

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Desenvolvimento de Gêmeo Digital com
Suporte em Realidade Virtual para Sistema
de Transposição de Peixes em Hidrelétricas

Yago Araújo dos Santos

Itajubá, Julho de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Desenvolvimento de Gêmeo Digital com
Suporte em Realidade Virtual para Sistema
de Transposição de Peixes em Hidrelétricas

Yago Araújo dos Santos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador: Luiz Eduardo Borges da Silva
Coorientador: Helcio Francisco Villa Nova

**Julho de 2022
Itajubá - MG**

Agradecimentos

A princípio, agradeço a Deus por todas as oportunidades que me foram concedidas ao longo da minha vida.

Agradeço com o coração a minha mãe Sueli, por me incentivar, apoiar e demonstrar diariamente o seu amor pela nossa família. Também agradeço meu pai Everaldo, por sempre estar presente, por me ensinar a ser uma pessoa melhor, me instigar a questionamentos, e a buscar o meu papel nesta vida em benefício do próximo. Agradeço toda a minha família pelo apoio incondicional por todo sempre.

Agradeço minha namorada Karina pelo companheirismo constante, por acreditar em mim e pelo amor compartilhado.

Agradeço meu amigo Lucas Scianni pelos longos anos de amizade, pelo apoio e conselhos. Também venho agradecer aos demais amigos queridos que contribuíram indiretamente para a realização deste trabalho.

Agradeço o Instituto Gnarus e também aos colegas Erik Bonaldi, Levy Oliveira e Frederico Assunção por conceder toda estrutura necessária para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Agradeço a Sinop Energia, a EDF e a ANEEL pelo suporte e oportunidade durante todo trabalho.

Agradeço especialmente os colegas da Sinop Energia, Célio Gheller e Paulo Loss pela oportunidade, comprometimento e por acompanharem o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço os professores Luiz Eduardo Borges, Germano Lambert-Torres, Helcio Villa Nova, Robson Bauwelz Gonzatti, Rondineli Rodrigues Pereira e Wilson Cesar Sant'Ana pelas orientações, conhecimento compartilhado e oportunidades oferecidas.

Agradeço os colegas de trabalho Frederico Assunção, Ronny Ribeiro, Marcos Vinícius, Mateus Campos e Arthur Lívio pelos conselhos, auxílio, orientação, direcionamento e suporte sempre que necessário.

Agradeço a Universidade Federal de Itajubá por contribuir mais uma vez com o meu desenvolvimento pessoal.

Finalmente, agradeço a instituição de fomento CAPES pelo apoio financeiro durante todo o plano de trabalho desta pesquisa.

“Se a princípio, a ideia não é absurda, então não há esperança para ela.”
Albert Einstein, físico, matemático, cienttista e professor.

Resumo

Um dos problemas comumente enfrentados por usinas hidrelétricas está relacionado à ineficiência do seu sistema de transposição de peixes (STPs). Muitas vezes, o sistema implementado não está funcionando de maneira adequada, devido à falta de controle, monitoramento, capacidade operativa, procedimentos ordenados de manutenção e transparência de dados. Se o STP não funciona corretamente, os peixes aos invés de optarem pelo caminho alternativo oferecido pelo sistema, acabam seguindo fluxos de água que não resultam em migração. Alguns passam pelas tubulações das máquinas geradoras, outros permanecem estacionados na soleira da barragem ou próximos ao vertedor. Assim, ficam reféns das manobras executadas na usina, as quais podem promover a morte em massa de peixes. Neste contexto, os órgãos ambientais fiscalizadores responsabilizam o empreendimento pelo dano causado ao meio ambiente e à comunidade, mediante a aplicação de multas. Apresentado o problema, o objetivo deste trabalho é criar um gêmeo digital (GD) com suporte em realidade virtual para um STP, visando à otimização geral da estrutura. Com isso, será possível controlar a estrutura real através de um modelo computacional que represente de maneira fiel o sistema físico. O GD implementado é formado por quatro partes principais: supervisorio 2D, supervisorio 3D, sistema de gestão da manutenção e um aplicativo móvel. Cada parte possui uma função específica e foi criada para atender às necessidades de operação, monitoramento, manutenção, simulação e treinamento. Além disso, o conjunto auxilia na construção de históricos operativos, os quais contribuem com a transparência e apresentação dos dados.

Palavras-chaves: gêmeo digital, sistema de transposição de peixes, modelo, sistema, simulação.

Abstract

One of the problems commonly faced by Hydro Power Plants (HHP) is related to the inefficiency of their fish transposition system (FTS). Often, the implemented system is not functioning properly, due to lack of control, monitoring, operational capacity, orderly maintenance procedures and data transparency. If the FTS does not work correctly, the fish, instead of opting for the alternative path offered by the system, end up following water flows that do not result in migration. In this context, the environmental inspection bodies hold the enterprise responsible for the damage caused to the environment and the community, through the application of fines. Some pass through the pipelines of the generating machines, others remain parked on the dam threshold or close to the spillway. Thus, they are held hostage by the operations carried out at the plant, which can promote the mass death of fish. Having presented the problem, the objective of this work is to create a digital twin (DT) supported by virtual reality for a FTS, aiming at the general optimization of the structure. In this way, it will be possible to control the real structure through a computational model that faithfully represents the physical system. The implemented DT consists of four main tools: 2D supervisory, 3D supervisory, maintenance management system and a mobile application. Each tool has a specific function and was created to make up the needs of operation, monitoring and maintenance. In addition, the set assists in the construction of operating histories, which contribute to the transparency and presentation of data.

Key-words: digital twin, fish transposition system, model, system, simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Gêmeo digital. Fonte: adaptada de [1].	21
Figura 2 – Comissionamento virtual. Fonte: adaptada de [2].	22
Figura 3 – Simulação aplicada no desenvolvimento de GDs. Fonte: baseada em [3].	26
Figura 4 – Contextualização e diferenças entre RV e RA. Fonte: baseada em [4] e [5].	29
Figura 5 – <i>Softwares</i> de simulação dinâmica.	30
Figura 6 – Plataforma Omedit “ <i>OpenSource</i> ” disponibilizada pela associação Modelica. Fonte: [6].	32
Figura 7 – Fluxo de dados entre o ambiente de programação originário e o arquivo FMU. Fonte: [7].	32
Figura 8 – <i>Software</i> Wolfram System Modeler. Fonte: adaptada de [8].	33
Figura 9 – Escada com soleira ou degrau. Fonte: baseada em [9].	36
Figura 10 – Sistema de transposição de peixes do tipo escada com orifício. Fonte: baseada em [9].	36
Figura 11 – Escada Denil. Fonte: baseada em [9].	37
Figura 12 – Sistema de transposição de peixes do tipo escada vertical slot. Fonte: baseada em [9].	37
Figura 13 – Sistema de transposição de peixes do tipo eclusa. Fonte: adaptada de [10].	38
Figura 14 – Sistema de transposição de peixes do tipo elevador. Fonte: adaptada de [10].	39
Figura 15 – Sistema de transposição de peixes do tipo captura e transporte. Fonte: baseada em [9].	40
Figura 16 – Vertedor retangular de parede delgada, sem contrações e com vazão controlada por comporta. Fonte: baseada em [11].	41
Figura 17 – Gêmeo digital do sistema de transposição de peixes do tipo misto. . . .	44
Figura 18 – Processo de transposição de peixes do STP pertencente à UHE Sinop. .	45
Figura 19 – Principais equipamentos do STP da UHE de Sinop.	47
Figura 20 – Molinete hidrométrico (6).	50
Figura 21 – Integração às interfaces virtuais.	51
Figura 22 – Rede física consolidada.	52
Figura 23 – Modelos dinâmicos ou subsistemas que compõem o ambiente de simulação do gêmeo digital do STP.	53
Figura 24 – Metodologia para execução dos modelos de simulação em Python. . . .	54
Figura 25 – Primeiro modelo ou primeira estrutura padrão para acionamento e controle de alguns equipamentos do STP.	55

Figura 26 – Diagrama de blocos do inversor.	55
Figura 27 – Diagrama de blocos do motor.	56
Figura 28 – Diagrama de blocos do freio.	56
Figura 29 – Diagrama de blocos do tambor.	57
Figura 30 – Diagrama de blocos da comporta de fundo.	57
Figura 31 – Comporta de fundo.	58
Figura 32 – Forças envolvidas na operação de equipamentos do STP.	58
Figura 33 – Segundo modelo ou segunda estrutura padrão para acionamento e controle das comportas mitra e de regulação.	59
Figura 34 – Diagrama de blocos da central hidráulica.	60
Figura 35 – Diagrama de blocos da comporta mitra.	60
Figura 36 – Forças dinâmicas relacionadas à operação da comporta mitra.	61
Figura 37 – Vazões controláveis.	63
Figura 38a – Curvas características da vazão em função altura de carga.	64
Figura 38b – Curvas características da altura de carga em função da vazão.	64
Figura 39 – Canal de bombeamento do STP.	66
Figura 40 – Disposição das telas na sala de controle e monitoramento.	67
Figura 41 – Supervisório 2D ou da operação.	68
Figura 42 – Simulação com a comporta de fundo.	69
Figura 43 – Simulação com a comporta mitra.	69
Figura 44 – Tela para simulação de cenários operativos do STP.	70
Figura 45 – Controle de vazão.	71
Figura 46 – (a) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a montante. (b) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a jusante.	72
Figura 47 – (a) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a montante. (b) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a jusante.	72
Figura 48 – Controle de câmeras.	73
Figura 49 – Supervisório 3D.	74
Figura 50 – Bombas submersíveis no supervisório 3D.	74
Figura 51a – Visão Geral e Chamados.	76
Figura 51b – <i>Jobs</i> e <i>Worklists</i>	77
Figura 52 – Acesso à bomba submersível do STP via APP.	78

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
APP	Aplicativo de Celular
AR/RA	<i>Augmented Reality/Realidade Aumentada</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEP	Comissão de Estudos da Piracema
CF	Comporta de Fundo
CLP	Controlador Lógico Programável
CM	Comporta Mitra
CPS	<i>Cyber Physical Systems</i>
DL	<i>Deep Learning</i>
DT/GD	<i>Digital Twins/Gêmeo Digital</i>
EDF	<i>Électricité de France</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FMI	<i>Funcional Mock-up Interfaces</i>
FMU	<i>Funcional Moch-up Units</i>
FTS/STP	<i>Fish Transposition System/Sistema de Tranposição de Peixes</i>
HHP/UHE	<i>Hydro Power Plant/Usina Hidrelétrica</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
IOT	<i>Internet of Things</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MLP	<i>Multilayer Perceptron</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
QR	<i>Quick Response</i>
RTU	<i>Remote Terminal Unity</i>
SBA	Simulação Baseada em Agentes
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SED	Simulação a Eventos Discretos
SGM	Sistema de Gestão da Manuntenção
SIN	Sistema Interligado Nacional
STP-GD	Gêmeo digital do STP do tipo misto
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
VR/RV	<i>Virtual Reality/Realidade Virtual</i>
2D	<i>Two Dimensions</i>
3D	<i>Three Dimensions</i>

Lista de símbolos

H	Carga do vertedor
p	Altura da soleira do vertedor
p'	Altura da lâmina de água da soleira a jusante do vertedor
B	Largura do vertedor
L	Largura relativa do vertedor
e	Espessura da parede do vertedor
Q	Vazão
Q_c	Vazão calculada
g	Aceleração da gravidade
C_d	Coefficiente de descarga
K	Constante específica para o cálculo da vazão, depende de C_d e g
W	Área preenchida pelo ar nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP)
t	Valores tabelados em [11]
i_{nec}	Relação de transformação de velocidade
n_{mot}	Rotação do motor elétrico
n_{tb}	Rotação do tambor
ρ	Massa específica da água
H_m	Altura molhada
A_{base}	Área da base
m	Massa
g	Gravidade
h	Altura do nível da água
P_g	Força peso

E	Força empuxo
f_r	Força resultante
f_c	Força do cilindro
A_u	Área útil do cilindro
P	Pressão no terminal de saída do cilindro
l_f	Largura da folha da comporta mitra
h_1	Altura do nível da água a montante
h_2	Altura do nível da água a jusante
v_1	Velocidade do fluído a montante
v_2	Velocidade do fluído a jusante
Q_m	Vazão mássica
Q	Vazão volumétrica
C_d	Constante de arrasto
A_m	Área molhada
f_{ra}	Força resultante na abertura da comporta
f_{rf}	Força resultante no fechamento da comporta
α	Altura de carga ou diferença entre o nível de regulação e adução
β	Altura da lâmina de água vertente ao canal de entrada
x_1	Altura do nível de adução
x_2	Altura do nível de regulação
x_3	Altura da parede de concreto
x_4	Altura da comporta
x_5	Altura da lâmina de água vertente
$Cota$	Posição da comporta em relação a elevação do terreno

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização do trabalho	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Contribuições	17
1.4	Metodologia de pesquisa	18
1.5	Organização do trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Gêmeo digital	20
2.1.1	Comissionamento virtual	21
2.1.2	Arquitetura de rede	22
2.1.3	Industria 4.0	24
2.1.4	Simulação	25
2.1.5	Realidade virtual e realidade aumentada	27
2.1.6	Ferramentas utilizadas no desenvolvimento de GDs	29
2.1.6.1	Softwares de simulação dinâmica	29
2.1.6.2	Linguagem Modelica	31
2.1.6.3	Interface FMI	31
2.1.6.4	Wolfram System Modeler	33
2.2	Tipos de sistemas de transposição de Peixes	34
2.2.1	Escada de peixes	35
2.2.2	Eclusa de peixes	36
2.2.3	Elevador de peixes	38
2.2.4	Captura e transporte de peixes	38
2.3	Vertedores	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	Sistema STP-GD	43
3.2	Sistema de transposição misto	44
3.3	Instrumentação	48
3.3.1	Nível de sensoriamento existente	48
3.3.2	Sensores adicionais	48
3.4	Ambientes virtuais	50
3.4.1	Comunicação entre os ambientes real e virtual	51
3.5	Modelos de simulação	52
3.5.1	Primeiro modelo	54

3.5.2	Segundo modelo	59
3.6	Método de controle de vazão	62
4	RESULTADOS	67
4.1	Supervisório da operação	67
4.1.1	Modelos de simulação	68
4.1.2	Controle de vazão e câmeras	70
4.2	Supervisório 3D	73
4.3	Sistema de gestão da manutenção	75
4.4	Aplicativo móvel	76
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 Introdução

A matriz elétrica brasileira é composta principalmente por fontes renováveis de energia. Conforme [12], a energia elétrica gerada no Brasil provém em grande parte das usinas hidrelétricas, confirmando o estabelecimento destas grandes construções pelo país. O aumento dos regimes e políticas sustentáveis vêm exigindo constantes mudanças e adaptatividade desses empreendimentos [13]. Observa-se em usinas hidrelétricas (UHEs) a necessidade de realizar a transposição de peixes com o objetivo de manter o ecossistema e a diversidade íctica¹ local [9]. Entretanto, se não houver processos efetivos por parte das UHEs em respeito às regras ambientais previstas, os resultados serão desastrosos ao meio ambiente, à comunidade, como também ao próprio negócio. As negligências resultam em consequências negativas à natureza, e ainda podem ser convertidas em punições monetárias às UHEs, aplicadas por órgãos fiscalizadores. A alta mortalidade de peixes leva à insatisfação da sociedade, pois atinge diretamente os pescadores da região, visto que trata-se da atividade principal desses trabalhadores [14].

A mortalidade de peixes em UHEs é observada nos momentos de manobra das unidades geradoras. Estes equipamentos operam conforme a demanda energética do Sistema Interligado Nacional (SIN), ou seja, ora estão inativos ora ativos. Além disso, existem cronogramas de manutenção e periódicas inspeções nas unidades geradoras, colocando-as, obrigatoriamente em estado inativo. Neste tipo de situação é necessário drenar a água existente no circuito hidráulico da turbina e garantir que a vazão turbinada seja reduzida a zero. Esta condição favorece a entrada dos peixes que estão no canal de fuga para o interior do tubo de sucção, sendo muitas vezes complexo e inviável o processo de evacuação das toneladas de peixes do local. Portanto, no momento da partida da turbina, os peixes armazenados no circuito hidráulico estão suscetíveis a sofrer choques físicos com as pás das unidades geradoras ou até mesmo com as paredes do reservatório, e ainda, nestas condições são submetidos a variações bruscas de pressão e supersaturação². As variações abruptas de pressão provocam o barotrauma³, responsável por danificar as estruturas físicas dos peixes, como o deslocamento do globo ocular, que se desprende e é projetado para fora da órbita do peixe, este fenômeno é denominado de exoftalmia⁴. Além deste, é característico o rompimento da bexiga natatória e a eversão estomacal. O barotrauma é um dos problemas mais comuns que geram danos irreparáveis e, muitas vezes, a morte à fauna íctica⁵ nas grandes UHEs. Proveniente do mesmo processo e de algumas manobras

¹ Diferentes espécies de peixes.

² Alta concentração de oxigênio na água

³ Lesões internas e externas devido à brusca variação de pressão.

⁴ Estado anormal de um ou ambos os olhos, comumente denominado de olhos esbugalhados.

⁵ Relativo a peixes.

para controle de vazão em vertedores, determinados locais do rio e reservatórios da usina entram na condição de supersaturação. A sua ocorrência provoca a morte de peixes, pois eles não são capazes de absorver a alta concentração de oxigênio presente na água. Por outro lado, a baixa saturação de oxigênio também é um problema dual, podendo acontecer em momentos de manobra dos equipamentos da usina hidrelétrica [15].

Devido à alta mortalidade de peixes, os órgãos fiscalizadores responsabilizam o empreendimento pelas consequências produzidas à sociedade, bem como pela incapacidade de geração devido à irregularidade observada, quando existe demanda [16]. Nesta situação, a empresa é responsabilizada e a inadimplência, na maioria das vezes, é convertida em multas altíssimas ao empreendimento. Para minimizar os efeitos negativos produzidos com a implantação de UHEs, são previstos no comissionamento, desde o século XX, os sistemas de transposição de peixes (STPs) [9]. Todavia, se o sistema não possuir uma operação adequada e constante, transparência em relação à eficiência, mas também dados comprobatórios do bom funcionamento para os órgãos fiscalizadores, o empreendimento está passível de multas e prejuízos diversos.

1.1 Contextualização do trabalho

Há anos vê-se a necessidade da criação de estruturas, mecanismos ou sistemas para preservar a fauna ictica de locais onde há exploração contínua dos recursos provenientes da natureza. Entretanto, isto nem sempre foi uma exigência. No Brasil, esta preocupação começou vir à tona somente em 28 de dezembro de 1927. Neste ano, foi decretado no Art. 16 na Lei Estadual nº 2.250 que “todos quantos, para qualquer fim, represarem as águas dos rios, ribeirões ou córregos, são obrigados a construir escadas que permitam a livre ascensão dos peixes” [17]. Os autores e propulsores pela Lei nº 2.250 pertenciam ao grupo de Comissão de Estudos da Piracema (CEP). Este grupo foi capaz de impulsionar o debate sobre o tema, que corroborou com o surgimento de leis semelhantes em diversos estados do Brasil, vias de transposição, ideias e questionamentos que colaboraram com a política sustentável brasileira.

Um dos problemas comumente enfrentados por usinas hidrelétricas envolve o STP. Muitas vezes, o sistema já implementado não está funcionando de maneira adequada, devido à falta de controle, monitoramento, treinamento, inspeção e manutenção. Deste modo, os peixes ao invés de optar pelo caminho alternativo, que é oferecido pelo STP, entram em fluxos de água que percorrem as pás das turbinas geradoras ou permanecem próximos à soleira da barragem e vertedor. Como resultado da ineficiência de diversos sistemas de transposição de peixes, observa-se mortes de peixes em massa, redução da biodiversidade local, impacto direto na atividade pesqueira da região, dentre outros prejuízos. Portanto, a proposta deste trabalho é criar um gêmeo digital (GD) para um sistema

de transposição de peixes do tipo misto, tendo em vista aumentar a observabilidade, controle e confiabilidade sistêmica.

1.2 Justificativa

A princípio foi verificado na literatura os principais estudos e aplicações a respeito de gêmeos digitais (do Inglês, *Digital Twin*). [18] apresentaram os veículos espaciais autônomos, o mais conhecido foi nomeado de "*Iron Bird*". [19] construíram um GD para monitoramento elétrico, tendo em vista a obtenção de predições confiáveis a respeito dos rolamentos de um motor. [20] desenvolveram um GD para manufatura, que ficaram conhecidas como fábricas inteligentes. [21] realizaram uma revisão bibliográfica onde mostraram dezesseis definições para GDs. Apesar da disseminação rápida sobre os conceitos e aplicações de GDs, não foi identificado no meio acadêmico, durante estudos referentes ao estado da arte, aplicações de GDs em sistemas de transposição de peixes. Deste modo, a implementação desta tecnologia destinada a um STP será de grande valia para trabalhos futuros semelhantes.

O objetivo deste trabalho é criar um GD de um STP, visando à otimização geral do conjunto. Com isso, será possível criar um modelo computacional que represente de maneira fiel o sistema físico. A ferramenta prevê o aumento da capacidade de inspeção e monitoramento, operação, manutenção e simulação do sistema real.

1.3 Contribuições

A maior contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de um GD para um sistema de transposição de peixes do tipo misto. Esta tecnologia foi escolhida para aumentar o potencial do sistema físico em diversos aspectos, mas, principalmente, a capacidade de inspeção, treinamento, manutenção e operação. O GD construído é composto por quatro partes principais, as quais são responsáveis por suprir as demandas supracitadas, sendo elas: o supervisor da operação ou 2D, supervisor 3D ou *viewer*, um sistema de gestão da manutenção e um aplicativo *mobile*.

Os desafios para a consolidação do projeto e validação da pesquisa foram inúmeros, contudo, estes foram identificados e solucionados ao longo do trabalho. O primeiro desafio esteve relacionado ao entedimento detalhado do sistema de transposição físico, visto que existem diversos tipos de STPs. A especificidade do sistema real é responsável por torná-lo único. Deste modo, foi preciso compreender detalhadamente a complexidade sistêmica em relação aos equipamentos existentes, nível de instrumentação, compatibilidade tecnológica da aparelhagem atual com possíveis dispositivos adicionais, as etapas do processo de transposição, e por último, mas não menos importante, os gargalos e as necessidades

constantes do sistema.

Sequencialmente, foi identificado o desafio da construção da plataforma virtual. As etapas de desenvolvimento foram: a modelagem do sistema físico em *software* CAD 3D; a construção dos diagramas de blocos que representassem de maneira fidedigna os equipamentos pertencentes ao sistema físico, tendo em vista as funcionalidades de simulação; a interligação do ambiente virtual com o real via banco de dados; e verificação da confiabilidade sobre a aquisição em Tempo Real ⁶ ou Quase Real ⁷ dos dados.

Outro desafio identificado durante a pesquisa, esteve relacionado ao controle de vazão, possível, mas não explorado na atual conjuntura do STP. O maior problema enfrentado esteve em encontrar e validar as equações matemáticas que regem o comportamento da atratividade de peixes, que está intimamente ligado ao ajuste de vazões.

As contribuições resultantes da aplicação do GD foram positivas e serão apresentadas ao longo deste trabalho. Deve-se ressaltar que tais benefícios refletem otimizações nos níveis de inspeção, treinamento, manutenção e operação.

1.4 Metodologia de pesquisa

A pesquisa foi dividida da seguinte maneira:

- Revisão bibliográfica sobre GDs e STPs;
- Estudo específico da estrutura do STP definido, englobando o entendimento de todos os equipamentos do sistema, o processo, as variáveis que devem ser controladas e monitoradas;
- Desenvolvimento dos modelos de simulação dos equipamentos principais do STP;
- Integração dos modelos digitais a um sistema de banco de dados do STP;
- Desenvolvimento de realidade virtual como suporte visual para o GD do STP;
- Simulações e testes com os modelos desenvolvidos.

1.5 Organização do trabalho

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para a contextualização e compreensão da pesquisa.

⁶ Intervalo de tempo necessário para integrar o âmbito real com o virtual, onde as “rodadas de atualização” são desprezíveis para o processo de leitura e gravação de dados. Conceito abordado em 2.1.4.

⁷ Intervalo de tempo necessário para integrar o âmbito real com o virtual, onde as “rodadas de atualização” são significativas para o processo de leitura e gravação de dados. Conceito abordado em 2.1.4.

O Capítulo 3 aborda, detalhadamente, o processo de construção do GD para o STP do tipo misto.

O Capítulo 4 contém, separadamente, os resultados de cada componente utilizado para o desenvolvimento do GD.

O Capítulo 5 traz as conclusões principais deste trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

2 Fundamentação teórica

Este capítulo introduz o que são gêmeos digitais (GDs) e apresenta os recursos utilizados para o seu desenvolvimento. E ainda, mostra os sistemas de transposição de peixes tradicionais e conceitos relacionados ao controle de vazão.

2.1 Gêmeo digital

Gêmeos digitais (do Inglês, *Digital Twin* – (DT)) são cópias virtuais para representar os sistemas físicos reais. Eles são atualizados por dados reais, obtidos pelo nível de instrumentação, visando à melhora dos processos, maior autonomia às instruções e obtenção de respostas [22] e [23]. O nome gêmeo digital surgiu com [18] e no contexto aeroespacial norte americano. [24] também compartilham da mesma ideia de [18], pois para eles, GD é uma representação virtual do comportamento de um componente, produto ou sistema. Essa ferramenta utiliza dados reais coletados, por meio de um sistema de aquisição, de maneira automática para espelhar os comportamentos físicos em um ambiente virtual. É ultrarrealista, traz uma realidade virtual, mas também pode representar um ou mais sistemas físicos, visando principalmente avaliar e recomendar mudanças para tais sistemas a fim de otimizá-los.

A tecnologia GD é baseada no espelhamento (como um gêmeo) do mundo real com o mundo virtual [25]. É uma representação que contém toda a informação física do sistema [26]. Como mencionado anteriormente os gêmeos digitais nasceram no cenário espacial, mas atualmente, vêm sendo adotados no contexto industrial. Um exemplo pioneiro para as aplicações de GDs na indústria é “*The Iron Bird*”, o qual foi montado em uma bancada de teste para simular um modelo de uma aeronave virtual [27], [28] e [29]. Além destes, há outros diferentes exemplos de gêmeos digitais emergentes da nova tecnologia da NASA [30], [18], [31], [32], [26] e [33]. [34] definiram os GDs como um espelhamento virtual do processo ou sistema, construídos com algoritmos capazes de avaliar e orientar as decisões de acordo com o seu comportamento. [35] também concordam com essa linha de raciocínio de [34], mas também evidenciam o sincronismo fiel do espelhamento do sistema físico, a partir da conexão com a diversidade de dados coletados, processados e retornados ao sistema físico em tempo real.

O gêmeo digital é capaz de proporcionar a otimização do sistema, auxiliando a tomada de decisão, em cooperação com o homem, máquinas, sensores, atuadores dentre outros recursos via monitoramento dos processos reais. Para [35] as partes principais da composição do GD são: o sistema físico a ser representado; os sistemas virtuais responsáveis pelo espelhamento fiel e detalhado; e o sincronismo entre ambos os sistemas. A parte

virtual é utilizada para representar a parte física, mas também pode possuir a função de gerar otimização e predição para o modelo real.

Por definição, o GD é extremamente unido ao sistema real conforme apresenta [36]. Os objetivos desta tecnologia são diversos, os quais devem estar bem definidos e alinhados àquilo que se espera da ferramenta, podendo ser utilizado para simulação de cenários, supervisão, treinamento, manutenção, operação, registro de históricos e previsões.

O tempo de sincronização e aquisição dos dados reais ou de simulação são parâmetros importantes para um GD [37]. Estes representam o tempo de estímulo e realimentação entre os ambientes físico e virtual. Eles são fundamentais para o bom funcionamento da aplicação [38]. A Figura 1 introduz a ideia conceitual sobre GD.

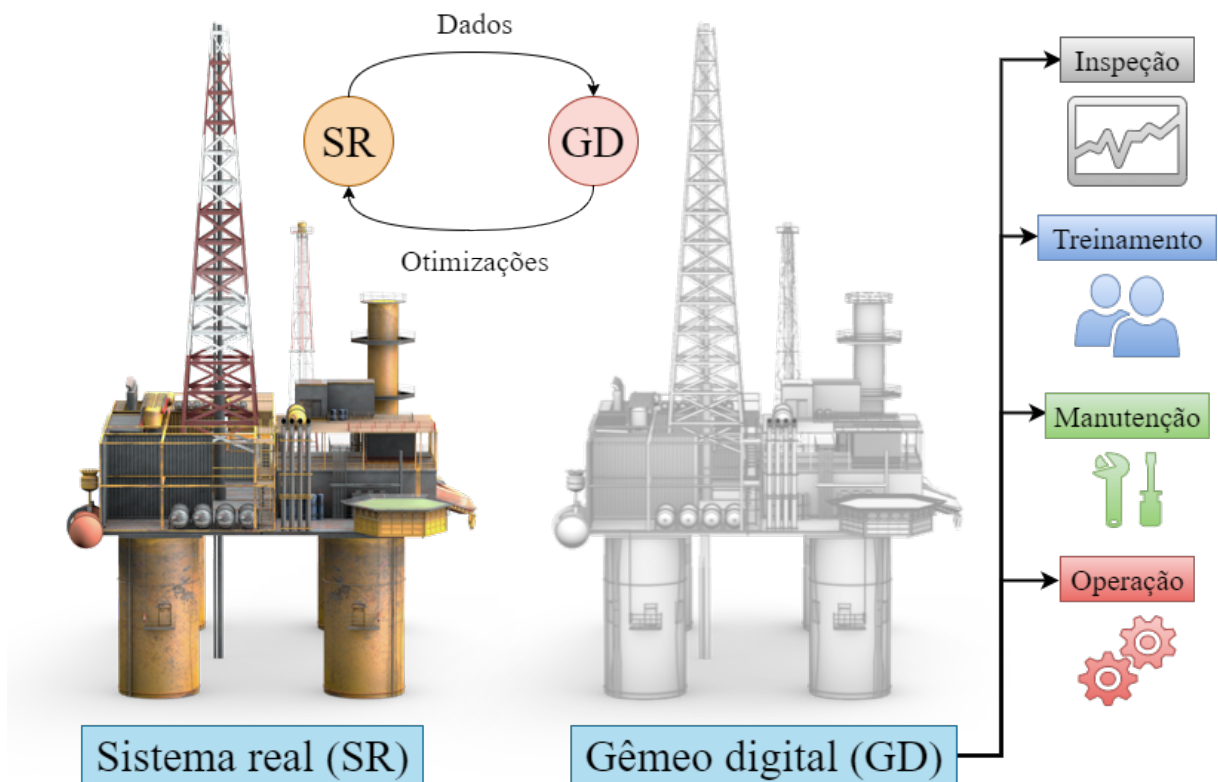


Figura 1 – Gêmeo digital. Fonte: adaptada de [1].

2.1.1 Comissionamento virtual

A implementação de um GD exige, previamente, o conhecimento e estudo conceitual da ideia ou modelo daquilo que será desenvolvido [39]. Deste modo, é possível visualizar de maneira clara o desafio da implementação, elencar as possíveis restrições, planejar ou incrementar o nível de instrumentação, identificar e selecionar as entidades principais que representem de maneira fidedigna a realidade, para posteriormente realizar a conexão entre o ambiente virtual e real, e por fim executar simulações de cenários para buscar condições ótimas de operação. Este procedimento é conhecido como comissionamento virtual, que consiste em quatro etapas principais:

1. Planejamento do processo;
2. Modelagem do equipamento físico (modelo CAD 3D);
3. Modelagem lógica do equipamento (comportamento da planta real);
4. Modelagem do sistema de controle.

O comissionamento virtual utilizado para construção do GD do sistema de transposição de peixes é proveniente dos conceitos apresentados por [2]. A Figura 2 mostra o fluxograma explicativo para realização do comissionamento de GDs.

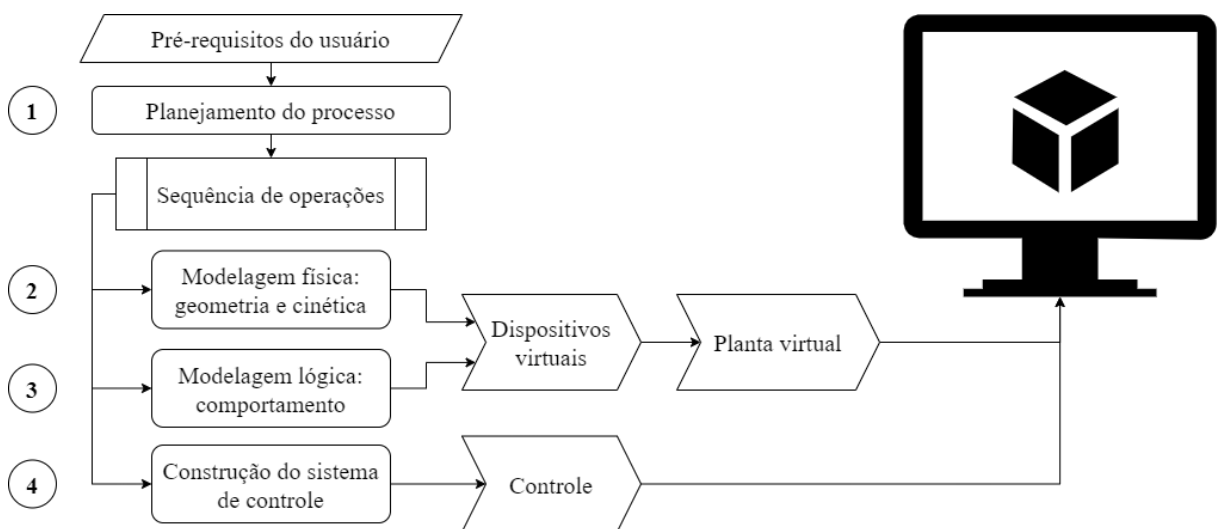


Figura 2 – Comissionamento virtual. Fonte: adaptada de [2].

2.1.2 Arquitetura de rede

A ordem cronológica de desenvolvimento entre o modelo virtual e real não altera a construção ou o resultado de um GD. Há casos em que o sistema físico já está consolidado e em funcionamento [40], outrora, o sistema físico também possa não existir [39], o que nesta situação é intuitivo optar a princípio pela construção do modelo virtual, devido à possibilidade de executar a simulação antes da definição física do sistema.

A maioria das aplicações relacionadas aos *digitais twins* partem de um modelo real. Este, em algum momento do desenvolvimento, será fundamental para a construção de um GD. Caso exista, a progressão tende a ser mais rápida do que o contrário, visto que o tempo destinado às melhorias do ambiente físico estarão direcionadas ao nível de instrumentação do sistema. De maneira complementar, é interessante que exista uma triagem para identificar quais são os dispositivos e equipamentos mais importantes para o processo, e, se necessário, substituí-los por aparelhos mais inteligentes, visando a obter o modelo mais simples, com mais opções de comunicação e integração disponíveis [41].

Existem duas esferas do modelo virtual, a primeira corresponde a simulação dinâmica convencional que está relacionada a avaliação, testes, monitoramento, configurações e verificação do comportamento das variáveis de controle consideradas. A partir desta, é possível entender a viabilidade de reproduzir um sistema físico existente ou por outro lado, considerando que ainda não exista um protótipo físico, criar o ambiente virtual de simulação, o qual terá a sua representatividade física ou modelo real à posteriori. A outra vertente do modelo virtual está relacionada àquilo que será visualizado, em outras palavras, é a interface entre usuário e máquina. Neste sentido, para atender a perspectiva e expectativas de um GD, é necessário elaborar uma plataforma em realidade virtual, podendo esta possuir ou não suporte de realidade aumentada (do Inglês, *Augmented Reality* – *AR*).

A plataforma 3D ou ambiente virtual exige alto nível de detalhamento e, geralmente, é construída em desenho assistido por computador (do Inglês, *Computer Aided Design* – *CAD*), pois é demandado do modelo uma réplica fiel ao sistema real [40], [32] e [26]. A comunicação e integração entre os ambientes real e virtual são estabelecidas por intermédio de dispositivos inteligentes, redes com protocolos de comunicação específicos e computadores. Ainda muito utilizado no âmbito da automação industrial são os controladores lógicos programáveis (CLPs). Eles são responsáveis por receber as informações do nível de instrumentação e gravá-las em banco de dados, que por sua vez, irão alimentar o ambiente virtual 3D ou supervisorio em tempo quase real. Esta conectividade entre os dados gravados em nuvem e o banco de dados exige interfaces de programações de aplicações (do Inglês, *Application Programming Interface* – *API*). As APIs são rotinas ou códigos criados para interligar processos diferentes. Elas são muito utilizadas para que haja entendimento entre os diferentes dispositivos da arquitetura definida. Quando existe um modelo real, é muito provável que ele demandará otimizações. Entretanto, não é uma tarefa muito simples realizá-las se não houver a disponibilidade de dados históricos operacionais e documentação. Nesta situação, a melhoria estará baseada na simulação de cenários imagináveis ou intuitivos de operação, reconhecendo a possibilidade relativamente alta de obter respostas insuficientes e imprecisas para o sistema. Ao longo do tempo, com o supervisorio alimentado e em funcionamento, é mais plausível buscar simulação de cenários mais confiáveis, visto que nesta situação haverá uma base de dados disponível para análise, os quais serão capturados pelo CLP e registrados em banco de dados.

As melhorias mais confiáveis e transformadoras são obtidas com base na ciência dos dados disponíveis, onde são aplicados conceitos de aprendizagem de máquina (do Inglês, *Machine Learning* – *ML*) e aprendizagem profunda (do Inglês, *Deep Learning* – *DL*). Neste seguimento, podem ser utilizados algoritmos de regressão, previsão, correlações, algoritmos genéticos, simulação Monte Carlo, redes neurais e outros recursos capazes de auxiliar na predição de comportamentos e condições ótimas de operação [42] e [43].

2.1.3 Indústria 4.0

A Indústria 4.0 propõe ao cenário mundial maior aceitação, adaptação e utilização dos recursos herdados de revoluções tecnológicas anteriores. A maioria dos sistemas e processos confiáveis e de alta eficiência possuem níveis consideráveis de automação, entretanto demandam investimento. Este cenário é desafiador para as indústrias, pois aquece e impulsiona a competição, e por consequência exige do mercado processos eficientes, de resposta rápida e menor custo possível [44]. A principal proposta da Indústria 4.0 é promover modificações comportamentais no modo e método em que empresas, negócios e pessoas entendem e manipulam os benefícios tecnológicos. Também é capaz de unir, integrar e virtualizar continuamente os sistemas, operadores ou usuários, os processos e ambientes uns com os outros, sendo responsável por esta interligação entre a realidade e cenários virtuais de operação [45].

Os pilares fundamentalistas do conceito da Usina 4.0 são a Internet das Coisas (do Inglês, *Internet of Things – IOT*), *Big Data*, Tecnologia de Nuvem e Sistemas Ciber-Físicos [46] e [37]. A internet das coisas tem como principal objetivo estabelecer conexões. Estas ocorrem entre objetos físicos presentes no meio industrial com uma rede de internet onipresente, permitindo a obtenção e intercâmbio contínuo de informações entre o mundo real e o virtual [44] e [45]. A tecnologia de *Big Data*, segundo [47], consiste em técnicas de organização, processamento e análise de uma grande quantidade e variedade de dados brutos, estruturados ou não, para direcionar e auxiliar as tomadas de decisões. As tecnologias da informação, em concordância com [48], englobam toda estrutura que promove essa conectividade entre ambientes, estabelecendo o processamento e transferência de sinais, dados e informações. Por outro lado, a tecnologia de nuvem está relacionada ao compartilhamento, alocação e obtenção dos dados através de redes e servidores. Com isso, aumenta a confiabilidade das informações, auxiliando na tomada de decisão e eficiência do processo. Por último, os sistemas ciber-físicos (do Inglês, *Cyber Physical System – CPS*), os quais estão relacionados à virtualização dos sistemas reais, bem como dos processos, mediante a uma emulação ou cópia digital inteligente [48] e [49]. Para [50] os CPS são responsáveis por relacionar os sistemas físicos a virtuais, por meio de uma rede local ou global, com maior autonomia e inteligência. Atuam como um meio de vincular o mundo físico, através de sensores, atuadores, dispositivos móveis, máquinas e outros a um mundo virtual, com o objetivo de espelhar o comportamento do mundo real ao âmbito virtual de preferência em tempo real [37]. A realidade aumentada (RA) compõe uma parte dos CPS, como também os robôs autônomos, simulações, integração de sistemas, cibersegurança e manufatura aditiva.

Os robôs autônomos fazem parte dos CPS. Eles são capazes de aprender novas estratégias, executar tarefas de maneira totalmente autônoma, utilizando, aprendizagem de máquina, IoT, *Big Data* e recursos que envolvem a inteligência artificial [32]. As simulações

também são importantes nesse contexto, pois permitem a modelagem e reconhecimento de um sistema a partir de dados de entrada e saída. Todavia, inicialmente, a probabilidade da simulação ser efetiva é baixa, na maioria das vezes é preciso construir métodos de treinamento responsáveis por ponderar a influência de cada variável para o sistema. Por este motivo, quanto mais dados alimentam o modelo, mais robusto ele tende a ser. Portanto, o treinamento do modelo é uma etapa importante para a metodologia, principalmente, tratando de redes neurais, pois para melhorar cada vez mais as respostas provenientes desse sistema é necessário submeter a rede a diferentes conjuntos de testes [51].

A integração de sistemas está direcionada à organização, segregação de tarefas, definição de responsabilidades e funções claras para cada nível que a compõe. Trazendo ganho em tempo, diminuição de custos, aumento da agilidade dos processos do sistema, empresa ou negócio. A cibersegurança tem como objetivo proteger os dados armazenados. As informações importantes para o processo devem possuir alta confiabilidade, por consequência demanda investimentos elevados para instalações de *firewalls*, tendo em vista a máxima segurança sistêmica. A impressão 3D ou manufatura aditiva é capaz de produzir um objeto real a partir de qualquer modelo virtual. Este objeto pode ser modelado por meio de diferentes tipos de matéria-prima como filamentos ou líquidos [50], [21] e [36]. Dentre os benefícios herdados dessa tecnologia estão a redução de custos, otimização de processos e aumento da qualidade dos serviços.

2.1.4 Simulação

Segundo [52], a simulação é uma história criada a partir dos sistemas do mundo real, através de proposições de características representativas dessas estruturas. Os modelos de simulação são elaborados a partir de inferências e observações do sistema real, sendo estas expressas por meio de relações matemáticas e técnicas. [53] afirma que a simulação é uma das técnicas mais utilizadas em diversas áreas da indústria, como também na academia. Para [54], a simulação se tornou uma ferramenta imprescindível para construção de modelos reais. Esta última afirmação justifica a tamanha relevância dos recursos de simulação no contexto dos gêmeos digitais, tendo em vista a compatibilidade entre definições e propósitos. Ela é o meio responsável por gerar possibilidades de operação, positivas ou negativas, para um sistema real. Os *setups* de operação provenientes dos cenários fictícios, podem ou não, resultar em melhorias significativas. Por este motivo, o cenário simulado precisa ser posto a prova, ou seja, praticado no ambiente físico. Com isso, as observações inerentes aos testes realizados serão avaliadas e de grande valia para auxiliar as tomadas de decisão do operador. [51] reforçam a ideia de que a simulação consegue capturar as características dos sistemas reais, que apresentam grande complexidade devido à sua natureza dinâmica, pois variam com o tempo, como também em função de variáveis aleatórias que definem alguns comportamentos aleatórios da natureza. A Figura

3 apresenta a cadeia de operação de um sistema real, este possui um nível de instrumentação responsável pela aquisição de dados e armazenamento, os quais alimentam o modelo virtual do sistema real. Assim, as simulações realizadas no ambiente virtual auxiliam o operador a tomar decisões assertivas diante das necessidades do processo.

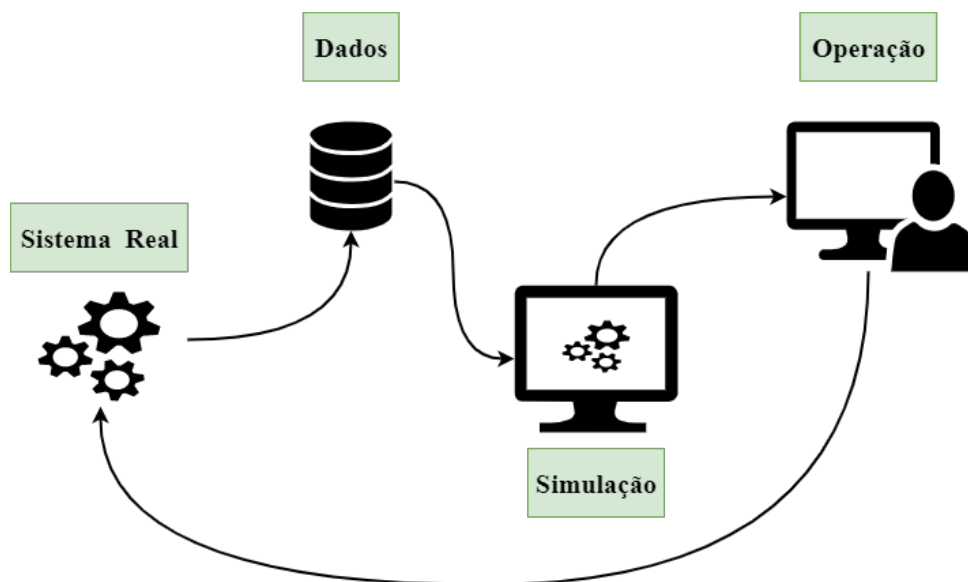


Figura 3 – Simulação aplicada no desenvolvimento de GDs. Fonte: baseada em [3].

A técnica de simulação pode ser entendida quando separada por fases: Análise; Educação e Treinamento da Ferramenta; Avaliação do Sistema e Pesquisa. Na primeira fase, a ideia principal é compreender o sistema real e seu comportamento. Na segunda fase, são estudados os conceitos referentes a suas aplicações em modelo simulado. Na terceira fase, o objetivo é entender se o sistema é capaz de cumprir com a sua função diante do que lhe é exigido. Por fim, a última fase põe em prova o modelo de simulação a fim de obter resultados, comparação, avaliação do comportamento, teste de hipóteses e outras funcionalidades [52].

Alguns modelos de simulação mais conhecidos são: Simulação de Monte Carlo, Simulação Contínua, Simulação de Eventos Discretos (SED) e a Simulação Baseada em Agentes (SBA) [3]. A Simulação de Monte Carlo é baseada na geração de números aleatórios para representarem os sistemas desejados, sem considerar a interferência do tempo. Já a Simulação Contínua considera o comportamento temporal, obtendo respostas relacionadas às mudanças de estado de um sistema submetido em um intervalo de tempo contínuo. A SED refere-se às mudanças de estado de um sistema, em intervalos de tempo discretos, que estão intrinsecamente ligados à ocorrência de eventos [53], [51] e [55]. Agora, a SBA trata-se de uma modelagem composta por agentes individuais, autônomos e interativos [56]. Segundo [53], o critério de escolha entre a simulação contínua e a discreta deve avaliar principalmente o objetivo da aplicação. A princípio é necessário entender a natureza do sistema que será modelado, com isso será possível compreender e analisar seu dinamismo

ao longo do tempo.

No contexto atual, observa-se que a simulação vem se consolidando cada vez mais nas últimas décadas em inúmeros setores e áreas de atuação, promovendo redução de custos em processos, desenvolvimento e aumento da qualidade de produtos [57]. Quando implementado corretamente, este mecanismo é capaz de promover cada vez mais otimização para os processos, fornecendo soluções ótimas ou quase ótimas para os tomadores de decisão [57] e [58].

Os modelos de simulação devem ser atualizados com dados reais, sendo estes coletados de maneira automática. Neste âmbito, surgem dois conceitos a serem entendidos, sendo eles a Simulação em Tempo Quase Real e Simulação em Tempo Real [3]. A Simulação em Tempo Quase Real considera o tempo necessário para realizar as atualizações no modelo real, que acontecem em “rodadas de atualização”, de modo periódico. O intervalo entre tais “rodadas de atualização” pode variar em conformidade ao objetivo em que a simulação foi empregada, estando ligado às características específicas do processo [59]. A Simulação em Tempo Real possui um atraso desprezível, ou seja, neste caso, as “rodadas de atualização” são praticamente contínuas. [60] afirma que o principal objetivo desse tipo de simulação é aprimorar, em tempo real, principalmente o monitoramento, fidelidade e avaliação do sistema em estudo. [61] apresentam comentários importantes sobre a aplicação da Simulação em Tempo Real, pois não é simples garantir uma coleta de dados contínua e precisa, o que demanda alta tecnologia, tempo para implementação e aumenta o custo do projeto, sendo, portanto, considerado um desafio. Essas técnicas de simulação podem ser encontradas em diversas áreas de aplicação, principalmente, a Simulação em Tempo Real, que vem sendo melhorada ao longo do tempo devido às contribuições tecnológicas.

2.1.5 Realidade virtual e realidade aumentada

A realidade aumentada (do Inglês, *Augmented Reality - AR*) possibilita a integração do âmbito virtual (o que devemos implementar) com o mundo real (o que existe e vivenciamos). Segundo [19], as aplicações das tecnologias envolvendo realidade aumentada (RA) e dos GDs trazem soluções importantes para processos de fabricação, como a manutenção preditiva de estruturas. [62] definiram RA como uma forma de Realidade Virtual (do Inglês, *Virtual Reality - VR*) que auxilia o operador a controlar um processo real. [63] afirmam que a Realidade Virtual (RV) é responsável por criar um ambiente totalmente artificial, imaginário e que muitas vezes não representa o ambiente local. Neste caso, o usuário está inserido no mundo virtual que não tem conexão direta com o mundo real. Já a realidade aumentada mescla o ambiente virtual com o real, pois produz uma superposição de informações sobre a realidade atual. Deste modo, a tecnologia RA promove interações de sistemas, imagens e processos em tempo real com o ambiente local,

ou seja, o usuário interage com os objetos virtuais inseridos em um ambiente real. [64] confirmou as definições de [62], e também foi quem mencionou que RA permite ao usuário ver o mundo real com uma superposição de objetos virtuais. Ele em conjunto com [65] definiram RA como um sistema de objetos virtuais 3D que são integrados a ambientes reais 3D em tempo real. [66] propôs outra definição, a qual indicou que RA é caracterizada por adicionar camadas de informações contextualizadas, estas geradas por computador dentro do mundo real, as quais levam ao enriquecimento da realidade. Outras definições também foram baseadas naquelas de [64] e a maioria delas adotam três critérios básicos: a combinação do ambiente real com elementos virtuais, interatividade em tempo real e registro de elementos virtuais 3D dentro da percepção da realidade aumentada [67].

A tecnologia RA contribui com a melhoria do tempo operacional, auxílio dinâmico e contextual, rastreabilidade em tempo real e de outros parâmetros [5]. Em adição, colabora com os fabricantes de maneira inteligente e remota, reduzindo o árduo trabalho industrial e ajudando-os a atingirem maior público, mas também acompanhar a evolução tecnológica [68]. A aplicação de RA na manutenção, montagem, controle industrial e observabilidade tem se tornado realidade nesta nova era digital [69].

Os avanços das técnicas de escaneamento 3D, sensores e recursos computacionais, vêm contribuindo e possibilitando cada vez mais essa interligação e controle dos sistemas. Esta evolução justifica a necessidade cada vez maior da melhoria dessas tecnologias para aumentar a robustez e autonomia dos sistemas envolvidos. Dessa forma, haverá mais possibilidades de integrar indústrias e otimizar a produção com implementações mais leves e eficientes, pois geralmente as implementações são muito complexas de serem desenvolvidas e utilizadas, visto que frequentemente requerem uma base estrutural sólida para serem executadas. Com a tecnologia GD, RA ganhou, rapidamente, a atenção em diversos cenários e especialmente no âmbito da fabricação.

O conjunto de tecnologias e recursos advindos da Indústria 4.0 trazem novas perspectivas relacionadas à manutenção preditiva, principalmente para a área industrial. Neste contexto, a proposta é antecipar a falha do dispositivo, reduzir as horas de manutenção e prolongar o ciclo de vida dos produtos através de análises dos processos industriais e medidas relacionadas às falhas, como por exemplo medidas de temperatura e vibração. Para cumprir com os objetivos supracitados, criam-se mecanismos de alerta ou sistemas de aviso para identificar e prevenir falhas antes de ocorrerem, sendo possível melhorar a manutenção corretiva e preventiva.

[70] desenvolveram recentemente uma aplicação com RA para auxiliar a manutenção remota aplicada na indústria robótica. Sua função específica é garantir a cooperação entre a mão de obra técnica local e o fabricante. [68] também propuseram uma sistemática revisão do estado da arte das aplicações de RA no contexto da manutenção e também apresentou algumas de suas limitações técnicas. Dentro desses estudos realizados por [68],

surgiram diversas aplicações de RA na indústria. Estas dizem respeito às operações de campo, como operação da manutenção, dos dispositivos utilizados no sistema de hardware de RA, o desenvolvimento da plataforma usada para desenvolver o sistema RA, a tecnologia de rastreamento, o método de iteração e a solução de autoria para criar o conteúdo dos sistemas de RA. Reconhecendo a utilidade dessas novas tecnologias no contexto industrial, muitas companhias estão agora desenvolvendo aplicações com RA sobre uma ampla variedade de campos como: logística, marketing, educação, manutenção e outros de forma a melhorar a performance dos serviços.

[69] desenvolveram aplicações com RA para auxiliar operações de manutenção remota para melhorar os serviços oferecidos por empresas deste segmento. Essas aplicações são implementadas a partir de módulos. O módulo de inspeção permite aos especialistas identificarem a posição e a causa de uma falha. Já o módulo registrador de manutenção permite gravar os procedimentos de manutenção para facilitar o tratamento de casos similares. Esse último módulo também é baseado em uma linguagem universal permitindo a manutenção especializada, visando a universalizar a comunicação com diversos países.

Um novo método de monitoramento, avaliação de estado e detecção de falhas em rolamentos foi proposto por [19], baseado em GD. Essa abordagem cria um GD de um motor real em operação, com foco no monitoramento dos rolamentos de motores elétricos, com base na influência de diversas medidas no estado de conservação do rolamento. Aqui também foi aplicada a técnica RA, por meio da emulação 3D, que permite a integração do equipamento físico com o motor virtual (gêmeo) em tempo real. A Figura 4 mostra o contexto de aplicação destas tecnologias no âmbito industrial, bem como as principais características de cada recurso, permitindo inferir a derivação de RA a partir de RV.

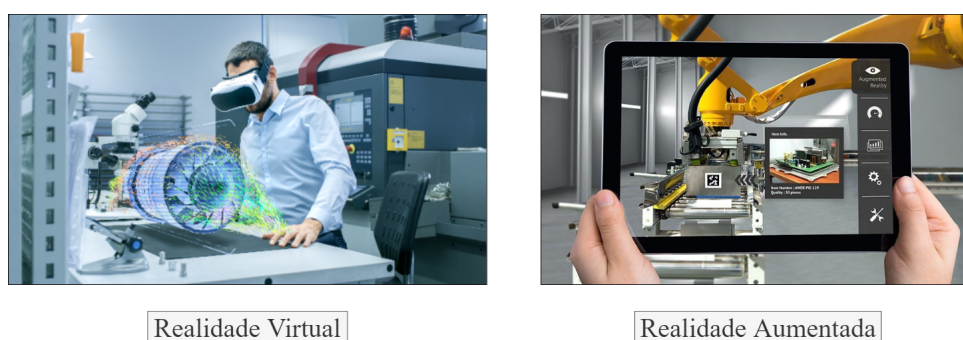


Figura 4 – Contextualização e diferenças entre RV e RA. Fonte: baseada em [4] e [5].

2.1.6 Ferramentas utilizadas no desenvolvimento de GDs

2.1.6.1 Softwares de simulação dinâmica

Uma das etapas de construção de um GD é reproduzir os modelos de simulação dos equipamentos mais importantes do sistema. Neste sentido, foi necessário buscar ferramentas de simulação dinâmica para prosseguir com o desenvolvimento dos modelos.

No mercado existem inúmeros *softwares* que a primeira vista cumpririam com os pré-requisitos exigidos pelo STP como AnyLogic [71], Simcad Pro [72], FlexSim [73], *SIMUL8* [74] e outros semelhantes. Eles trazem um ambiente 2D ou de programação para desenvolvimento das lógicas, restrições, controle de variáveis inerentes ao modelo e, em paralelo, outra perspectiva de simulação 3D. No entanto, esses programas são mais direcionados para modelar processos logísticos e gestão de manufatura, no geral, relacionados à produção. Além disso, não possuem um recurso intuitivo ou de fácil acesso que possibilite a comunicação com outros programas da mesma área. Outras plataformas de simulação dinâmica possuem interface de comunicação flexível, linguagem de programação de alto nível, recursos de simulação via diagrama de blocos, variedade de bibliotecas e modelos consolidados. Os ambientes de simulação mais utilizados atualmente para construção de modelos dinâmicos são o Matlab [75], OpenModelica [6], MapleSim [76], Modelon [77], Dymola [78], SimulationX [79] e Wolfram System Modeler [80].

A escolha do ambiente correto está diretamente relacionada ao objetivo, necessidades, configurações do modelo a ser implementado, e também do escopo do projeto. A Figura 5 mostra os programas que podem ser utilizados para o desenvolvimento de GDs. Avaliando os pré-requisitos existentes foi escolhido para este trabalho o Wolfram System Modeler. As subseções 2.1.6.2, 2.1.6.3 e 2.1.6.4 serão direcionadas a explicar algumas condições previamente avaliadas para o desenvolvimento de GDs.



Figura 5 – *Softwares* de simulação dinâmica.

2.1.6.2 Linguagem Modelica

Modelica é a linguagem para modelar sistemas dinâmicos. Ela é baseada em equações e orientada a objetos que permitem a criação de componentes e a visualização gráfica dos resultados de simulação dos modelos desenvolvidos. Possui código aberto (do Inglês, *Open Source*) e foi criada por uma organização sem fins lucrativos denominada Modelica Association desde 1997. Esta organização envolve membros da academia e indústria do mundo todo. As informações mais precisas sobre a linguagem de programação modelica estão disponíveis em [6].

A associação Modelica está contribuindo muito para o cenário de simulações. Eles elaboraram uma biblioteca de componentes básica, padrão e de código aberto que possibilita ao usuário o desenvolvimento de modelos simples. Estes podem ser relacionados a diferentes áreas como sistemas elétricos, mecânicos, eletromecânicos, térmicos, hidráulicos e outros.

Os modelos disponíveis, construídos matematicamente por suas respectivas funções de transferências, foram testados e validados pela academia. É perceptível que quanto mais componentes estiverem disponíveis, mais fácil e rápido será o desenvolvimento do sistema em sua totalidade. Outro recurso muito importante é a possibilidade de criação de outros componentes ou modelos a partir daqueles que já existem, pois cada sistema possui a sua peculiaridade que deverá ser implementada. A Figura 6 mostra o ambiente de programação Omedit construído e baseado em linguagem Modelica, pela associação vinculada.

2.1.6.3 Interface FMI

Modelo de interface funcional (do Inglês, *Funcional Mock-up Interfaces – FMI*) vêm sendo usado constantemente para exportação e co-simulação de modelos dinâmicos [7]. O uso deste recurso traz maior independência e liberdade aos processos de simulação. Em outras palavras, é possível desenvolver o modelo em um ambiente de simulação, muitas vezes pago, e compilá-lo em um ambiente de simulação gratuito, desde que este último possua suporte FMI.

Os modelos são exportados como arquivos FMUs, que são Unidades de Modelos Funcionais (do Inglês, *Funcional Mock-up Units - FMU*). Os arquivos FMUs podem ser exportados por dois métodos: intercâmbio ou troca de modelos (do Inglês, *Model Exchange*) e co-simulação (do Inglês, *Co-Simulation*). A Figura 7 apresenta o mecanismo de comunicação entre plataformas de simulação, realizada por meio de arquivos FMU.

O primeiro método de exportação permite que a compilação ou integração seja responsabilidade da plataforma geradora do arquivo FMU, ou seja, o solver não acompanha

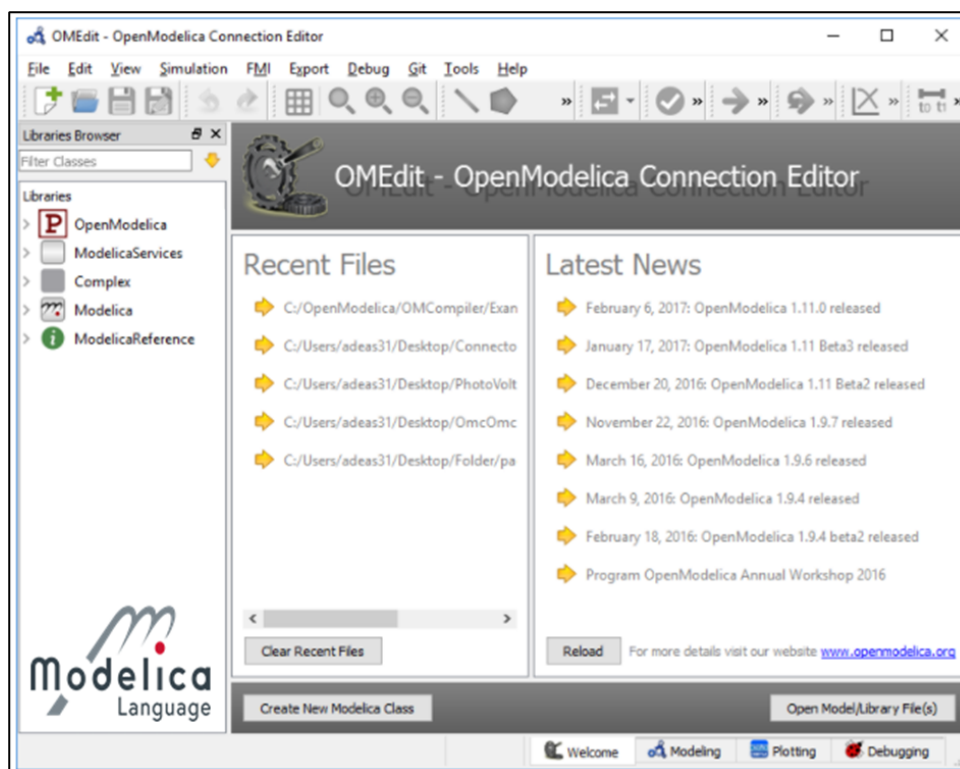


Figura 6 – Plataforma Omedit “OpenSource” disponibilizada pela associação Modelica. Fonte: [6].

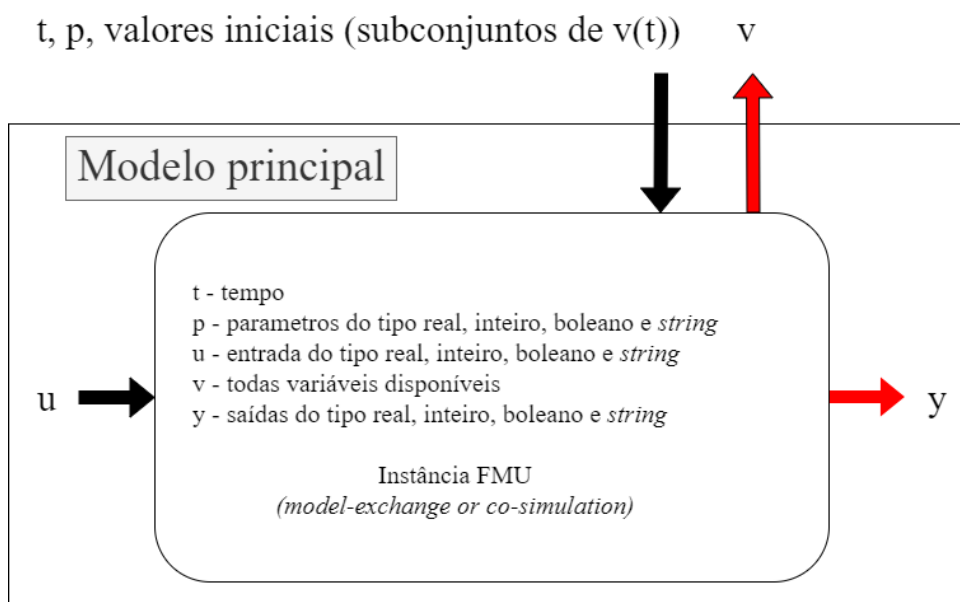


Figura 7 – Fluxo de dados entre o ambiente de programação originário e o arquivo FMU. Fonte: [7].

o conteúdo do arquivo FMU. Já o método de co-simulação traz consigo o *solver* de integração da plataforma de origem do modelo dinâmico. Como mencionado anteriormente, os arquivos FMUs podem ser compilados na maioria dos ambientes de simulação que os produzem, mas também podem ser simulados usando linguagem de código C. A interface

com o *software* Python pode ser proporcionada utilizando a biblioteca FMPy, enquanto *softwares* como QTronic, Microsoft Visual Studio e outros possibilitam a simulação com códigos implementados em linguagem C [7].

2.1.6.4 Wolfram System Modeler

O System Modeler cumpre com todos os pré-requisitos necessários para o desenvolvimento de um GD. É um ambiente de simulação e modelagem de última geração, intuitivo, flexível e destinado a sistemas ciber-físicos. Ele permite a modelagem de caráter industrial, multidomínios ou sistemas complexos. Esta plataforma não é gratuita, mas possui um bom preço de mercado, tendo em vista os recursos da ferramenta e a concorrência. Uma vez comprado, o acesso ao System Modeler será disponibilizado ao usuário com algumas bibliotecas, exemplos e documentação vinculados ao pacote adquirido.

A biblioteca padrão disponibilizada pela associação Modelica é integrada ao ambiente, permitindo a utilização de componentes prontos e auxiliando o desenvolvimento de novos. Entretanto, bibliotecas mais específicas como a *hydraulics*, por exemplo, não é incluída na versão básica, pois é considerada um adicional ou “*add-on*”, podendo ser obtida paralelamente por preço específico. Para esta pesquisa, a biblioteca de hidráulica foi imprescindível para facilitar e agilizar a etapa de reprodução dos modelos existentes. Além disso, o Sytem Modeler possui a interface FMI que permite a geração de arquivos FMUs, possibilitando a integração e comunicação de ambientes de simulação, tendo como exemplo, o *software* Python. A Figura 8 mostra a plataforma de simulação.

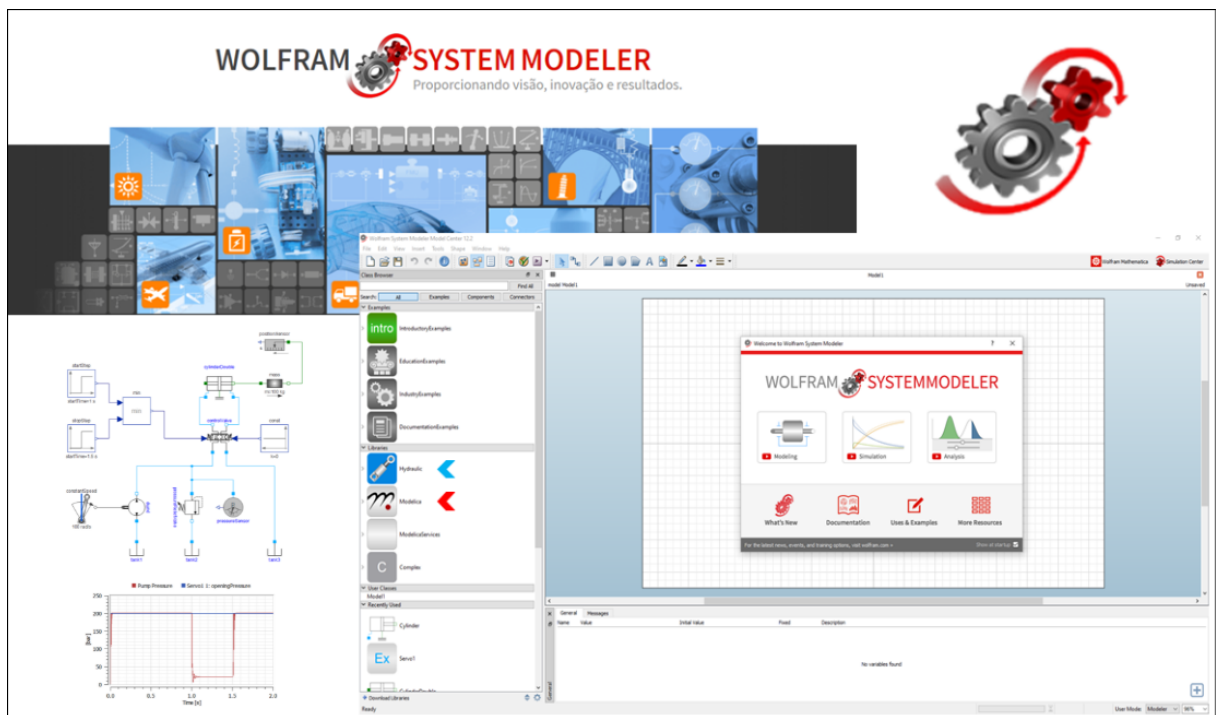


Figura 8 – *Software* Wolfram System Modeler. Fonte: adaptada de [8].

O *software* desenvolvido pela Wolfram Mathcore também pode ser integrado ao Mathematica. Este é outro ambiente de programação da Wolfram que traz inúmeras técnicas atuais de inteligência artificial como algoritmos de reconhecimento de imagens, otimização, estimação e predição. O ambiente é fundamentado em Wolfram Language, que é uma linguagem de programação simbólica e intuitiva. Com ela a plataforma de modelagem torna-se completamente integrada para analisar, compreender, e rapidamente iterar designs de sistemas, bem como impulsionar a inovação, a visualização dos modelos e obtenção de resultados. O Mathematica também não é gratuito, e pode ser utilizado apenas se for licenciado ou obtido em conjunto com o System Modeler, sendo a modalidade aderida para este trabalho [8].

2.2 Tipos de sistemas de transposição de Peixes

A finalidade de um STP é criar um caminho alternativo para as migrações de peixes em locais que possuem barragens, estruturas físicas ou até obstáculos naturais, os quais impedem o percurso natural das espécies de peixes [9].

As migrações íctias fazem parte da natureza destes animais, sendo motivadas por diferentes razões, as quais estão relacionadas, principalmente, as necessidades de reprodução e alimentação. O sentido do fluxo das diferentes espécies de peixes está relacionada à classe a que cada tipo pertence, sendo os três grupos principais: oceanódromos, patamódromos e diádromos. Esta classificação tem relação direta com o ciclo de vida de cada espécie. Os oceanódromos são considerados peixes de água salgada, enquanto os patamódromos de água doce. Os diádromos são peixes que vivem parte do seu ciclo de vida em água doce e a outra parte em água salgada. Estes últimos, são subclassificados em anádromos, catádromos ou anfídromos. Os anádromos são caracterizados por reproduzirem-se no rio e desenvolverem-se no mar, enquanto os catádromos possuem o ciclo de vida inverso ao dos anádromos, ou seja, se reproduzem no mar e se desenvolvem no rio. Por último, os anfídromos são aqueles que se reproduzem no rio, migram e permanecem parte de seu ciclo de vida no mar e, por fim, retornam para o rio [81].

Para [82], a escolha do tipo do STP a ser implementado em um grande empreendimento, que interfira no percurso natural do curso de água, deve estar baseada na análise dos seguintes itens:

- As espécies de peixes que serão transpostas pelo sistema;
- Volume do fluxo de água no interior da estrutura;
- Variações de nível entre montante e jusante;
- Acidentes topográficos;

- Desnível a vencer;
- Custo de funcionamento;
- Transporte sólido.

Os STPs precisam reproduzir as condições naturais do fluxo de água do rio, visto que houve a interrupção do seu curso natural devido à intervenção do homem no ambiente. De acordo com a [14], toda construção que interromper ou modificar o curso d'água de rios em domínio da União (Brasil) deve possuir um STP eficiente para evitar a mortandade de peixes ou até mesmo a extinção de diversos ecossistemas, prejudicando também, a comunidade local que sobrevive da atividade pesqueira.

Ainda, segundo [9], os tipos mais comuns de STPs são o tipo escada (do Inglês, *Fishladder*), eclusa (do Inglês, *Fishlock*) e elevador (do Inglês, *Fishelevator or Fishlift*). Além destes, existem outros diversos tipos de STPs, como por exemplo, os mistos, os quais na maioria dos casos são baseados em estruturas comuns. A diferença está na adição dos meios de transporte para os peixes, como caminhões ou embarcações, responsáveis por conduzi-los à montante da barragem. Estes tipos são conhecidos como captura e transporte (do Inglês, *Trap and Truck*). Os tipos de STPs serão melhor explicados nas subseções 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 e 2.2.4.

2.2.1 Escada de peixes

A escada de peixes possui uma estrutura simples quando comparada com as demais, sendo o arranjo básico característico de uma escada com soleira ou degrau como mostra a Figura 9. Elas são formadas por reservatórios sequenciais interligados por degraus. O fluxo da água que percorre este STP é descendente, ou seja, a água entra pelo degrau superior (montante) em sentido ao degrau inferior (jusante) da estrutura.

O processo de transposição neste tipo de sistema é semelhante ao natural. O fluxo de água, os degraus e os reservatórios criam um caminho próprio para a migração dos peixes. Estes ultrapassam os degraus ou soleiras, saltando ou nadando, nas épocas de migração trófica e reprodutiva. As funções dos degraus ou soleiras são facilitar a migração dos peixes e controlar os níveis de água dos reservatórios subsequentes, do início ao fim da escada [9].

O STP do tipo escada possui algumas variações em relação às suas edificações. Algumas hidrelétricas fazem o uso de sistemas de transposição escada com orifício como mostra a Figura 10, com o objetivo de favorecer o deslocamento dos peixes de fundo. Outra alternativa é a escada Denil apresentada na Figura 11, desenvolvida para espécies de peixes anádromos ou diádromos, mais comuns no hemisfério norte. Esta estrutura é aplicada em casos onde é necessário produzir diferenças de velocidade do fluxo de água

no interior da escada, sendo produzidas velocidades maiores no centro do STP e menores nas adjacências, graças aos ajustes na forma física do sistema.

Mais uma adaptação é a escada vertical *slot* ilustrada na Figura 12, que ao contrário da estrutura física do tipo Denil, possui barreiras no centro e canais laterais livres. As barreiras centrais possuem vãos nas soleiras, permitindo o deslocamento de peixes de fundo. Já os jatos laterais promovem maior velocidade e atraem peixes de superfície. Além destes, existem outras variações ou adaptações que podem contribuir para a melhoria e atratividade dos STPs do tipo escada.

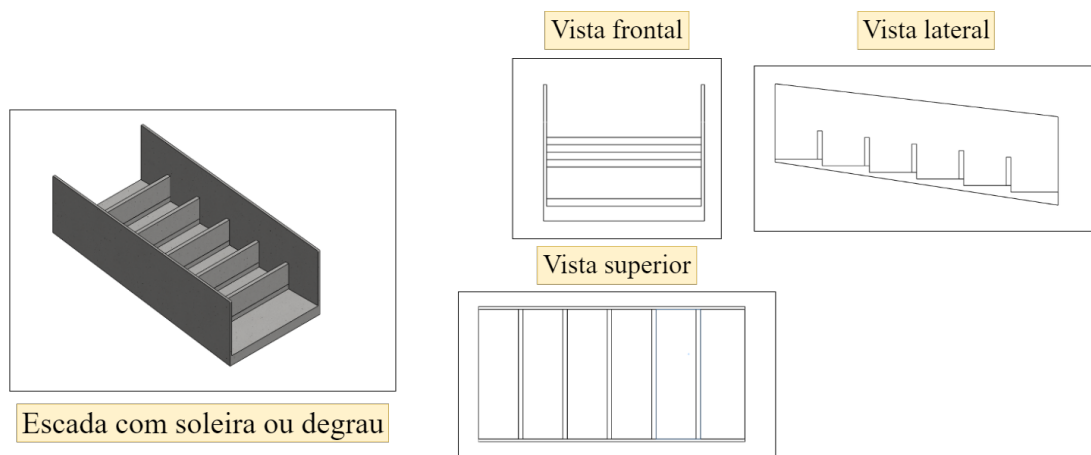


Figura 9 – Escada com soleira ou degrau. Fonte: baseada em [9].

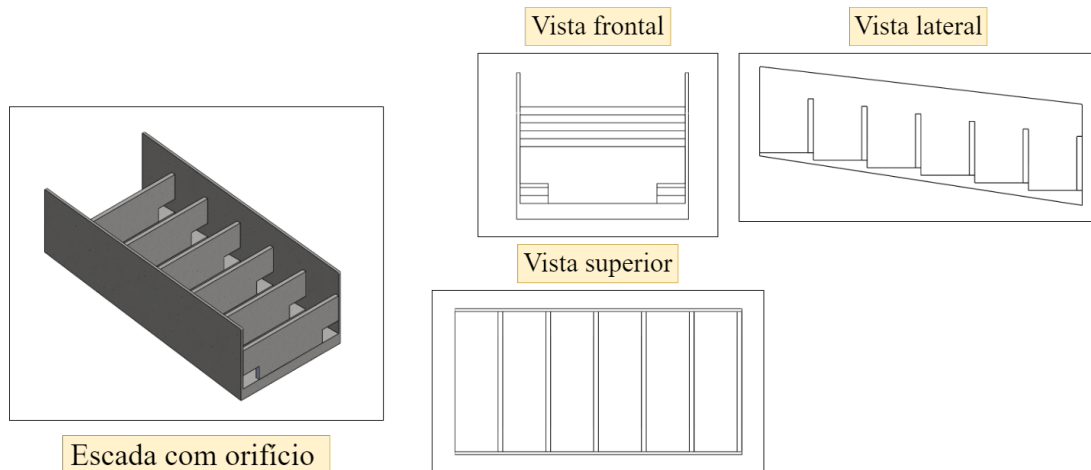


Figura 10 – Sistema de transposição de peixes do tipo escada com orifício. Fonte: baseada em [9].

2.2.2 Eclusa de peixes

As eclusas de peixes são provenientes do conceito das eclusas utilizadas para navegação. A estrutura é composta por comportas, conduto e reservatórios. Um dos reserva-

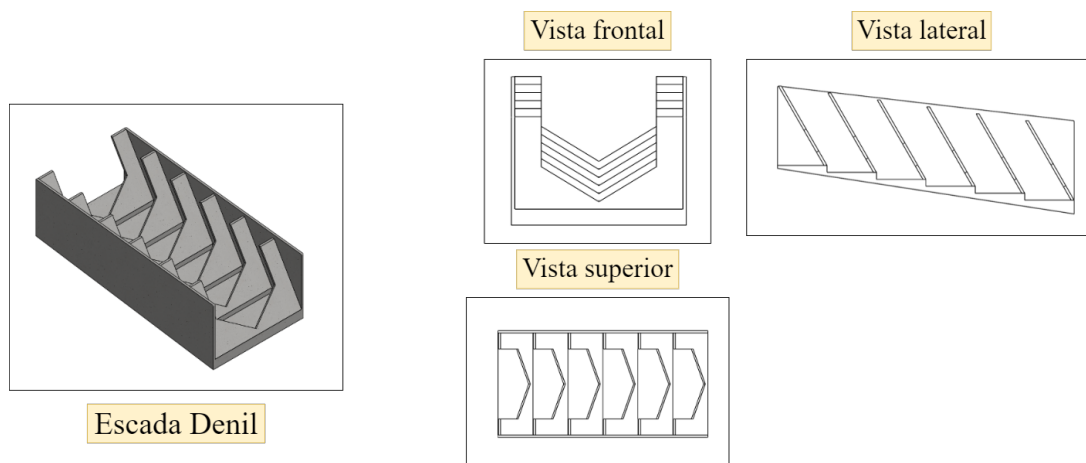


Figura 11 – Escada Denil. Fonte: baseada em [9].

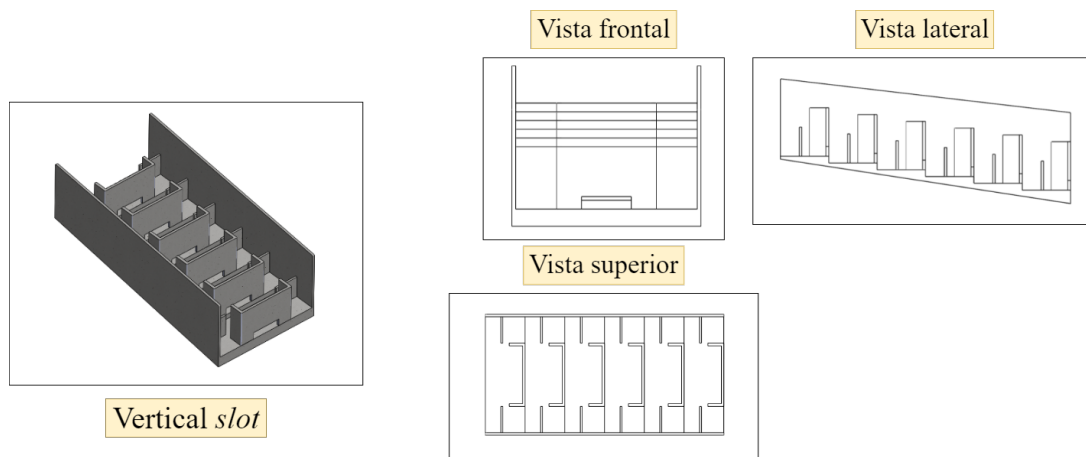


Figura 12 – Sistema de transposição de peixes do tipo escada vertical slot. Fonte: baseada em [9].

tórios está localizado a montante da barragem e o outro a jusante, sendo eles interligados pelo conduto. As comportas inerentes a cada um são manipuladas conforme as etapas do processo de transposição. A Figura 13 mostra o esquema típico de uma eclusa de peixes.

Existem dois sentidos para a transposição: transposição ascendente e descendente. A primeira acontece com os peixes que percorrem em direção às cabeceiras do rio. Na descendente os peixes movimentam-se na direção da foz do rio.

O processo de transposição ascendente funciona da seguinte maneira: quando a comporta do reservatório de montante está fechada e a comporta do reservatório de jusante está aberta, o sistema está configurado para atrair os peixes para o confinamento. Em seguida, ocorre o fechamento da comporta do poço de jusante e abertura da comporta do poço de montante, com isso haverá o inundamento da eclusa permitindo a passagem dos peixes confinados para montante do rio. Agora, no processo de transposição descendente é necessário inverter as ordens de abertura e fechamento das comportas dos reservatórios

de montante e jusante.

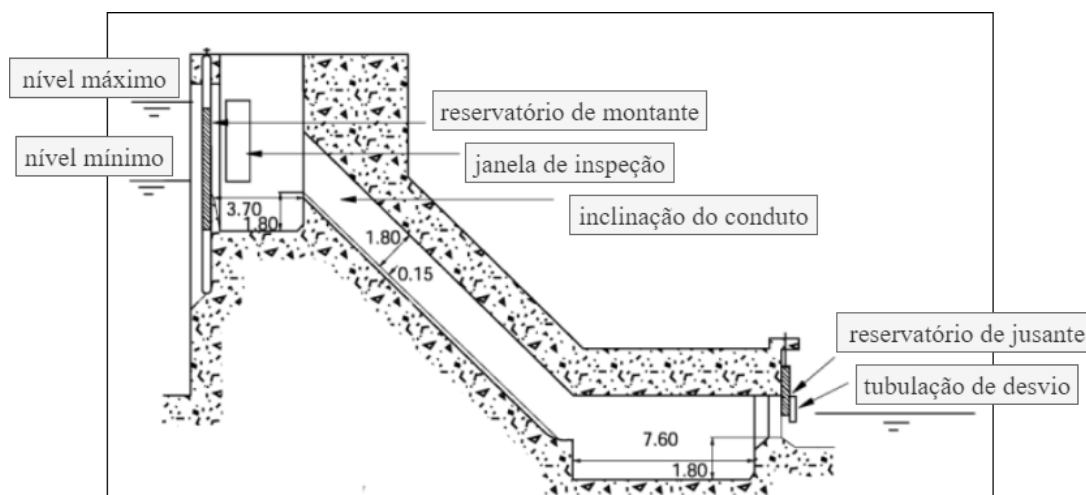


Figura 13 – Sistema de transposição de peixes do tipo eclusa. Fonte: adaptada de [10].

2.2.3 Elevador de peixes

Os STPs com elevadores ou caçambas de peixes são conhecidos como sistemas de transposição mecânicos. Nestes, a automação industrial é extremamente importante para o correto funcionamento do modelo. A diferença entre as eclusas de peixes para o elevador de peixes está principalmente no método utilizado para superar o desnível existente entre jusante e montante ou vice-versa. Portanto, nos STPs do tipo elevador de peixes, o elevador tem como objetivo transportar os peixes entre os reservatórios de montante e jusante. Entretanto, é necessário a princípio criar estratégias de atração para os peixes até os reservatórios de jusante e montante. Estas estratégias são baseadas geralmente na geração de fluxos contínuos de água de modo a reproduzir condições semelhantes às das correntezas naturais.

O processo de transposição nesse tipo de modelo é dividido em três partes: atratividade, carga e descarga. Os peixes atraídos pelo fluxo de água são direcionados para o elevador, que estará em condições adequadas para recepção do cardume, e em sequência, depositados a montante ou jusante da barragem, conforme o tipo de transposição solicitada.

2.2.4 Captura e transporte de peixes

Os sistemas de transposição do tipo misto são utilizados para atender as características demandadas e restrições específicas do empreendimento. Este tipo de STP incorpora às estratégias de transposição supracitadas certas variações, como por exemplo, a adição de meios de transporte. A Figura 15 mostra um modelo para um STP do tipo captura e transporte.

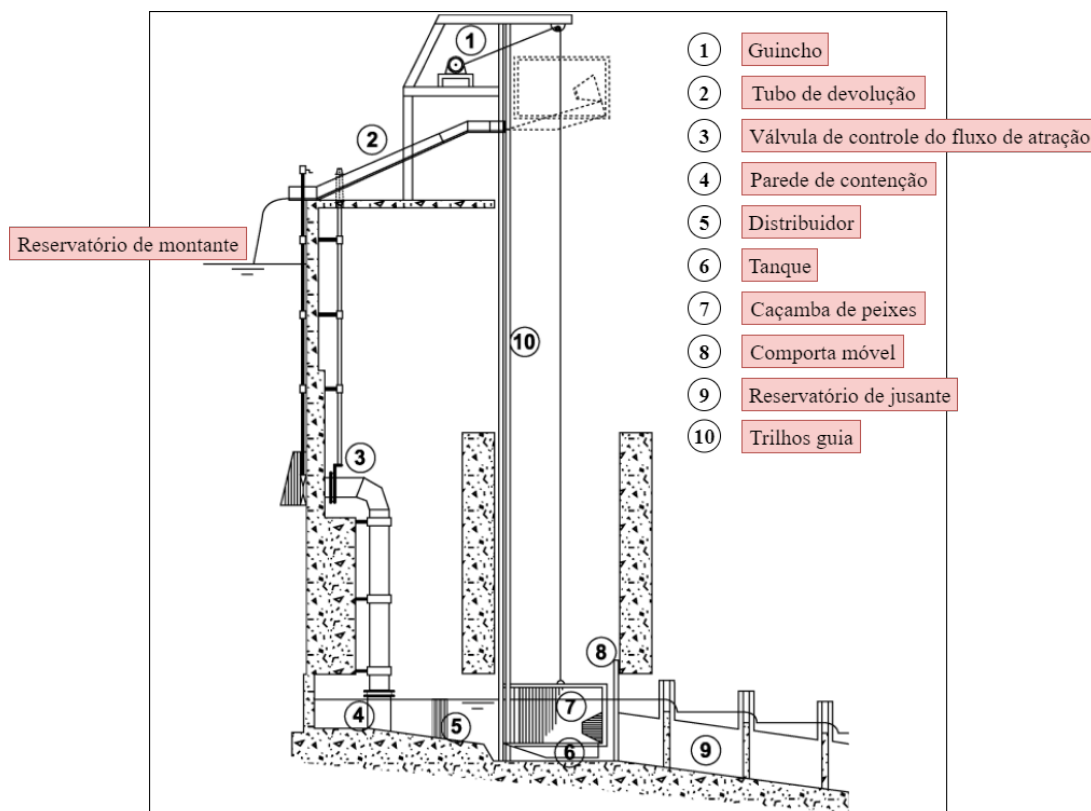


Figura 14 – Sistema de transposição de peixes do tipo elevador. Fonte: adaptada de [10].

Algumas usinas hidrelétricas existentes no Brasil possuem STPs que não interligam diretamente o lado de montante com o de jusante da barragem da usina. Neste caso, o processo de transposição é dividido em etapas de atração, confinamento, carga, descarga, triagem e transporte.

Algumas usinas no Brasil utilizam as próprias eclusas de navegação, com embarcações próprias, para armazenar e posteriormente transpor os peixes de jusante para montante ou vice-versa. Outras possuem caminhões com tanques adaptados e específicos para a recepção dos peixes, possuindo como função no processo o transporte via rodovia até o ponto de descarga.

2.3 Vertedores

Por definição, em hidráulica, os vertedores são estruturas simples como: paredes de concreto, diques de pedras ou aberturas específicas sobre as quais um líquido escoar. Também, são utilizados como obstáculos à passagem de um fluido, podendo ser denominados de extravasores [11]. Eles são aplicados para controlar o nível do fluido represado, sendo geralmente a água como pode ser observado em usinas hidrelétricas. Sua principal função é verter a água de montante da barragem para jusante. Os vertedores podem ser controlados ou não através de comportas. Por este motivo, são utilizados para realizar a

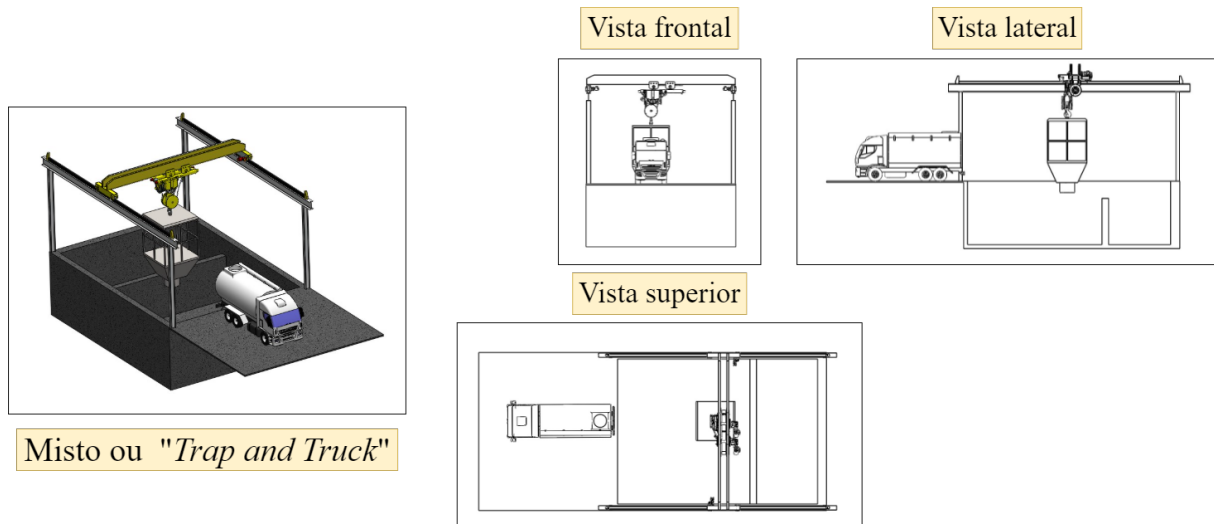


Figura 15 – Sistema de transposição de peixes do tipo captura e transporte. Fonte: baseada em [9].

medição de vazão, controle de vazão e nível destas represas.

Um vertedor é composto pela borda horizontal ou soleira, bordas verticais ou faces e a carga do vertedor, representada por H . Eles podem assumir diferentes configurações, sendo escolhidas conforme a sua aplicabilidade. As bases de classificação destas estruturas são: a forma, podendo ser simples (retangular, trapezoidal ou triangular) ou composto (seções combinadas); a altura relativa da soleira, trazendo consigo as opções de vertedores completos ou livres ($p > p'$) e incompletos ou afogados ($p < p'$); a natureza da parede, podendo apresentar as características de parede delgada (chapas ou madeira chanfrada) ou parede espessa ($e > 0,66H$); e a largura relativa, tornando possível a existência de vertedores sem contrações laterais ($L = B$) ou contraídos ($L < B$). A Figura 16 mostra um vertedor retangular de parede delgada, sem contrações e com possibilidade de controle de vazão através da movimentação de comporta.

A classificação de um vertedor segue os critérios supracitados. Deste modo, é possível afirmar que um extravasor retangular de parede delgada e sem contrações é de forma simples (retangular), com a possibilidade de ser livre ($p > p'$) ou afogado ($p < p'$), com a espessura da parede menor ou igual a $0,66H$ e respeita o critério $L = B$, confirmando que a largura relativa é igual largura real do vertedor.

A equação geral para orifícios de grandes dimensões é dada pela Equação 2.1. Por convenção, a Equação 2.1 é simplificada da seguinte maneira. Adota-se $h_1 = 0$, $h_2 = H$, resultando em $Q = \frac{2}{3}C_dL\sqrt{2g}H^{3/2}$. Assim, assumindo que $Q = K LH^{3/2}$, então $K = \frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}$. Como valor médio de $C_d = 0,62$, então pode-se afirmar que $K = 1,83$ [11]. Este método contribuiu com o surgimento das equações mais usuais para o cálculo de vazão em vertedores, sendo esta a equação elaborada por Francis, definida pela Equação 2.2;

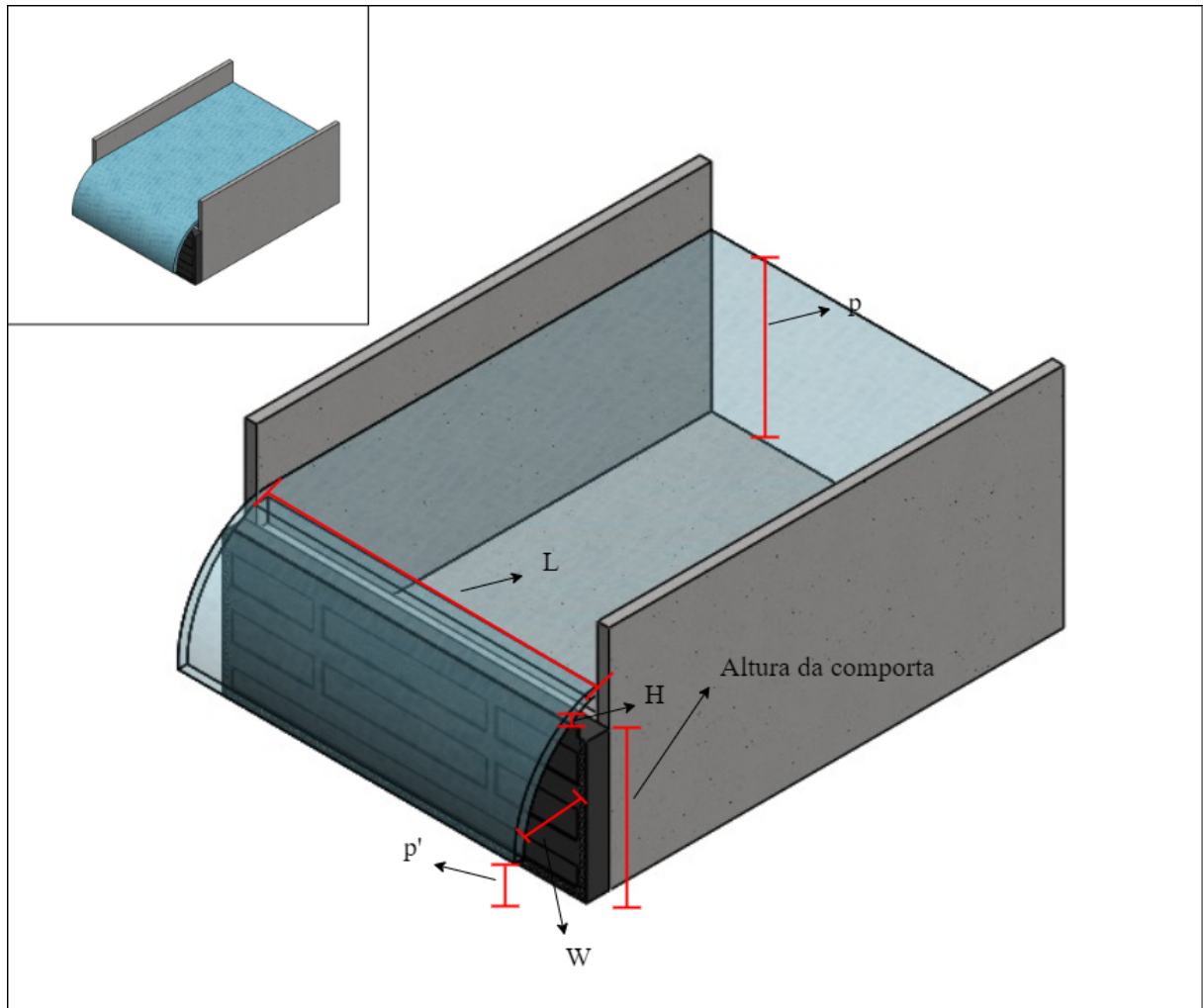


Figura 16 – Vertedor retangular de parede delgada, sem contrações e com vazão controlada por comporta. Fonte: baseada em [11].

pela Sociedade Suíça de Engenheiros e Arquitetos, apresentada pela Equação 2.3; e a de Bazin como mostra a Equação 2.4. Tais equações podem ser aplicadas em vertedores onde há a atuação da pressão atmosférica na lâmina de água vertente, que é área preenchida por W .

$$Q = \frac{3}{2} C_d L_v \sqrt{2g} (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.1)$$

$$Q = 1,838 L_v H^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.2)$$

$$Q = \left(1,816 + \frac{1,816}{1000H + 1,6} \left[1 + 0,5 \left(\frac{H}{H+p} \right)^2 \right] \right) L_v H^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.3)$$

$$Q = tL_v H \sqrt{2gH} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.4)$$

Onde:

g – aceleração da gravidade;

L_v – largura do vertedor;

H – altura da carga do vertedor (lâmina de água vertente);

p – altura da soleira do vertedor;

p' – altura da lâmina de água da soleira a jusante do vertedor;

W – área preenchida pelo ar nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP);

t – valores tabelados em [11].

3 Metodologia

O processo de criação do GD consistiu de cinco etapas principais. Estas etapas foram sintetizadas e listadas em sequência.

- 1ª Etapa: estudar, entender e aprender as características do sistema, produto ou processo que terá seu gêmeo concebido;
- 2ª Etapa: identificar e criar os modelos dinâmicos mais importantes no *software Wolfram SystemModeler*;
- 3ª Etapa: otimizar o nível de instrumentação;
- 4ª Etapa: desenvolver interfaces virtuais;
- 5ª Etapa: estabelecer a conexão entre o meio físico e virtual.

3.1 Sistema STP-GD

O gêmeo digital construído possui três partes fundamentais: o modelo real, interfaces de comunicação e modelos virtuais. No modelo real estão dispostos os equipamentos do STP, os quais possuem sensores e atuadores. Estes dispositivos estão conectados diretamente aos CLPs. Cada painel de comando possui um CLP e uma IHM respectiva. Os CLPs são utilizados para integrar o nível de instrumentação com as IHMs, ou seja, recebem as informações instantâneas do nível mais baixo, e disponibiliza-os ao operador via IHM. Por outro lado, também repassam os comandos produzidos pelo operador aos atuadores do sistema.

Os painéis e as IHMs representam as centrais de comando e controle local respectivamente. A estação de controle remota ou sistema de supervisão e aquisição de dados (do Inglês, Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA) engloba as duas funcionalidades, tornando redundante a capacidade de observação e operação do STP. Apesar da redundância, a estação de controle remota é fundamental para a implantação do GD, pois recebe as variáveis de estado mais atuais e as destina ao modelo real. As variáveis de estado são utilizadas para alimentar os modelos virtuais, reproduzindo aquilo que é observado no modelo real em tempo quase real. A Figura 17 apresenta a arquitetura do GD construído para o STP do tipo misto.

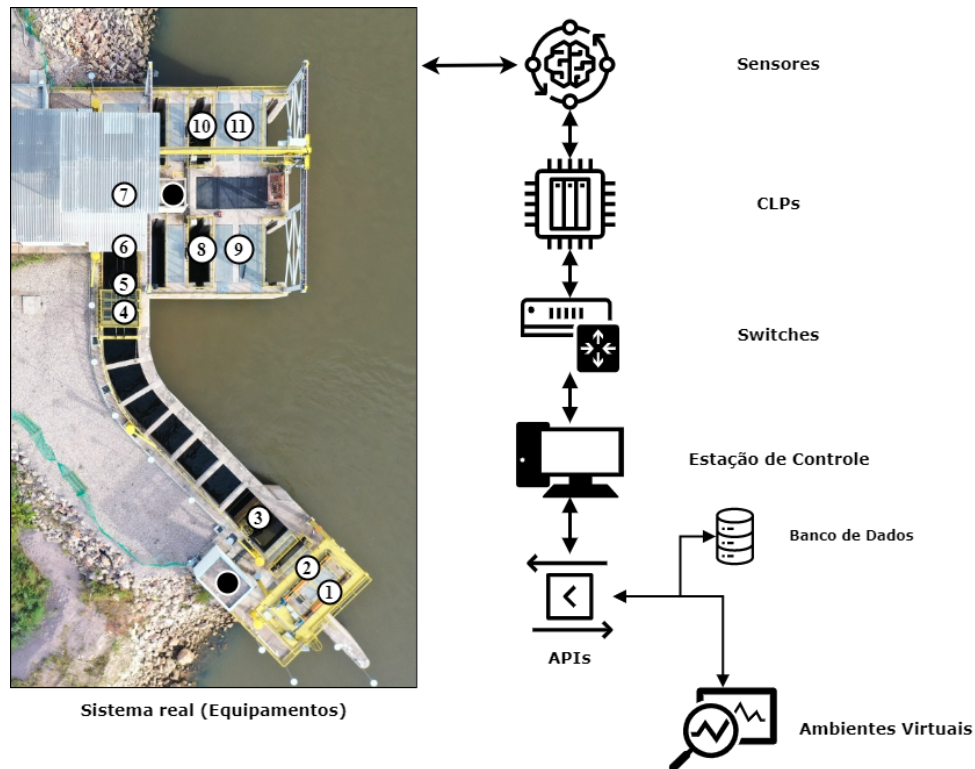


Figura 17 – Gêmeo digital do sistema de transposição de peixes do tipo misto.

3.2 Sistema de transposição misto

O sistema de transposição de peixes da usina hidrelétrica de Sinop-MT é do tipo misto. A função principal de qualquer STP é criar um caminho alternativo para as espécies migratórias de peixes, tendo em vista a manutenção do ecossistema local. Especificamente neste sistema, o processo de transposição acontece da seguinte maneira: os peixes são atraídos pelo fluxo e som da queda d'água gerados nos canais de bombeamento do STP; a captura se inicia no canal de entrada, pelo canal de fundo ou superfície; os peixes seguem até o canal de descanso, onde são conduzidos ao elevador de peixes por meio do carro empurrador; o elevador é içado para o primeiro andar do sistema e descarta os peixes capturados no tanque de seleção de espécies, onde é realizado o processo de triagem; por último, os peixes são conduzidos ao caminhão ou *transfish* que transporta apenas as linhagens migratórias para montante da barragem. A Figura 18 mostra o trajeto percorrido pelos peixes durante o processo de transposição.

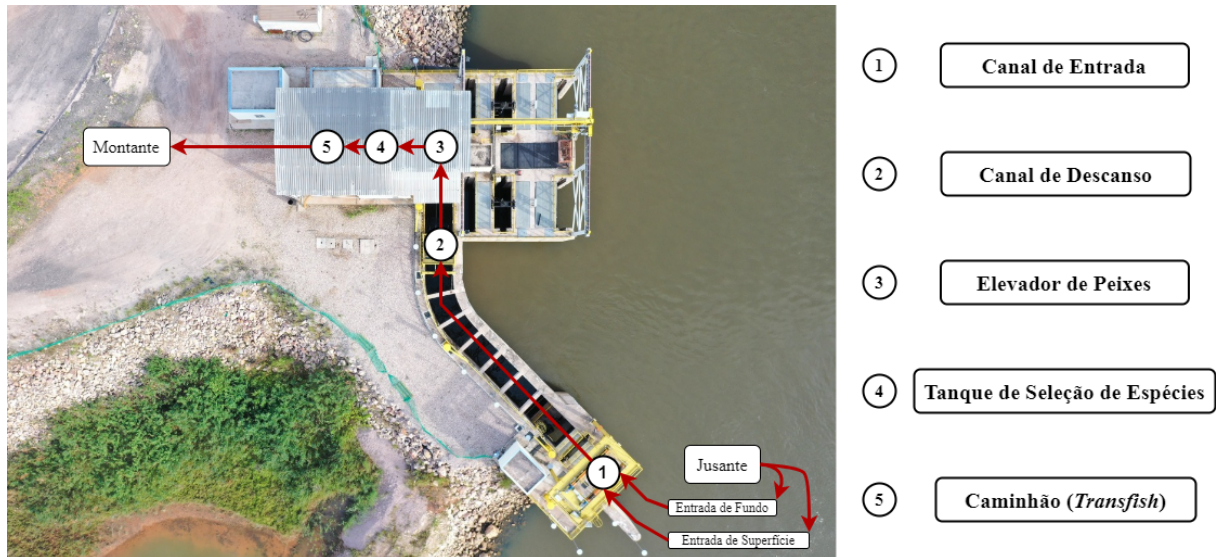


Figura 18 – Processo de transposição de peixes do STP pertencente à UHE Sinop.

O STP da UHE Sinop é compacto, entretanto possui inúmeros equipamentos, os quais constituem subsistemas. Basicamente, a alimentação geral, modo de operação e controle destes subsistemas são realizados por meio de cinco painéis principais: painel da comporta de fundo e superfície; painel da comporta mitra; painel do carro empurrador, grade móvel, elevador de peixes, comporta do elevador de peixes; painel das bombas submersíveis; e painel das comportas de regulação. Cada equipamento possui a sua importância para o processo de transposição. Por este motivo, foi estudado a função, o modo de controle e as possíveis configurações de funcionamento referente a esses aparelhos.

No canal de entrada do STP estão situadas as comportas de fundo e superfície. Estas comportas operam na maioria do tempo abertas, sendo fechadas apenas em atividades que demandam o esgotamento do canal de entrada, como é o caso de eventuais manutenções ou intervenções específicas de infraestrutura. Os mecanismos utilizados para movimentar as comportas de fundo e superfície, o carro empurrador, a grade móvel e o elevador de peixes são semelhantes, porém, existem divergências em relação ao dimensionamento técnico, visto que as cargas deslocadas por cada um são diferentes. Eles são formados por inversor, motor, freio, redutor de velocidade, tambor e cabos de aço. O inversor de frequência é utilizado para acionar e controlar a velocidade do motor. No eixo de rotação do motor é acoplado o freio e em seguida o redutor de velocidade. O freio tem a função de interromper o funcionamento do motor quando necessário. O redutor de velocidade é uma caixa de engrenagens, sendo utilizada para diminuir a velocidade de rotação da engrenagem maior, mas consequentemente aumentar a potência do eixo acoplado a ela, neste caso um tambor. Os cabos de aço estão presos ao tambor, mas também na comporta. O sentido de rotação do motor pode ser, horário ou antihorário, determinando se o movimento da comporta é de abertura ou fechamento.

A comporta mitra está localizada próxima às comportas de fundo e superfície. Ela auxilia na regulação do fluxo de água que percorre a entrada de superfície. Quando a comporta está completamente aberta a área de seção transversal por onde percorre a água é máxima. As folhas da comporta mitra, mesmo completamente alinhadas ou teoricamente fechadas, não são capazes de interromper o montante de água proveniente dos canais de bombeamento do STP, pois existe um vão natural de aproximadamente 700 *mm* entre elas. Neste caso, a área de seção transversal existente é mínima. Então, durante o movimento de abertura das folhas da comporta mitra a área de seção transversal aumenta, enquanto no movimento de fechamento a área de seção transversal diminui. Cada folha da comporta possui seu respectivo cilindro hidráulico, sendo estes acionados por uma central hidráulica existente na mesma sala do painel geral da comporta. Existem duas centrais hidráulicas idênticas no STP, uma delas está direcionada ao controle da comporta mitra e a outra às comportas vagão de montante e jusante. As centrais hidráulicas possuem diversos componentes, dentre eles estão as motobombas, bomba manual, as válvulas de retenção, válvulas direcionais de fluxo acionadas por solenoides, visor de nível, pressostatos, monômetro, tubulações, válvulas de esfera e outros.

O carro empurrador é uma estrutura utilizada para conduzir os peixes que chegaram ao canal de descanso até o poço do elevador. Ele possui uma grade integrada denominada de grade confinadora. O carro desloca-se ao longo do canal de descanso, portanto, possui uma posição inicial e uma posição final designadas como *trás* e *frente* respectivamente. Adiante ao carro empurrador está a grade móvel e o elevador de peixes. Durante a etapa de atração, em ordem cronológica, a grade móvel está fechada, o carro empurrador está parado na posição inicial e a grade confinadora está aberta. Após a observação visual de uma quantidade razoável de peixes no canal de descanso, mas também um tempo delimitado pelo operador do sistema, inicia-se a etapa de armazenamento e captura. Nesta etapa, o elevador de peixes está submerso e preparado para receber o cardume do canal de descanso, a grade móvel está aberta e a grade confinadora fechada. Com estes pré-requisitos cumpridos, movimenta-se o carro empurrador no sentido de sua posição final.

O elevador de peixes ou caçamba de peixes tem a função de transportar os peixes do poço de confinamento até o tanque de seleção das espécies. Este elevador é moldado conforme uma caçamba inclinada. Os peixes entram pela superfície do compartimento e saem por uma comporta lateral. A comporta da caçamba está fechada na maior parte do processo, sendo aberta apenas no primeiro andar para o descarte dos peixes capturados.

As bombas submersíveis estão localizadas nos canais de bombeamento de montante e jusante. Eles tem como finalidade prover o fluxo de água necessário para realizar a atração dos peixes para o interior da estrutura de captura. Nas épocas da piracema as espécies migratórias de peixes nadam contra a correnteza para cumprir com o seu ciclo de

vida natural. Por este motivo, o STP é configurado para impor uma velocidade de atração semelhante com àquela observada no rio, tendo em vista reproduzir as condições naturais do processo. Além disso, os canais de bombeamento possuem comportas de regulação ou vagão. Estas auxiliam no controle de nível dos canais, mas também ajudam na manutenção do nível de oxigenação do STP. O subsistema de bombeamento possui bombas submersíveis de fluxo axial do tipo *propeller*. Ele é composto por três bombas localizadas à montante do elevador de peixe e outras três à jusante. O volume de água proveniente do recalque é controlado pelas comportas vagão, as quais atuam como vertedores retangulares sem contrações. As comportas são independentes das bombas, mas podem ser manipuladas para variar o nível de água no canal de regulação e conseqüentemente controlar a vazão de água vertida. A Figura 19 mostra a localização dos principais equipamentos para o processo de transposição de peixes.



Figura 19 – Principais equipamentos do STP da UHE de Sinop.

3.3 Instrumentação

A eficiência de um GD está relacionada à disponibilidade de dados reais, de preferência, obtidos constantemente pelo nível de instrumentação do sistema. O STP é um sistema físico consolidado, e possui um nível de instrumentação direcionado para os equipamentos cruciais do processo de transposição de peixes. No entanto, é extremamente necessário entender a real eficiência deste STP. Assim, será possível avaliar se o nível de instrumentação atual é suficiente para suprir as necessidades de inspeção e operação.

3.3.1 Nível de sensoriamento existente

O STP da UHE de Sinop possui bom nível de automação, todavia não é explorado toda sua capacidade. Na estrutura estão dispostos cinco CLPs, os quais são responsáveis por iniciar os atuadores dos equipamentos principais do processo de transposição, mas também receber sinais dos sensores presentes ao longo do sistema.

O nível de sensoriamento do STP contém sensores de nível, fins de curso, posição, umidade, temperatura, óleo, pressão e tensão. Os sensores ou transmissores de nível estão posicionados no canal de entrada, nos canais de bombeamento e no rio. Estes são utilizados para medir o nível da água, podendo ser de regulação (interno) e adução (externo). Os fins de curso são essenciais para identificar o estado atual de comportas ou demais subsistemas. Assim, determina-se a posição inicial ou final, como também se está aberto ou fechado. Adicionalmente, alguns equipamentos possuem sensores de posição instantânea. As bombas submersas contam com dispositivos de detecção de umidade e temperatura; as centrais hidráulicas possuem transdutores de pressão e óleo; e os painéis elétricos apresentam voltímetros para verificação da tensão operativa.

3.3.2 Sensores adicionais

O nível de instrumentação do STP foi aprimorado. As métricas anteriormente analisadas eram frágeis e não convergiam em informações relevantes para o operador. Além disso, os sensores são fundamentais para a construção do GD, pois para o ambiente virtual se comportar de maneira idêntica ao sistema físico, a única maneira de reproduzi-lo virtualmente é através do monitoramento efetivo das condições reais.

A princípio, o GD foi alimentado pelos sensores existentes. Os sensores adicionais foram instalados, em sua maioria, no canal de entrada. Estes compreendem as sondas de monitoramento da qualidade da água, como a de temperatura (1), PH (2) e oxigênio dissolvido (3). Também foram instalados sensores de posição instantânea no carro empurrador (4), elevador de peixes (4) e na comporta do funil do tanque de seleção (5). No canal e no rio, foram instalados os molinetes hidrométricos, os quais são utilizados para medir a velocidade do fluxo de água (6). Adicionalmente, foram instaladas duas câmeras

subaquáticas (7) no canal de entrada, ambas para auxiliar na identificação e monitoramento dos peixes atraídos pelo STP. Uma das câmeras está posicionada no fundo do canal, para monitorar os peixes de fundo e a outra na superfície, para observar os peixes de superfície. Na estrutura do pórtico da comporta de fundo e superfície foram instalados um sensor de temperatura (8) e outro de luminosidade (9). Estes sensores possuem um papel complementar, pois possibilitam uma análise comparativa entre os valores medidos pela sonda de temperatura do conjunto de limnologia ¹, mas também referente à qualidade das imagens registradas pelas câmeras subaquáticas. Além destes, foram adicionadas para monitorar a operação do STP duas câmeras de monitoramento (10), uma delas para observar a despesca dos peixes e a outra para visualizar a condução dos peixes pelo carro empurrador.

A partir do processamento dessas medições pelo GD, será possível inferir, acompanhar e entender as condições de estresse dos peixes no canal, a localização em tempo real dos equipamentos envolvidos no processo de transposição, e ainda, quais são as velocidades de atração mais atraentes aos peixes. A leitura e registro dos dados coletados pelo nível de sensoriamento permitem a construção de históricos. Com isso, foi possível realizar a análise quantitativa e qualitativa do processo, como também encontrar configurações padronizadas de operação. Os sensores adicionais escolhidos para aumentar a capacidade de inspeção do sistema existente são:

1. Sensor de temperatura – modelo PT-1000 [83];
2. Sensor de PH – modelo ENV-20-PH [84];
3. Sensor de oxigênio dissolvido – modelo ENV-20-DOX [85];
4. Encoder incremental – modelo DFS60B [86];
5. Transdutor linear de posição – modelo LWH [87];
6. Sensor de proximidade para medição de vazão – modelo SMT-8M [88];
7. Câmeras subaquáticas – modelo 4K POE IP [89];
8. Sensor de temperatura ambiente – modelo PT100 [90];
9. Sensor de luminosidade ambiente – modelo HD2021T [91].
10. Câmeras de monitoramento – modelo VIP 3240IA [92].

O monitoramento da velocidade do fluxo da água do canal e do rio é atualmente realizado por molinetes hidrométricos. Estes dispositivos foram construídos em sua totalidade durante este trabalho. O instrumento foi projetado para trabalhar imerso em água.

¹ Relativo à qualidade da água.

Por este motivo, foi usinado em inox. Possui um hélice de alumínio e é estanque à água para trazer maior proteção ao encoder encapsulado. O molinete hidrométrico desenvolvido está apresentado na Figura 20

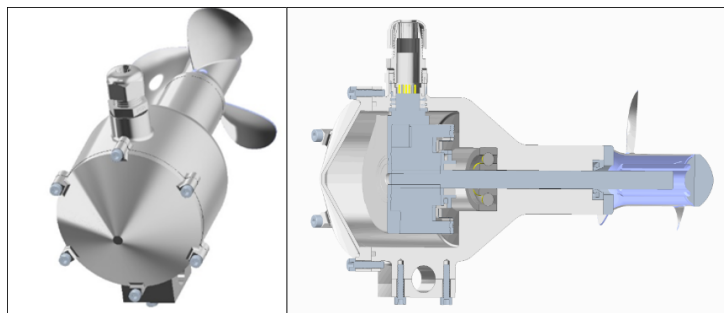


Figura 20 – Molinete hidrométrico (6).

O eixo do equipamento está acoplado ao sensor de proximidade, que é responsável por gerar pulsos elétricos conforme o número de revoluções observadas no eixo. Com isso, obtém-se o passo do hélice ou deslocamento linear. Portanto, ao monitorar a quantidade de revoluções que acontecem em um segundo é possível determinar a velocidade linear do fluido.

3.4 Ambientes virtuais

As interfaces virtuais desenvolvidas para compor o GD do STP consistiram no supervisor 3D e supervisor 2D. Os modelos 3D foram construídos em *software* CAD-3D e posteriormente adicionados à plataforma da Unity. Este ambiente de programação foi integrado ao Microsoft VisualStudio, que auxiliou a implantação de *scripts* de controle do ambiente virtual.

O supervisor 2D ou da operação foi construído por meio do *software* Elipse E3. A linguagem de programação adotada por esta plataforma é a *visual basic*, o que facilita a integração com ferramentas produzidas pelas Microsoft. Embora opere de maneira redundante ao supervisor 3D, o objetivo principal do supervisor 2D é oferecer a possibilidade de comando remoto aos operadores do STP. Tais ambientes operam de modo complementar. Enquanto o supervisor 2D é destinado a operação, o supervisor 3D tem com função transmitir as informações do sistema real de maneira dinâmica e interativa. Este monitoramento é realizado por meio de animações, vinculadas aos equipamentos e direcionadas a representar as condições atuais de cada um.

Com a base do ambiente virtual projetado, foi necessário redirecionar os dados obtidos e registrados em banco de dados à aplicação. Por este motivo, foram criadas APIs para estabelecer a comunicação entre sistema real, banco de dados e sistemas virtuais. Os dados que alimentam o ambiente virtual da Unity, bem como o supervisor 2D com-

preendem os alarmes e as variáveis de estado dos equipamentos presentes no STP. A Figura 21 mostra um esquema simplificado da arquitetura consolidada para implantação dos supervisórios 2D e 3D.

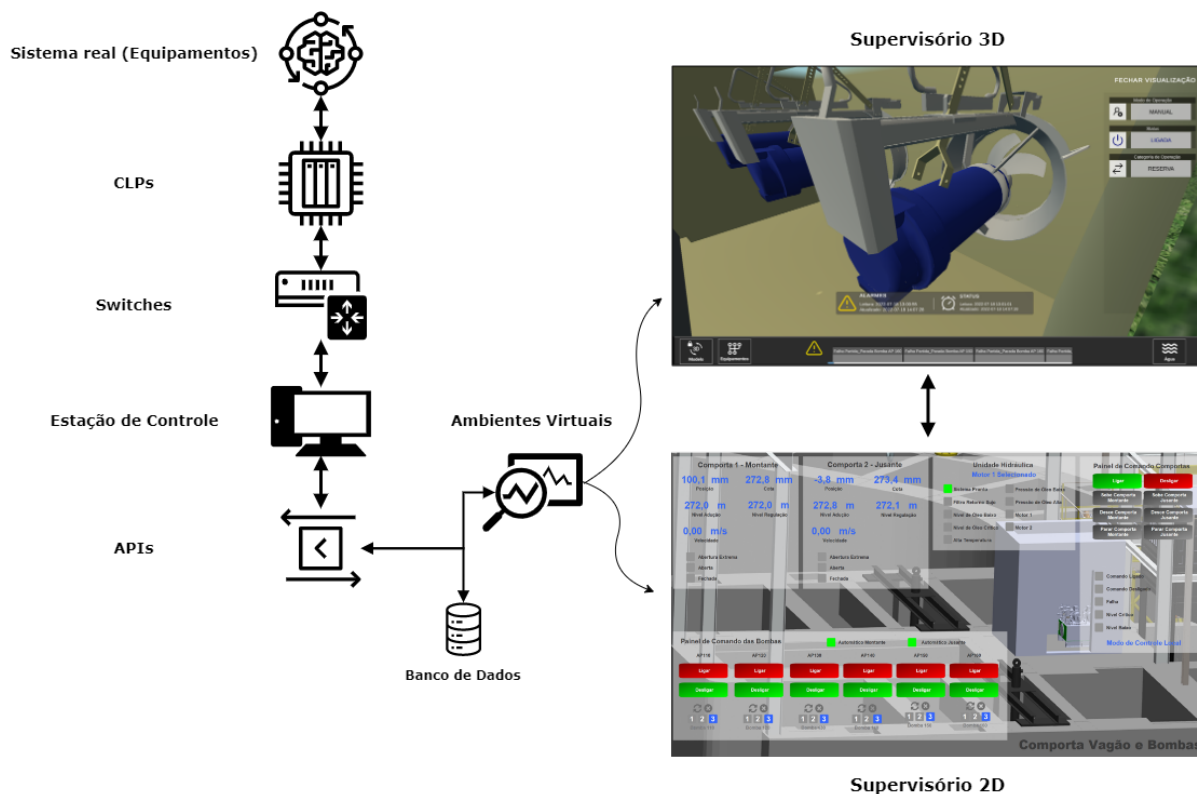


Figura 21 – Integração às interfaces virtuais.

3.4.1 Comunicação entre os ambientes real e virtual

A última etapa de desenvolvimento do GD consistiu na integração entre os ambientes real e virtual. Primeiramente, foi necessário construir uma rede interna no STP para conectar todos os equipamentos importantes para o sistema. Como mencionado anteriormente, o STP possui cinco painéis principais, consequentemente cinco CLPs. Cada CLP é responsável por equipamentos específicos, por exemplo: o CLP1 comanda as bombas submersíveis; o CLP2 controla o elevador de peixes, carro empurrador, grade móvel e grade confinadora; o CLP3 atua sobre as comportas de regulação; o CLP4 manipula a comporta mitra; o CLP5 controla as comportas de fundo e superfície; e o CLP6 os sensores adicionados ao nível de instrumentação do STP.

Três CLPs possuem comunicação modbus RTU (serial) e os outros dois modbus TCP/IP. Como a rede principal foi construída no protocolo ethernetIP, foi necessário utilizar conversores RTU para ethernetIP. Estes dispositivos foram utilizados para conectar os três CLPs e dois controladores multipamétricos, já os outros dois CLPs foram conectados diretamente aos switches instalados na rede principal. Adicionalmente, foi instalado um CLP e uma unidade remota auxiliar, utilizada para estabelecer comunicação com os

sensores adicionais instalados ao longo do STP. O tipo de comunicação entre a unidade remota e esse CLP é etherCAT, enquanto do CLP com a rede é TCP/IP. A Figura 22 mostra o passo a passo realizado para integrar os ambientes, agregando à rede consolidada os sensores adicionais apresentados na 3.3.2.

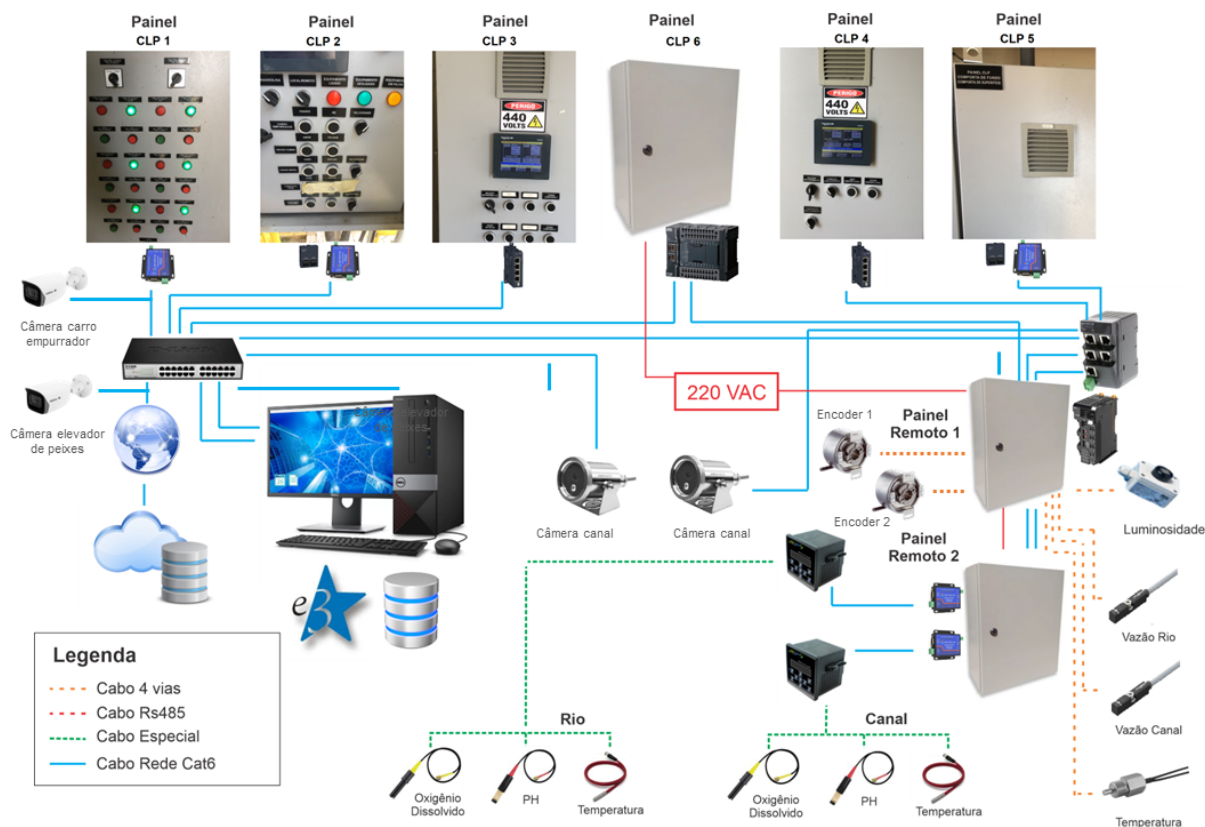


Figura 22 – Rede física consolidada.

3.5 Modelos de simulação

Os modelos dinâmicos construídos são os principais para o ambiente de simulação do GD desenvolvido. Eles foram elaborados a partir de uma gama de exemplos introdutórios disponíveis em [93]. A partir da interligação desses modelos ou subsistemas origina-se então o STP-GD. Deste modo, a partir de valores pré-definidos para a entrada desses modelos, será possível criar diversos cenários, que poderão ser reproduzidos ou não para a realidade. A Figura 23 mostra os subsistemas que compõem ambiente de simulação do GD do STP do tipo misto.

Alguns modelos do ambiente de simulação do STP-GD foram desenvolvidos no *software* Wolfram System Modeler. Entretanto, para utilizá-los constantemente, foi necessário criar um arquivo especial, denominado *FMU.file*. Este arquivo permite a integração de plataformas de simulação. Com ele é possível utilizar um compilador *open source*, como o Python, para geração dos mesmos cenários de simulação observados no *software* de origem. O funcionamento do STP-GD é diretamente dependente das variáveis de entrada, as quais são provenientes do nível de sensoriamento do STP. A Figura 24 mostra um fluxograma explicativo para execução do STP-GD em Python.

Além dos modelos de simulação elaborados no System Modeler, também foi construído outro com o Microsoft Visual Studio. Este último, compreende o ambiente de simulação de vazões, onde são construídos cenários fictícios de operação para os equipamentos, tendo como resultado possíveis condições de atratividade.

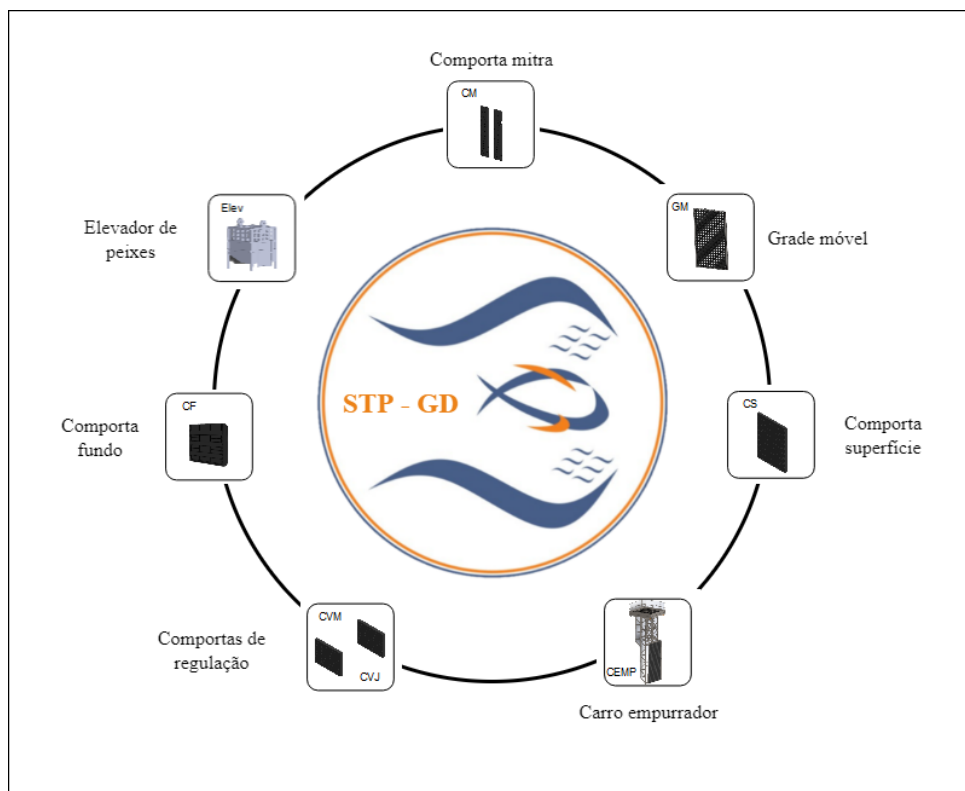


Figura 23 – Modelos dinâmicos ou subsistemas que compõem o ambiente de simulação do gêmeo digital do STP.

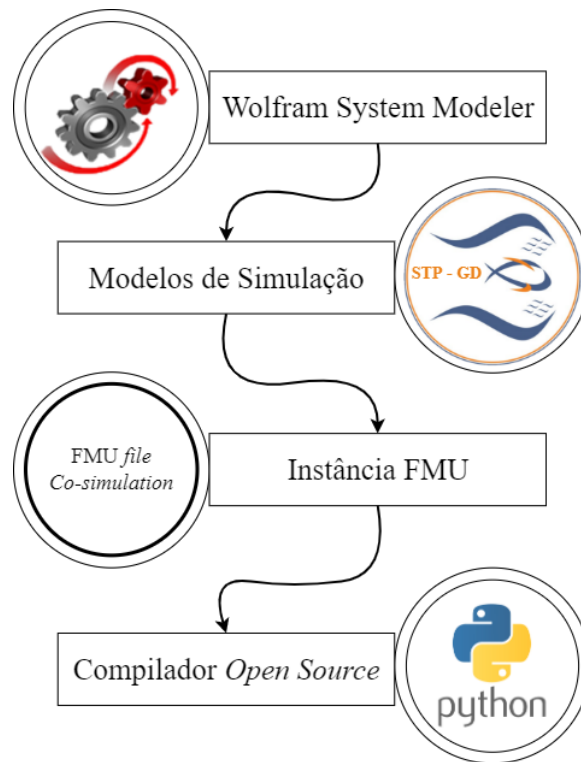


Figura 24 – Metodologia para execução dos modelos de simulação em Python.

3.5.1 Primeiro modelo

Os subsistemas da comporta de fundo, comporta de superfície, carro empurrador, grade móvel, elevador de peixes foram desenvolvidos de maneira semelhante. Por este motivo, para não replicar informações ao longo do texto, será apresentado uma estrutura padrão detalhada que foi utilizada para os equipamentos supracitados. O primeiro modelo ou primeira estrutura padrão do mecanismo de acionamento e controle possui inversores de frequência, motores, freios, tambores com cabos de aço, e por fim o equipamento que será atuado. A Figura 25 mostra o diagrama de blocos implementado para representar o primeiro modelo.

O inversor de frequência foi formado por uma fonte de tensão controlada. O sinal de controle permite a configuração do nível de tensão nominal, frequência nominal, mas também da frequência atual ou desejada. Esta última interfere diretamente na velocidade de rotação do motor, a qual é definida conforme as características e demanda de cada equipamento. A Figura 26 mostra como foi elaborado o diagrama de blocos para representar o inversor, sendo posicionado na sua saída um medidor de corrente, para auxiliar no ajuste e na verificação do controle de velocidade do motor.

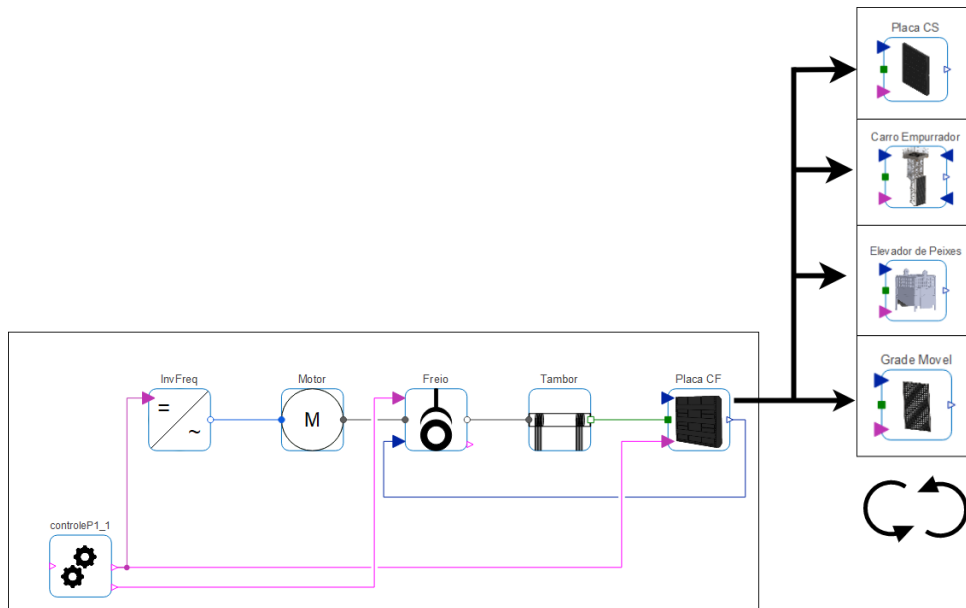


Figura 25 – Primeiro modelo ou primeira estrutura padrão para acionamento e controle de alguns equipamentos do STP.

O eixo de rotação do motor é acoplado ao freio e ao tambor respectivamente. O motor utilizado é do tipo gaiola de esquilo, trifásico, o qual possui três pares de polos e atua na frequência nominal sistêmica (60 Hz). O diagrama de blocos do motor possui dois sensores para auxiliar no monitoramento da potência mecânica no eixo, e da velocidade de rotação, como mostra a Figura 27. O bloco *aimdata* representa os dados específicos do motor, como número de pares de polos, frequência nominal, momentos de inércia do estator e do rotor.

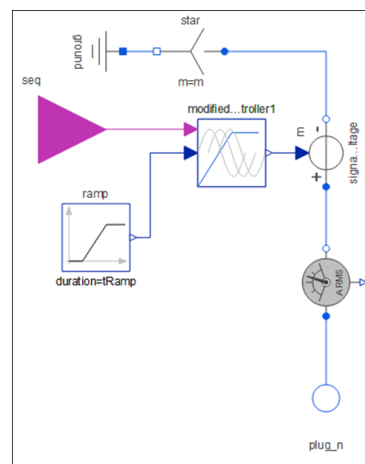


Figura 26 – Diagrama de blocos do inversor.

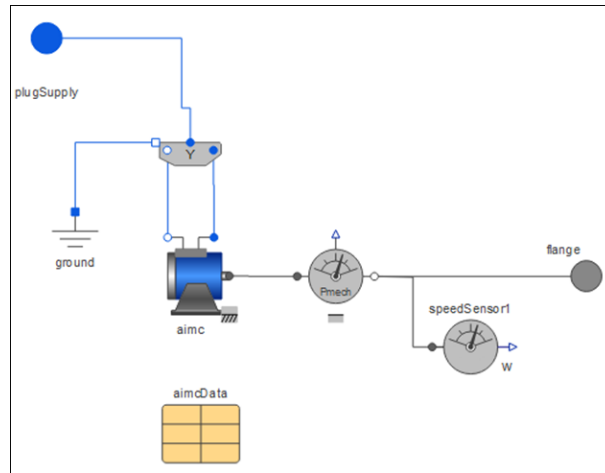


Figura 27 – Diagrama de blocos do motor.

O freio é acionado apenas em duas ocasiões. Quando os fins de cursos identificam a conclusão do movimento e em eventuais paradas de emergência. O deslocamento da estrutura pode ser uma translação na direção vertical ou horizontal. A frenagem ocorre com a mudança no sentido de rotação do motor, por meio da inversão da sequência de fases disponíveis para o motor. O diagrama de blocos que representa o modelo do freio desenvolvido é apresentado na Figura 28.

O tambor está conectado ao redutor de velocidade, o qual tem a função de diminuir a rotação proveniente do motor. A Figura 29 mostra o diagrama de blocos que representa o tambor. A relação de transformação de velocidade (i_{nec}) depende da rotação do motor elétrico (n_{mot}) e da rotação do tambor (n_{tb}) como é explicitado na Equação 3.1.

$$i_{nec} = \frac{n_{mot}}{n_{tb}} \quad (3.1)$$

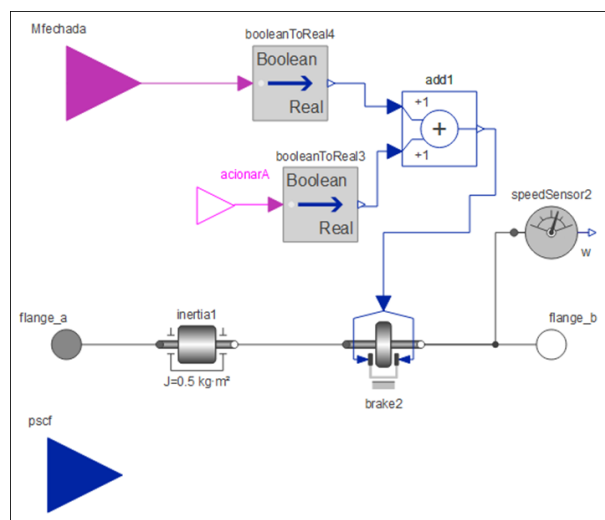


Figura 28 – Diagrama de blocos do freio.

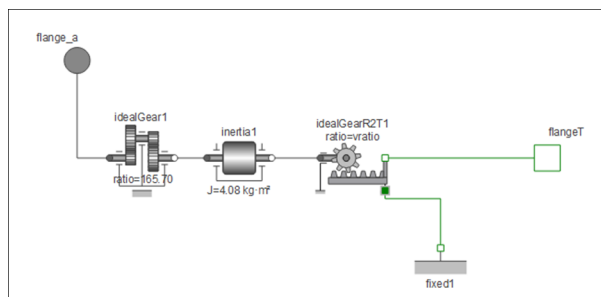


Figura 29 – Diagrama de blocos do tambor.

Por último, foram modelados os equipamentos do STP. A princípio foi necessário entender a função do equipamento, mas também a sua contribuição para o STP, para avaliar as divergências na implementação de cada um. Neste sentido, foram considerados na modelagem o tipo de movimento, a massa, as forças dinâmicas envolvidas na sua operação e outras características relevantes. A Figura 30 mostra o digrama de blocos implementado para comporta de fundo (CF).

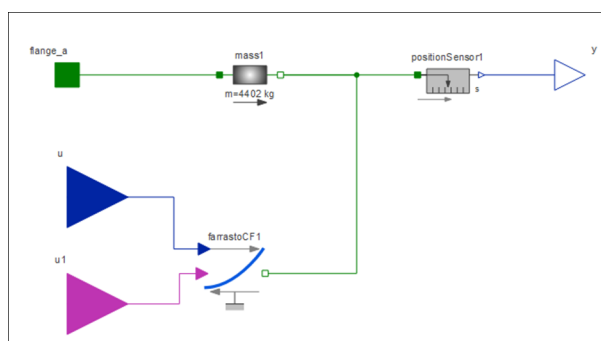


Figura 30 – Diagrama de blocos da comporta de fundo.

Na construção do diagrama de blocos da comporta de fundo foram consideradas a sua massa, bem como as forças dinâmicas envolvidas na movimentação da comporta. As forças dinâmicas resultantes na maioria das comportas e no elevador de peixes do STP dependem apenas das forças peso e empuxo. A força peso é uma força estática, entretanto, a força empuxo varia conforme o volume de água que a comporta desloca ao ser submersa em água. As equações para o cálculo das forças consideradas foram retiradas de [94]. O monitoramento da força empuxo está vinculado à altura molhada da comporta. Por este motivo, o nível de água do canal de entrada é medido por sensores estrategicamente posicionados. Para representar o nível da água na simulação foi definido uma variável h , responsável por repassar esta informação à comporta de fundo. A Figura 31 mostra as forças envolvidas na operação e na dinâmica da CF. A força empuxo é calculada pela Equação 3.2, enquanto a força peso pela Equação 3.3. Na Equação 3.2, ρ representa a massa específica da água, H_m é a altura molhada e A_{base} é a área da base da comporta. Já na Equação 3.3, m é a massa da comporta e g a gravidade. H_m depende diretamente de h , que é a variável utilizada para monitorar o nível de água no canal, enquanto os demais

valores são constantes previamente definidas. Com as forças envolvidas na operação da comporta de fundo, calcula-se a força resultante, como mostra a Equação 3.4.

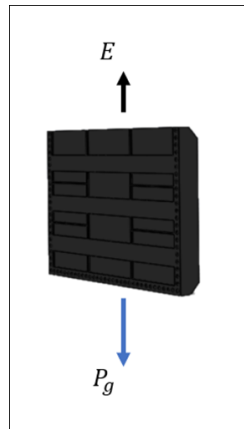


Figura 31 – Comporta de fundo.

$$E = \rho \cdot H_m \cdot A_{base} [N] \tag{3.2}$$

$$P_g = m \cdot g [N] \tag{3.3}$$

$$f_r = P_g - E [N] \tag{3.4}$$

As forças dinâmicas da comporta de fundo são obtidas da mesma maneira do que na comporta de superfície, na grade móvel, no elevador de peixes e nas comportas vagão posicionadas nos canais de bombeamento. A Figura 32 mostra as forças envolvidas na movimentação de algumas estruturas do STP, as quais realizam translação vertical no sentido para cima ou para baixo.

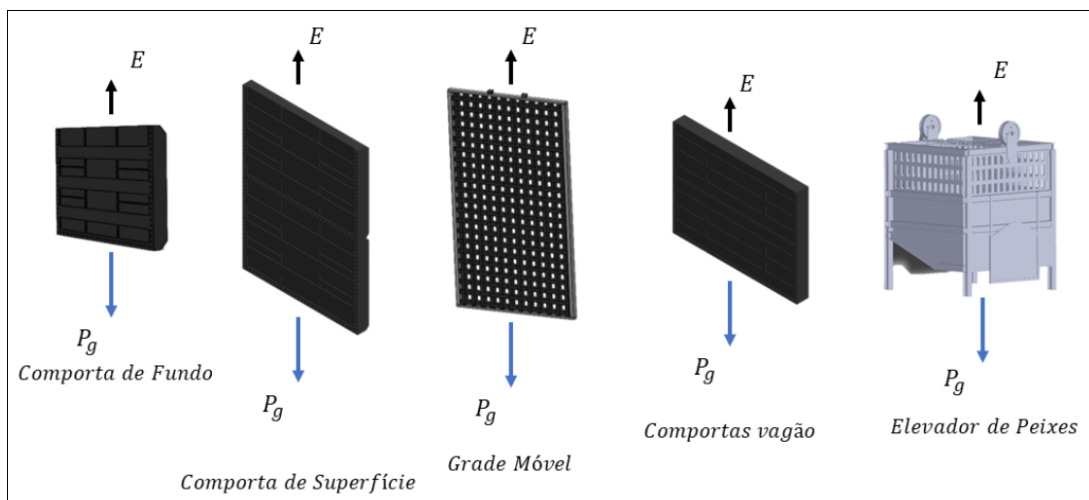


Figura 32 – Forças envolvidas na operação de equipamentos do STP.

3.5.2 Segundo modelo

O segundo modelo é formado por uma central hidráulica, pelas folhas da comporta mitra, um bloco de controle e variáveis inerentes ao STP que trazem informações de vazão e do nível da água no canal de entrada. Estas últimas são obtidas de sensores físicos posicionados ao longo do canal de entrada. A Figura 33 mostra o diagrama de blocos implementado. Seguindo a mesma ideia, o modelo confeccionado para as comportas vagão de montante e jusante dos canais de bombeamento é muito semelhante. As diferenças estão na estrutura a ser movimentada, nas forças dinâmicas envolvidas na movimentação do equipamento e nas variáveis de controle.

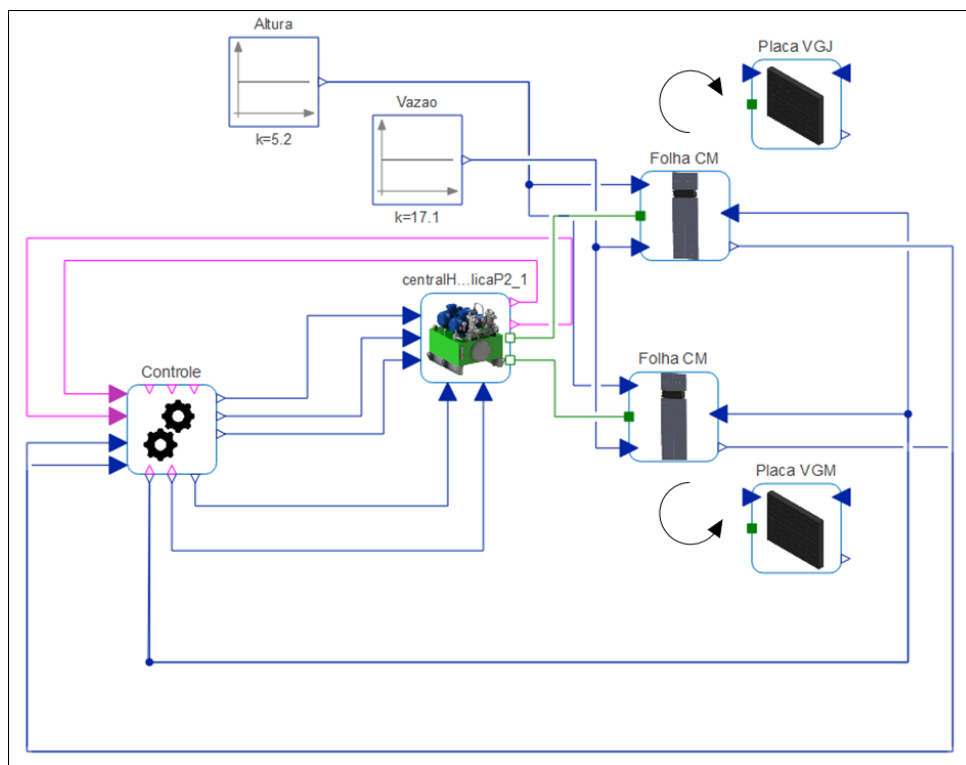


Figura 33 – Segundo modelo ou segunda estrutura padrão para acionamento e controle das comportas mitra e de regulação.

O componente principal do diagrama de blocos do segundo modelo é a central hidráulica. Ela é responsável por realizar a pressurização do óleo para movimentar, adequadamente, os cilindros hidráulicos. A velocidade de expansão e compressão de cada cilindro é constante. A central hidráulica é formada por duas motobombas, uma bomba manual, um conjunto de válvulas e dois cilindros hidráulicos. Os pressostatos são sensores que fazem o controle de pressão do sistema em funcionamento. As válvulas e as bombas operam ao comando do bloco de controle. A Figura 34 apresenta o modelo confeccionado para a central hidráulica.

As motobombas e bomba manual foram implementadas a partir de componentes bases da biblioteca *Hydraulics*, que é um *add-on* do *software* Wolfram SystemModeler,

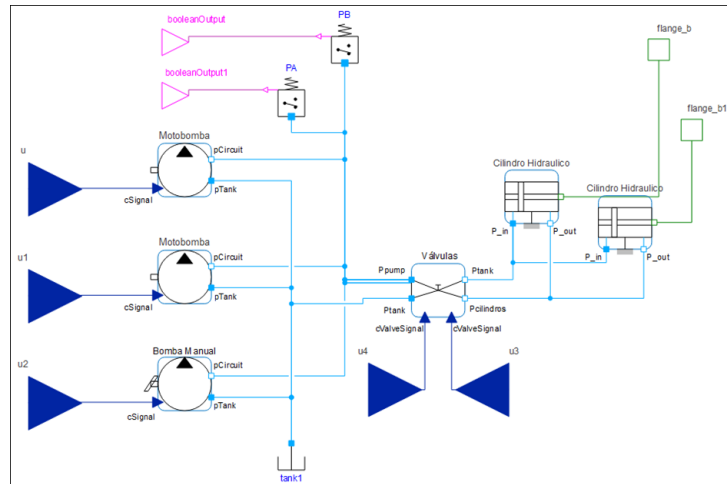


Figura 34 – Diagrama de blocos da central hidráulica.

bem como o conjunto de válvulas e os cilindros. Os dados de entrada são provenientes do STP real. Além disso, para ajustar os modelos, foi necessário realizar diversas simulações, visando a reproduzir condições de operação próximas as da realidade. A comporta mitra (CM) é constituída de duas folhas, as quais operam em sincronia. A Figura 35 apresenta o modelo das folhas da CM. As forças dinâmicas envolvidas na operação de abertura e fechamento da comporta são as forças dos cilindros hidráulicos, a força hidráulica e força de arrasto. A Figura 36 mostra o diagrama de forças envolvidas na operação da comporta. Como mencionado anteriormente, as equações para o cálculo das forças consideradas foram retiradas de [94].

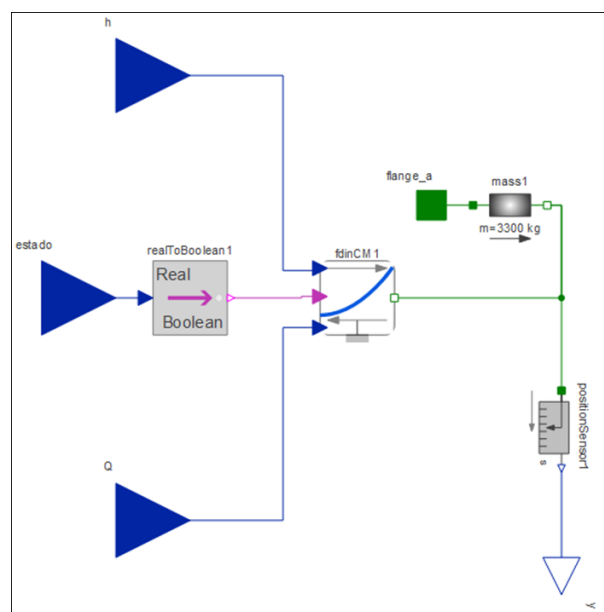


Figura 35 – Diagrama de blocos da comporta mitra.

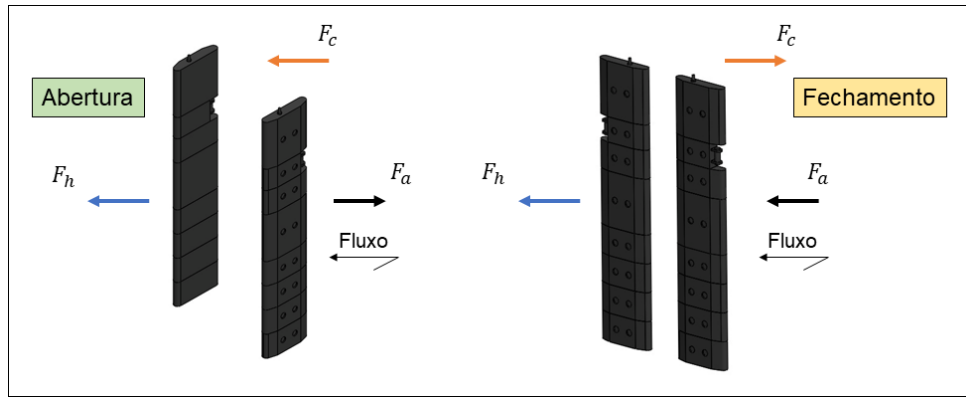


Figura 36 – Forças dinâmicas relacionadas à operação da comporta mitra.

A força proporcionada pelo cilindro é definida na Equação 3.5, onde A_u é a área útil do cilindro e P é a pressão disponível no seu terminal de entrada.

$$F_c = A_u \cdot P \text{ [N]} \quad (3.5)$$

As hipóteses consideradas para o cálculo da força hidráulica exercida no eixo x são: regime permanente, propriedades uniformes ao longo das seções, fluido incompressível, sendo também desconsiderados os efeitos provenientes do peso do fluido. A estrutura do canal de entrada do STP traz intuitivamente a condição de regime permanente, ou seja, que a vazão mássica permanecerá constante ao longo do canal. Como o fluido que percorre o canal de entrada é a água, entende-se que a variação de sua massa específica é muito pequena, sendo considerada um fluido incompressível. Da mesma forma, as propriedades inerentes às características do fluido, da estrutura, dos equipamentos e das seções são uniformes e também que o peso da água é desprezível nesta situação. Com isso, a força hidráulica (F_h) pode ser obtida pela Equação 3.6, onde ρ é a massa específica da água, g a gravidade, l_f a largura de uma das folhas CM, L é a largura do canal, h o nível de água no canal, h_1 é a quantidade de metros por coluna de água a montante da CM, h_2 é a quantidade de metros por coluna de água a jusante da CM, d é o vão existente entre as folhas da comporta mitra, v_1 a velocidade do fluido a montante da comporta mitra e v_2 a velocidade do fluido a jusante da comporta mitra. O vão existente entre as folhas da comporta quando estão completamente fechadas é de 700 mm, entretanto, d varia conforme a posição das folhas da comporta. O deslocamento angular (θ) de cada uma das folhas é de no máximo 90°. Então, quando a comporta está em 0° ou completamente fechada significa que o vão entre as folhas da comporta mitra é mínimo (700 mm). Já quando está em 90° ou completamente aberta, o vão entre as folhas é máximo (3000 mm). Com isso, o cálculo de d é realizado pela Equação 3.7 que depende de θ , que por sua vez está relacionado com a posição real da comporta mitra (Pos_{mitra}), bem como com a posição máxima ($Pos_{mitra_{max}}$), sendo calculado por meio da Equação 3.8.

$$F_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot (L \cdot h_1 - d \cdot h_2) + Q_m \cdot (v_1 - v_2) [N] \quad (3.6)$$

$$d = L - 2 \cdot l_f \cdot \cos(\theta) [mm] \quad (3.7)$$

$$\theta = \left(\frac{Pos_{mitra}}{Pos_{mitra_{max}}} \right) \cdot \frac{\pi}{2} [rad] \quad (3.8)$$

Por último, calcula a força de arrasto, que por definição é oposta ao movimento. A força de arrasto depende da constante de arrasto C_d , da ρ massa específica da água, da vazão interna medida no canal Q e de A_m que é a área molhada da comporta. A F_a é obtida com a Equação 3.9.

$$F_a = \frac{(\rho \cdot C_d \cdot Q^2)}{(2 \cdot A_m)} [N] \quad (3.9)$$

As forças resultantes, observadas nos movimentos de abertura e fechamento, possuem valores distintos. Na Equação 3.10 foi definido f_{ra} , sendo esta a força resultante na abertura e na Equação 3.11 f_{rf} , que é a força resultante no fechamento de CM.

$$f_{ra} = F_c + F_h - F_a [N] \quad (3.10)$$

$$f_{rf} = F_c - F_h - F_a [N] \quad (3.11)$$

Os dados específicos da central hidráulica, como pressões de operação do sistema, velocidade de rotação das motobombas e bomba manual, velocidade de expansão e compressão dos cilindros dentre outros dados técnicos são baseados em dados reais. As forças dinâmicas relacionadas à comporta mitra são semelhantes à da grade confinadora, a qual faz parte da estrutura do carro empurrador, entretanto, os cilindros destas últimas são pressurizados através de uma central pneumática e não hidráulica.

3.6 Método de controle de vazão

Os sistemas de transposição de peixes são responsáveis por reproduzir fluxos de água semelhantes às correntezas dos rios, cada tipo possui uma estratégia de atração característica, tendo em vista atrair a fauna íctia para dentro de sua estrutura. Por este motivo, foi implementado de maneira complementar às funcionalidades do GD, a possibilidade de controlar as vazões impostas pelo sistema.

A princípio, foram identificados os equipamentos envolvidos no processo de criação da atratividade oferecida. Neste trabalho, foram consideradas as comportas de regulação, as bombas submersíveis, os medidores de nível e as estruturas dos canais de bombeamento e entrada. Assim, a partir das manobras destes equipamentos, como ajustes de posição e *setup* de bombas, é possível manipular a vazão produzida no canal de entrada do STP. A Figura 37 mostra as vazões passíveis de controle no sistema.

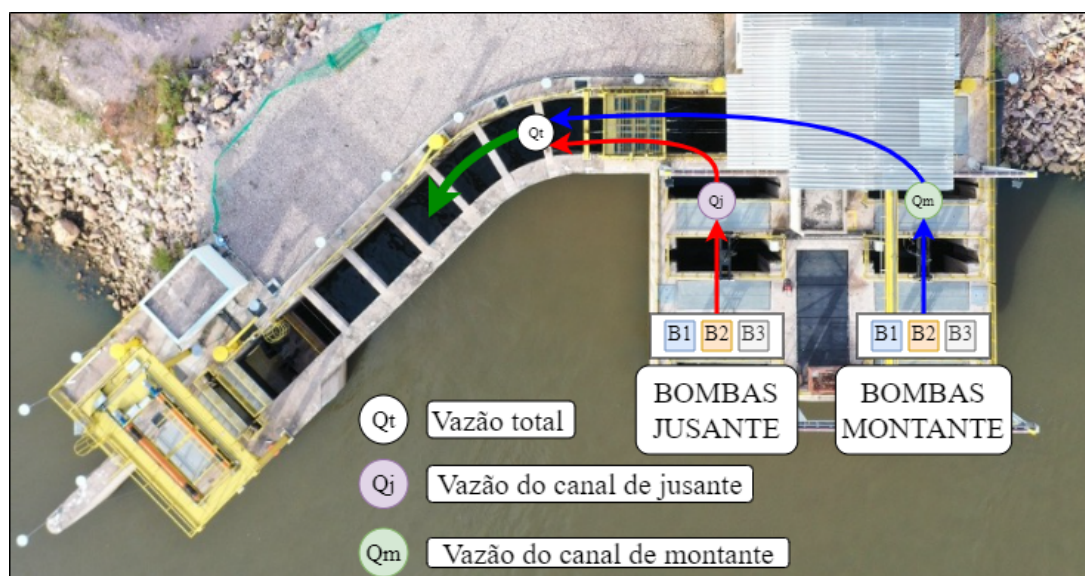


Figura 37 – Vazões controláveis.

O modelo implementado é dependente dos níveis de adução e regulação, da equação característica inerente às bombas e do ajuste de posição das comportas de regulação. Primeiramente, foi determinada a curva característica de uma bomba. Como as bombas possuem a mesma especificação técnica e estão associadas em paralelo, foi necessário determinar também a curva característica para os casos em que duas ou três bombas estejam operando simultaneamente. É importante mencionar que em uma associação de bombas em paralelo, considerando bombas de mesma especificação, haverá ganho em vazão para uma mesma altura de carga. Deste modo, foram determinadas as equações teóricas que regem o comportamento da vazão em função da altura de carga e vice-versa. A Figura 38a mostra as curvas características da vazão em função da altura de carga para uma, duas e três bombas operantes. A Figura 38b apresenta as mesmas curvas, entretanto, considerando a vazão em função da altura.

A partir da Figura 38b foi possível construir as linhas de tendência de cada curva, visando a encontrar os coeficientes do polinômio que as representam. As equações 3.12, 3.13 e 3.14 representam as linhas de tendências referentes à operação com 1 Bomba, 2 Bombas e 3 Bombas respectivamente.

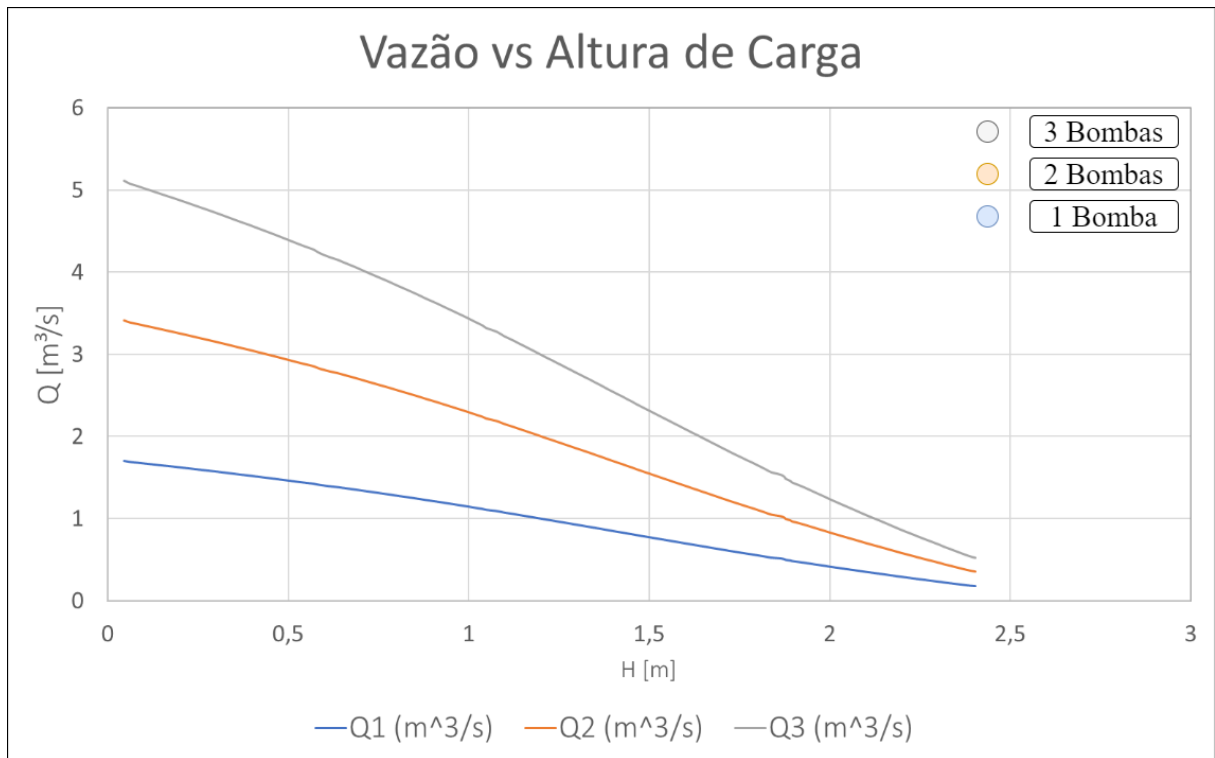


Figura 38a – Curvas características da vazão em função altura de carga.

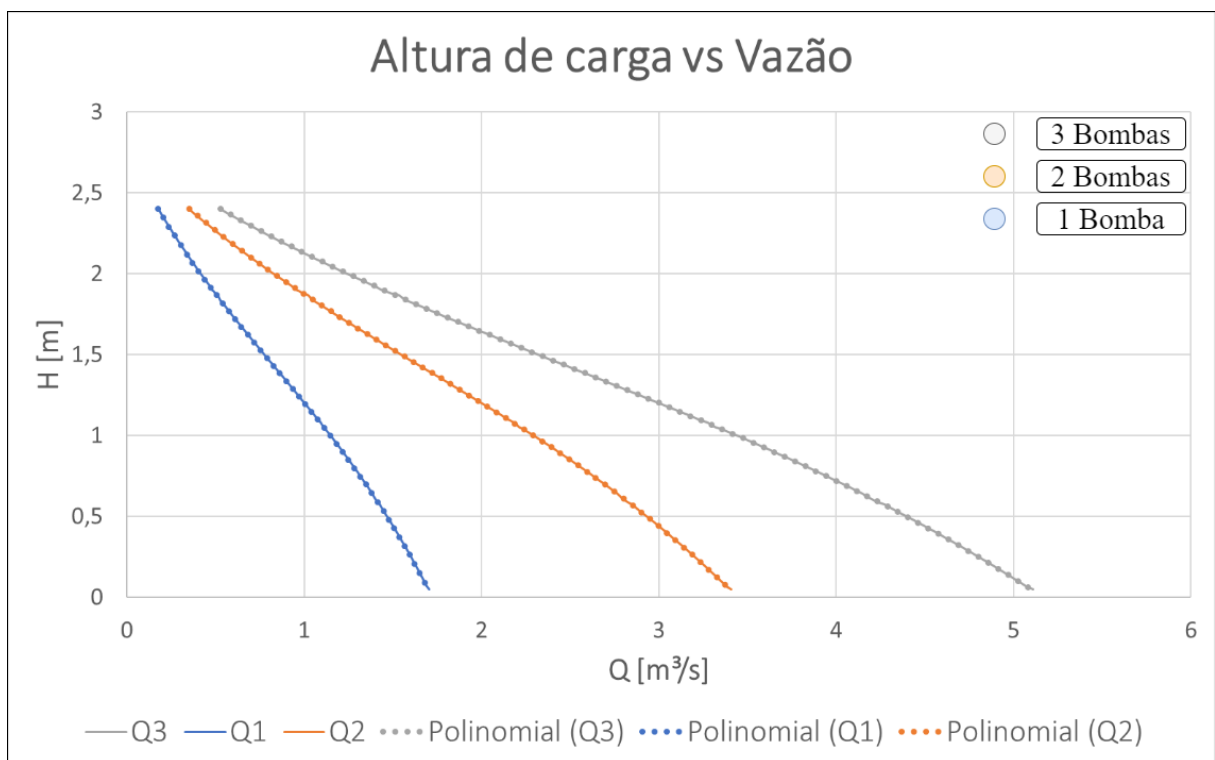


Figura 38b – Curvas características da altura de carga em função da vazão.

$$\alpha_1 = 0,0246Q_1^4 - 0,4705Q_1^3 + 1,0763Q_1^2 - 2,1829Q_1 + 2,7526 [m] \quad (3.12)$$

$$\alpha_2 = 0,0015Q_2^4 - 0,0588Q_2^3 + 0,2691Q_2^2 - 1,0915Q_2 + 2,7526 [m] \quad (3.13)$$

$$\alpha_3 = 0,0003Q_3^4 - 0,0174Q_3^3 + 0,1196Q_3^2 - 0,7276Q_3 + 2,7526 [m] \quad (3.14)$$

As equações 3.12, 3.13 e 3.14 são escolhidas conforme a faixa de vazão selecionada pelo operador. Se a vazão desejada ao canal de entrada estiver dentro dos limites aceitáveis, tem-se o número de bombas operantes e a altura de carga respectiva. A Figura 39 apresenta, detalhadamente, a estrutura dos canais de bombeamento do STP, onde x_1 é a altura nível de água no canal de adução; x_2 é a altura do nível de água no canal de regulação; x_3 é a altura da parede de concreto; x_4 é a altura da comporta; e x_5 é a altura da lâmina de água vertente. Com isso, define-se α e β ou x_5 , os quais são representados na Equação 3.15 e Equação 3.16. É importante mencionar que no STP existem dois canais de bombeamento, sendo um localizado a jusante do elevador e o outro a montante. Estes canais são muito semelhantes em relação a função, equipamentos e operação. Por este motivo, foram considerados iguais.

$$\alpha = x_2 - x_1 [m] \quad (3.15)$$

$$\beta = x_5 = x_2 - (x_3 + x_4) [m] \quad (3.16)$$

Onde:

α – altura de carga ou diferença entre o nível de regulação e nível de adução;

β ou x_5 – altura da lâmina de água vertente ao canal de entrada;

Com a altura de carga proveniente das equações características das bombas, é possível determinar o nível de regulação necessário para a vazão desejada. O nível de regulação varia em conformidade com a posição da comporta do canal de bombeamento, visto na Figura 39. O estado de comporta aberta acontece quando x_4 é mínimo e o estado de comporta fechada quando x_4 é máximo.

Os conceitos apresentados na Seção 2.3 permitem relacionar os canais de bombeamentos a vertedores de paredes delgadas. Deste modo, com a equação 3.17 e vazão desejada, obtém-se os valores teóricos de β . Estes representam os limites da altura da

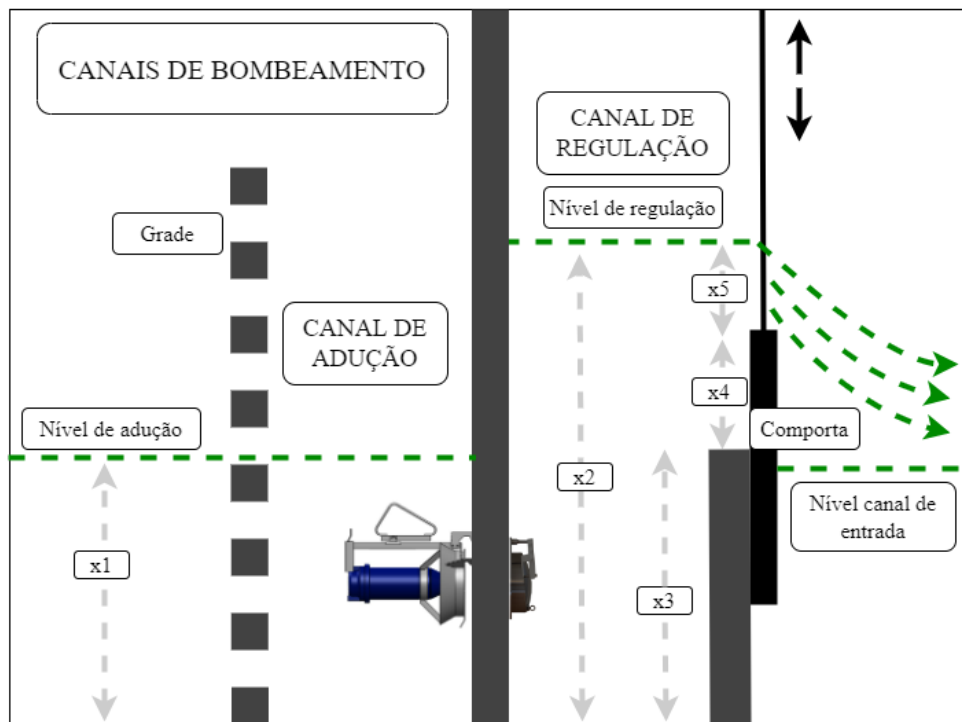


Figura 39 – Canal de bombeamento do STP.

lâmina de água vertente pela comporta dos canais de bombeamento. Por fim, calcula-se a posição da comporta pela equação 3.18, onde a *Cota* representa a altura da comporta referenciada aos valores de elevação do terreno.

$$Q_c = 1,838 \cdot L_v \cdot \beta^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.17)$$

$$x4 = (Cota - x_3) \cdot 1000 [mm] \quad (3.18)$$

Onde:

Q_c – vazão calculada;

L_v – largura do vertedor;

4 Resultados

O gêmeo digital desenvolvido é composto por quatro partes principais: o supervisor da operação ou supervisor 2D; o supervisor 3D ou *viewer*; o sistema de gestão de manutenção; e um aplicativo móvel. Cada estrutura possui uma função específica, tendo em vista suprir as necessidades de operação, inspeção, simulação e treinamento, como também manutenção. As seções 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam detalhadamente as funções desempenhadas por cada ferramenta presente no GD implementado.

4.1 Supervisor da operação

O supervisor da operação tem como objetivo principal permitir o controle remoto do STP. Neste aspecto, incorpora ao GD as funcionalidades interligadas à operação sistêmica. Esta ferramenta possibilita ao usuário acompanhar as variáveis de estado de cada equipamento, mas também do processo. Deste modo, facilita a tomada de decisão do operador e o comando para atuação dos equipamentos existentes no sistema.

Os dados que alimentam este supervisor são os mesmos visualizados nas IHMs de cada CLP. Os comandos remotos são habilitados apenas no modo de operação remota, as monobras e o estado real dos equipamentos podem ser acompanhados nas próprias telas de monitoramento, bem como de maneira dinâmica no supervisor 3D. A Figura 40 apresenta a organização dos monitores na sala de controle e monitoramento em campo. A Figura 41 mostra a disposição das telas do supervisor da operação.



Figura 40 – Disposição das telas na sala de controle e monitoramento.

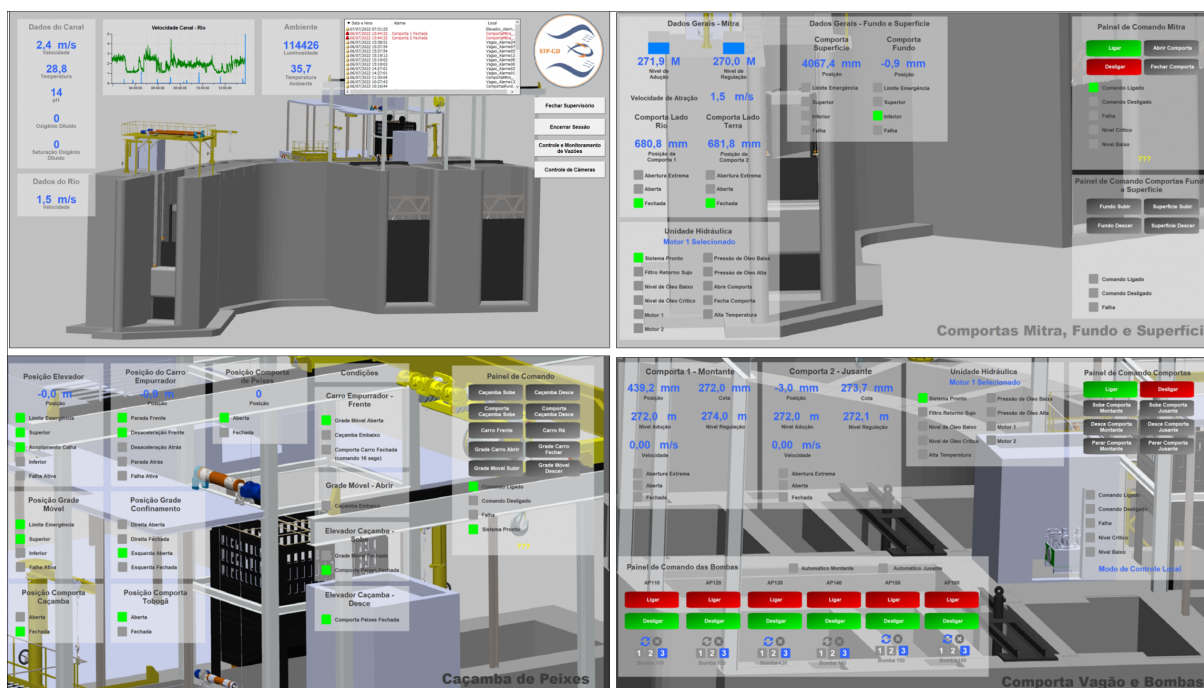


Figura 41 – Supervisório 2D ou da operação.

4.1.1 Modelos de simulação

Os modelos de simulação construídos no *software* Wolfram SystemModeler foram integrados ao supervisório 2D. Estas simulações trazem informações a respeito das forças dinâmicas envolvidas nas manobras dos equipamentos do STP. Além disso, possibilita a construção de cenários operativos mediante a configuração da posição de parada de cada objeto, *status* ou estado do equipamento, pré-definição do nível do canal de entrada e vazão. Estes últimos podem ser escolhidos conforme os limites operacionais ou receber os valores instantâneos provenientes do nível de sensoriamento. Com o modelo escolhido e as variáveis de entrada ajustadas é possível realizar a simulação. Os resultados da simulação aparecem na interface gráfica projetada na mesma tela. As variáveis de saída são listadas e devem ser selecionadas para apresentar o gráfico relativo. Na totalidade foram desenvolvidos oito modelos de simulação para o STP-GD. Este modelos podem ser escolhidos conforme o interesse do operador. A Figura 42 mostra uma simulação para a comporta de fundo, pertencente ao grupo apresentado como primeiro modelo. Já a Figura 43 mostra outra simulação para contextualizar o grupo do segundo modelo, sendo esta referente à comporta mitra.

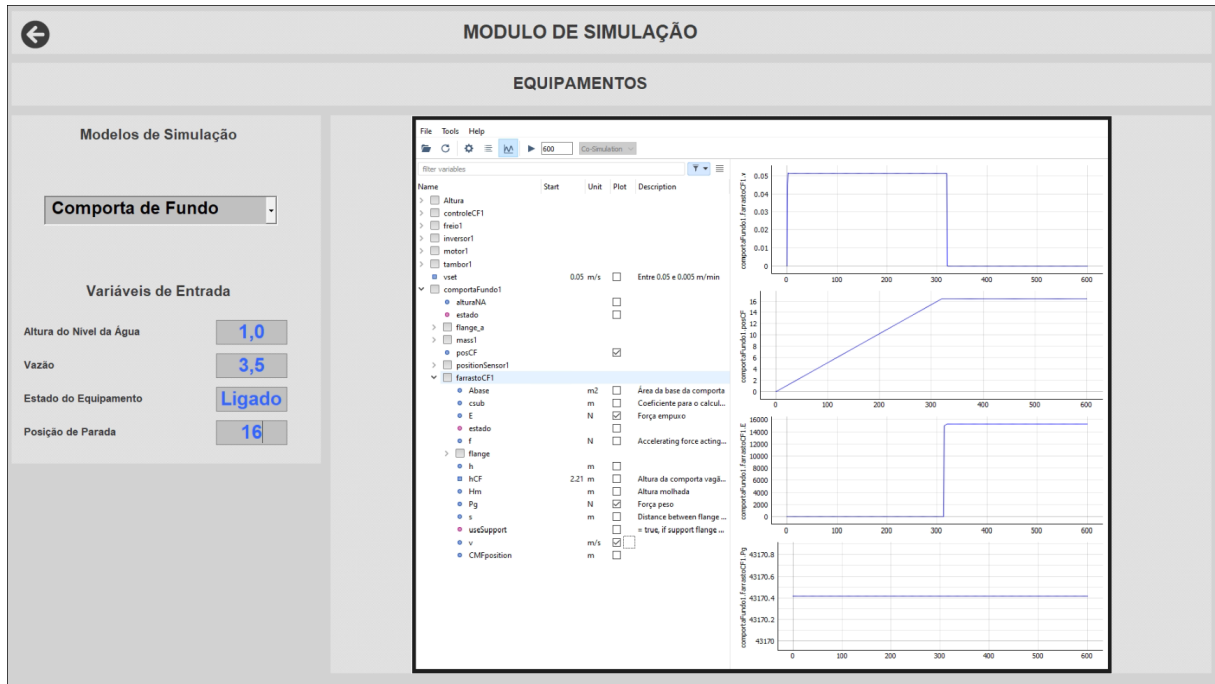


Figura 42 – Simulação com a comporta de fundo.

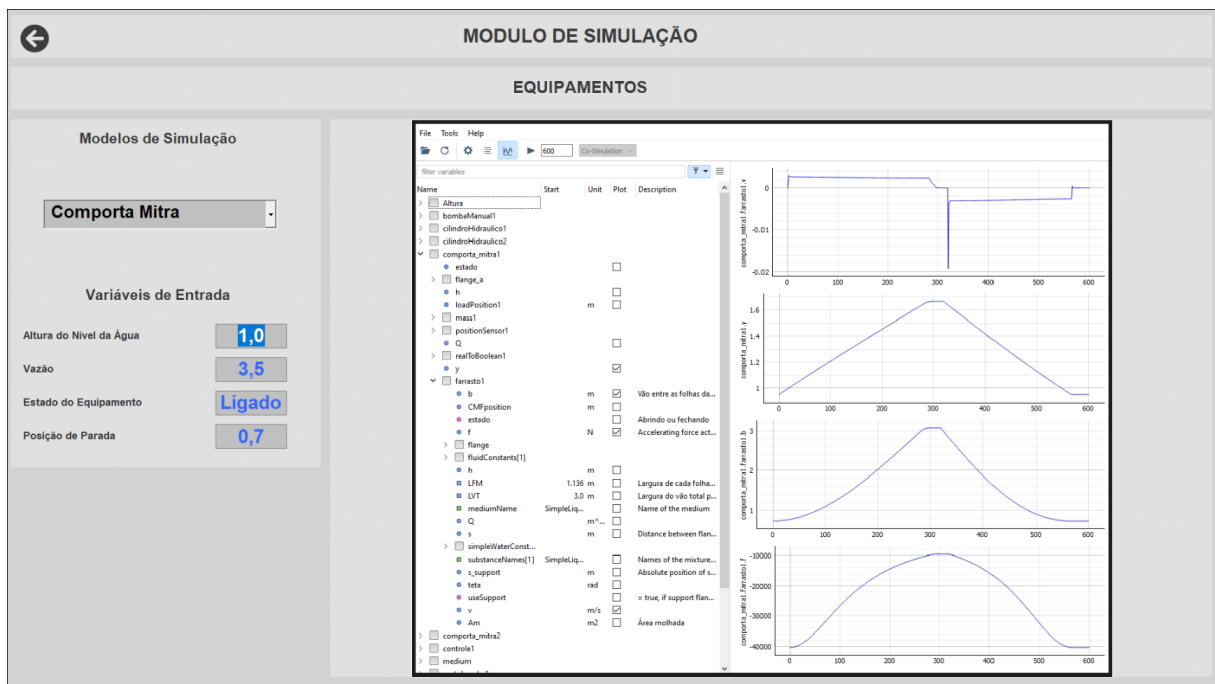


Figura 43 – Simulação com a comporta mitra.

Além das funcionalidades de monitoramento e comando, também foi integrado ao supervisor 2D um ambiente para realizar simulações de cenários, treinamento, controle de vazão e acompanhamento de locais específicos do STP por intermédio das câmeras instaladas. A simulação consiste em escolher aleatoriamente configurações específicas para o processo de transposição, como o número de bombas e posição de comportas, respeitando os limites reais. O treinamento é uma consequência da simulação, pois auxilia os opera-

dores a entender o STP e o processo de transposição de maneira intuitiva e dinâmica. A Figura 44 mostra os controles desenvolvidos para atender as funcionalidades supracitadas.

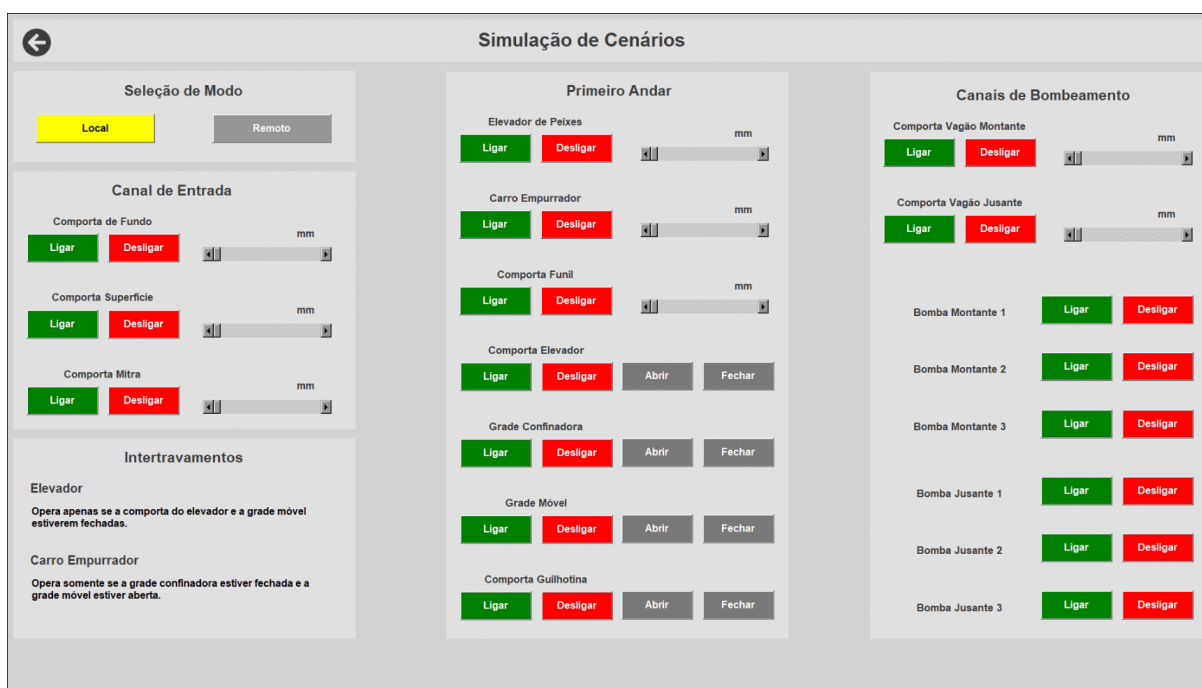


Figura 44 – Tela para simulação de cenários operativos do STP.

4.1.2 Controle de vazão e câmeras

Com o supervisor 2D também é possível realizar o controle de vazão, que funciona da seguinte maneira: a princípio, o usuário escolhe a vazão desejada; em seguida recebe como resposta o número de bombas, bem como posições específicas das comportas; por fim, o usuário deve manobrar os equipamentos para tal a configuração encontrada, tendo em vista promover a vazão requerida. A Figura 45 apresenta as variáveis envolvidas no processo de controle da vazão do STP.

Os testes de campo relacionados ao controle da atratividade de peixes, a partir do controle de vazão, trouxeram alguns resultados. Os testes consistiram em alterar os *setups* de bombas de cada canal, movimentar as comportas vagão e medir a velocidade instantânea no canal de entrada. Na totalidade foram realizados quatro testes, sendo que cada um possui uma configuração específica.

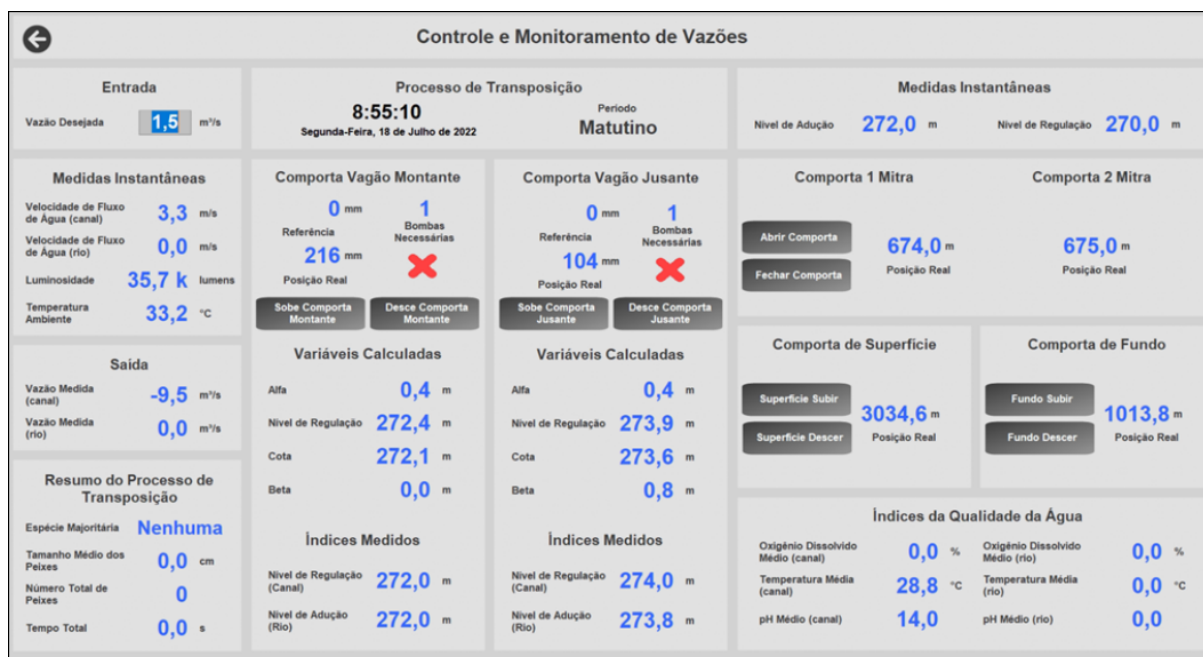


Figura 45 – Controle de vazão.

No primeiro teste, o canal de jusante estava com duas bombas em funcionamento e a comporta vagão completamente aberta. O canal de montante também estava com duas bombas operantes, porém, a diferença está no ajuste de posição da comporta vagão deste canal. Com isso, foi mantido constante a vazão proveniente do canal de jusante e variado a parcela produzida pelo canal de montante, as quais somadas totalizaram na vazão total reproduzida ao canal de entrada do STP. As velocidades estimadas e calculadas para esta situação estão dispostas na Figura 46a.

O segundo teste executado foi semelhante ao primeiro. O número de bombas operantes no canal de montante foi mantido, entretanto, a comporta vagão permaneceu completamente aberta. Neste caso, a vazão variável foi a do canal de jusante e não a de montante. A Figura 46b mostra as velocidades estimadas e medidas para os pontos sensíveis ao molinete hidrométrico.

Para o terceiro e quarto teste a lógica adotada foi a mesma, entretanto, o *setup* de bombas foi modificado. No terceiro teste, foi desligado uma bomba de montante e verificado a variação da vazão para apenas uma bomba operante. Então, com a alteração da posição da comporta do canal de montante foi possível encontrar o gráfico de velocidades exibido na Figura 47a. No último ou quarto teste, foi religado uma bomba de montante e desligado uma bomba de jusante, promovendo a configuração inversa ao terceiro teste. Ao variar a posição da comporta vagão de jusante foi percebido a diminuição da vazão de jusante e conseqüentemente da velocidade medida no canal de entrada. O gráfico apresentado na Figura 47b mostra os resultados observados.

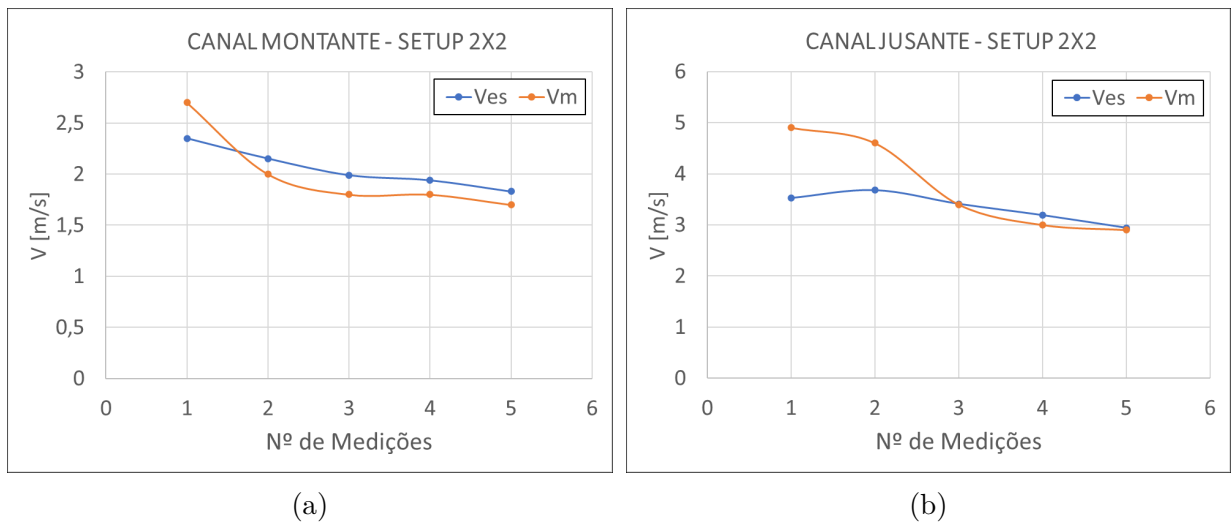


Figura 46 – (a) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a montante. (b) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a jusante.

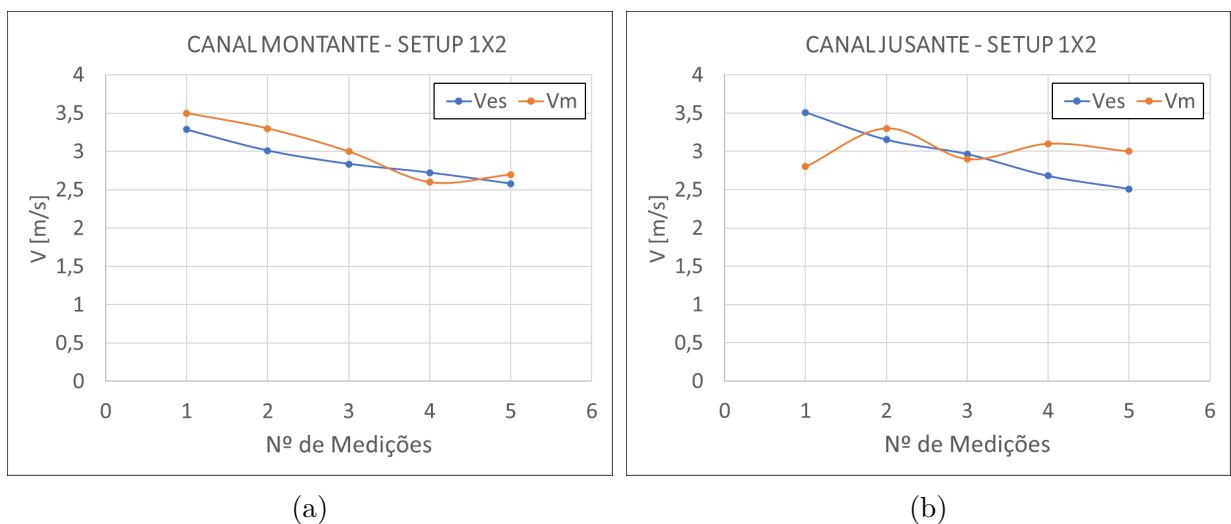


Figura 47 – (a) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a montante. (b) Velocidade estimada e medida para vazão variável no canal de bombeamento a jusante.

A câmera de fundo e superfície auxiliam na identificação e contagem dos peixes que passam pelo processo de transposição. As câmeras de segurança monitoram especificamente a despesca e os movimentos do carro empurrador. O acompanhamento das imagens em tempo real fornecidas pelas câmeras instaladas também é possível pelo supervisório 2D, onde está disponível o Controle de Câmeras. A Figura 48 apresenta as possibilidades de inspeção oferecidas por cada dispositivo, bem como os ganhos relacionados à observabilidade sistêmica.

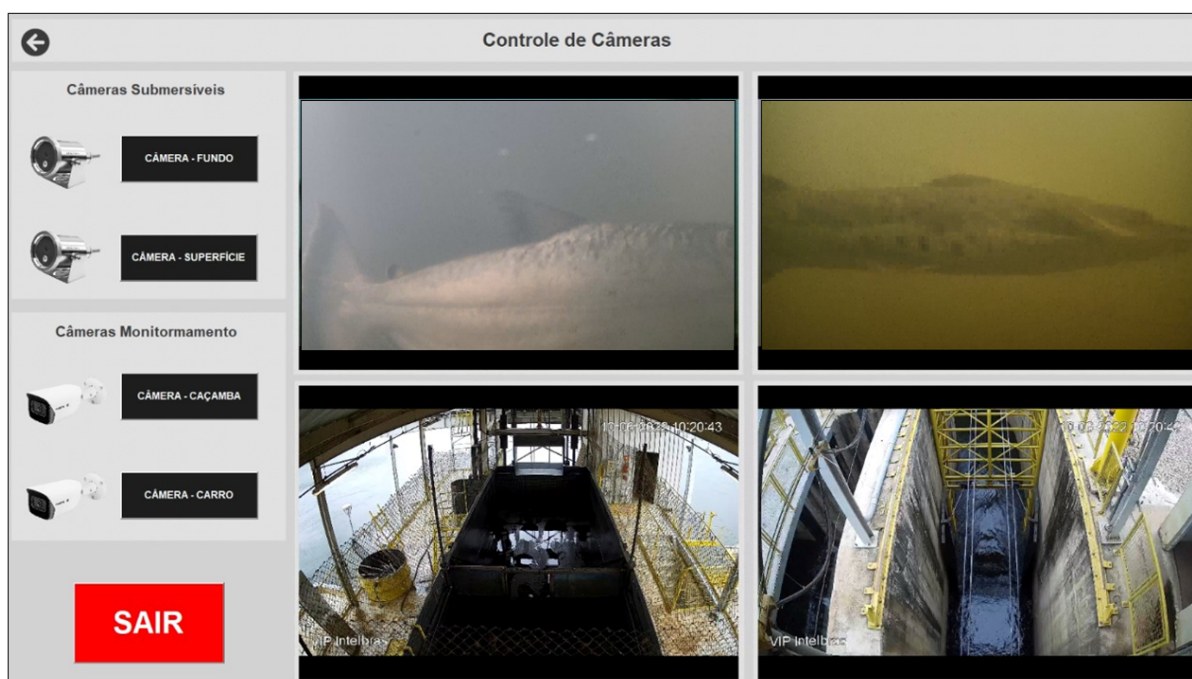


Figura 48 – Controle de câmeras.

4.2 Supervisório 3D

O Supervisório 3D foi desenvolvido para suprir a capacidade de monitoramento dinâmico do GD. Esta ferramenta permite a navegação por toda a estrutura do STP, sendo possível acessar todos os equipamentos em campo. O objetivo principal desta interface é apresentar a configuração real do sistema de maneira dinâmica. Em outras palavras, isso significa que se houver alguma manobra localmente ou remotamente, de qualquer equipamento, o *viewer* 3D apresentará simultaneamente a operação realizada. Como cada equipamento possui um comportamento e função específica, foi necessário criar animações próprias à condição operativa desses dispositivos. Estas animações reproduzem de forma fiel os movimentos mecânicos do elevador de peixes, das comportas e outros equipamentos. Estes foram reproduzidos no ambiente virtual desenvolvido como mostra a Figura 49.

O *viewer* está diretamente conectado ao supervisório 2D como mencionado anteriormente. Ele apresenta os resultados da configuração atual do STP, mas também pode

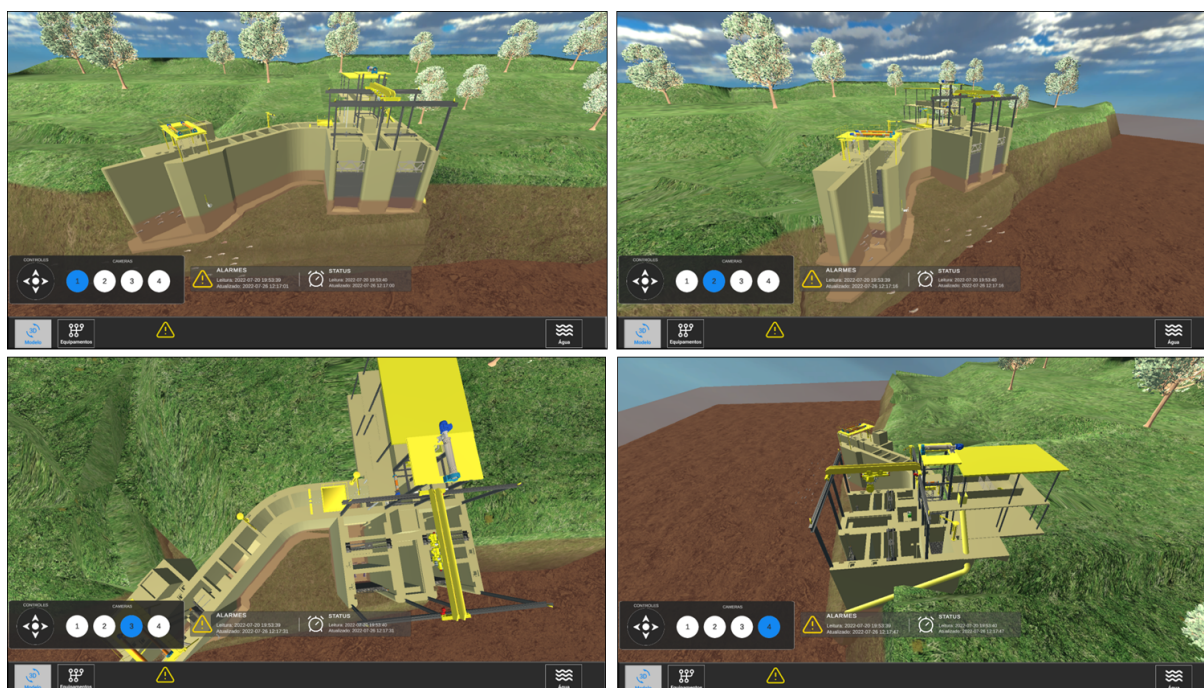


Figura 49 – Supervisório 3D.

mostrar os cenários de simulação escolhidos e auxiliar no treinamento de equipes. É importante mencionar que o usuário é informado na tela principal do *viewer* se o sistema está operando no modo real ou simulação e treinamento.

A Figura 50 mostra como é realizado o acesso, pelo supervisório 3D, ao equipamento desejado. Ao selecionar a aba “Equipamentos” de maneira intuitiva, aparece ao usuário os diversos equipamentos cadastrados e monitorados do STP, em seguida, ao escolher aquele de interesse, são reproduzidas na tela as informações inerentes ao equipamento. Estes possuem um conjunto de variáveis de estado que permitem, em tempo quase real, acompanhar as condições como modo de operação (local/remoto), status (ligado/desligado), movimento (subindo/descendo/parado), posição instantânea e outras.



Figura 50 – Bombas submersíveis no supervisório 3D.

4.3 Sistema de gestão da manutenção

É indiscutível que os sistemas mecânicos e elétricos demandam manutenções, podendo assumir caráter corretivo, preventivo e até mesmo preditivo. Os procedimentos de manutenção, em muitos casos, são prejudicados pela falta de planejamento, organização e acompanhamento daquilo que está em observação. Por este motivo, o Sistema de Gestão da Manutenção (SGM) foi incorporado ao GD, tendo em vista suprir as necessidades dos processos de manutenção. Esta ferramenta pode ser acessada via plataforma *web*, mas também por aplicativo em dispositivos móveis.

O SGM acessado via plataforma *web* permite ao usuário cadastrar a agenda de manutenção do processo em inspeção. Este recurso incorporado ao GD é destinado à organização da agenda de atividades de manutenção do STP. É uma ferramenta completamente dedicada a planejar, criar e acompanhar todas as ações de manutenção para cada equipamento.

A janela “Supervisório 3D” possibilita a integração das ferramentas que compõem o GD. Deste modo, o usuário consegue acessar o Supervisório 3D do STP pelo SGM e visualizar as informações de interesse do sistema real de maneira rápida. Outro recurso inteligente do SGM está na janela “Dashboard” que traz ao usuário de modo simples e sintetizado o aspecto global das atividades de manutenção, ou seja, mostra todo status do cronograma de manutenção. Na janela “Chamado” é definida a ordem de prioridade de cada tarefa, bem como quem será o executor do procedimento. Alguns avisos importantes são mais evidentes nesta janela. Estes alertam o administrador quanto ao prazo para cumprimento do que foi cadastrado, do total de atividades abertas e concluídas. A janela “Jobs” mostra a condição das tarefas cadastradas, ou seja, se é uma nova tarefa (*new*) ou se já foi iniciada (*opened*) e até mesmo concluída (*closed*). Na opção “Worklists” cria-se o *setup* das atividades de manutenção conforme especificado por fabricantes ou até mesmo por normas técnicas de cada equipamento. O cadastro dos tipos de equipamentos e unidades existentes no sistema é realizado na janela “Equipamentos”. Na janela “Acessos” estão as funções de cadastramento dos usuários e níveis de acesso, além de controles de ativação, ou inativação. Por último, a janela “Configuração” traz as configurações gerais a respeito da empresa e sistema que utilizam o SGM. A Figura 51a mostra a tela de Visão Geral e Chamados. A Figura 51b mostra a tela de *Jobs* e *Worklists*.

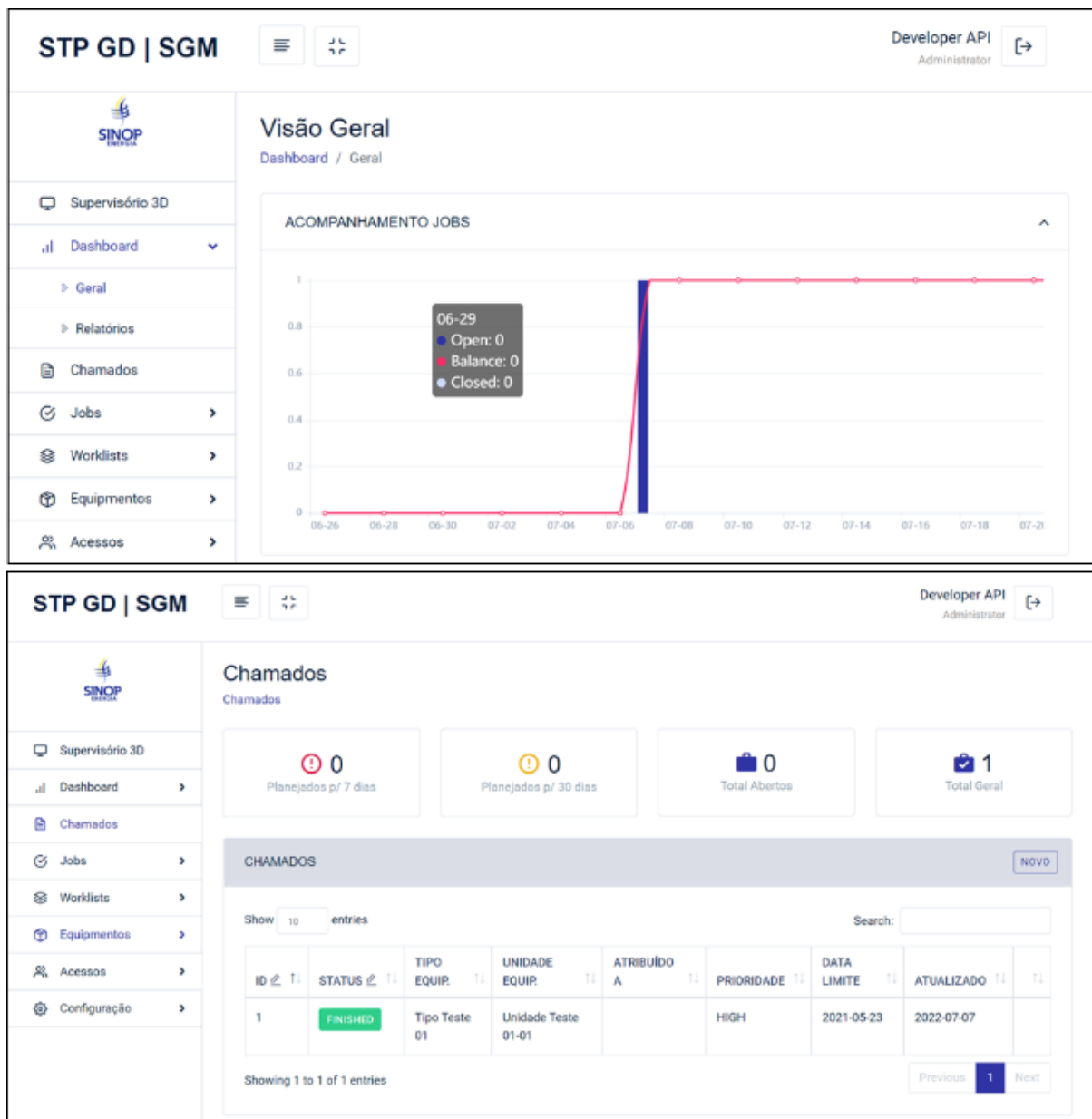


Figura 51a – Visão Geral e Chamados.

4.4 Aplicativo móvel

O aplicativo móvel (APP) foi criado para complementar os supervisórios 2D e 3D. O APP tem como objetivo proporcionar ao operador a possibilidade de acompanhar a operação do STP em campo por meio de um celular conectado à rede de internet local. Assim, promove a integração entre as equipes envolvidas no monitoramento da operação do STP, pois permite a visualização das informações provenientes do nível de instrumentação em tempo real.

The top screenshot displays the 'NOVOS JOBS' section of the application. It features a table with the following columns: NO., STATUS, WORKLIST, TIPO EQUIP., UNIDADE EQUIP., INSTALAÇÃO, EXECUTOR, INICIO, and TÉRMINO. The table contains five entries:

NO.	STATUS	WORKLIST	TIPO EQUIP.	UNIDADE EQUIP.	INSTALAÇÃO	EXECUTOR	INICIO	TÉRMINO
1	ASSIGNED	Worklist Teste 01	Tipo Teste 01	Unidade Teste 01-01	Novo Site	Developer API	2021-05-26 12:00:00	2021-05-29 12:00:00
4	OPEN	Worklist Teste 01	Tipo Teste 01	Unidade Teste 01-01	Novo Site	Not Assigned	2021-05-26 00:00:00	--
7	OPEN	Worklist Teste 01	Tipo Teste 01	Unidade Teste 01-01	Novo Site	Not Assigned	2021-06-01 12:00:00	2021-06-02 12:00:00
44	OPEN	Troca de óleo	Central Hidráulica	Vagão	Novo Site	Not Assigned	2021-11-08 12:00:00	2021-11-10 12:00:00
46	ASSIGNED	Identificação de fuga de corrente	Comporta Superfície	Motor	Novo Site	Developer API	2022-07-08 12:00:00	2022-07-08 12:00:00

The bottom screenshot displays the 'Worklists' section. It features a table with the following columns: NOME, TIPO EQUIPAMENTO, LISTA ATIVIDADES, CRIADO POR, ATUALIZADO, and AÇÕES. The table contains three entries:

NOME	TIPO EQUIPAMENTO	LISTA ATIVIDADES	CRIADO POR	ATUALIZADO	AÇÕES
Identificação de fuga de corrente	Comporta Superfície	Adicionar/Editar	Developer	2022-07-07	Clonar, Excluir
Troca de óleo	Central Hidráulica	Adicionar/Editar	Developer	2021-11-04	Clonar, Excluir
Worklist Teste 01	Tipo Teste 01	Adicionar/Editar	Developer	2021-05-26	Clonar, Excluir

Figura 51b – Jobs e Worklists.

A tela inicial do APP apresenta as informações gerais do sistema. Dentre elas estão os índices da qualidade da água, velocidade do fluxo da água no canal de entrada e no rio, temperatura e luminosidade ambiente. Estas informações são provenientes dos sensores adicionais instalados no STP. As telas subsequentes apresentam os equipamentos existentes no STP, bem como as informações obtidas pelos sensores relacionados a eles.

A partir da seleção da caixa superior esquerda do aplicativo aparece a lista dos equipamentos importantes para o processo de transposição. Ao selecionar um equipamento disponível, o usuário é redirecionado ao mesmo, e então as informações inerentes a ele como o *Status*, Modo de Operação, Posição, entre outras, aparecerão em tela. Os nomes atribuídos a cada janela do APP são extremamente intuitivos e repassam ao operador as mesmas informações disponibilizadas nas IHMs dos painéis locais do STP, todavia, agora,

no celular.

Os equipamentos do STP podem ser escolhidos de duas maneiras, por clique ou por câmera. Por exemplo, para acessar a primeira bomba submersível a montante é necessário que o usuário clique na aba superior esquerda, em seguida na aba “Bombas” e, por último, na opção “Montante 1”. Por outro lado, se o operador estiver em campo, basta selecionar a opção “Scanear QRCode”. Com isso, o aplicativo direcionará para a câmera do dispositivo móvel, que deve ser reposicionada de modo a centralizar o código QR referente ao equipamento em inspeção local. Este acesso por câmera depende da identificação correta dos equipamentos existentes no STP, os quais devem possuir códigos QR específicos e em pontos estratégicos para facilitar a leitura pela câmera do celular, bem como a rapidez e obtenção das informações desejadas. Uma vez selecionado, a imagem do equipamento é carregada, como também o conjunto de variáveis de estado relacionadas ao mesmo. A Figura 52 mostra o passo a passo para acessar a bomba (Montante 1) do STP via APP.

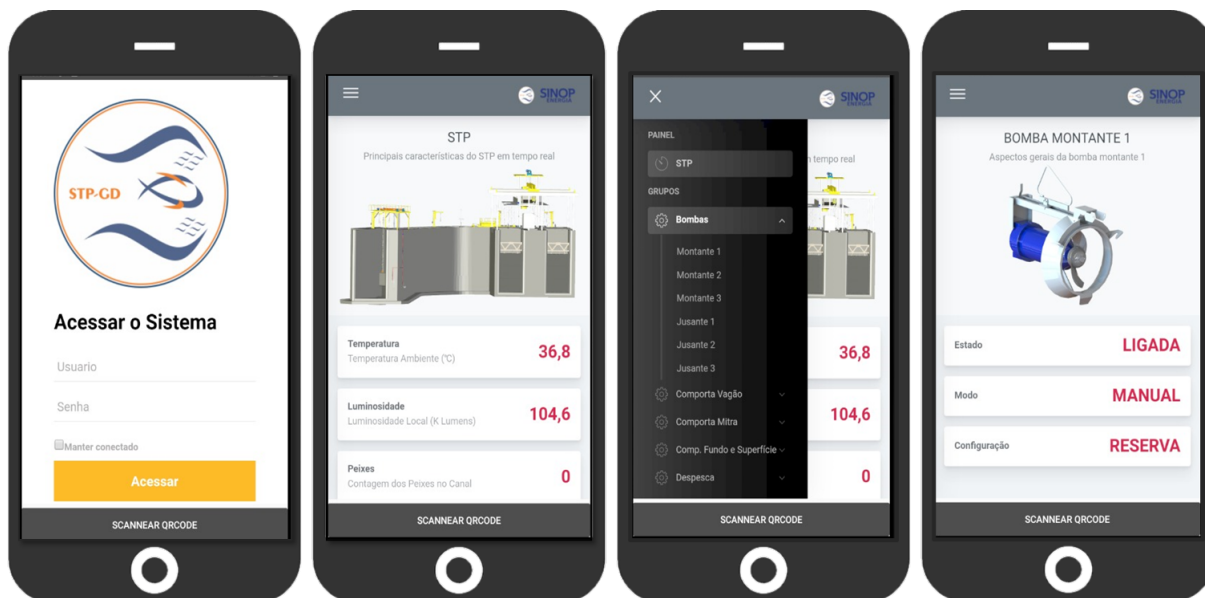


Figura 52 – Acesso à bomba submersível do STP via APP.

5 Conclusões

O presente trabalho mostrou a criação de um GD para atender um STP do tipo misto. As partes constituintes do GD são: o supervisor 2D, supervisor 3D, SGM e APP. O supervisor 2D foi construído para atender às necessidades de operação e monitoramento remoto. A dinâmica do STP pode ser observada no supervisor 3D, que por sua vez representa o sistema físico em realidade virtual e mostra o comportamento dos equipamentos em campo e tempo real ao operador. Por este motivo, ele deve ser utilizado em paralelo com o supervisor 2D. Adicionalmente, o SGM foi elaborado para organizar os processos de manutenção dos equipamentos do STP. Com isso, os processos de manutenção estão destinados a acontecer de forma programada e não o contrário, evitando a interrupção do sistema e, conseqüentemente, que a transposição de peixes seja manual, por meio de barcos. E por fim, o APP auxilia o operador de campo no acompanhamento da operação dos equipamentos do STP, como também os estados dos equipamentos no sistema.

Embora a funcionalidade principal atribuída ao supervisor da operação ou 2D seja a capacidade de operação remota e monitoramento, foram agregadas a ele outras funções importantíssimas. Dentre elas, o controle da atratividade de peixes mediante ao ajuste da vazão no canal de entrada, que se mostrou efetivo conforme os resultados apresentados na Seção 4.1.2. Também possui recursos para o monitoramento das espécies de peixes, de equipamentos específicos e do manejo com os peixes no tanque de seleção, por intermédio do controle de câmeras. Entre estas, as câmeras subaquáticas contribuem diretamente com a identificação das espécies e contagem dos peixes atraídos pelo STP. Além disso, o supervisor 2D fornece ao usuário a possibilidade de criar cenários operativos em busca de otimizações, auxiliando no treinamento das equipes envolvidas na operação e monitoramento do STP, como também no entendimento global do sistema.

A aplicação da tecnologia GD apresentou consistência e objetividade para suprir as necessidades de operação, monitoramento, simulação e treinamento para o STP do tipo misto. Os benefícios principais do GD ao STP estão relacionados ao aumento da observabilidade, possibilidade da simulação de *setups* de operação e criação de cenários, controle remoto dos equipamentos envolvidos no processo, gestão dos processos de manutenção, otimização contínua e registro de históricos. Estas características reunidas auxiliam as tomadas de decisão de operadores e mantenedores do sistema, bem como são utilizadas como instrumentos de medição da eficiência global do processo.

A revisão bibliográfica realizada para este trabalho não identificou nenhuma aplicação de GDs em STPs. Os resultados obtidos mostram que a tecnologia agregou inúmeros

benefícios ao sistema real. Por este motivo, este trabalho possui originalidade, sendo único dentro do contexto de gêmeos digitais. E ainda, mostra a utilização da engenharia e tecnologia em prol do meio ambiente, buscando o desenvolvimento atrelado à sustentabilidade. Portanto, este trabalho cumpre com os objetivos propostos e apresenta à comunidade acadêmica a construção do GD para o STP do tipo misto da UHE de Sinop.

5.1 Trabalhos Futuros

O ganho proporcionado ao STP de Sinop com a inserção do GD para otimização geral do sistema é significativo. Anteriormente ao desenvolvimento, o STP não possuía métodos, recursos, organização e base de dados suficientes para expor as informações de maneira transparente. Agora, com o potencial oferecido pelo GD ao STP, relacionado a observabilidade e reastreabilidade de dados, isto não será mais um problema.

Como a aplicação do GD para o STP é recente, a base de dados construída em históricos ainda é insuficiente para encontrar correlações consistentes entre as variáveis medidas. Com o registro e acompanhamento dos índices relativos à qualidade da água, o número e espécies de peixes que entram pelo canal de entrada, as condições específicas de atratividade, posição de comporta, entre outras, serão de grande valia aos operadores e à UHE no longo prazo.

Portanto, para trabalhos futuros é interessante avaliar esses dados mediante a correlações, os quais podem convergir em condições ótimas de operação para o sistema real e, conseqüentemente, reduzir e até mesmo acabar com os problemas relacionados à mortandade de peixes. Para a explanação das correlações sugeridas, pode-se aplicar os modelos autorregressivos, redes neurais do tipo *feedforward* ou (do Inglês, *Multilayer Perceptron* - MLP), análise de componentes principais (do Inglês, *Principal Component Analysis* - PCA) e outros algoritmos de mesmo seguimento.

Referências

- 1 REPLY. *Digital Twin*. 2022. <<https://www.reply.com/br/topics/augmented-and-virtual-reality/digital-twin-experience>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 21.
- 2 KO, M.; AHN, E.; PARK, S. C. A concurrent design methodology of a production system for virtual commissioning. *Concurrent Engineering*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 2, p. 129–140, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 22.
- 3 SANTOS, C. H. *Utilização da simulação para tomada de decisões no contexto da indústria 4.0: uma aplicação inserida no conceito de gêmeo digital*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 7, 26 e 27.
- 4 OZMU, E. *Augmented Reality fur Unternehmen: Aktiv interaktiv sein!* 2018. <<https://www.econsor.de/app-entwicklung/app-news/augmented-reality-aktiv-interaktiv-sein/>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 29.
- 5 REALWORDONE. *Origin of virtual reality and augmented reality: Applications in the Manufacturing Industry*. 2019. <<https://realworld-one.com/virtual-and-augmented-reality-set-for-success-in-the-manufacturing-industry-of-the-future/>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 28 e 29.
- 6 ASSOCIATION, M. *Modelica language*. 1997–2022. <<https://modelica.org/modelicalanguage.html>>. Último acesso em 16/02/2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 30, 31 e 32.
- 7 ASSOCIATION, M. *FMI related publications: funcional mock-up interface for model exchange and co-simulation*. 2020. <<https://fmi-standard.org/downloads>>. Último acesso em 16/02/2022. Citado 4 vezes nas páginas 7, 31, 32 e 33.
- 8 WOLFRAM. *Wolfram SystemModeler: ambiente de simulação e modelagem de última geração, fácil de usar, para sistemas ciber-físicos*. 2022. <<https://www.wolfram.com/system-modeler>>. Último acesso em 16/02/2022. Citado 3 vezes nas páginas 7, 33 e 34.
- 9 MARTINS, S. L. *Sistemas para a transposição de peixes neotropicais potamódromos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2005. Citado 8 vezes nas páginas 7, 15, 16, 34, 35, 36, 37 e 40.
- 10 TRAVADE, F.; LARINIER, M. Fish locks and fish lifts. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, EDP Sciences, n. 364, p. 102–118, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 7, 38 e 39.
- 11 NETTO, A.; FERNÁNDEZ, M. F. *Manual de hidráulica*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 7, 11, 39, 40, 41 e 42.
- 12 ENERGÉTICA, E. de P. *Matriz Energética e Elétrica*. 2021. <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia>>. Último acesso em 14/02/2022. Citado na página 15.

- 13 CIVIL, P. da R. C. *Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981*. 2010. <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Último acesso em 08/02/2022. Citado na página 15.
- 14 CONSUMIDOR, M. A. e. M. Comissão de Defesa do. *Projeto de lei nº 4.630*. 1998. <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=85E434FE3F1AFF64DED95F458D4A85D6.proposicoesWeb1?codteor=12305&filename=Tramitacao-PL+4630/1998>. Último acesso em 08/02/2022. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 35.
- 15 GERAIS, C.-C. E. D. M. Avaliação de risco de morte de peixes em usinas hidrelétricas. *Belo Horizonte: CEMIG, 332p*, 2016. Citado na página 16.
- 16 ANEEL. *Resolução Normativa nº 846*. 2019. <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-846-de-11-de-junho-de-2019-164060539>>. Último acesso em 09/02/2022. Citado na página 16.
- 17 PAULO, A. L. do Estado de S. *Lei nº 2.250, 28 de dezembro de 1997*. 1997. <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1927/lei-2250-28.12.1927.html>>. Último acesso em 08/02/2022. Citado na página 16.
- 18 SHAFTO, M. et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. *National Aeronautics and Space Administration*, v. 32, n. 2012, p. 1–38, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- 19 RABAH, S. et al. Towards improving the future of manufacturing through digital twin and augmented reality technologies. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 17, p. 460–467, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 17, 27 e 29.
- 20 STARK, R.; FRESEMANN, C.; LINDOW, K. Development and operation of digital twins for technical systems and services. *CIRP Annals*, Elsevier, v. 68, n. 1, p. 129–132, 2019. Citado na página 17.
- 21 NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 939–948, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 25.
- 22 VACHÁLEK, J. et al. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. In: IEEE. *2017 21st international conference on process control (PC)*. [S.l.], 2017. p. 258–262. Citado na página 20.
- 23 KUNATH, M.; WINKLER, H. Integrating the digital twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 72, p. 225–231, 2018. Citado na página 20.
- 24 BOSCHERT, S.; ROSEN, R. Digital twin?the simulation aspect. In: *Mechatronic futures*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 59–74. Citado na página 20.
- 25 GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. [S.l.]: Springer, 2017. p. 85–113. Citado na página 20.
- 26 NEE, A.; ONG, S. *Special Issue on Digital Twins in Industry*. [S.l.]: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. 6437 p. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.

- 27 DENTI, E. et al. A tool for the simulation of all-electric aircraft systems. *Aerotecnica Missili & Spazio*, Springer, v. 93, n. 1, p. 33–40, 2014. Citado na página 20.
- 28 BALS, J. et al. Virtual iron bird-a multidisciplinary modelling and simulation platform for new aircraft system architectures. 2005. Citado na página 20.
- 29 LI, Z. et al. Modular design of iron bird for modern aircraft. In: IEEE. *2016 IEEE International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS)*. [S.l.], 2016. p. 1133–1137. Citado na página 20.
- 30 GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. The digital twin paradigm for future nasa and us air force vehicles. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1818. Citado na página 20.
- 31 ROSEN, R. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *Ifac-papersonline*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 567–572, 2015. Citado na página 20.
- 32 HUANG, Z. et al. A survey on ai-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 19, p. 6340, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 20, 23 e 24.
- 33 KOSACKA-OLEJNIK, M. et al. How digital twin concept supports internal transport systems literature review. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 16, p. 4919, 2021. Citado na página 20.
- 34 KRITZINGER, W. et al. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Citado na página 20.
- 35 TAO, F. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 94, n. 9, p. 3563–3576, 2018. Citado na página 20.
- 36 UHLEMANN, T. H.-J.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 61, p. 335–340, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.
- 37 LOPEZ-AREVALO, I. et al. A wot-based method for creating digital sentinel twins of iot devices. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 16, p. 5531, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- 38 ZIDEK, K. et al. Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept. *Sustainability*, v. 12, n. 9, 2020. ISSN 2071-1050. Citado na página 21.
- 39 ROLLE, R.; MARTUCCI, V.; GODOY, E. Architecture for digital twin implementation focusing on industry 4.0. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 18, n. 05, p. 889–898, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

- 40 KAMPCZYK, A.; DYBEŁ, K. The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 17, p. 5757, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- 41 CALLCUT, M. et al. Digital twins in civil infrastructure systems. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 13, n. 20, p. 11549, 2021. Citado na página 22.
- 42 DEMIANENKO CARLO IAPIGE, M.; GAETANI, D. A procedure for automating energy analyses in the bim context exploiting artificial neural networks and transfer learning technique. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 14, n. 10, p. 2956, 2021. Citado na página 23.
- 43 ELSISI, M. et al. Reliable industry 4.0 based on machine learning and iot for analyzing, monitoring, and securing smart meters. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 21, n. 2, p. 487, 2021. Citado na página 23.
- 44 HARRISON, W. S. *Virtual fusion: The integration and analysis of simulation and real processes for manufacturing process deployment*. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 2011. Citado na página 24.
- 45 RÜTTIMANN, B. G.; STÖCKLI, M. T. Lean and industry 4.0?twins, partners, or contenders? a due clarification regarding the supposed clash of two production systems. *Journal of Service Science and Management*, Scientific Research Publishing, v. 9, n. 6, p. 485–500, 2016. Citado na página 24.
- 46 JAMWAL, A. et al. Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: a systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 12, p. 5725, 2021. Citado na página 24.
- 47 QI, Q.; TAO, F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access*, IEEE, v. 6, p. 3585–3593, 2018. Citado na página 24.
- 48 ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017. Citado na página 24.
- 49 XU, L. D.; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International journal of production research*, Taylor & Francis, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 2018. Citado na página 24.
- 50 MUELLER, E.; CHEN, X.-L.; RIEDEL, R. Challenges and requirements for the application of industry 4.0: a special insight with the usage of cyber-physical system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, SpringerOpen, v. 30, n. 5, p. 1050–1057, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- 51 CHWIF, L.; MEDINA, A. *Modelagem e simulação de eventos discretos, 4a edição: Teoria e aplicações*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. v. 4. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- 52 BANKS, J. *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

- 53 LAW, A. M.; KELTON, W. D.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. [S.l.]: McGraw-hill New York, 2007. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- 54 FISHMAN, G. S. Programming and execution. In: *Discrete-Event Simulation*. [S.l.]: Springer, 2001. p. 98–175. Citado na página 25.
- 55 NANCE, R. E.; SARGENT, R. G. Perspectives on the evolution of simulation. *Operations Research*, INFORMS, v. 50, n. 1, p. 161–172, 2002. Citado na página 26.
- 56 MACAL, C.; NORTH, M. Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. In: IEEE. *Proceedings of the winter simulation conference 2014*. [S.l.], 2014. p. 6–20. Citado na página 26.
- 57 RODIČ, B. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. *Organizacija*, v. 50, n. 3, p. 193–207, 2017. Citado na página 27.
- 58 URIARTE, A. G.; NG, A. H.; MORIS, M. U. Supporting the lean journey with simulation and optimization in the context of industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 25, p. 586–593, 2018. Citado na página 27.
- 59 VAHDATIKHAKI, F.; HAMMAD, A. Framework for near real-time simulation of earthmoving projects using location tracking technologies. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 42, p. 50–67, 2014. Citado na página 27.
- 60 SAEZ, M. et al. Real-time manufacturing machine and system performance monitoring using internet of things. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, IEEE, v. 15, n. 4, p. 1735–1748, 2018. Citado na página 27.
- 61 SONG, L.; ELDIN, N. N. Adaptive real-time tracking and simulation of heavy construction operations for look-ahead scheduling. *Automation in Construction*, Elsevier, v. 27, p. 32–39, 2012. Citado na página 27.
- 62 MILGRAM, P. et al. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Telem manipulator and telepresence technologies*. [S.l.], 1995. v. 2351, p. 282–292. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- 63 TOSHNIWAL, R.; DASTIDAR, K. G. Virtual reality: The future interface of technology. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Citeseer, v. 5, n. 6, p. 7032–7034, 2014. Citado na página 27.
- 64 AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. *Presence: teleoperators & virtual environments*, MIT Press One Rogers Street, Cambridge, MA 02142-1209, USA journals-info ?, v. 6, n. 4, p. 355–385, 1997. Citado na página 28.
- 65 RESE, A. et al. How augmented reality apps are accepted by consumers: A comparative analysis using scales and opinions. *Technological Forecasting and Social Change*, Elsevier, v. 124, p. 306–319, 2017. Citado na página 28.
- 66 JOHNSON, L. et al. The 2009 horizon report: K. *Austin, Texas: The New Media Consortium. Cover photograph: Chapped Lips by Vox_Efx on Flickr. Creative Commons*, v. 3, 2009. Citado na página 28.

- 67 JEŘÁBEK, T.; RAMBOUSEK, V.; WILDOVÁ, R. Perceptual specifics and categorisation of augmented reality systems. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, v. 191, p. 1740–1744, 2015. Citado na página 28.
- 68 PALMARINI, R. et al. A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 49, p. 215–228, 2018. Citado na página 28.
- 69 MASONI, R. et al. Supporting remote maintenance in industry 4.0 through augmented reality. *Procedia manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 1296–1302, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- 70 MOURTZIS, D.; ZOGOPOULOS, V.; VLACHOU, E. Augmented reality application to support remote maintenance as a service in the robotics industry. *Procedia Cirp*, Elsevier, v. 63, p. 46–51, 2017. Citado na página 28.
- 71 ANYLOGIC. *Digital Twin Development and Deployment*. 2022. <<https://www.anylogic.com/features/digital-twin>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 72 SIMCAD. *Manufacturing Digital Twin*. 2022. <<https://www.createasoft.com/digital-twin/manufacturing-digital-twin>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 73 FLEXSIM. *FlexSim plus Digital Twin*. 2022. <<https://www.flexsim.com/pt/g{ê}meo-digital/>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 74 SIMUL8. *Build rapid, cost-effective digital twins with SIMUL8*. 2022. <<https://www.simul8.com/applications/digital-twins>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 75 MATHWORKS. *What is a Digital Twin*. 2022. <<https://www.mathworks.com/discovery/digital-twin.html>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 76 MAPLE. *Virtual Commissioning using MapleSim*. 2022. <<https://www.maplesoft.com/solutions/engineering/AppAreas/Virtual-Commissioning.aspx>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 77 MODELON. *The Future of Microgrids*. 2022. <<https://www.modelon.com/the-future-of-microgrid-design/>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 78 SYSTEMES, D. *Virtual twin experiences in Manufacturing Industries*. 2022. <<https://www.3ds.com/virtual-twin/manufacturing-industries>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 79 ESI. *Machinery and Equipment – Digital Transformation with Human Centric Validation*. 2022. <<https://www.esi-group.com/machinery-equipment-digital-transformation-with-human-centric-validation>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.
- 80 MODELER, W. S. *Heavy Equipment*. 2022. <<https://www.wolfram.com/system-modeler/examples/heavy-equipment/construction-equipment-simulation.html>>. Último acesso em 05/07/2022. Citado na página 30.

- 81 MAKRAKIS, M. et al. *Comportamento migratório de espécies de peixes na bacia do rio paraná. 2009. <[https://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20100211093317-\[GIA\]-17.pdf](https://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20100211093317-[GIA]-17.pdf)>. Citado na página 34.*
- 82 LARINIER, M.; TRAVADE, F.; PORCHER, J.-P. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, n. 364, spcial milieux tropicaux, p. 208, 2002. Citado na página 34.
- 83 SCIENTIFIC, A. *PT-1000 temperature probe*. 2021. <<https://files.atlas-scientific.com/PT-1000-probe.pdf>>. ltimo acesso em 17/02/2022. Citado na página 49.
- 84 SCIENTIFIC, A. *EZO-pH*. 2021. <https://www.atlas-scientific.com/files/pH_EZO_Datasheet.pdf>. ltimo acesso em 17/02/2022. Citado na página 49.
- 85 SCIENTIFIC, A. *Mini lab grade D.O. probe*. 2021. <https://files.atlas-scientific.com/Mini_DO_probe.pdf>. ltimo acesso em 17/02/2022. Citado na página 49.
- 86 SICK. *Incremental Encoders*. 2022. <https://cdn.sick.com/media/pdf/6/76/076/dataSheet_DFS60B-TEPC10000_1036916_en.pdf>. Citado na página 49.
- 87 NOVOTECHNIK. *Position transducers potentiometric*. 2022. <https://novotechnik.ind.br/site/wp-content/uploads/2020/12/LWH_e.pdf>. Citado na página 49.
- 88 FESTO. *Proximity switch for T-slot*. 2022. <<https://www.festo.com/media/pim/961/D15000100151961.PDF>>. ltimo acesso em 02/07/2022. Citado na página 49.
- 89 LINOVISION. *4K POE IP Underwater Camera for Aquaculture and Underwater Inspection Anti-Corrosion, Max 50 Meters Depth of Water*. 2022. <<https://store.linovision.com/collections/featured/products/4k-poe-ip-underwater-camera-for-aquaculture-and-underwater-inspection>>. Citado na página 49.
- 90 ELECTRON. *Sensor de Temperatura - PT100*. 2022. <<http://www.electron.com.br/arquivos/catalogo/pt100/catalogo-pt100-PT.pdf>>. Citado na página 49.
- 91 DELTAOHM. *HD2021T Transmitters for illuminance and irradiance measurements*. 2022. <https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2021T_datasheet_ENG.pdf>. Citado na página 49.
- 92 INTELBRAS. *Câmera IP de 2MP*. 2022. <https://backend.intelbras.com/sites/default/files/2021-04/Datasheet_VIP_3240_BD_IA_V4.pdf>. Citado na página 49.
- 93 WOLFRAM. *Introductory Examples*. 2022. <<https://reference.wolfram.com/system-modeler/libraries/IntroductoryExamples/IntroductoryExamples.html>>. Citado na página 52.
- 94 BRUNETTI, F. *Mecânica dos fluidos*. [S.l.]: Pearson Educação, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 60.