σ se torna útil para a escolha adequada da turbina.

O valor crítico σ_c é conhecido como o coeficiente de cavitação de Thoma. Assim, para que não ocorra cavitação a altura de sucção H_s deve ser fixada de forma que o valor do coeficiente de cavitação seja maior que o valor crítico de σ_c .

No trabalho de (QUEIROZ, 2012), a altura de suspensão de uma turbina pode ser calculado por

$$H_s = H_b - h_v. \quad (1)$$

Onde:

- H_b : Pressão barométrica local, em metros coluna d'água;
- σ Coeficiente de cavitação.
- H Queda líquida em metros;
- h_v Pressão do vapor d'água na temperatura do escoamento, em metros coluna d'água;

O coeficiente de cavitação de Thoma σ_c depende diretamente da velocidade específica da turbina n_s , de forma que

$$\sigma_c = 0,625 \left(\frac{n_s}{100} \right)^2. \quad (2)$$

3.2 GRÁFICO DE HILL

Uma turbina é especificada para operar nos pontos máxima eficiência, tanto para parâmetros de queda quanto para parâmetros de fluxo, entretanto, pode ser que em determinada situação a turbina possa operar fora dos parâmetros especificados para máxima eficiência. (ESCALER *et al.*, 2006) e (GOSMANN *et al.*, 2020) exemplificam expressões de cálculo para o coeficiente de vazão (ϕ) representado Equação 3 e de queda (ψ), representado pela equação 4.

$$\phi = \frac{2E}{\omega^2 R^2} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{Q}{\pi \omega R^3} \quad (4)$$

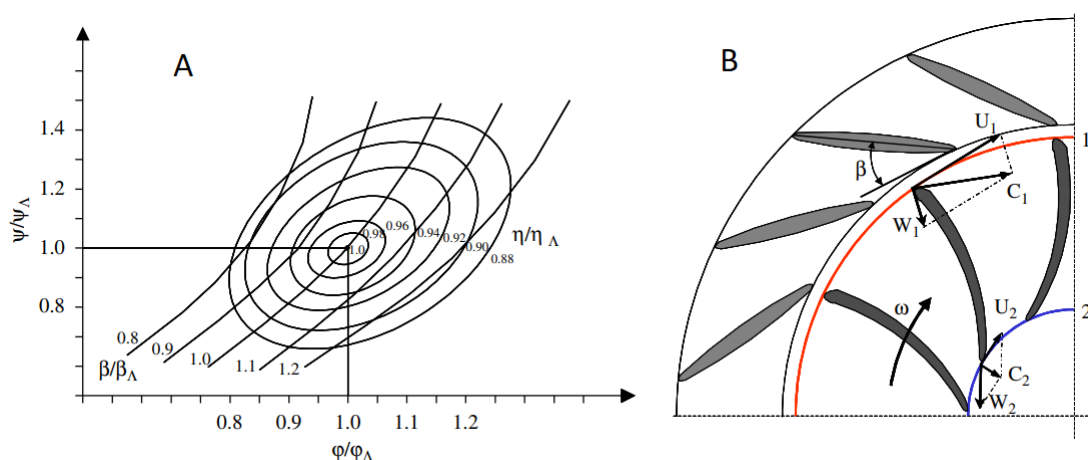
Onde:

- E : Energia hidráulica específica;
- ω : Velocidade angular;

- R: Raio de referência do rotor;
- Q: Vazão;

A Figura 14(A) apresenta um gráfico que representa um diagrama típico de operação de uma turbina do tipo Francis, também conhecido como gráfico de Hill e a Figura 14(B) apresenta um diagrama de vetores que representa a cinemática do fluxo no rotor da turbina.

Figura 14 – (A) Diagrama de operação de uma turbina do tipo Francis. (B) Diagrama de vetores do fluxo no rotor.



Fonte: (ESCALER *et al.*, 2006).

Pela Figura 14(A) é possível perceber o índice \wedge que indica o ponto de operação de projeto onde a turbina está trabalhando no regime de máxima eficiência. Entretanto, a queda pode sofrer alterações, pois depende diretamente dos níveis montante e jusante que tem suas próprias dinâmicas e podem variar. A vazão é alterada pela abertura ou fechamento das palhetas, já que é possível controlar o ângulo de abertura β como é possível visualizar na Figura 14(B). Variações que tem influência direta na cinemática e dinâmica do fluxo e determinam a tendência do surgimento do fenômeno de cavitação.

Quanto maior é a diferença entre as condições operacionais e as condições de projeto, maior é a probabilidade do surgimento de cavitação na turbina.

3.3 TIPOS DE CAVITAÇÃO

Diferentes tipos de cavitação aparecem de acordo com origem do fenômeno. Para isso, os aspectos do fenômeno de cavitação devem ser analisados de forma localizada, principalmente pelo motivo que apenas fazer uma estimativa da pressão em uma localidade, não basta, pois a cavitação pode ocorrer quando um fluxo é

obstruído quando está seguindo em uma direção. Diferentes tipos de cavitação podem surgir, dependendo da origem do fenômeno, como a cavitação no bordo de ataque, cavitação em bolhas, cavitação de vórtices, cavitação em nuvem, entre outras.

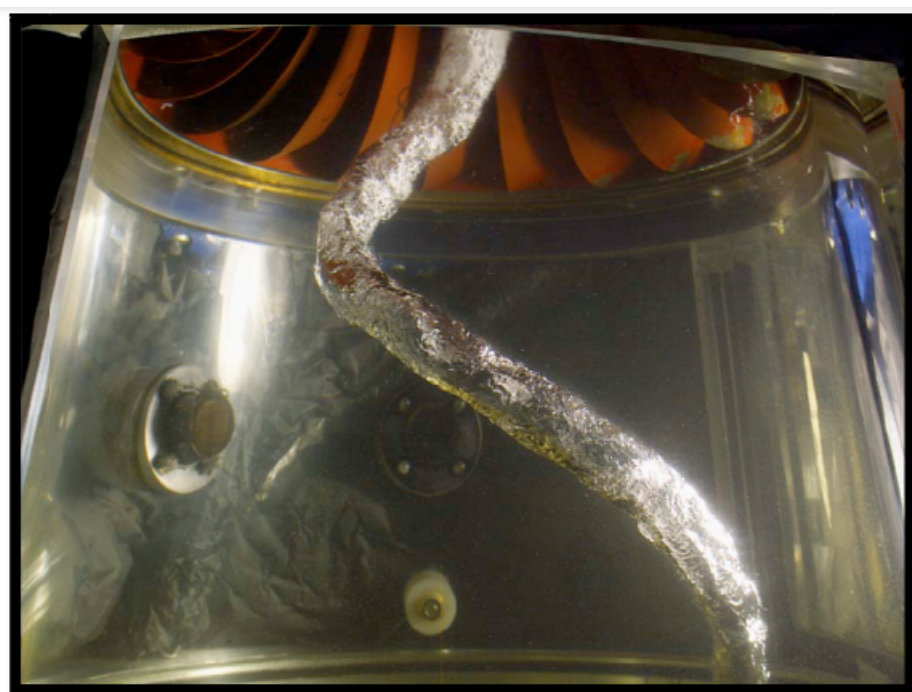
Assim, é essencial compreender as particularidades do fenômeno em estudo para identificar a origem da cavitação e os diferentes tipos envolvidos. Somente com uma análise detalhada e localizada é possível desenvolver estratégias efetivas para evitar a ocorrência de danos nos equipamentos e otimizar o desempenho dos sistemas hidráulicos (SANTOS, 2013).

3.3.1 Cavitação em vórtices

3.3.1.1 Vórtice de núcleo

O fenômeno de cavitação em vórtice no núcleo é bastante comum em usinas hidrelétricas que utilizam turbinas do tipo Francis, principalmente pelo fato que o rotor da turbina Francis não possui pás móveis, ou seja, o fenômeno pode ser controlado de forma que o fluxo seja adequado nas condições de operação, existindo o fenômeno em sobrecargas e cargas parciais. Em usinas hidrelétricas que utilizam turbinas do tipo Kaplan, o fenômeno de cavitação em vórtice no núcleo é pouco comum, devido ao fato de ser possível alterar o ângulo de entrada e saída nas pás do rotor. A Figura 15 mostra um vórtice de núcleo em uma turbina Francis.

Figura 15 – Cavitação em vórtice em uma turbina do tipo Francis.



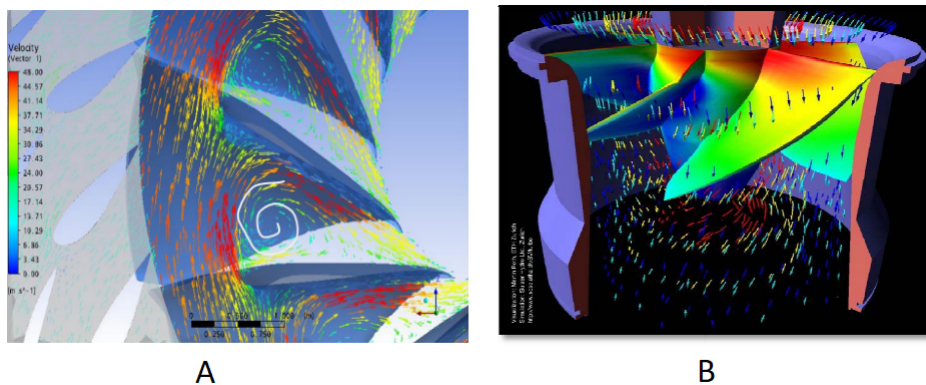
Fonte: (SANTOS, 2013).

A cavitação em vórtice no núcleo pode ser encontrada quando a turbina opera em cargas parciais ($\frac{\phi}{\phi\lambda} < 1$) ou ($\frac{\phi}{\phi\lambda} > 1$) que significa que a turbina está operando em sobrecarga.

3.3.1.2 Vórtice nas pás

Vórtice nas pás acontecem nas turbinas do tipo Francis e nas turbinas do tipo Kaplan, onde vórtices são formados nas pás do rotor devido ao aumento significativo na velocidade do escoamento que é dado conforme a abertura do distribuidor e pela rotação do rotor. Os vórtices são causados devido a grande velocidade associada à aderência do fluido com as pás, ao qual contribui na formação de regiões de baixa pressão, que por sinal é uma potencial região de cavitação. A Figura 16(A) representa o vetor de velocidade que está atuando no rotor de uma turbina do tipo Francis, a Figura 16(B) representa o perfil de pressão associado a uma turbina do tipo Kaplan.

Figura 16 – (A) Vetor de velocidade no rotor de uma turbina do tipo Francis. (B) Perfil de pressão associado a uma turbina Kaplan.



Fonte: (SANTOS, 2013).

A cavitação nas pás pode ser identificada em cargas parciais, quando ($\frac{\phi}{\phi\lambda} < 1$), ou em cargas extremamente altas, quando ($\frac{\phi}{\phi\lambda} \gg 1$).

3.3.1.3 Bordo de ataque

Fatores podem influenciar a formação de bolhas no bordo de ataque das pás, tais como:

- Irregularidades no bordo de ataque;
- Porosidade na superfície da pá;
- Falha de projeto da pá;

Quando tem-se este tipo de cavitação, o potencial erosivo é alto e tem a possibilidade de ocasionar flutuações de pressão. A Figura 17 mostra um exemplo de cavitação do bordo de ataque de uma pá.

Figura 17 – Exemplo de cavitação no bordo de ataque de uma pá.



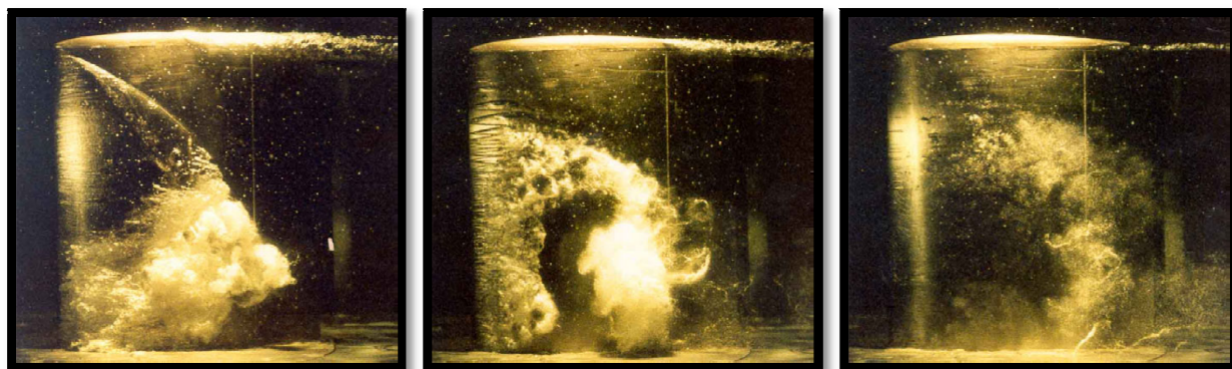
Fonte: (SANTOS, 2013).

O fenômeno acontece quando a altura de queda é maior que a de projeto, ou seja, quando $(\frac{\psi}{\psi\lambda} > 1)$ ou quando a altura de queda é menor que a de projeto, quando $(\frac{\psi}{\psi\lambda} < 1)$.

3.3.1.4 Bolhas em movimento

Quando provocada, pode provocar um grande efeito erosivo na máquina. No início é formado bolhas e em determinadas condições, há descolamento no fluido o que ocasiona jatos, que geram interação coletiva entre as bolhas e leva a um colapso praticamente instantâneo das bolhas ao longo de toda a superfície. Provoca ondas de choque que são extremamente prejudiciais ao equipamento. Na Figura 18 é possível perceber a dinâmica de uma formação de bolhas em movimento, onde tem o surgimento, evolução e desaparecimento.

Figura 18 – Dinâmica do fenômeno de cavitação por bolhas em movimento.



Fonte: (SANTOS, 2013).

A cavitação por bolhas em movimento pode ser descrita quando a turbina está operando em regime de sobrecarga, ou seja, quando a vazão é muito maior do que a vazão projetada ($\frac{\phi}{\phi_{\lambda}} \gg 1$).

A detecção da cavitação através das equações 4 e 3 podem dizer o tipo de cavitação localizada está acontecendo, o que não é possível através da detecção de cavitação pelo método do coeficiente de Thoma. Entretanto, a eficiência como um dos parâmetros faz com que esse método não seja muito confiável, já que uma variação notória em relação a eficiência é apenas vista em estados avançados de cavitação.

O choque das bolhas na estrutura do hidrogerador forma ruídos que podem ser medidos através de sensores acústicos. A medição de cavitação através de sensores de emissão acústicas é ainda um dos métodos mais eficaz em relação ao diagnóstico desse fenômeno.

4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

A análise de vibração é uma técnica muito utilizada e não invasiva para a detecção de falhas e defeitos em turbinas, pois permite identificar forças extras que afetam no nível global de vibração da máquina. O monitoramento da vibração da turbina consiste na descoberta de mudanças de frequência e amplitude da vibração. Pode ser realizada uma análise no espectro do sistema como um todo, com o objetivo de obter as características de cada componente de forma individual.

4.1 OPERAÇÕES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

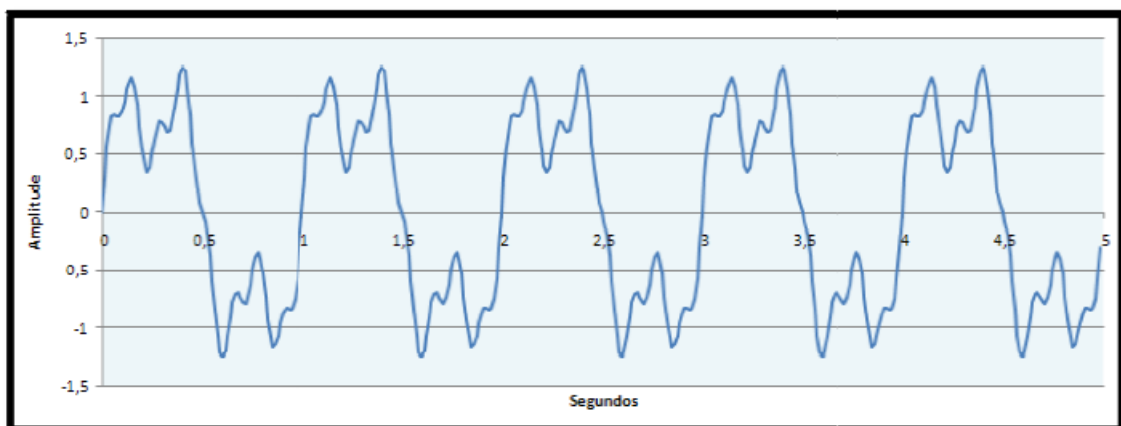
4.1.1 Espectro

Os sinais brutos captados pelos sensores, antes do processamento do seu sinal, os dados estão no domínio do tempo. Para a análise de vibração é necessário uma ferramenta que transforme o sinal no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Para isso uma Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform) pode ser aplicada. Para um sinal com N amostras, é possível calcular a FFT de forma que

$$\frac{1}{N} \sum_{X=0}^{N-1} f(X) e^{-j2\pi X/N}. \quad (5)$$

A função do espectro é diferenciar e identificar todas as frequências presentes em um determinado sinal. A Figura 19 apresenta um sinal com um período de 1 segundo mas frequências distintas.

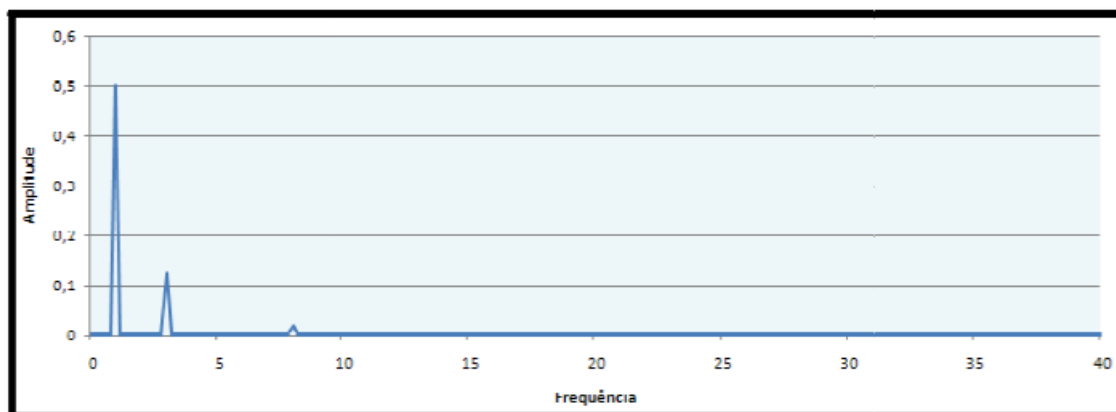
Figura 19 – Sinal com período de 1 segundo.



Fonte: (SANTOS, 2013).

A Figura 20 apresenta o espectro do sinal da Figura 19, onde é possível perceber a identificação de frequências que compõe o sinal.

Figura 20 – Sinal após a aplicação da FFT.

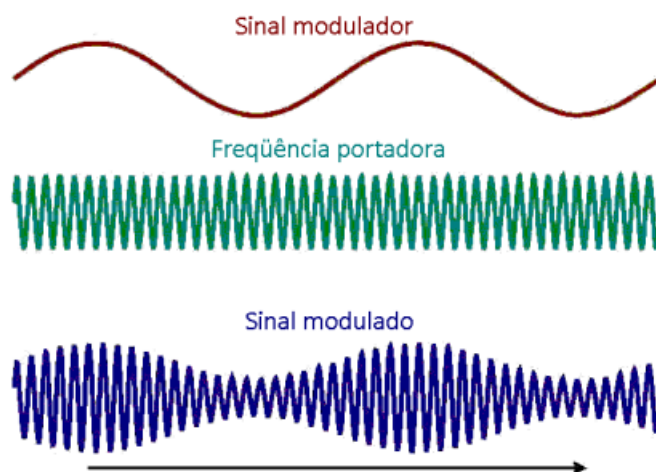


Fonte: (SANTOS, 2013).

4.1.2 Modulação e demodulação

Ao capturar um sinal no domínio do tempo pode ser que contenha uma modulação, dois tipos de sinais podem aparecer na análise conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Exemplo de um sinal modulado e seus componentes.



Fonte: (SANTOS, 2013).

A modulação de uma amplitude consiste em aplicar uma onda de alta frequência chamada de sinal portador, a sua amplitude varia em uma frequência mais baixa que é chamada de sinal modulador. A frequência portadora está relacionada normalmente com as frequências naturais de vibração.

A demodulação é o processo o contrário, ao qual permite a obtenção das informações das frequências moduladoras. No processo é aplicada a transformada de Hilbert, de forma que

$$Hi(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{1}{t-\tau} d\tau. \quad (6)$$

Deste modo, é obtido um sinal complexo, definido como

$$X(t) = x(t) - jHi(x(t)), \quad (7)$$

onde $x(t)$ = sinal modulado, $Hi(x(t))$ = sinal portador e $X(t)$ = sinal modulador.

4.1.3 Densidade Espectral de Potência

Densidade Espectral de Potência (PSD) é definida como a densidade de potência de um sinal por unidade de banda de frequência. Resulta em um sinal de potência média (V^2) por uma faixa de frequência (Hz).

4.2 IDENTIFICAÇÃO DE CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

De acordo com (ESCALER *et al.*, 2006), (SANTOS, 2013), (GOSMANN *et al.*, 2020) e (JÚNIOR, 2015), os métodos para detecção de cavitação em turbinas é realizados através da leitura de sinais acústicos, de sensores de emissão acústica posicionados na estrutura da turbina.

A detecção de cavitação a partir de vibrações acústicas é uma abordagem eficaz devido às propriedades únicas do fenômeno. A cavitação cria bolhas de vapor que se formam e colapsam rapidamente, criando pulsos de pressão e ondas de choque. Essas mudanças bruscas de pressão e colisões de bolhas de vapor geram vibrações acústicas que podem ser detectadas por sensores de emissão acústica.

A análise dessas vibrações acústicas permite identificar a presença e a intensidade da cavitação e fornece informações valiosas para a manutenção e monitoramento de equipamentos hidráulicos. Além disso, a detecção de cavitação por meio de vibrações acústicas pode ser realizada remotamente, sem a necessidade de acesso físico ao aparelho, tornando-se uma técnica conveniente e eficiente.

4.2.1 Processamento do sinal

A partir do trabalho de (SANTOS, 2013), alguns procedimentos são realizados para o processamento do sinal.

- Média RMS da amostra do sinal de vibração.

- Filtragem do sinal, com o objetivo de remover faixas de frequência que não tem contribuição para o diagnóstico.
- Demodulação do sinal, utilizando a transformada de Hilbert, assim sendo possível identificar o sinal modulador, que é o resultado das vibrações mecânicas.
- Densidade espectral da potência (PSD) do sinal demodulado, com o objetivo de quantificar a energia do sinal em determinadas faixas de frequência.

A análise do espectro do envelope, permite identificar se tem alguma frequência moduladora associada com a dinâmica das bolhas. A cavitação é identificada quando a frequência do envelope é igual as frequências hidrodinâmicas. De acordo com (GOSMANN *et al.*, 2020), uma indicação de ocorrência de cavitação, é quando tem-se amplitudes na frequência de passagem nas palhetas ($f_{palhetas}$) e amplitudes na frequência de passagem nas pás (f_{pas}). É possível calcular as frequências usando as equações 8 e 9.

$$f_{palhetas} = f_{turb} \cdot n_{palhetas}, \quad (8)$$

$$f_{pas} = f_{turb} \cdot n_{pas}. \quad (9)$$

Onde

- f_{turb} representa a frequência nominal da turbina.
- $n_{palhetas}$ representa o número de palhetas.
- n_{pas} representa o número de pás.

As frequências hidrodinâmicas relacionadas aos tipos de cavitação, são indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre os tipos de cavitação e frequências hidrodinâmicas.

Tipo de cavitação	Frequências
Bordo de ataque	f_{pas} e $f_{palhetas}$
Bolhas em movimento	f_{pas}
Vórtice nas pás	f_{pas}
Vórtice de núcleo	0,2 a 0,4 vezes f_{turb}

Fonte: (GOSMANN *et al.*, 2020).

5 AQTECH POWER PROGNOSTICS

A AQTech Power Prognostic é uma empresa que tem como base tecnológica o desenvolvimento de soluções de monitoramento e diagnóstico em ativos de energia elétrica. A empresa presta serviços e oferece soluções de Software e Hardware capazes de diagnosticar futuras falhas em ativos elétricos, visando o aumento de produtividade e lucratividade para os clientes, onde atualmente possui mais de 10 GW de potência instalada monitorada e com mais de 100 clientes espalhados pelo Brasil e América Latina.

5.1 SOLUÇÕES DE SOFTWARE

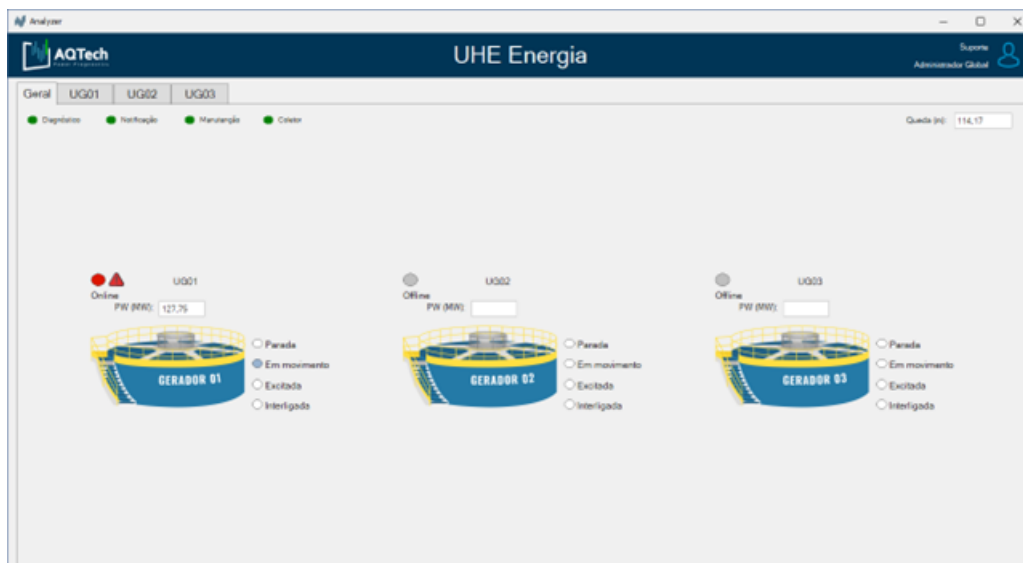
Neste capítulo serão apresentados as soluções de software desenvolvidas pela empresa, e como as soluções se enquadram no desenvolvimento do diagnóstico proposto.

5.1.1 Analyzer

O Analyzer é a principal solução desenvolvida pela empresa, com foco na monitoração de unidades geradoras hidrelétricas. Essa ferramenta abrangente proporciona aos usuários uma visão detalhada e em tempo real do desempenho das unidades geradoras, permitindo uma operação mais eficiente e confiável. É um software que tem várias telas e funcionalidades, contendo as informações e dados relevantes do ativo para auxiliar no agendamento de manutenção.

A Figura 22 apresenta a tela principal do Analyzer. É possível perceber que é disponibilizado ao usuário informações gerais sobre as unidades geradoras, tal como status dos serviços e indicadores de nível de água.

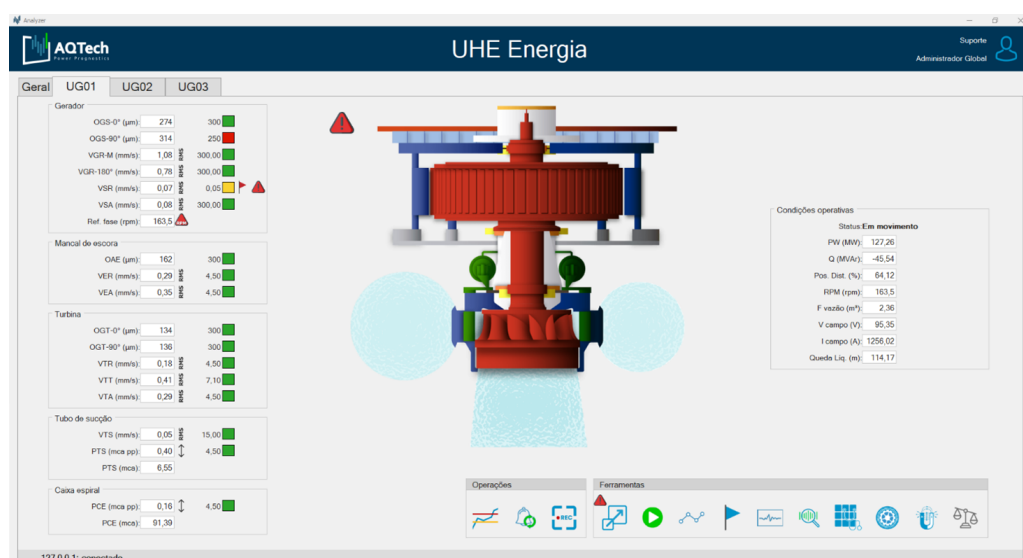
Figura 22 – Página principal do Analyzer.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 23 mostra a página da unidade geradora, é nela onde será encontrado informações detalhadas sobre a unidade geradora. É possível verificar as condições de cada sinal configurado.

Figura 23 – Página da unidade geradora do Analyzer.



Fonte: Arquivo pessoal.

Uma ferramenta da unidade geradora é a matriz de diagnósticos, é nela onde tem-se as informações dos cálculos dos diagnósticos configurados. A Figura 24 mostra a tela principal da matriz de diagnósticos.

Figura 24 – Janela de matriz de diagnóstico do Analyzer.



Fonte: Arquivo pessoal.

Esta janela é dividida em três áreas principais:

- Resumo de cada diagnóstico configurado, destacado em laranja;
- Tabela de diagnóstico das frequências notáveis, destacada em amarelo;
- Informações gerais, destacado em verde;

Ao clicar no botão interrogação, no canto superior direito é aberto a janela que é possível visualizar na Figura 25. As cores presentes nos botões representam o estado do diagnóstico.

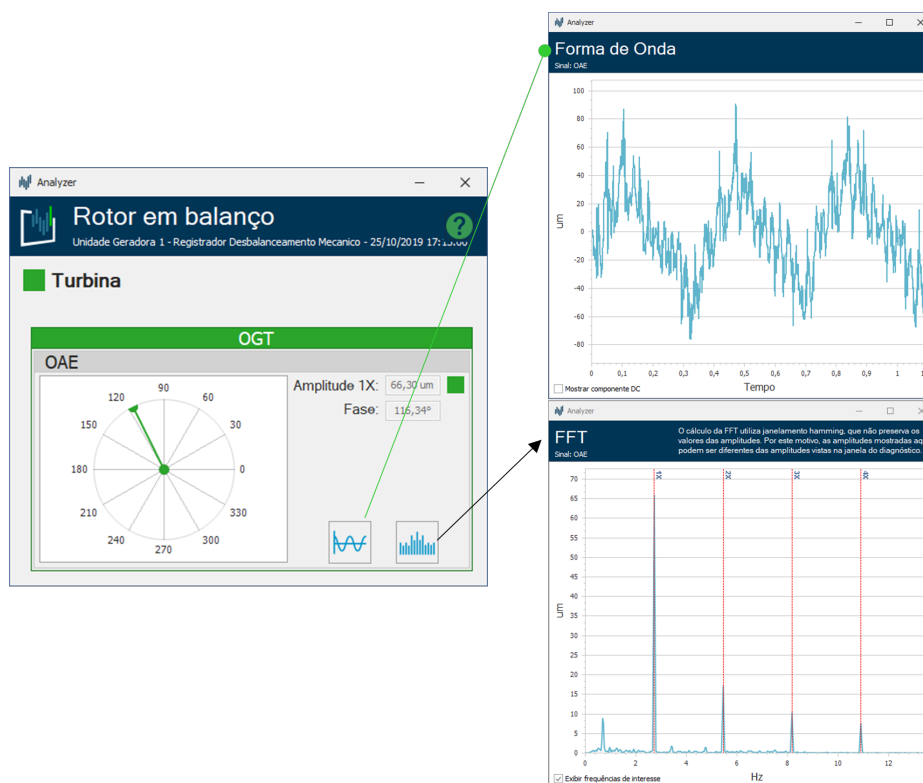
Figura 25 – Informações sobre o estado do diagnóstico.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao clicar em um botão de diagnóstico, é aberto uma janela com maiores informações do diagnóstico calculado, como exemplifica a Figura 26.

Figura 26 – Diagnóstico de rotor em balanço.

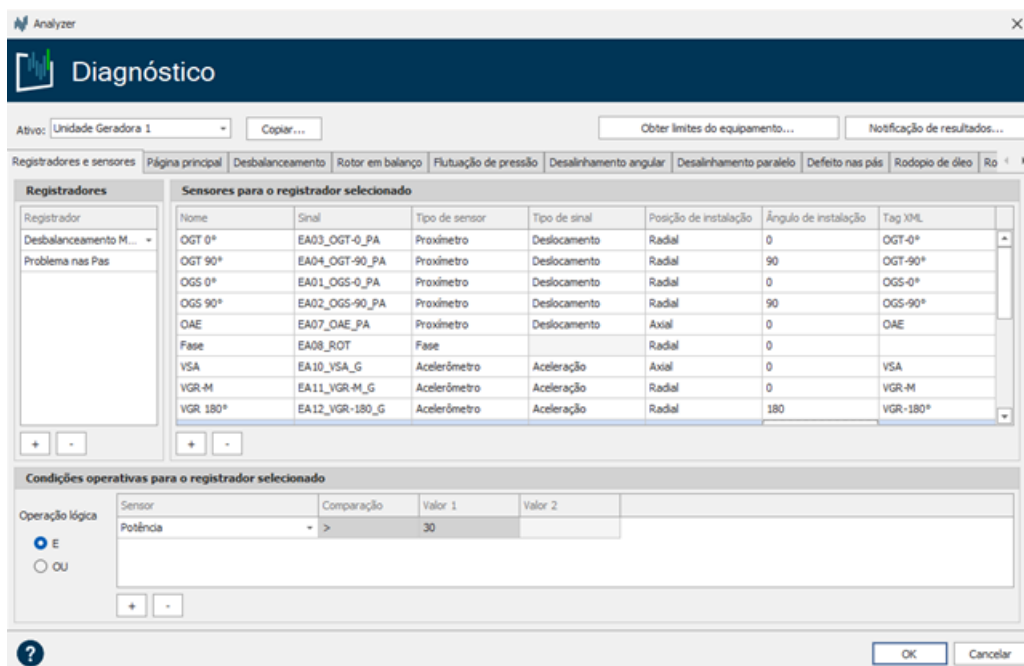


Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 26 apresenta um diagnóstico de rotor em balanço. A janela de resultados deste diagnóstico apresenta as informações dos mancais e sensores configurados, a cor do mancal funciona de acordo com o resultado do diagnóstico, explicado na Figura 25. No canto inferior direito tem botões que representam o sinal bruto, do domínio do tempo, além do espectro FFT.

O Analyzer disponibiliza uma janela de configuração de cada diagnóstico. A Figura 27 apresenta a interface principal de configuração dos diagnósticos, é possível ver no quadrante superior da janela, diagnósticos disponíveis para parametrização.

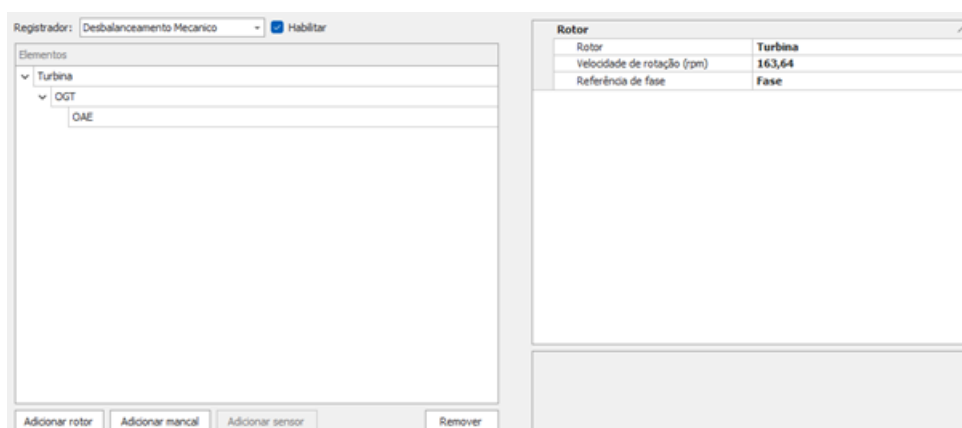
Figura 27 – Janela de configuração de diagnósticos.



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 28 mostra a configuração de um diagnóstico de rotor em balanço, onde oferece a possibilidade de configurar o diagnóstico tomando como base rotores, mancais e o limite de sensores do tipo proxímetro configurados em posição axial.

Figura 28 – Janela de configuração de um diagnóstico de rotor em balanço.



Fonte: Arquivo pessoal.

Os elementos podem ser configurados de acordo com as Tabelas 2 e 3

Tabela 2 – Parâmetros configuráveis pelo rotor.

Turbina	
Parâmetro	Descrição
Nome	Nome ao qual ao qual o rotor será identificado
Velocidade de rotação	Se refere à velocidade nominal de rotação do eixo da máquina
Referência de fase	Sensor responsável pela informação da rotação da turbina
Sensor	Sensor responsável por fornecer os dados para o cálculo do diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 3 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

Sensor	
Parâmetro	Descrição
Sensor	Sensor responsável por fornecer os dados para o cálculo do diagnóstico
Limite AB	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está boa
Limite BC	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está médio
Limite CD	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está ruim

Fonte: Arquivo pessoal.

Como foi possível perceber, é o Analyzer que possibilita o usuário tanto de configurar um diagnóstico, quanto visualizar. Desta maneira, o módulo do software que terá como objetivo permitir o usuário configurar o diagnóstico de cavitação e visualizar os resultados do cálculo do diagnóstico, será implementado no Analyzer.

5.1.2 DiagnosticService

O DiagnosticService é um software que atua como um serviço, é nele onde são realizados os cálculos de cada diagnóstico a partir de amostras dos dados dos sensores salvos na base de dados, os diagnósticos que serão computados serão os configurados pelo Analyzer. A Figura 29 mostra um exemplo de um console do DiagnosticService após realizar os cálculos para o diagnóstico.

Figura 29 – Exemplo do DiagnosticService no console.

```
C:\Users\felipe.rosa\Desktop\5_Estagio_dev\diagnosticService\bin\Debug\DiagnosticService.exe
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 0.33X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 0.5X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 1X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 1.5X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 2X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 2.5X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 3X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 3.5X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:38 > Faixa de operação em 4X: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Faixa de operação: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Finalizado
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Diagnóstico: Flutuação de Pressão
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Processando sensor de pressão: PCE
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Tipo do sensor: Pressão
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Tipo do sensor: Comum
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Valor da queda d'água, 0,00 m, parece estar errado. O diagnóstico não será
executado.
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Faixa de operação: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Processando sensor de pressão: PTS
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Tipo do sensor: Pressão
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Tipo do sensor: Comum
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Valor da queda d'água, 0,00 m, parece estar errado. O diagnóstico não será
executado.
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Faixa de operação: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Faixa de operação: A
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Finalizado
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Diagnósticos foram executados com sucesso.
[Diagnostic] - 30/10/2022 17:23:39 > Aguardando novos registros...
```

Fonte: Arquivo pessoal.

Para o diagnóstico de cavitação proposto, o DiagnosticService servirá como o serviço que irá calcular os resultados de cavitação com base nos parâmetros configurados pelo Analyzer e dados dos sensores salvos na base de dados.

5.1.3 PostInstall

O PostInstall é o software de configuração da base de dados do sistema, a comunicação de todos os softwares já explicados anteriormente é realizada pela base de dados. A Figura 30 apresenta a interface principal do PostInstall.

Figura 30 – Interface do software PostInstall.

AQTech

Empresa e usuário
Cadastro da empresa e do usuário administrador do sistema.

Ajude a melhorar a aplicação em caso de problemas e falhas. Identifique esse fornecimento e usuário do sistema. Para fazer isso, preencha abaixo as informações da empresa e crie um usuário para ser o administrador do sistema. Os dados serão usados para contato e suporte.

Empresa

Nome:

CNPJ:

Usuário

Nome:

Email:

Senha: Confirme a senha:

Telefone:

Versão 3.20.4

< Voltar Avançar > Cancelar

Fonte: Arquivo pessoal.

O PostInstall terá o objetivo de configurar na base de dados, todas as tabelas e relações propostas para o diagnóstico de cavitação.

5.2 SOLUÇÕES DE HARDWARE

Nesta seção será apresentado as soluções de hardware destinada a captação dos dados de sensores;

5.2.1 VibraOne

O hardware utilizado é fabricado pela AQTech, chamado de VibraOne, é uma central de processamento de dados com 24 entradas analógicas e 4 entradas digitais. As entradas analógicas coletam os sinais do sensor conectado na sua porta. O hardware opera em conjunto com os demais softwares advindos da AQTech, de forma a coletar, processar e entregar os sinais de forma clara a serem interpretados posteriormente pelos demais softwares. A Figura 31 mostra um VibraOne.

Figura 31 – VibraOne.



Fonte: (VIBRAONE..., s.d.).

5.2.2 Sensor

Os sensores acústicos utilizados para obtenção dos sinais, são PCB Piezotronics 378B02, como ilustrado na Figura 32.

Figura 32 – Sensor acústico utilizado para leitura de sinais sonoros.



Fonte: (PCB PIEZOTRONICS, s.d.).

As especificações foram retiradas do fabricante, e são dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do sensor acústico.

Especificações		
Especificação	Unidade	Valor
Diâmetro	in(mm)	$\frac{1}{2}$ (12)
Sensibilidade	$\frac{mV}{Pa}$ (dB)	50 (-26)
Faixa de frequência	Hz	3,75 - 20000

Fonte: (ATEC, s.d.).

A frequência de aquisição utilizada no sensor de emissão acústica é de 20 KHz.

5.3 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

No que tange a programação do diagnóstico, serão apresentadas as ferramentas utilizadas.

5.3.1 Bitbucket

O Bitbucket é uma ferramenta de hospedagem de códigos e colaboração, com o objetivo de compartilhamento de dados, versionamento de códigos e o principal que é a criação do repositório dos projetos. Nele é possível criar ramos para implementação de certas funcionalidades para o Software de formas separadas, e assim sendo mesclada no código principal, as principais funcionalidades são:

- **Branch:** Um ramo separado onde será desenvolvida a tarefa designada, seja uma melhoria, nova implementação ou correção de bug.
- **Commit/pull:** Um commit é ação que resulta no envio do material contido na branch, salvando primeiramente localmente e logo após o pull, as modificações são aplicadas na branch de forma online.
- **Pull request:** O pull request é uma requisição para que a branch possa ser mesclada no ramo principal do Software.
- **Merge:** Ação de mesclagem da branch após a realização do pull request.

5.3.2 C#

Todos os Softwares descritos acima são desenvolvidos pela AQTech através da linguagem de programação C#. O C# é uma linguagem muito popular e extremamente robusta, ela é linguagem principal do .NET Framework, que é um framework desenvolvido pela Microsoft. Esta linguagem veio para facilitar o processo de desenvolvimento e tem inúmeros recursos que proporcionam grande produtividade, como por exemplo orientação à objetos. Aqui pode ser visto a sintaxe simples de uma aplicação com C#.

```
1 class Exemplo
2 {
3     static void Main()
4     {
5         for (int i = 1; i <= 5; i++)
6         {
7             Console.WriteLine(i);
8         }
9     }
```

10 }


Listing 5.1 – Exemplo do código em c#

Onde *for* é um laço de repetição que a cada iteração soma a variável "i", e *Console.WriteLine(i)* imprime na tela o valor da variável "i".

5.3.3 Visual Studio

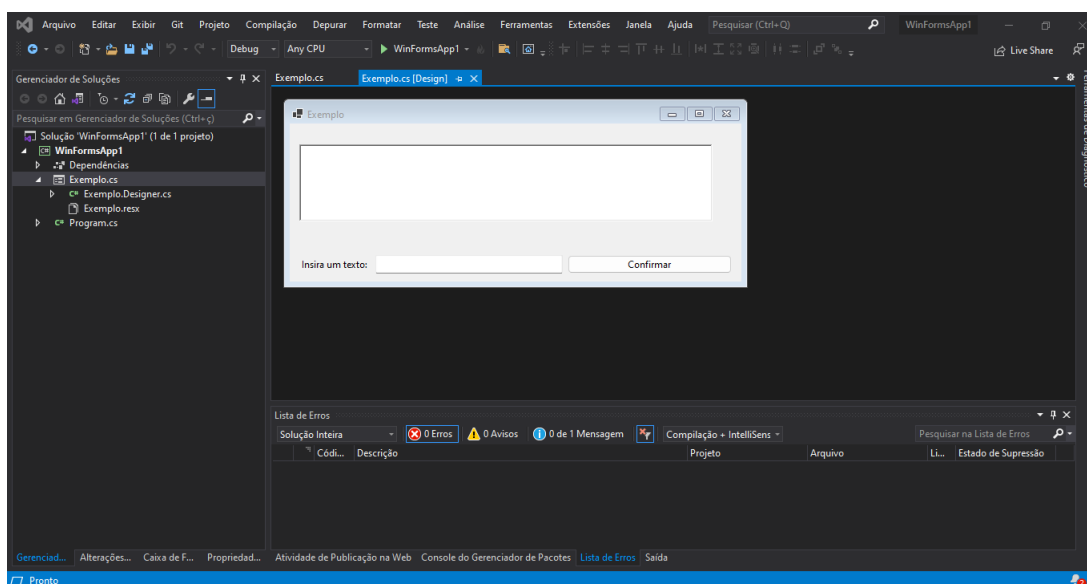
O Visual Studio é uma IDE (*Integrated Development Enviropent*). É basicamente um software editor de texto que possibilita o usuário a desenvolver os seus códigos em uma determinada linguagem de programação, e só então o código é traduzido em comandos que podem ser lidos por computadores. Por exemplo, no Visual Studio é possível editar, depurar, testar, controlar versão e entre tantas outras funcionalidades. Atualmente a principal linguagem de programação mais utilizada no Visual Studio é c# com .NET Framework.

5.3.4 Windows Forms

O Windows Forms é uma estrutura de interface entre o usuário e a aplicação, onde permite ao usuário criar aplicativos de forma interativa. A principal funcionalidade é a facilidade de posicionar os componentes de controle visual, sendo que é basicamente arrastar e soltar, facilitando a criação de aplicativos.

Os aplicativos do Windows Forms podem acessar o hardware local e o sistema de arquivos do computador em que o aplicativo está em execução, além de trabalhar também de forma online com comunicação com a base de dados. A Figura 33 representa um exemplo de uma aplicação sendo criada, com controles de texto e botões.

Figura 33 – Exemplo de uma aplicação sendo criada pelo Windows Forms no Visual Studio.



Fonte: Arquivo pessoal.

Após a implementação da interface gráfica, é possível configurar os eventos de cada componente, nesse caso o único evento criado foi o de clique no botão "Confirmar", onde cada vez que for realizado o clique a caixa de texto superior deverá ser preenchida com o texto inserido na caixa de texto ao lado do botão, o código em C# para realizado no Visual Studio é visto.

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.ComponentModel;
4 using System.Data;
5 using System.Drawing;
6 using System.Linq;
7 using System.Text;
8 using System.Threading.Tasks;
9 using System.Windows.Forms;
10
11 namespace WinFormsApp1
12 {
13     public partial class Exemplo : Form
14     {
15         public Exemplo()
16         {
17             InitializeComponent();
```

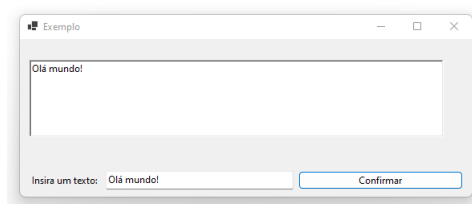


```
18     }
19
20     private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
21     {
22         richTextBox1.Text = textBox1.Text;
23     }
24 }
25 }
```

Listing 5.2 – Exemplo do código em c#

O resultado do aplicativo gerado, é representado pela Figura 34, onde é possível ver que foi digitado "Olá mundo" na caixa de texto, e após pressionar o botão, a caixa de texto superior foi atualizada.

Figura 34 – Resultado da aplicação implementada com Windows Forms no Visual Studio.



Fonte: Arquivo pessoal.

5.3.5 PostgreSQL

Atualmente, é indiscutível a importância dos bancos de dados em aplicações, assim, o PostgreSQL é uma ferramenta de gerenciamento de banco de dados, seja na criação de elementos ou no gerenciamento de aplicações.

O PostgreSQL tem a função de gerenciar os dados salvos no banco de maneira organizada e eficaz, seja gravando ou lendo todas as informações salvas nos compartimentos. Por meio desse sistema, é possível executar consultas de maneira simples sem precisar acessar diretamente o banco de dados. É visto um exemplo de linhas de código utilizada para criação de uma tabela pelo PostgreSQL.

```
1 CREATE TABLE playground (
2     equip_id serial PRIMARY KEY,
3     type varchar (50) NOT NULL,
4     color varchar (25) NOT NULL,
5     location varchar(25) check (location in ('north', 'south', '
        west', 'east', 'northeast', 'southeast', 'southwest', '
        northwest'))),
```

```
6     install_date date
7 );
```

Listing 5.3 – Exemplo de linhas de código para inserir uma tabela no PostgreSQL

6 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Neste capítulo, serão explicadas as atividades desenvolvidas para a criação e implementação do módulo de software destinado ao cálculo de cavitação. O desenvolvimento desse módulo envolveu várias etapas essenciais para garantir a sua eficácia e funcionalidade.

6.1 MODELAGEM DO SOFTWARE

A modelagem de software desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de sistemas de software eficientes e confiáveis. Ela envolve a criação de representações abstratas do software, que capturam os requisitos, estrutura, comportamento e interações do sistema. Esta seção tem como objetivo expor todas as etapas de concepção e modelagem do software destinado ao cálculo de um diagnóstico de cavitação.

6.1.1 Requisitos

A implementação do módulo de software para calcular um diagnóstico de cavitação requer o cumprimento dos seguintes requisitos funcionais.

Primeiramente, o software Analyzer precisa ser configurável de forma que todos os parâmetros importantes para o diagnóstico sejam disponíveis ao usuário. A Tabela 5 mostra os requisitos para a configuração do diagnóstico.

F1 - Configuração do diagnóstico (Analyzer).				Oculto ()	
Descrição: O sistema deve ser capaz de permitir o usuário configurar os parâmetros para o diagnóstico.					
Requisitos Não-Funcionais					
Nome	Restrição	Prioridade	Obrigatório	Permanente	Atingido
NF1.1 - Apresentar os dados a serem configurados de forma clara	Os dados disponíveis a ser configurados pelo usuário devem ser representados de maneira clara e de fácil interpretação.	Alta	X	X	Sim
NF1.2 - Guardar a configuração no banco de dados	Manter no banco de dados as configurações realizadas pelo usuário, a fim de que seja possível a realização de consultas dessas informações para o cálculo do diagnóstico posteriormente.	Alta	X	X	Sim

Tabela 5 – Requisitos funcionais e não funcionais para a configuração no Analyzer.

Para a visualização do diagnóstico, o software deve ser capaz de apresentar

de forma clara e objetiva o resultado do cálculo de cavitação. A tabela 6 apresenta os requisitos funcionais e não funcionais destinados a visualização do cálculo do diagnóstico de cavitação no Analyzer.

F2 - Visualização do diagnóstico (Analyzer).					Oculto ()
Descrição: O sistema deve ser capaz de permitir o usuário visualizar o diagnóstico.					
Requisitos Não-Funcionais					
Nome	Restrição	Prioridade	Obrigatório	Permanente	Atingido
NF2.1 - Apresentar o resultado do diagnóstico de maneira clara e de fácil interpretação.	O usuário deve analisar o resultado diagnóstico de maneira simples e objetiva.	Alta	X	X	Sim

Tabela 6 – Requisito funcional para a visualização no Analyzer.

Para o serviço de diagnóstico, o software precisa ser robusto e preciso no cálculo do diagnóstico, permitindo análise espectral (Tabela 7), detecção de padrões de cavitação (Tabela 8) e classificação da identificação da intensidade (Tabela 9).

F3 - Análise espectral (DiagnosticService).					Oculto ()
Descrição: Deve ser realizada a análise espectral dos sinais para identificar frequências-chave.					
Requisitos Não-Funcionais					
Nome	Restrição	Prioridade	Obrigatório	Permanente	Atingido
NF3.1 - Confiabilidade nos dados capturados.	Os dados devem vir processados de forma a serem confiáveis para o cálculo e análise espectral.	Alta	X	X	Sim

Tabela 7 – Requisitos funcionais e não funcionais para a análise espectral.

F4 - Detecção de padrões de cavitação (DiagnosticService).					Oculto ()
Descrição: O software deve identificar padrões característicos de cavitação nos sinais.					
Requisitos Não-Funcionais					
Nome	Restrição	Prioridade	Obrigatório	Permanente	Atingido
NF4.1 - Exatidão dos cálculos de espectro.	Os espectros capturados devem ser exatos para que a detecção de padrões seja exata.	Alta	X	X	Sim

Tabela 8 – Requisitos funcionais e não funcionais para a detecção de padrões de cavitação.

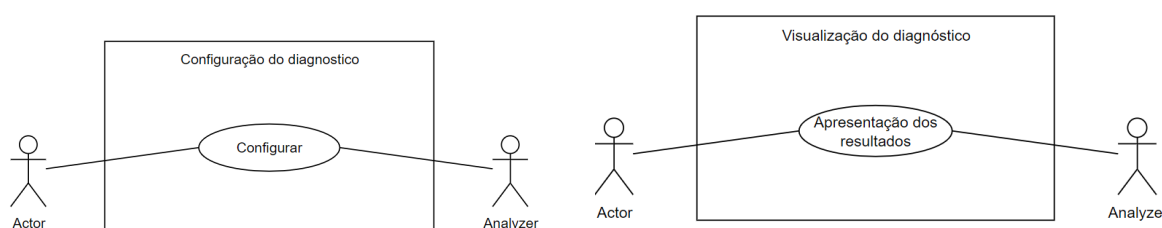
F5 - Classificação da intensidade (DiagnosticService).				Oculto ()	
Descrição: Deve ser possível classificar a intensidade da cavitação com base nos dados analisados.					
Requisitos Não-Funcionais					
Nome	Restrição	Prioridade	Obrigatório	Permanente	Atingido
NF5.1 - Exatidão dos padrões de cavitação captados.	Os padrões de cavitação devem ser certos para que a classificação da intensidade esteja certa.	Alta	X	X	Sim

Tabela 9 – Requisitos funcionais e não funcionais para a classificação da intensidade de cavitação.

6.1.2 Casos de uso

Com base nos requisitos, diagramas de casos de usos foram ser desenvolvidos, onde fica mais fácil de visualizar as informações relevantes no processo à ser desenvolvido.

A Figura 35(a) e Figura 35(b) têm papéis distintos e complementares.



(a) Casos de uso para configuração no Analyzer. (b) Casos de uso para visualização no Analyzer.

Figura 35 – Casos de usos para os Softwares.

Na Figura 35(a), pode-se visualizar o diagrama de casos de uso, nos mostra que o usuário é encarregado de configurar os parâmetros importantes e relevantes para o diagnóstico de cavitação, por outro lado, o Analyzer precisa permitir a apresentação dos parâmetros de forma concisa. A configuração desempenha um papel fundamental na definição e ajuste dos valores que controlam o funcionamento do sistema. Esses parâmetros podem incluir turbinas e sensores.

Configurar corretamente os parâmetros é essencial para o desempenho adequado do sistema. Valores incorretos podem levar a comportamentos indesejados, instabilidade ou até mesmo falhas no diagnóstico. Portanto, para realização da configuração dos parâmetros de cavitação, deve-se ter um conhecimento aprofundado dos componentes do sistema.

A Figura 35(b), encarregada de mostrar que o usuário tem a possibilidade de visualizar os resultados, assim, permitindo ao usuário a tarefa de analisar e interpretar as informações geradas pelo sistema. O Analyzer é responsável por coletar e apresentar os dados de maneira compreensível e significativa. Envolve a criação de interfaces

gráficas. A visualização dos resultados é importante para monitorar o desempenho do diagnóstico, identificar problemas e tomar decisões.

Os parâmetros para configuração são mostrados nas tabelas 10 e 11. Já a Figura 35(b) é responsável por visualizar os resultados do cálculo do diagnóstico, proporcionando informações relevantes para a análise e tomada de decisões.

Tabela 10 – Parâmetros configuráveis pela turbina.

Turbina	
Parâmetro	Descrição
Nome	Nome ao qual a turbina será identificada
Referência de fase	Sensor responsável pela informação da rotação da turbina
Número de pás	Número de pás da turbina
Número de palhetas	Número de palhetas diretrizes da turbina
Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de rotação nominal da turbina em rpm
Sensor	Sensor responsável por fornecer os dados para o cálculo do diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 11 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

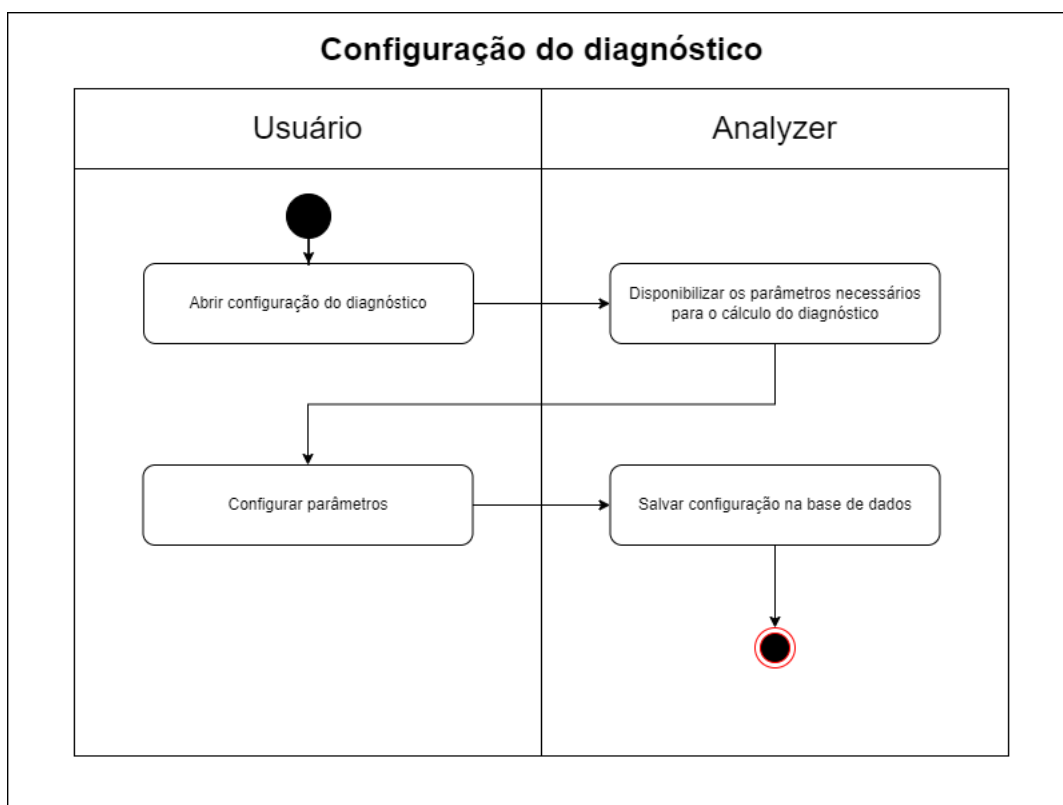
Turbina	
Parâmetro	Descrição
Sensor	Sensor responsável por fornecer os dados para o cálculo do diagnóstico
Limite AB	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está boa
Limite BC	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está médio
Limite CD	Limite definido para decidir que a faixa de operação do sensor está ruim

Fonte: Arquivo pessoal.

6.1.3 Diagrama de atividades

A Figura 36 representa o diagrama de atividades de um módulo de software específico projetado para configurar os parâmetros de cavitação.

Figura 36 – Diagrama de atividades para a configuração do diagnóstico no Analyzer.



Fonte: Arquivo pessoal.

O diagrama de atividades é uma representação gráfica que mostra as etapas sequenciais envolvidas em um processo. No contexto desse módulo de software, o diagrama de atividades ilustra as ações que um usuário ou operador deve seguir para configurar os parâmetros relacionados à cavitação.

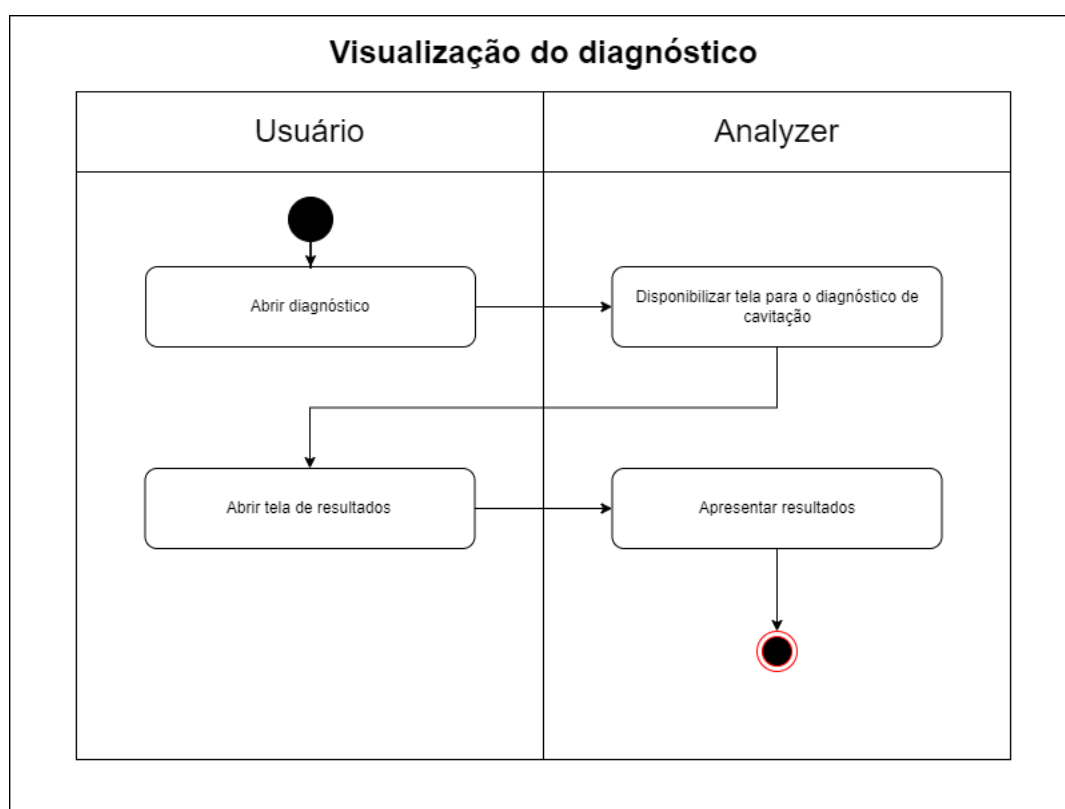
O diagrama de atividades representado pela Figura 36 pode incluir várias atividades, como:

- Iniciar o módulo de configuração de parâmetros de cavitação;
- Definir os parâmetros de operação do sistema, já definidos pelas tabelas 10 e 11;
- Confirmar as configurações e aplicá-las ao sistema;

Ao utilizar esse módulo de software, os usuários podem configurar os parâmetros de cavitação de acordo com as características específicas do sistema, garantindo um controle adequado e evitando problemas decorrentes desse fenômeno. A representação visual do diagrama de atividades auxilia na compreensão e no uso eficiente do módulo de configuração, simplificando o processo de ajuste dos parâmetros relacionados à cavitação.

A Figura 37 representa o diagrama de atividades do módulo do Analyzer projetado para permitir o usuário visualizar os resultados do cálculo do diagnóstico de cavitação.

Figura 37 – Diagrama de atividades para a visualização dos resultados do diagnóstico no Analyzer.



Fonte: Arquivo pessoal.

No diagrama de atividades representado pela Figura 37, são mostradas as ações que um usuário ou operador deve seguir para visualizar e compreender os resultados obtidos a partir do diagnóstico de cavitação.

O diagrama de atividades pode incluir várias atividades, tais como:

- Iniciar o módulo de visualização de resultados do diagnóstico de cavitação;
- Carregar os dados ou informações do sistema que foram coletados durante o diagnóstico;
- Gerar gráficos, tabelas ou representações visuais dos resultados obtidos;
- Exibir os resultados de forma clara e compreensível, com informações relevantes, como níveis de cavitação e valores de referência;

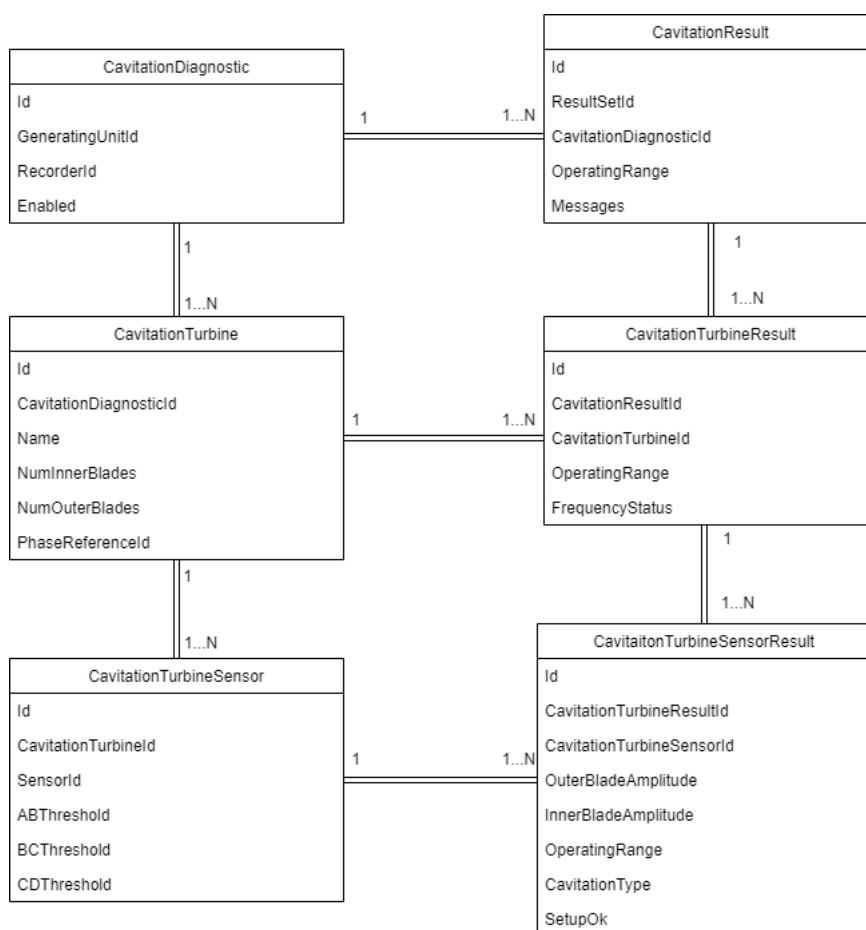
Esse diagrama de atividades auxilia na visualização do fluxo de trabalho envolvido na exibição dos resultados do diagnóstico de cavitação. Ele fornece uma estrutura lógica para o usuário ou operador seguir e garantir que todas as etapas necessárias sejam realizadas para uma visualização correta e adequada dos resultados.

6.2 DIAGRAMA DE CLASSES

Um diagrama de classes é uma ferramenta essencial para a implementação de um módulo de software destinado a calcular a cavitação em uma turbina. Ele descreve a estrutura e as relações entre as classes de objetos que compõem o sistema de software, fornecendo uma visão clara e organizada de como as diferentes partes do sistema se relacionam e interagem entre si.

A Figura 38 exemplifica o diagrama de classes definido para o diagnóstico de cavitação, nele é possível perceber as classes que serão utilizadas assim como suas respectivas relações.

Figura 38 – Diagrama de classes para o diagnóstico de cavitação, e suas relações.



Fonte: Arquivo pessoal.

Pela Figura 38 é possível perceber as classes e seus parâmetros, que serão explicados.

A Tabela 12 mostra os parâmetros para a classe **CavitationDiagnostic**. Esta classe representa um diagnóstico completo, contendo seu identificador, unidade geradora associada, registrador e por fim, informação se o diagnóstico está habilitado e pode ser calculado.

Tabela 12 – Diagrama de classes para **CavitationDiagnostic**.

CavitationDiagnostic	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar o diagnóstico de cavitação na base de dados
GeneratingUnitId	Identificador da unidade geradora ao qual o diagnóstico está inserido
RecorderId	Registrador ao qual o diagnóstico está inserido
Enabled	Váriavel booleana que identifica se o diagnóstico está habilitado, ou não

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 13 mostra os parâmetros para a classe **CavitationResult**. Tem a função de representar os resultados de um diagnóstico de cavitação. Tem como parâmetro o identificador do seu diagnóstico de cavitação associado.

Tabela 13 – Diagrama de classes para **CavitationResult**.

CavitationResult	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar o resultado do diagnóstico de cavitação na base de dados
ResultSetId	Identificador do conjunto de resultados que é salvo na base de dados
CavitationDiagnosticId	Identificador do diagnóstico de cavitação que esse resultado é pertencente
OperatingRange	Faixa de operação, indica e quantifica o grau de cavitação
Messages	Mensagens ao usuário

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 14 mostra os parâmetros para a classe **CavitationTurbine**. Serve como representante de uma turbina associada a um diagnóstico. Nele é configurado o nome da turbina, números de palhetas diretrizes e pás da turbina, assim como o sensor de referência de fase que será utilizado para calcular a frequência.

Tabela 14 – Diagrama de classes para **CavitationTurbine**.

CavitationTurbine	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar a turbina do diagnóstico de cavitação na base de dados
CavitationDiagnosticId	Identificador do diagnóstico de cavitação que esse resultado é pertencente
Name	Nome que a turbina será reconhecida
NumInnerBlades	Número de pás da turbina
NumOuterBlades	Número de palhetas diretrizes da turbina
PhaseReferencId	Identificador do sensor de referência de fase

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 15 mostra os parâmetros para a classe **CavitationTurbineResult**. Classe que representa um resultado de uma turbina. Tem como um dos parâmetros o status da frequência, que indica se o cálculo pode ser calculado ou não.

Tabela 15 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

CavitationTurbineResult	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar o resultado da turbina do diagnóstico de cavitação na base de dados
CavitationTurbineId	Identificador da turbina do diagnóstico de cavitação que esse resultado é pertencente
OperatingRange	Faixa de operação do resultado
FrequencyStatus	Status da frequência, calculado através do sensor de referência de fase

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 16 mostra os parâmetros para a classe **CavitationTurbineSensor**. Representa um sensor associado a uma turbina, nele é configurado os limites para verificação da intensidade de cavitação.

Tabela 16 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

CavitationTurbineSensor	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar o sensor pertencente a uma turbina do diagnóstico de cavitação
CavitationTurbineId	Identificador da turbina do diagnóstico de cavitação que esse resultado é pertencente
SensorId	Identificador do sensor
ABThreshold	Faixa de operação AB
BCTreshold	Faixa de operação BC
CDThreshold	Faixa de operação CD

Fonte: Arquivo pessoal.

A Tabela 17 mostra os parâmetros para a classe **CavitationTurbineSensorResult**. Classe representante de um resultado do sensor, contém as informações das amplitudes nas frequências de passagem nas pás e palhetas e o tipo de cavitação que está acontecendo.

Tabela 17 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

CavitationTurbineSensorResult	
Parâmetro	Descrição
Id	Valor único para identificar o sensor pertencente a uma turbina do diagnóstico de cavitação
CavitationTurbineResultId	Identificador do resultado do cálculo das turbinas
CavitationTurbineSensorId	Identificador do sensor
InnerBladeAmplitude	Amplitude do cálculo na frequência de passagem nas pás
OuterBladeAmplitude	Amplitude do cálculo na frequência de passagem nas palhetas
OperatingRange	Faixa de operação
CavitationType	Tipo de cavitação
SetupOk	Váriavel booleana indicando se a configuração está OK

Fonte: Arquivo pessoal.

6.2.1 Programação

Serão exemplificados toda as etapas do desenvolvimento do software, todos os módulos implementados foram concebidos utilizando o software Visual Studio, onde foi possível programar com a linguagem C#.

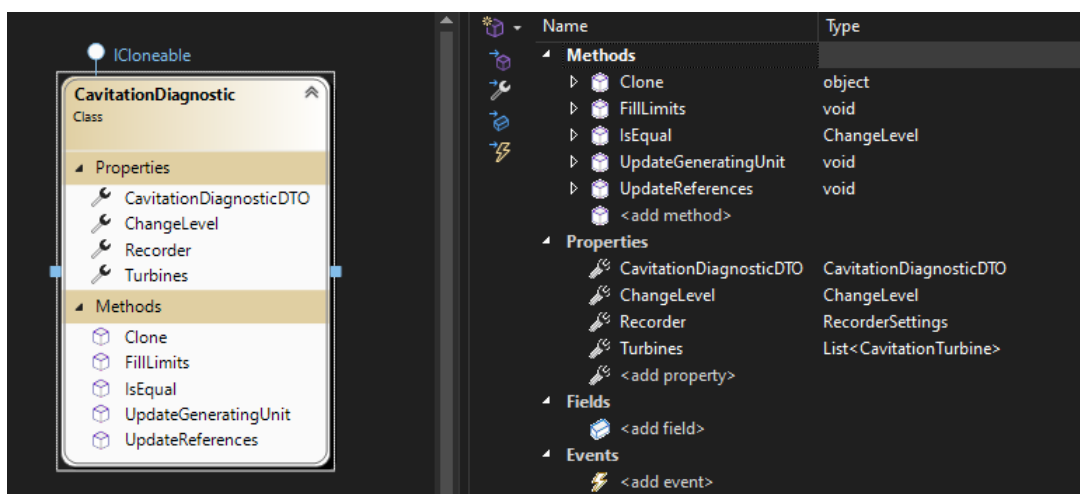
6.2.1.1 Analyzer

Serão apresentados todos os desenvolvimentos no software Analyzer.

6.2.1.1.1 Configuração

A configuração dos parâmetros necessários para o diagnóstico de cavitação é apresentada através de diagramas de classes. A Figura 39 apresenta o diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação. Na Tabela 18 será explicado os parâmetros e métodos mais relevantes dessa classe.

Figura 39 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.



Fonte: Arquivo pessoal.

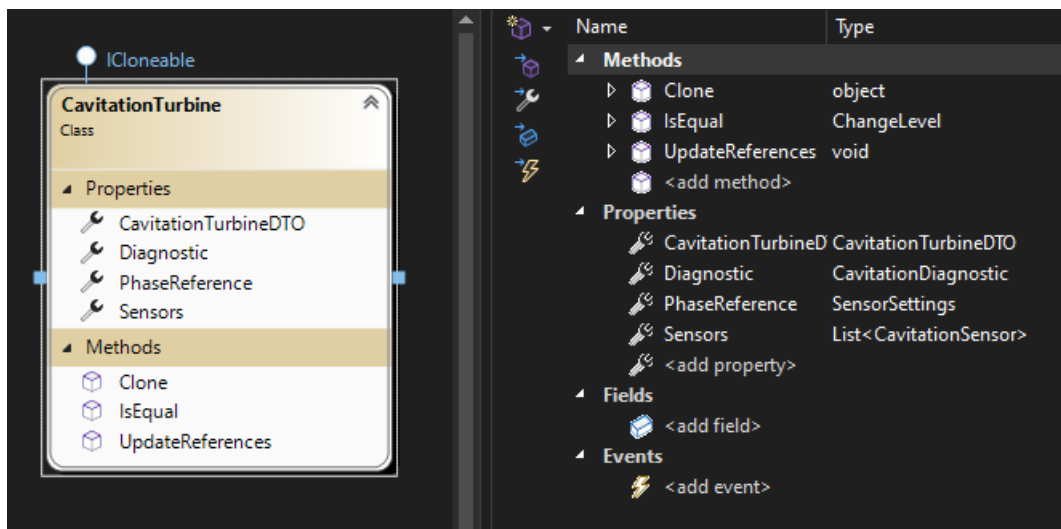
Tabela 18 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.

CavitationDiagnostic	
Parâmetro	Descrição
CavitationDiagnosticDTO	Parâmetro que representa o diagnóstico na base de dados
Recorder	Registrador ao qual o diagnóstico pertence
Turbines	Turbinas configuradas no diagnóstico
Métodos	Descrição
Clone	Permite clonar o diagnóstico de cavitação
FillLimits	Preenche os valores dos limites deste diagnóstico
IsEqual	Compara esta configuração
UpdateGeneratingUnit	Atualiza quem é a unidade geradora deste diagnóstico
UpdateReferences	Atualiza as referências dos elementos ligados a este diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 40 apresenta o diagrama de classe que representa uma turbina no diagnóstico. Na classe da turbina é possível obter o seu parâmetro salvo na base de dados, assim como informação ao diagnóstico ao qual está conectado. Além de informações sobre os sensores atribuídos a essa turbina e seu sensor de referência de fase. A Tabela 19 exemplifica os principais parâmetros e métodos.

Figura 40 – Diagrama de classes para que representa o diagnóstico de cavitação.



Fonte: Arquivo pessoal.

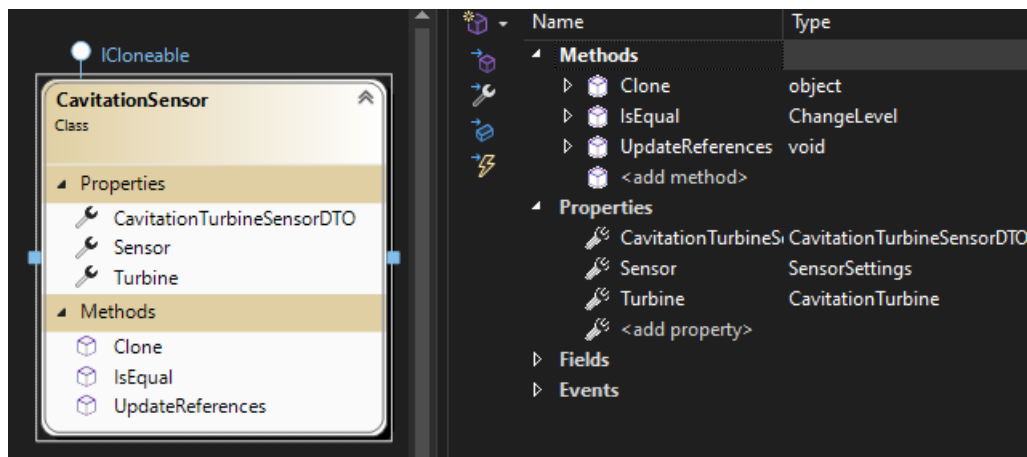
Tabela 19 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa uma turbina no diagnóstico de cavitação.

CavitationTurbine	
Parâmetro	Descrição
CavitationTurbineDTO	Parâmetro que representa a turbina do diagnóstico na base de dados
Diagnostic	Diagnóstico de cavitação ao qual a turbina está relacionada
PhaseReference	Sensor de referência de fase
Sensors	Lista de sensores que estão atribuídos para esta turbina
Métodos	Descrição
Clone	Permite clonar o diagnóstico de cavitação
IsEqual	Compara esta configuração.
UpdateReferences	Atualiza as referências dos elementos ligados a esta turbina

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 41 apresenta o diagrama de classe que representa um sensor no diagnóstico de cavitação. É possível gerenciar o seu objeto na base de dados, assim como as informações sobre o sensor que foi configurado e a sua turbina ao qual está relacionado. A Tabela 20 mostra os parâmetros e métodos, assim como suas descrições.

Figura 41 – Diagrama de classes que representa um sensor diagnóstico de cavitação.



Fonte: Arquivo pessoal.

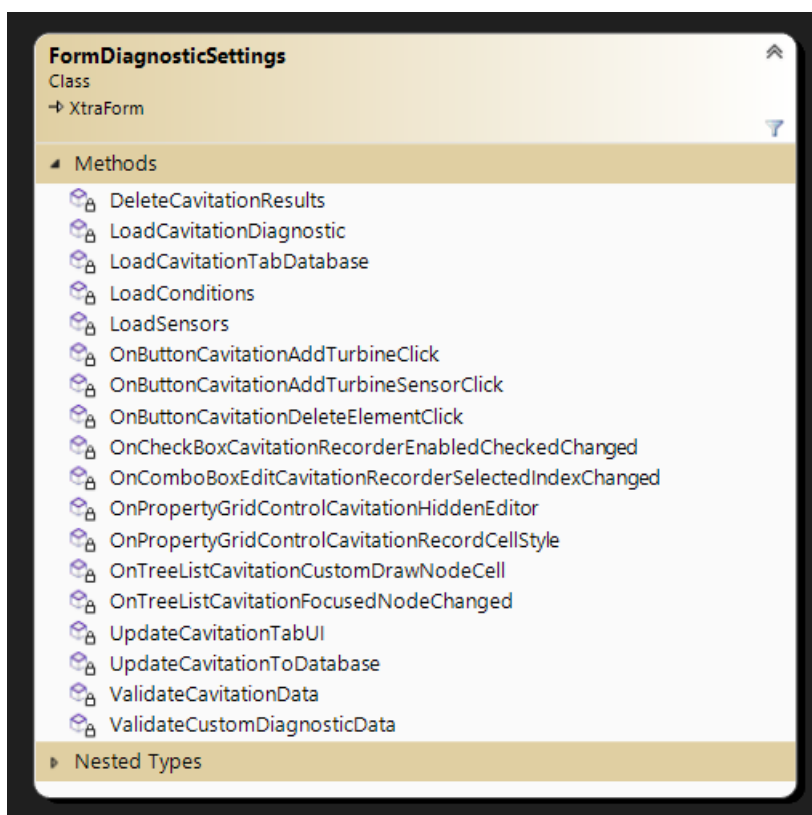
Tabela 20 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa um sensor no diagnóstico de cavitação.

CavitationSensor	
Parâmetro	Descrição
CavitationTurbineSensorDTO	Parâmetro que representa o sensor relacionado a uma turbina do diagnóstico na base de dados
Sensor	Sensor configurado
Turbine	Turbina ao qual o sensor está conectado
Métodos	Descrição
Clone	Permite clonar o diagnóstico de cavitação
IsEqual	Compara esta configuração.
UpdateReferences	Atualiza as referências dos elementos ligados a esta turbina

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 42 apresenta o diagrama de classe que representa a interface gráfica desenvolvida em Windows Forms. Todos os métodos e eventos são configurados nessa classe, que foi desenvolvida inteiramente com o objetivo de proporcionar ao usuário uma interface gráfica para a configuração dos parâmetros necessários para o cálculo do diagnóstico de cavitação.

Figura 42 – Diagrama de classes a interface gráfica para a configuração do diagnóstico.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 21 será explicado os principais parâmetros e métodos relacionados à classe apresenta as configurações do diagnóstico ao usuário.

Tabela 21 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que a interface gráfica.

FormDiagnosticSettings	
Métodos	Descrição
DeleteCavitationResults	Remove os resultados do diagnóstico na base de dados
LoadCavitationDiagnostic	Carrega o diagnóstico de cavitação associado a um registrador
LoadCavitationTabDatabase	Carrega o diagnóstico de cavitação da base de dados
LoadSensors	Carrega informações dos sensores de um registrador na base de dados de diagnóstico
OnButtonCavitationAddTurbineClick	Evento disparado quando o botão para adicionar turbina é pressionado
OnButtonCavitationAddTurbineSensorClick	Evento disparado quando o botão para adicionar sensor é pressionado
OnButtonCavitationDeleteElementClick	Evento disparado quando o botão para remover elemento é pressionado
UpdateCavitationTabUI	Atualiza a aba de cavitação
UpdateCavitationToDatabase	Atualiza os dados do diagnóstico na base de dados
ValidateCavitationData	Verifica se os dados digitados pelo usuário estão corretos

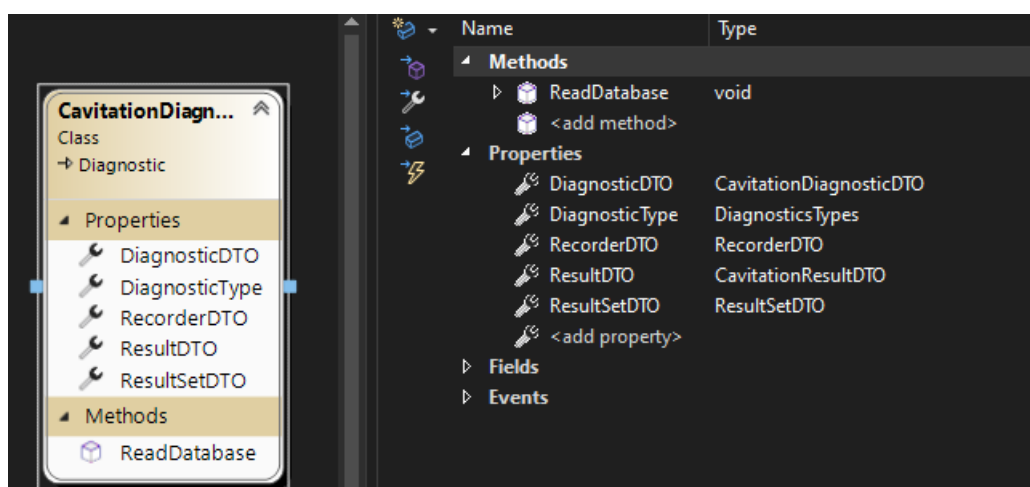
Fonte: Arquivo pessoal.

6.2.1.1.2 VISUALIZAÇÃO

Serão apresentados os diagramas de classes que representam as telas de visualização do diagnóstico de cavitação.

A Figura 43 apresenta o diagrama de classe que representa o diagnóstico de cavitação e os seus resultados, salvos na base de dados. A Tabela 22 exemplifica os principais parâmetros e métodos.

Figura 43 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação na base de dados.



Fonte: Arquivo pessoal.

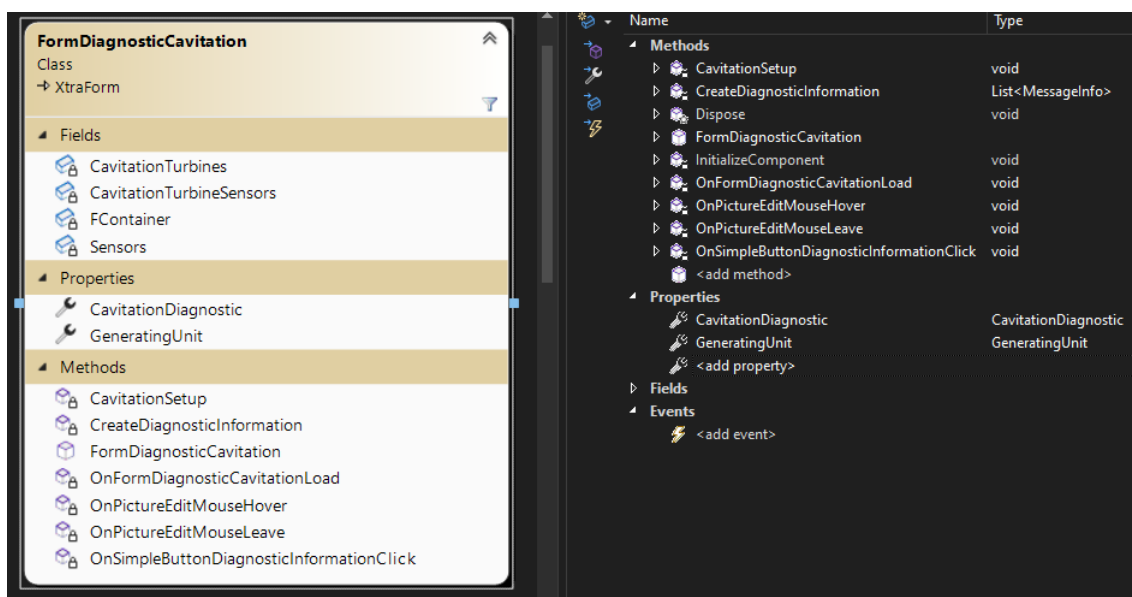
Tabela 22 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação e seus resultados.

CavitationDiagnostic	
Parâmetro	Descrição
DiagnosticDTO	Configurações do diagnóstico
DiagnosticType	Nome identificador do diagnóstico
RecorderDTO	Registrador associado ao diagnóstico
ResultDTO	Resultado do diagnóstico
ResultSetDTO	Conjunto de resultado do diagnóstico
Métodos	Descrição
ReadDatabase	Realiza a leitura dos resultados do diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 44 apresenta o diagrama de classe que representa a tela principal que mostrará a representação gráfica dos resultados ao usuário. É obtido as informações sobre o diagnóstico de cavitação salvo no banco de dados e a sua unidade geradora.

Figura 44 – Diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados do diagnóstico de cavitação.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 25 será explicado os principais parâmetros e métodos do diagrama de classes da tela principal para a apresentação dos resultados do diagnóstico de cavitação.

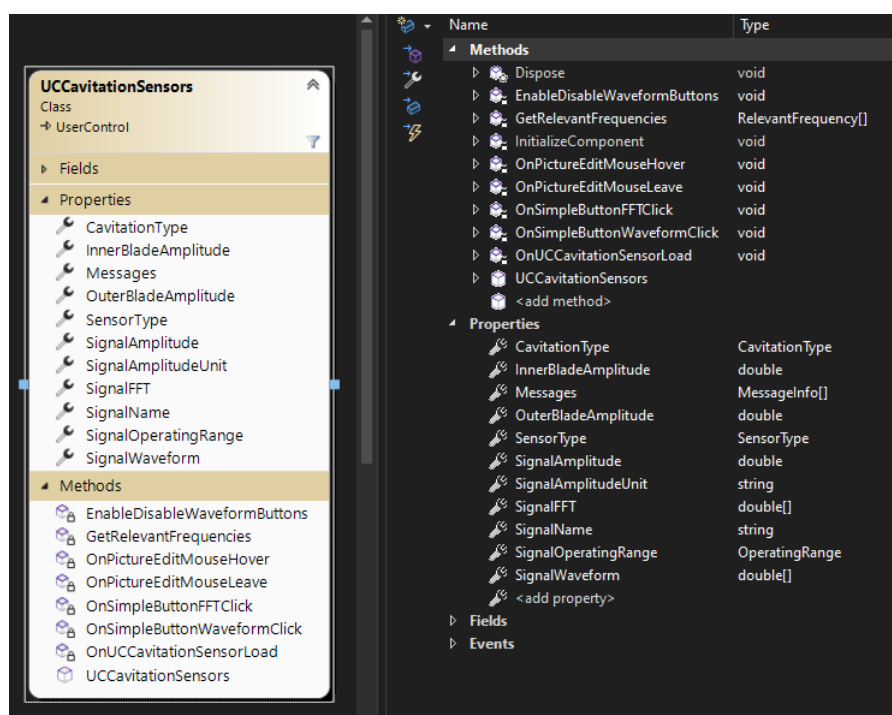
Tabela 23 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes da tela principal para a apresentação dos resultados do diagnóstico de cavitação.

FormDiagnosticCavitation	
Parâmetro	Descrição
CavitationTurbines	Lista com as configurações de turbinas
CavitationTurbinesSensors	Lista com as configurações de sensores associados a uma turbina
Sensors	Lista com informações dos sensores cadastrados para as falhas
CavitationDiagnostic	Propriedade com as configurações do diagnóstico
GeneratingUnit	Unidade geradora analisada
Métodos	Descrição
CavitationSetup	Monta a estrutura da janela de análise do diagnóstico de cavitação
CreateDiagnosticInformation	Cria as mensagens do diagnóstico
FormDiagnosticCavitation	Inicializa um novo objeto da janela de análise de cavitação
OnFormDiagnosticCavitationLoad	Evento disparado quando a janela é carregada
OnSimpleButtonDiagnosticInformationClick	Evento disparado quando o botão "Informações" é pressionado

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 24 apresenta o diagrama de classe que representa a tela que mostrará as informações dos resultados de cálculo de cada sensor. A Tabela 24 explica os principais parâmetros e métodos relacionados.

Figura 45 – Diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados de cada sensor.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 24 – Parâmetros e métodos do diagrama de classes que representa a tela principal para a apresentação dos resultados dos cálculos de cada sensor.

UCCavitationSensors	
Parâmetro	Descrição
CavitationType	Tipo de cavitação
InnerBladeAmplitude	Amplitude da passagem nas pás
Messages	Mensagens do sensor relacionadas ao diagnóstico
OuterBladeAmplitude	Amplitude da passagem nas palhetas
SensorType	Tipo de sensor
SignalAmplitude	Amplitude da componente
SignalAmplitudeUnit	Unidade do valor de amplitude do sinal
SignalFFT	Transformada de Fourier do sinal
SignalName	Nome do sinal
SignalOperatingRange	Faixa de operação da componente
SignalWaveForm	Forma de onda do sinal
Métodos	Descrição
GetRelevantFrequencies	Calcula e retorna as frequências de interesse
OnSimpleButtonFFTClick	Abre a transformada de Fourier dos sinais
OnSimpleButtonWaveFormClick	Abre a forma de onda dos sinais
OnUCCavitationSensorLoad	Evento disparado quando o Form é carregado

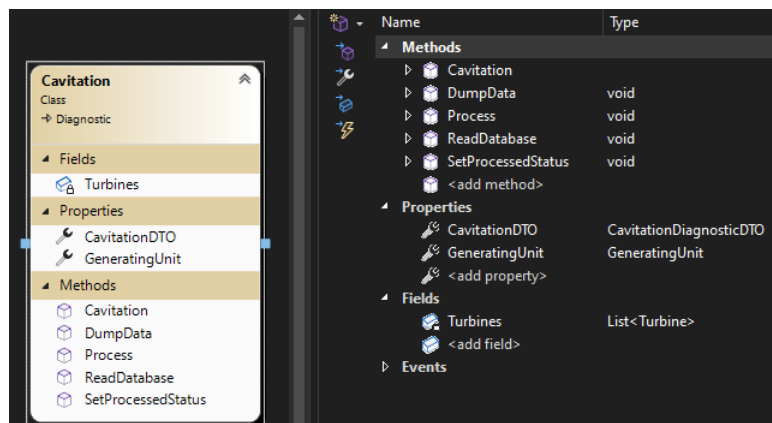
Fonte: Arquivo pessoal.

6.2.1.2 DIAGNOSTICSERVICE

Será apresentado os diagramas de classe que representam os cálculos relacionado ao diagnóstico de cavitação.

A Figura 46 apresenta o diagrama de classe representante do diagnóstico de cavitação salvo na base de dados. É possível obter as informações do objeto na base, assim como a sua unidade geradora. A Tabela 25 apresenta os parâmetros, métodos e descrições mais relevantes da classe. O método "Process", processa cada turbina configurada no diagnóstico.

Figura 46 – Diagrama de classes que representa o diagnóstico de cavitação.



Fonte: Arquivo pessoal.

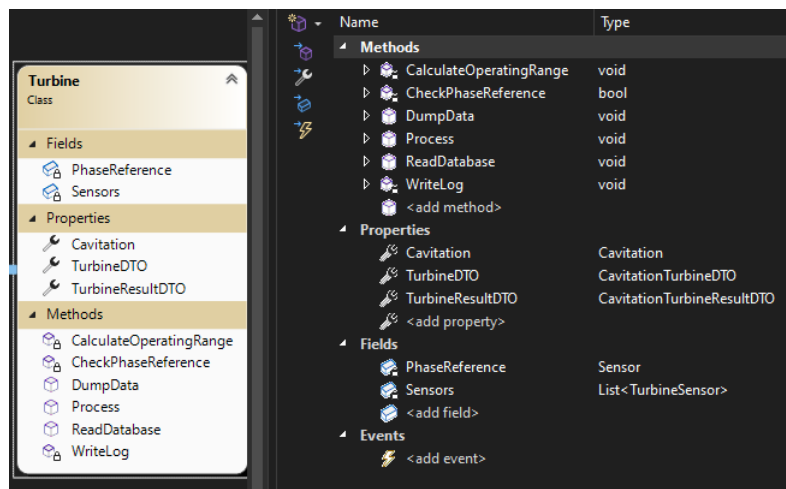
Tabela 25 – Parâmetros e métodos de **Cavitation**.

Cavitation	
Parâmetro	Descrição
Turbines	Lista de turbinas pertencentes ao diagnóstico
CavitationDTO	Configuração do diagnóstico de cavitação
GeneratingUnit	Unidade geradora a qual este diagnóstico está associado
Métodos	Descrição
DumpData	Para colocar no log as configurações do diagnóstico
Process	Processamento do diagnóstico de cavitação
ReadDatabase	Leitura das turbinas que fazem parte deste diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 47 apresenta o diagrama de classe responsável por processar os dados de cada turbina configurada no diagnóstico. É possível perceber as informações relevantes para o cálculo, como o sensor de referência de fase para o cálculo da frequência da turbina e os seus sensores. A Tabela 26 exemplifica os parâmetros e métodos utilizados na classe. Dentro do método "Process" são processados todos os sensores pertencentes a essa turbina.

Figura 47 – Diagrama de classe da classe **Turbine**.



Fonte: Arquivo pessoal.

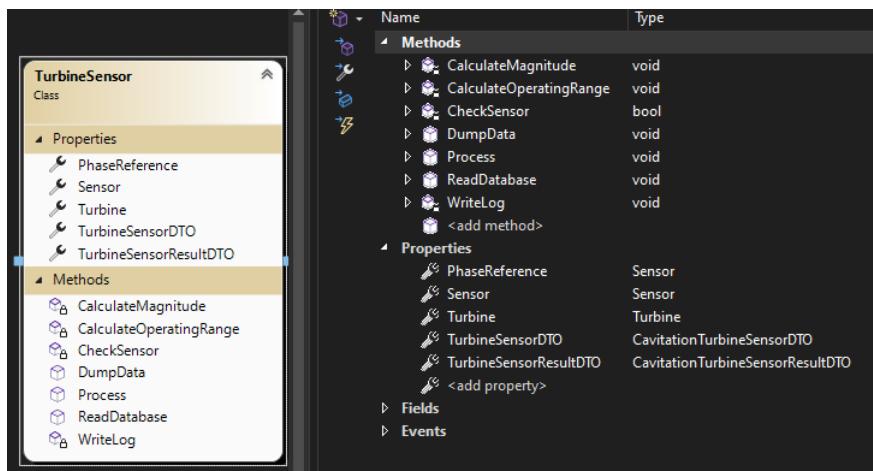
Tabela 26 – Parâmetros e métodos do diagrama de classe que representa uma turbina.

Turbine	
Parâmetro	Descrição
PhaseReference	Sensor de referência de fase, para medição de frequência de rotação
Sensors	Sensores que fazem parte da turbina
Cavitation	A qual diagnóstico esta turbina faz parte
TurbineDTO	Configuração da turbina
TurbineResultDTO	Resultado do diagnóstico para a turbina
Métodos	Descrição
DumpData	Para colocar no log as configurações da turbina
Process	Processamento do diagnóstico da turbina
ReadDatabase	Lê os sensores que pertencem a esta turbina
CalculateOperatingRange	Calcula a faixa de operação
CheckPhaseReference	Verifica se o sinal de referência de fase está estável
WriteLog	Para escrita no log do console e nas mensagens do diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

Na Figura 48 é possível observar o diagrama de classes para um sensor pertencente a uma turbina. É possível obter os dados do sensor configurado, assim como o sensor de referência de fase que é utilizado para calcular a frequência base da turbina. A Tabela 27 exemplifica os parâmetros e métodos utilizados na classe.

Figura 48 – Diagrama de classe da classe **TurbineSensor**.



Fonte: Arquivo pessoal.

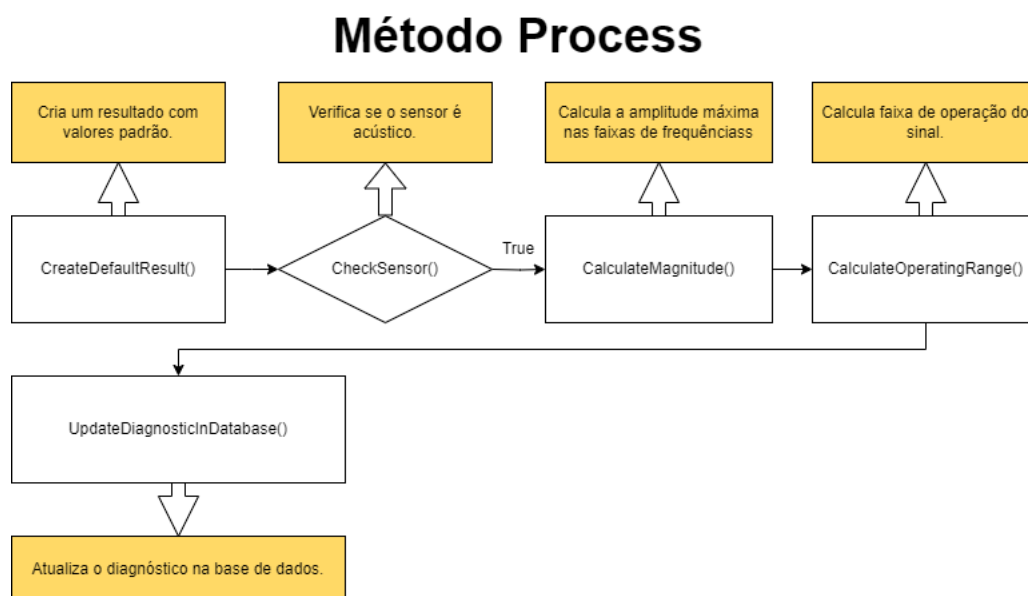
Tabela 27 – Parâmetros e métodos do diagrama de classe que representa um sensor de uma turbina.

TurbineSensor	
Parâmetro	Descrição
PhaseReference	Contém a forma de onda do sensor de referência de fase
Sensor	Referência ao sensor configurado
Turbine	A qual turbina este sensor faz parte
TurbineSensorDTO	Configuração do sensor
TurbineSensorResultDTO	Resultado do diagnóstico para o sensor
Métodos	Descrição
DumpData	Coloca no log as configurações do sensor
Process	Processamento do diagnóstico do sensor da turbina. É no processamento onde é realizado todos os cálculos em relação aos dados dos sensores.
ReadDatabase	Leitura da base de dados
CalculateOperatingRange	Calcula a faixa de operação do sinal
CalculateMagnitude	Calcula a amplitude do sinal
CheckSensor	Verificações necessárias para que o diagnóstico rode. É necessário que sensor seja apenas acústico ou acelerômetro
WriteLog	Para escrita no log do console e nas mensagens do diagnóstico

Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 49 apresenta a representação de como está estruturado o método "Process", que tem como objetivo realizar o cálculo do diagnóstico.

Figura 49 – Diagrama representando passo a passo o método "Process".



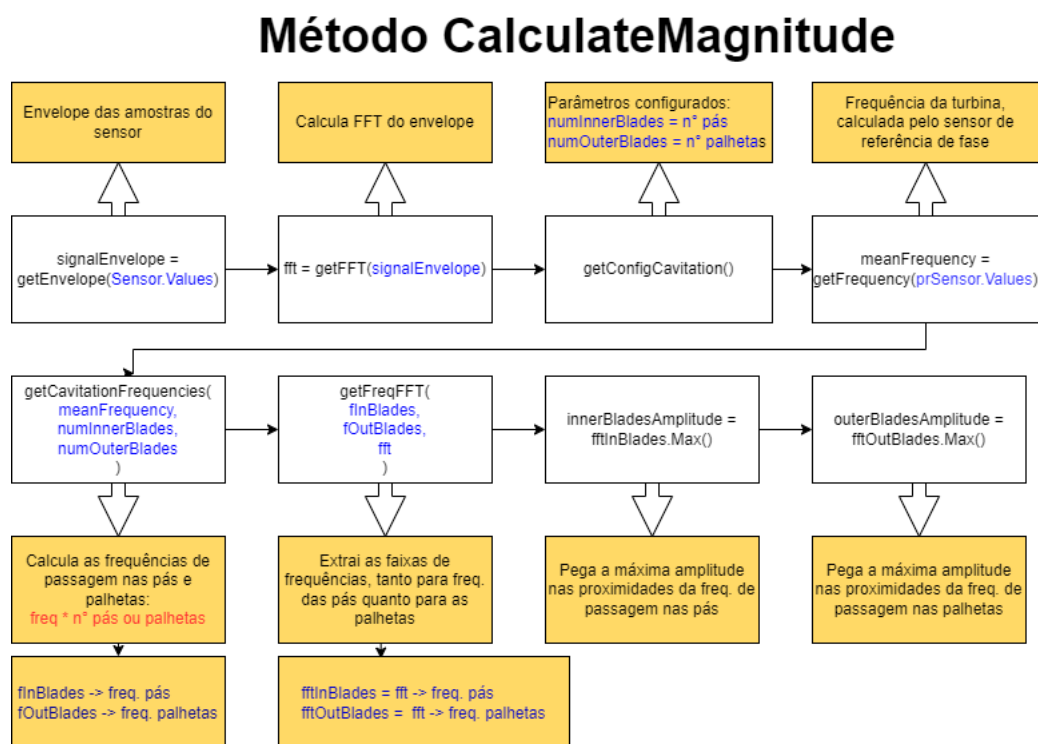
Fonte: Arquivo pessoal.

O método evolui de forma que será explicado sequencialmente:

- É criado um resultado padrão, que será completado conforme os cálculos forem sendo processados;
- Checa se o sensor é adequado para o cálculo do diagnóstico, o sensor deve ser do tipo acústico ou acelerômetro;
- Calcula a magnitude do sinal nas frequências de passagem nas pás e passagem nas palhetas, este método será melhor apresentado;
- Calcula a faixa de operação do sinal e tipo de cavitação, de acordo com a magnitude já calculada e os limites definidos na configuração;
- Salva o resultado na base de dados;

A Figura 50 mostra o diagrama que representa o método "CalculateMagnitude". Método responsável de realizar o cálculo do diagnóstico através dos dados do sensor.

Figura 50 – Diagrama representando passo a passo o método "CalculateMagnitude".



Fonte: Arquivo pessoal.

Será exemplificado o cálculo de forma sequencial:

- Obtém o envelope das amostras do sinal do sensor configurado;
- Calcula a transformada de Fourier do envelope;
- Obtém os parâmetros estáticos previamente configurados pelo Analyzer, entre eles estão o número de pás da turbina e número de palhetas da turbina.
- Obtém a frequência da turbina, de acordo com o sensor de referência de fase;
- Calcula a frequência de passagem nas pás e passagem nas palhetas de acordo com as equações 8 e 9;
- Extração de duas novas FFTs, uma contendo a faixa de frequência pertencente a passagem nas pás, região definida entre $\pm 10\%$ a frequência de passagem nas pás, e outra pertencente a frequência de passagem nas palhetas, região definida entre $\pm 10\%$ a frequência de passagem nas palhetas;
- Calcula a máxima amplitude na faixa de frequência;

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Será exposto a análise dos resultados obtidos da implementação do módulo de software desenvolvido para calcular cavitação em turbinas hidráulicas. Será explorada as funcionalidades da interface ao usuário, evidenciando a facilidade de uso e a clareza das informações apresentadas. Além disso, serão discutidas as limitações do software e possíveis melhorias que poderiam ser implementadas para aprimorar a precisão e a eficiência do diagnóstico de cavitação.

No geral, a seção de análise de resultados fornecerá uma visão abrangente sobre o desempenho e a utilidade do módulo de software desenvolvido para calcular a cavitação em uma turbina, fornecendo uma base sólida para avaliar a eficácia do software e suas aplicações práticas na indústria hidroelétrica.

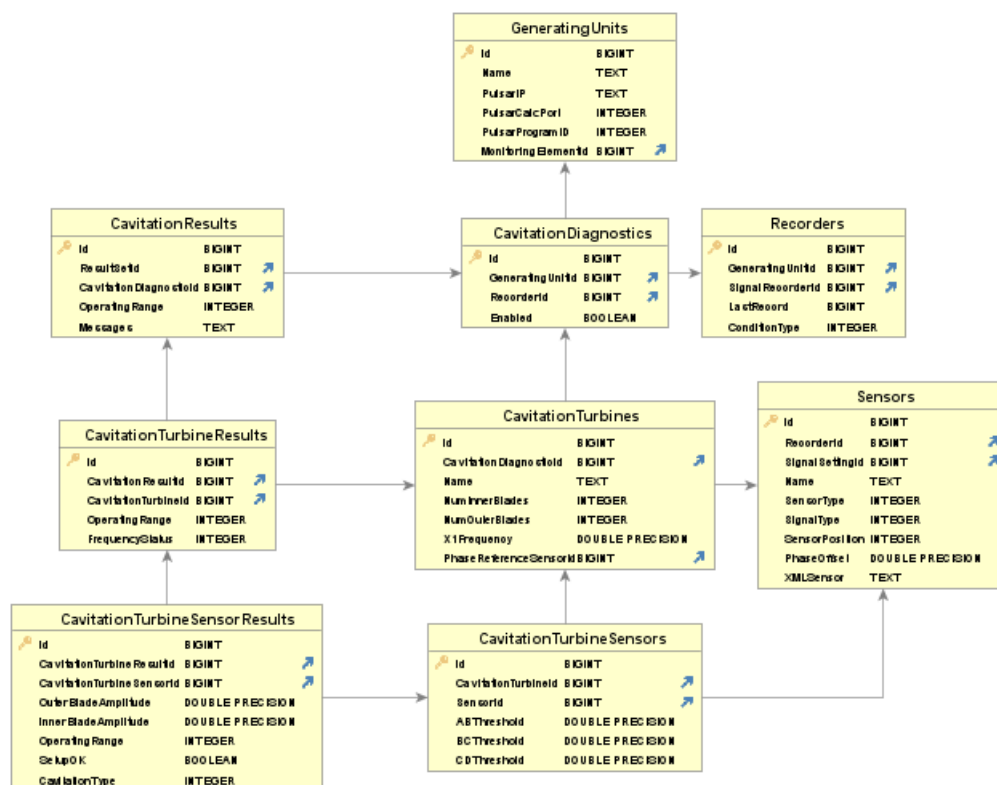
7.1 BASE DE DADOS

A base de dados utilizada para a validação do cálculo de cavitação pertence à AQTech e é composta por dados reais provenientes de usinas que são clientes. Esses dados foram coletados diretamente das operações das usinas e representam condições de operação reais, permitindo uma análise precisa e confiável do fenômeno da cavitação. A utilização de dados reais de usinas clientes garante que o módulo de software seja testado e validado em condições próximas às encontradas na prática, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos. A empresa valoriza a confidencialidade e a privacidade dos dados de seus clientes, garantindo que sejam utilizados apenas para fins de desenvolvimento, validação e melhoria contínua do software.

7.2 POSTINSTALL

O PostInstall é o responsável pela criação das tabelas na base de dados, na Figura 41 é possível verificar a criação de todas as tabelas com o auxílio do software Dbvisualizer, uma ferramenta que pode ser utilizada pelo PostgreSQL para gerenciamento das tabelas criadas. A Figura 51 mostra o diagrama de classes gerado pelo PostInstall.

Figura 51 – Diagrama de classes gerado pelo PostInstall.



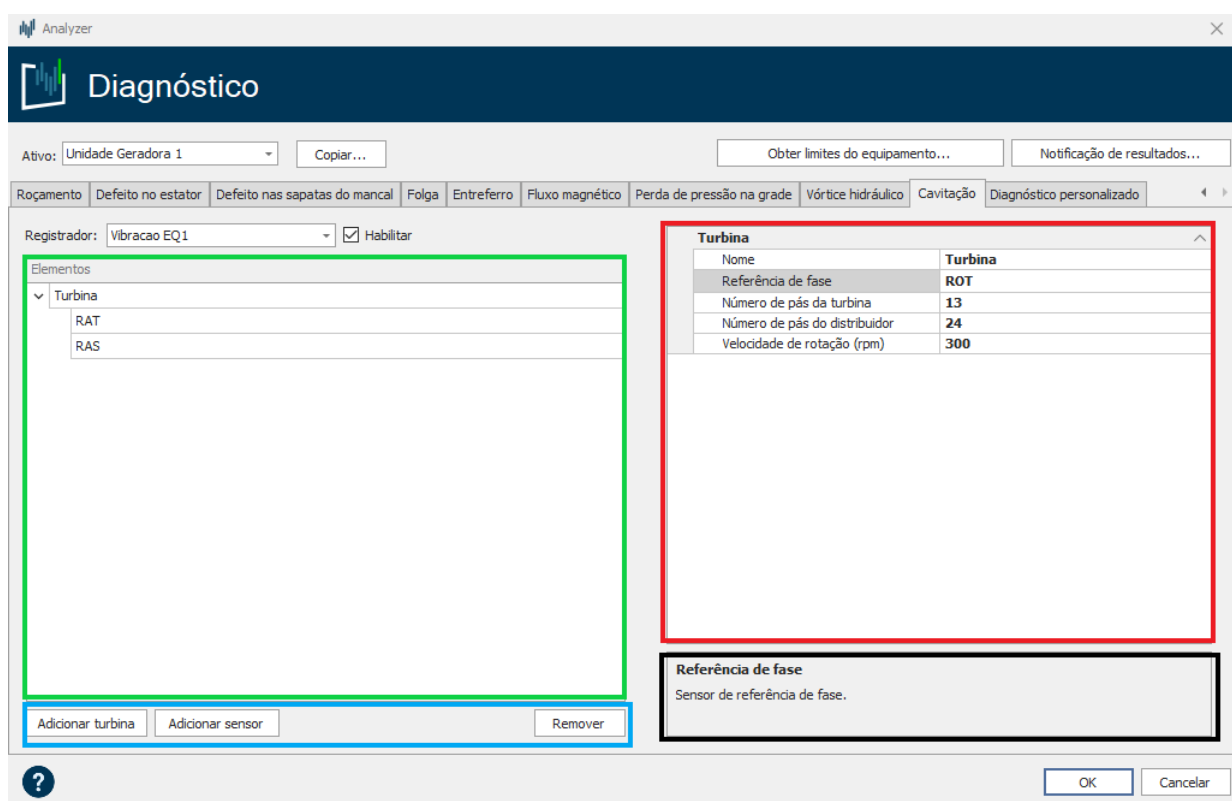
Fonte: Arquivo pessoal.

7.3 ANALYZER

7.3.1 Configuração

A Figura 52 apresenta a tela de configuração no Analyzer.

Figura 52 – Tela de configuração do diagnóstico de cavitação.



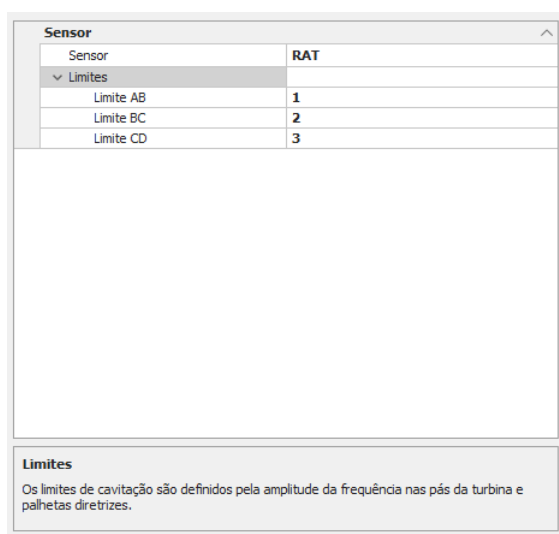
Fonte: Arquivo pessoal.

Os principais elementos da tela de configuração serão apresentados através de cores.

- Verde: Apresentação dos elementos inseridos na configuração;
- Azul: Manipulação dos elementos, inserção de turbinas e sensores, ou remoção;
- Vermelho: Apresentação dos parâmetros de cada elemento, é possível configurar cada parâmetro, tanto da turbina quanto dos sensores;
- Preto: Descrição de cada parâmetro selecionado;

A Figura 52 apresenta em vermelho, os parâmetros disponíveis para configuração na turbina. A Figura 53 mostra os parâmetros disponíveis para configuração no sensor.

Figura 53 – Tela de configuração do diagnóstico de cavitação com ênfase na configuração do sensor.



Fonte: Arquivo pessoal.

As Tabelas 28 e 29 apresentam os parâmetros e valores definidos para a turbina e os sensores respectivamente. Os valores condizem com dados reais de uma turbina real ao qual os dados foram retirados.

Tabela 28 – Parâmetros configuráveis pela turbina.

Turbina	
Parâmetro	Valor
Nome	Turbina
Referência de fase	ROT
Número de pás	13
Número de palhetas	24
Velocidade de rotação (RPM)	300

Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 29 – Parâmetros configuráveis pelo sensor.

Sensor	
Parâmetro	Valor
Sensor	RAT
Limite AB	1
Limite BC	2
Limite CD	3

Fonte: Arquivo pessoal.

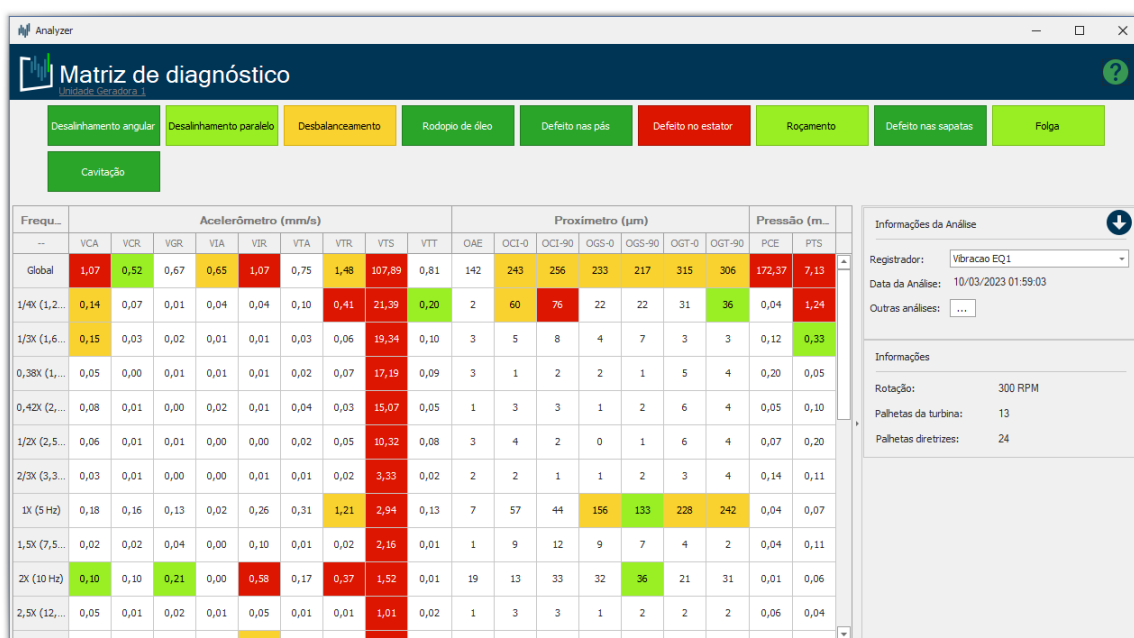
De acordo com (GOSMANN *et al.*, 2020), quando a amplitude nas frequências de interesse passa de 2 dB, a turbina pode estar cavitando. Desta maneira foi definido os limites de AB, BC e CD de cada sensor.

O sensor RAT é um sensor acústico posicionado na tampa da turbina, já o sensor RAS fica posicionado no tubo de sucção.

7.3.2 Visualização

Após os cálculos serem efetuados, é possível visualizar os resultados do diagnóstico através da tela matriz de diagnóstico, que destaca um botão chamado "Cavitação", como pode-se ver na Figura 54.

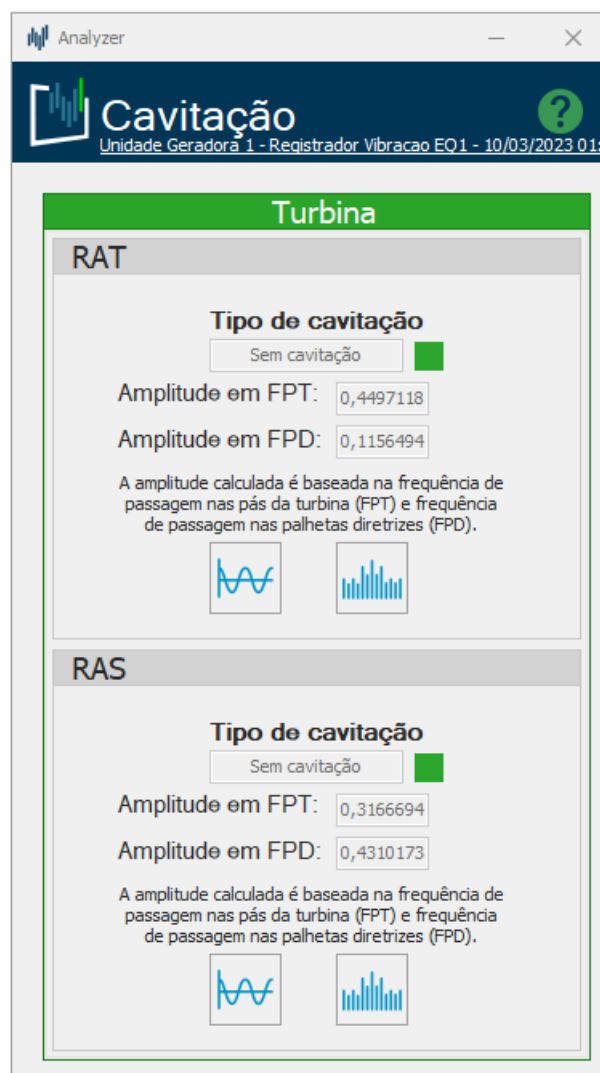
Figura 54 – Matriz de diagnósticos com o diagnóstico de cavitação implementado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Ao clicar em "Cavitação", é possível analisar a interface gráfica principal para análise do diagnóstico de cavitação, como é mostrado na Figura 55. Pode-se perceber que a cor principal está verde, indicador que as amplitudes nas frequências de interesse são menores que a definida no limite AB, o que indica que não há cavitação presente nos registros e dados analisados.

Figura 55 – Matriz de diagnósticos com o diagnóstico de cavitação implementado.

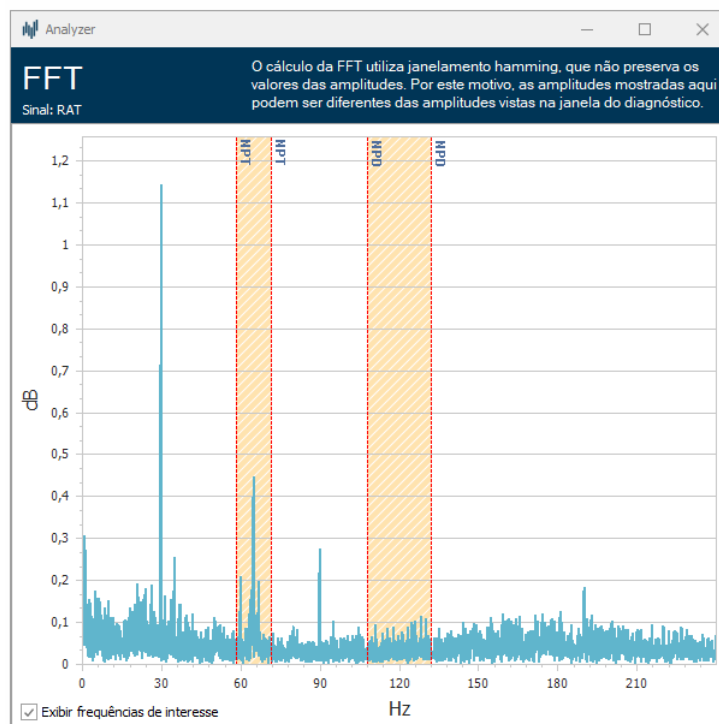


Fonte: Arquivo pessoal.

A interface gráfica disponibiliza os valores absolutos das amplitudes, tanto na frequência de passagem nas pás da turbina (FPT), quanto na frequência de passagem nas palhetas diretrizes (FPD).

São disponibilizados dois botões para análise dos dados, na esquerda e em azul, um botão para visualização dos dados brutos, no domínio do tempo. Na direita, em azul é possível perceber um botão para análise do espectro FFT do envelope do sinal. A Figura 56 apresenta o gráfico da transformada de Fourier do envelope do sinal RAT.

Figura 56 – Visualização do espectro FFT do envelope do sinal RAT.

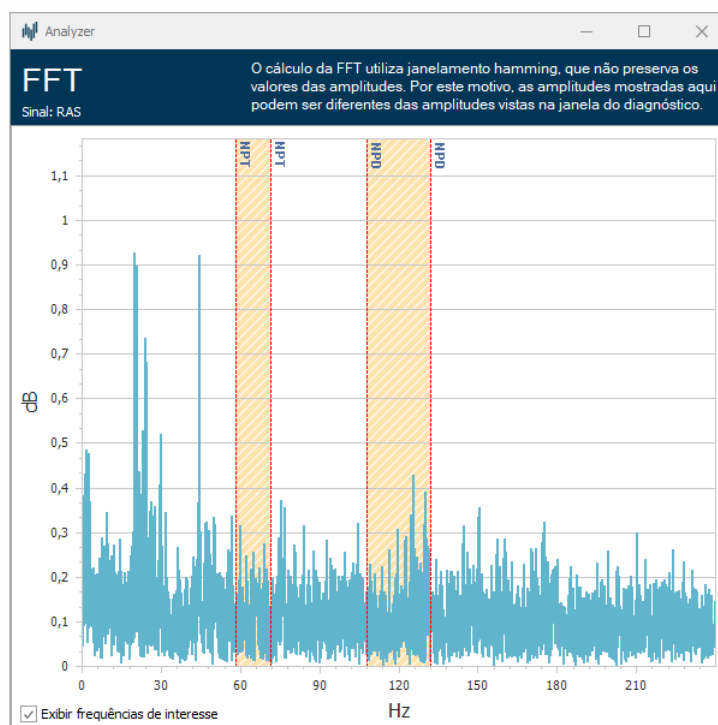


Fonte: Arquivo pessoal.

Pela Figura 56, percebe-se que tem-se uma amplitude considerável na frequência de passagem nas pás da turbina, porém, a amplitude máxima é de apenas 0,44 dB, o que não caracteriza como cavitação. Já na frequência de passagem nas palhetas diretrizes, a amplitude é de 0,11 dB, o que diz que o sensor não presenciou nenhum traço de cavitação durante a operação da turbina.

A Figura 57 apresenta o espectro FFT do envelope do sensor RAS. É possível verificar que a amplitude em *FPT* é 0,3166 dB e em *FPD* é 0,4310 dB, o que também não caracteriza como cavitação.

Figura 57 – Visualização do espectro FFT do envelope do sinal RAS.



Fonte: Arquivo pessoal.

7.4 DIAGNOSTICSERVICE

O DiagnosticService é o serviço responsável por calcular o diagnóstico a partir dos parâmetros configurados pelo Analyzer e postos no banco de dados. Também é possível acompanhar a sua interface gráfica, deste modo, o software é apresentado em forma de arquivos de logs. A Figura 58 mostra um arquivo de log do DiagnosticService após o cálculo de cavitação.

Figura 58 – Arquivo de log do DiagnosticService.

```
Processando sensor: RAS
  Tipo do sensor:
  Amplitude da frequência de passagem nas pás: 0,3
  Amplitude da frequência de passagem nas palhetas: 0,3
  Faixa de operação: A
  Faixa de operação: A
  Operating range: A
  Finalizado
[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:07 > Diagnósticos foram executados com sucesso.
[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:07 > Unidade geradora: UG1, registrador Vibração EQ1 (Id: 2): processando registro 5.
[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:07 > Condições de operação foram satisfeitas, registro está pronto para o diagnóstico.

[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:11 >
  Processando turbina: Turbina
  Processando sensor: RAT
  Tipo do sensor:
  Amplitude da frequência de passagem nas pás: 0,6
  Amplitude da frequência de passagem nas palhetas: 0,2
  Faixa de operação: A
  Processando sensor: RAS
  Tipo do sensor:
  Amplitude da frequência de passagem nas pás: 0,4
  Amplitude da frequência de passagem nas palhetas: 0,3
  Faixa de operação: A
  Faixa de operação: A
  Operating range: A
  Finalizado
[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:11 > Diagnósticos foram executados com sucesso.
[Diagnostic] - 15/06/2023 18:53:11 > Aguardando novos registros...
```

Fonte: Arquivo pessoal.

8 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram abordadas diversas etapas que visaram a análise e implementação de um módulo de software para calcular e diagnosticar a cavitação em turbinas hidroelétricas. A partir da revisão bibliográfica, foi possível compreender os fundamentos teóricos do fenômeno da cavitação e sua importância na operação eficiente e segura dos equipamentos.

A etapa seguinte envolveu o estudo detalhado do fenômeno da cavitação, compreendendo seus mecanismos, tipos e impactos nos componentes das turbinas. Isso permitiu a identificação dos principais parâmetros e características acústicas relacionadas à cavitação, fundamentais para o desenvolvimento do módulo de software.

A implementação do software exigiu o cumprimento de requisitos funcionais e não funcionais, garantindo a capacidade de processar os dados acústicos, realizar análises espectrais, detectar padrões de cavitação, classificar a intensidade e fornecer uma interface amigável para o usuário. A validação do software foi realizada com o uso de uma base de dados real de usinas clientes, o que fortaleceu a confiabilidade dos resultados obtidos.

Por fim, os resultados da implementação e validação do módulo de software mostraram-se promissores. Não foi possível detectar a presença de cavitação na turbina de acordo com os dados fornecidos. As interfaces intuitivas facilitam a interpretação dos resultados e a tomada de decisões para manutenção e otimização dos equipamentos hidroelétricos.

No entanto, é importante ressaltar que existem limitações e oportunidades de melhoria para o software. A realização de testes em diferentes condições operacionais podem aprimorar a precisão e a robustez do diagnóstico de cavitação.

Em suma, este trabalho representa um passo significativo na análise e implementação de um módulo de software para calcular e diagnosticar a cavitação em turbinas hidroelétricas. Os resultados obtidos fornecem uma base sólida para futuros desenvolvimentos na área e contribuem para o avanço no monitoramento e manutenção de equipamentos hidráulicos, visando a operação segura e eficiente das usinas.

REFERÊNCIAS

- ATEC. **ATEC - PCB Piezotronics**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.atecorp.com/products/pcb-piezotronics/378b02>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- BRENNEN, Christopher. An Introduction to Cavitation Fundamentals, p. 2–3, jul. 2011.
- COLLET, Diego. **Análise de desempenho de uma turbina Francis vertical da usina hidrelétrica ITÁ**. 2004. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ENERGY, U.S. Department of. **Types of Hydropower Turbines**. [S.l.]. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-turbines>. Acesso em: 11 abr. 2023.
- ESCALER, Xavier; EGUSQUIZA, Eduard; FARHAT, Mohamed; AVELLAN, François; COUSSIRAT, Miguel. Detection of cavitation in hydraulic turbines. **Journal of Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, p. 983–1007, mai. 2006. DOI: 10.1016/j.ymsp.2004.08.006.
- GOSMANN, Rodrigo P.; FREDO, Guilherme; MENARIN, Henrique A.; A., Heliara; ERLON C. FINARDI, Leonardo A. Weiss. Cavitation detection in Kaplan turbines using real-time acoustic measurements. **Journal of Mechanical Systems and Signal Processing**, p. 1–29, 2020.
- JÚNIOR, Roberto Meira. **Monitoramento da cavitação em turbinas hidráulicas Francis operando em condições de escassez hídrica utilizando análise de vibração**. 2015. Mestrado – Universidade Federal de Itajubá.
- LEITE, Maria Beatriz Ayello. **Hidrelétricas no Brasil**. [S.l.]. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/agua/recursos_hidricos/hidreletricas_no_brasil.html. Acesso em: 12 mar. 2023.
- LINQUIP TECHNEWS. **An Ultimate Guide to Francis Turbine**. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.linquip.com/blog/what-is-francis-turbine>. Acesso em: 12 abr. 2023.

MATSUO, Tiago Kaoru. **Método de análise de vibrações para identificação de falhas em máquinas rotativas de geração de energia elétrica**. 2017. Mestrado – Instituto Federal de Santa Catarina.

NOGUEIRA, Manoel Fernandes Martins; ALARCÓN, Arturo. Impacto das interrupções na geração hidrelétrica do Brasil. **Banco Interamericano de Desenvolvimento**, p. 3–6, 2019.

PCB PIEZOTRONICS. **PCB Piezotronics 378B02**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.pcb.com/products?m=378b02>. Acesso em: 12 jun. 2023.

PLANAS, Oriol. **An Ultimate Guide to Francis Turbine**. [S.l.], 2018a. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/energia-renovavel/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas/turbina-pelton>. Acesso em: 12 abr. 2023.

PLANAS, Oriol. **Turbina Kaplan**. [S.l.], 2018b. Disponível em: <https://pt.solar-energia.net/energia-renovavel/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas/kaplan>. Acesso em: 12 abr. 2023.

PUTINI, Ednei Pedro Gomes. **Análise de Falhas por fadiga num rotor de Hidrogerador vertical via método dos elementos finitos**. 2015. Mestrado – Universidade Estadual Paulista.

QUEIROZ, Fernando Ribeiro. **Avaliação de Cavitação em turbinas hidráulicas por emissão acústica**. 2012. Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais.

RIBEIRO, João Victor Tonello. **Aprendizagem de máquina aplicada à detecção de falhas de acoplamento de acelerômetros no contexto de geração eólica**. 2022. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina.

SANTOS, Rana Cerise Loreto dos. **Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan**. 2013. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

VIBRAONE. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.aqtech.com/hidro>. Acesso em: 12 jun. 2023.