

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



GÊMEO DIGITAL DE UM SISTEMA DE
BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Caio Mangueira do Nascimento

João Pessoa
Julho - 2022

Caio Mangueira do Nascimento

GÊMEO DIGITAL DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPB (área de concentração: Sistemas eletrônicos e automação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGE

Orientador: Dr. Euler Cássio Tavares Macêdo

Coorientador: Dr. Ademar Virgolino da Silva Netto

João Pessoa-PB

Julho de 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N244g Nascimento, Caio Mangueira do.
Gêmeo digital de um sistema de bombeamento de água /
Caio Mangueira do Nascimento. - João Pessoa, 2022.
100 f. : il.

Orientação: Euler Cássio Tavares de Macêdo.
Coorientação: Ademar Virgolino da Silva Netto.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Simulação digital. 2. Gêmeos digitais. 3. Redes
Neurais Artificiais - RNA. 4. Planta hidráulica. 5.
Modelo digital. 6. Sombra digital. 7. Indústria 4.0. I.
Macêdo, Euler Cássio Tavares de. II. Silva Netto,
Ademar Virgolino da. III. Título.

UFPB/BC

CDU 004.383.4(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

GÊMEO DIGITAL DE UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA


Elaborada por

CAIO MANGUEIRA DO NASCIMENTO

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. EULER CÁSSIO TAVARES DE MACÊDO

Orientador – UFPB



Documento assinado digitalmente

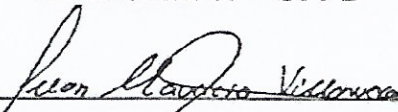
ADEMAR VIRGOLINO DA SILVA NETTO

Data: 16/09/2022 09:39:20-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

PROF. DR. ADEMAR VIRGOLINO DA SILVA NETTO

Coorientador – UFPB



PROF. DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA

Examinador Interno – UFPB



Documento assinado digitalmente

IVANOVITCH MEDEIROS DANTAS DA SILVA

Data: 28/07/2022 13:20:11-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

PROF. DR. IVANOVITCH MEDEIROS DANTAS DA SILVA

Examinador Externo –

Agradecimentos

Agradeço a Deus por permitir momentos de aprendizados durante o período no Mestrado.

Agradeço aos meus pais Daísio e Zenaide por toda dedicação e esforço para torna minha formação possível.

Agradeço aos meus irmãos Yuri e Larissa por todos os conselhos e apoio em momentos difíceis.

Agradeço ao Professor Euler e ao Professor Ademar pela oportunidade, dedicação e orientação para o desenvolvimento do trabalho e por todo apoio em momentos difíceis durante a caminhada do Mestrado.

Agradeço aos meus amigos João Ricardo, Igo e Iago pelo apoio durante esse período na universidade.

Agradeço a Thommas Kevin, Robson e Anne pelo apoio e paciência durante esse tempo que passei no LENHS.

Aos colegas de curso que me ajudaram de forma direta ou indireta na minha formação profissional e pessoal.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação do Curso de Engenharia Elétrica da UFPB por todo o conhecimento transmitido.

Aos familiares e amigos que tiveram a compreensão necessária quando precisei me ausentar para a conclusão desta pesquisa e que colaboraram direta ou indiretamente.

Resumo

Com a necessidade de modernização das empresas de abastecimento de água e chegada do conceito de Indústria 4.0, a busca por melhores soluções otimizadas no menor tempo possível para problemas internos vem sendo constantemente buscadas. Uma das alternativas empregadas para essas situações consiste na utilização de Gêmeos Digitais (GD). Os Gêmeos Digitais são representações virtuais em tempo real de objetos, processos e sistemas. Embora os gêmeos digitais possam representar coisas puramente digitais, eles frequentemente servem como uma ponte entre os domínios físico e digital. O estudo relacionado a Gêmeos Digitais é recente, no qual ainda se buscam arquiteturas adequadas para sua construção e o repertório das aplicações relacionadas aos sistemas de distribuição de água são limitados. A presente pesquisa concentrou-se no desenvolvimento de um Gêmeo Digital de um sistema de bombeamento de água focado em manter a integridade da planta hidráulica a partir dos dados da pressão das tubulações. Para o desenvolvimento do Gêmeo Digital, a pesquisa foi dividida em três partes: a construção do Modelo Digital, a Sombra Digital, e por fim do Gêmeo Digital. O sistema considerado como cenário para a pesquisa consiste em uma bancada experimental que encontra-se instalada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba, possuindo em sua constituição atuadores e sensores, como válvulas, conjunto motobomba e diversos sensores de pressão. O desenvolvimento dos modelos digitais a partir do sistema real foi realizado por meio do emprego de Redes Neurais Artificiais, nas quais foram avaliadas duas funções de ativações diferentes, a sigmoide e ReLU, e considerando a aplicação de realimentação ou não com atrasos da saída. Os melhores modelos digitais obtidos foram utilizados em paralelo com a planta hidráulica, como uma Sombra Digital. Dos melhores modelos encontrados, três utilizam a função de ativação ReLU e um a função de ativação sigmoide. Utilizando os modelos digitais em paralelo com o sistema físico, obteve-se um erro percentual absoluto médio (MAPE) satisfatório a partir do emprego do modelo digital com dois atrasos. Como Sombra Digital foram realizados experimentos com atualização do modelo digital considerando dois cenários, um com dados novos e antigos ou apenas com dados novos, no qual foi observado uma melhora nos resultados em relação ao modelo digital sem atualização e a influência do erro quadrático médio (EQM) obtido durante a atualização nos resultados do MAPE durante os experimentos como Sombra Digital. Para o Gêmeo Digital foi desenvolvido um supervisório no ScadaBR, que é um software livre, gratuito e de código-fonte aberto, para desenvolvimento de aplicações de Automação, Aquisição de Dados e Controle Supervisório, o qual permite o manejo do GD e da planta física, não permitindo entradas fora de intervalo permitido ou operações que elevem a pressão nas tubulações. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar que a utilização do Gêmeo Digital é de grande valia em relação a proteção do sistema físico

contra operações danosas bem como a possibilidade de realizar testes simulados sem a comunicação com a planta física.

Palavras-chaves: Indústria 4.0; Gêmeos Digitais; Planta Hidráulica; Redes Neurais Artificiais; Modelo Digital; Sombra Digital.

Abstract

With the need to modernize water supply companies and the arrival of the Industry 4.0 concept, the search for better optimized solutions in the shortest possible time for internal problems has been constantly sought. One of the alternatives used for these situations is the use of Digital Twins (DT). Digital Twins are real-time virtual representations of objects, processes and systems. While Digital Twins can represent purely digital things, they often serve as a bridge between the physical and digital domains. The study related to Digital Twins is recent, in which suitable architectures are still being sought for their construction and the repertoire of applications related to water distribution systems is limited. The present research focused on the development of a Digital Twin of a water pumping system focused on maintaining the integrity of the hydraulic plant from the pressure data of the pipes. For the development of the Digital Twin, the research was divided into three parts: the construction of the Digital Model, the Digital Shadow, and finally the Digital Twin. The system considered as a scenario for the research consists of an experimental bench that is installed in the Laboratory of Energy and Hydraulic Efficiency in Sanitation (LENHS) of the Federal University of Paraiba, having in its constitution actuators and sensors, such as valves, water pump set and several pressure sensors. The development of digital models from the real system was carried out through the use of Artificial Neural Networks, in which two different activation functions were evaluated, the sigmoid and ReLU, and considering the application of feedback or not with output delays. From the developed digital models, it was observed that the greater the delay, the lower the mean square error (MSE) obtained, and the best digital models obtained were used in parallel with the hydraulic plant, as a Digital Shadow. Of the best models found, three use the ReLU activation function and one uses the sigmoid activation function. Using the digital models in parallel with the physical system, a satisfactory mean absolute percentage error (MAPE) was obtained from the use of the digital model with two delays. As Digital Shadow, experiments were carried out with updating the digital model considering two scenarios, one with new and old data or only with new data, in which an improvement in the results was observed in relation to the digital model without updating and the influence of the MSE obtained during the update on MAPE results during experiments with Digital Shadow. For the Digital Twin, a supervisory was developed in ScadaBR, which is a free software, freeware and open source software for the development of Automation, Data Acquisition and Supervisory Control applications, which allows the management of the DT and the physical plant, not allowing entries outside the permissible range or operations that increase pressure in the pipelines. The obtained results show the use of the Digital Twin as being of great value in relation to the protection of the physical system against harmful operations as well as the possibility of performing simulated tests without communication with the physical plant.

Keywords: Industry 4.0; Digital Twins; Hydraulic Plant; Artificial neural networks; Digital Model; Digital Shadow.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de Abastecimento de Água com Zona Alta e Zona Baixa (CARVALHO JUNIOR, 2021).	5
Figura 2 – a) Modelo Digital; b) Sombra Digital; c) Gêmeo Digital (Autoria Própria).	8
Figura 3 – Modelo de Gêmeo Digital de 8 Dimensões (Adaptada de Stark, Frese- mann e Lindow (2019)).	10
Figura 4 – Gêmeo Digital de Bevilacqua et al. (Adaptado de Bevilacqua et al. (2020)).	11
Figura 5 – Gêmeo Digital de ZHENG, YANG, CHENG (Adaptado de Zheng, Yang e Cheng (2019)).	13
Figura 6 – Gêmeo Digital de Rabelo, Magalhães, Cabral (Adaptado de Rabelo, Magalhães e Cabral (2020)).	14
Figura 7 – Modelo não-linear de um neurônio (HAYKIN, 2000).	16
Figura 8 – Rede Neural Artificial com uma camada oculta (HAYKIN, 2000).	18
Figura 9 – Arquitetura de Redes Neurais Artificiais (RANZAN, 2021).	19
Figura 10 – Topologia de PMC recorrente (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016).	20
Figura 11 – Bancada Experimental do LEHNS (Autoria Própria).	23
Figura 12 – Bancada Experimental do LEHNS (Autoria Própria).	24
Figura 13 – Válvula Proporcional, Modelo ARB24-SR (BELIMO, 2019).	25
Figura 14 – Sensor de pressão TP-18 (ACROS, 2007).	25
Figura 15 – Sensor de vazão VMS038BU22040 (Autoria Própria).	26
Figura 16 – Conjunto Motobomba (Autoria Própria).	26
Figura 17 – Booster (Autoria Própria).	27
Figura 18 – Dimensões da caixa d'água (FORTLEV, 2019).	27
Figura 19 – Dispositivo USB-6229 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022a).	28
Figura 20 – Inversor CFW-08 (WEG, 2009).	29
Figura 21 – Elementos da planta hidráulica utilizados no desenvolvimento da pes- quisa (Autoria Própria).	30
Figura 22 – Rede Neural de Planta Hidráulica (Autoria Própria).	32
Figura 23 – Funções de ativação: a) sigmóide; b) ReLU (Adaptada de: JAYAWAR- DANA e BANDARANAYAKE, 2021).	32
Figura 24 – Sombra Digital da Planta Hidráulica (Autoria Própria).	34
Figura 25 – Digrama de fluxo da atualização do modelo digital (Autoria Própria).	35
Figura 26 – Gêmeo Digital desenvolvido (Autoria Própria).	35
Figura 27 – Arquitetura do Gêmeo Digital desenvolvido (Autoria Própria).	36
Figura 28 – Dados obtidos para treinamento (Autoria Própria).	39
Figura 29 – Dados após tratamento (Autoria Própria).	40

Figura 30 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 0 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).	42
Figura 31 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 1 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).	43
Figura 32 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 2 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).	43
Figura 33 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 3 com a função de ativação sigmoide (Autoria Própria).	44
Figura 34 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 0 (Autoria Própria).	45
Figura 35 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 1 (Autoria Própria).	45
Figura 36 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 2 (Autoria Própria).	46
Figura 37 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 3 (Autoria Própria).	46
Figura 38 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 0 (Autoria Própria).	48
Figura 39 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 1 (Autoria Própria).	48
Figura 40 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 2 (Autoria Própria).	49
Figura 41 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 3 (Autoria Própria).	49
Figura 42 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 0 (Autoria Própria).	51
Figura 43 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 1 (Autoria Própria).	51
Figura 44 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 2 (Autoria Própria).	52
Figura 45 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 3 (Autoria Própria).	52
Figura 46 – Dados obtidos do experimento 1 (Autoria Própria).	54
Figura 47 – Dados obtidos do experimento 1 do modelo digital atualizado com novos e antigos dados (Autoria Própria).	55
Figura 48 – Dados obtidos do experimento 2 (Autoria Própria).	56
Figura 49 – Dados obtidos do experimento 2 do modelo digital atualizado com novos e antigos dados (Autoria Própria).	57
Figura 50 – Dados obtidos do experimento 3 (Autoria Própria).	58
Figura 51 – Tela Inicial do supervisor de configuração do Gêmeo Digital (Autoria Própria).	59
Figura 52 – Supervisor de controle do Gêmeo Digital (Autoria Própria).	60
Figura 53 – Pastas do Gêmeo Digital (Autoria Própria).	61
Figura 54 – Pasta "Arquivos Complementares"(Autoria Própria).	61
Figura 55 – Pasta "dados"(Autoria Própria).	62
Figura 56 – Pasta "modelo"(Autoria Própria).	62
Figura 57 – Supervisor configurado para a realização dos experimento do Gêmeo Digital (Autoria Própria).	63
Figura 58 – Supervisor de controle do Gêmeo Digital com medições habilitadas (Autoria Própria).	64

Figura 59 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada maior que a permitida na CV2 (Autoria Própria).	65
Figura 60 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada permitida na CV2 (Autoria Própria).	65
Figura 61 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada de 40 Hz no CMB (Autoria Própria).	66
Figura 62 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada de 45° no CV1 (Autoria Própria).	67
Figura 63 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital após processamento da entrada (Autoria Própria).	67
Figura 64 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital após processamento da entrada (Autoria Própria).	68
Figura 65 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital operação desejada realizada (Autoria Própria).	69
Figura 66 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital após atualização do modelo digital (Autoria Própria).	70
Figura 67 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital realizando criação de novos modelos digitais (Autoria Própria).	71

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com informações dos modelos digitais.	41
Tabela 2 – Tabela com informações do experimento 1 do Sombra Digital.	47
Tabela 3 – Tabela com informações do experimento 2 do Sombra Digital.	50
Tabela 4 – Tabela com informações do experimento 3 do Sombra Digital.	53
Tabela 5 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 1.	54
Tabela 6 – Tabela com informações do experimento 1 da atualização do modelo digital.	55
Tabela 7 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 2.	56
Tabela 8 – Tabela com informações do experimento 2 da atualização do modelo digital.	57
Tabela 9 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 3.	58
Tabela 10 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Bobina(<i>Coil Status</i>).	81
Tabela 11 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Entrada Discreta(<i>Input Status</i>).	81
Tabela 12 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Registrador <i>Holding</i>	82
Tabela 13 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Registrador de entrada (<i>Input Register</i>).	83

Lista de abreviaturas e siglas

A_{CV}	Ângulo da válvula proporcional
AR	Realidade Aumentada
CISs	Sistemas de infraestrutura civil
CMB	Conjunto motobomba
CPS	Sistemas Ciber-Físico
DT	Digital Twins
EE	Estação Elevatória
EQM	Erro Quadrático Médio
ETA	Estação de Tratamento de Água
F_{CMB}	Frequência conjunto motobomba
GD	Gêmeo Digital
ICPSs	Industrial Sistemas Ciber-Físico
IHM	Interface Homem Máquina
IoS	Internet dos Serviços
IoT	Internet das Coisas
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
MAPE	Erro absoluto percentual médio
MSE	Mean Square Error
PMC	Perceptron Multicamadas
ReLU	Unidade linear retificada
RNA	Redes Neurais Artificiais
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	Estimação de estado

T-GCNs	Rede Neural Convolucional de Gráfico Temporal
VR	Realidade Virtual
WDS	Sistema de distribuição de água
ZONA A	Zona Alta
ZONA B	Zona Baixa

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivos gerais	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
1.2	Contribuições do trabalho	3
1.3	Organização do trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Sistema de Abastecimento de Água	5
2.2	Gêmeo Digital	6
2.2.1	Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital	7
2.2.2	Funcionalidades	8
2.2.3	Arquiteturas	9
2.3	Redes Neurais Artificiais	15
2.4	Trabalhos Relacionados	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Planta Hidráulica	23
3.2	Métodos	29
3.2.1	Linguagem de Programação	30
3.2.2	Comunicação	30
3.2.3	Modelo Digital	31
3.2.4	Sombra Digital	33
3.2.5	Gêmeo Digital	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	Modelo Digital	40
4.2	Sombra Digital	44
4.2.1	Experimentos com o melhor modelo digital para cada atraso	44
4.2.1.1	Experimento 1	44
4.2.1.2	Experimento 2	47
4.2.1.3	Experimento 3	50
4.2.2	Experimentos realizando atualização do modelo digital	53
4.2.2.1	Experimento 1	53
4.2.2.2	Experimento 2	55
4.2.2.3	Experimento 3	57

4.3	Gêmeo Digital	59
4.3.1	Experimentos	63
4.3.1.1	Experimento 1	64
4.3.1.2	Experimento 2	66
4.3.1.3	Experimento 3	69
4.3.1.4	Experimento 4	70
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – ENDEREÇO DE MEMÓRIAS DA COMUNICAÇÃO MODBUS TCP/IP	81

1 Introdução

A água é o bem mais necessário para a manutenção da vida. Da água presente na terra, 97% consiste em salgada nos oceanos, águas subterrâneas e mares, e apenas 2,5 a 2,75% são de água doce, incluindo as geleiras congeladas em forma de neve, umidade do solo, etc. Ela é distribuída por meio de um sistema de abastecimento de água, no qual é usada para fins domésticos, industriais, públicos e comerciais. Um sistema de distribuição de água é constituído por instalações com captação, armazenamento, transporte, bombeamento, tratamento e distribuição, e seus componentes são reservatório, bombas, tanques, tubos, válvulas, etc (DEEPALI; SANDIP, 2019).

Segundo Flores (2021) a água potável é um recurso essencial para a manutenção da vida humana, o cuidado com o serviço de abastecimento de água desempenha um papel crucial para a sociedade, no qual é responsável por fornecer ao usuário final este insumo em quantidade, qualidade e pressão adequada (apud TSUTIYA, 2004).

Com o objetivo de fornecer uma água de melhor qualidade e livre de elementos e substâncias que possam afetar a saúde humana, foram introduzidos sistemas de controle supervísório e aquisição de dados (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*) que permitem controlar e gerir os sistemas de distribuição de água, possibilitando assim, o monitoramento 24 horas por dia, sete dias por semana (FRANCO et al., 2019).

A 4ª revolução industrial, ou Indústria 4.0, inicialmente apontava principalmente para uma integração entre o mundo físico e virtual, o que foi definido de Sistemas Ciber-Físico (CPS - *Cyber-Physical System*), porém logo o conceito evoluiu para uma associação entre CPS com Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) e Internet dos Serviços (IoS - *Internet of Services*). Posteriormente, foi combinada com a noção de “esperteza” (dimensão da inteligência) refletida em termos como fábrica inteligente, sensores inteligentes, máquinas inteligentes, produtos inteligentes, ambientes inteligentes, etc (CAMARINHA-MATOS; FORNASIERO; AFSARMANESH, 2017).

A Indústria 4.0 possui diferentes tipos de tecnologias habilitadoras como Internet das Coisas, Computação em nuvem e *Big Data Analytics* que contribuem para a criação do que é o Gêmeo Digital, ou *Digital Twins*, de um processo físico, ou seja, permite o desenvolvimento de um modelo matemático capaz de descrever o processo, o produto ou serviço para realizar análises e aplicar as estratégias da empresa (BEVILACQUA et al., 2020).

Os CPS são definidos como tecnologias transformadoras para o gerenciamento de sistemas interconectados entre seus ativos físicos e capacidades computacionais, no qual a maior disponibilidade e acessibilidade de sensores, sistemas de aquisição de dados e

redes de computadores, forçam a competitividade das fábricas a se moverem em direção à implementação de metodologias de alta tecnologia (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Os Sistemas Ciber-Físicos são vistos como o facilitador fundamental para uma nova era de comunicação e colaboração em tempo real baseada na Internet entre os participantes da cadeia de valor, por exemplo, dispositivos, sistemas, organizações e humanos. O uso em ambientes industriais deve revolucionar a forma como as empresas conduzem seus negócios de um ponto de vista holístico, ou seja, do chão de fábrica às interações comerciais, dos fornecedores aos clientes e do design ao suporte em todo o ciclo de vida do produto e serviço. Os chamados Industrial CPS (ICPSs) confundem a estrutura dos mundos cibernético (incluindo negócios) e físico e dá o pontapé inicial em uma era de colaboração em todo o sistema e interações orientadas por informações entre todas as partes interessadas da cadeia de valor (COLOMBO et al., 2017).

O Gêmeo Digital, em relação aos CPS, surge como uma representação virtual do produto físico, uma sombra digital que contém todas as informações e conhecimentos do mesmo, podendo ter inteligência, como por exemplo, recuperando informações sobre si mesmo e participando ou tomando decisões sobre seu próprio futuro (SCHROEDER et al., 2016).

As soluções de Gêmeo Digital foram desenvolvidas para propiciar melhorias na eficiência, minimizar as taxas de falhas, encurtar os ciclos de desenvolvimento, abrir novas oportunidades de negócios, melhorar a segurança dos operadores e mantenedores de plantas de processo, aplicação de políticas preditivas no gerenciamento e manutenção da planta e simulações de processos para treinar e melhorar a resiliência industrial (BEVILACQUA et al., 2020).

Segundo Rabelo, Magalhães e Cabral (2020), “um GD visa ajudar na redução de custos, melhorar e agilizar o ciclo de testes e de produção de um produto ou processo, reduzir o tempo de introdução de novos produtos, e criar um ambiente virtual no qual todas as fases do produto estejam integradas”.

Após a introdução de sistemas SCADA, as empresas de água e esgoto buscam como o próximo passo a implementação de Gêmeos Digitais (GD), que permitem a realização de simulações dinâmicas do processo, com o intuito de melhorar suas instalações e apoiar no treinamento de seus operadores, a fim de reduzir os riscos e falhas, além de otimizar as operações (CURL et al., 2019).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Neste trabalho pretende-se realizar o desenvolvimento de um Gêmeo Digital de uma planta hidráulica, que possui na sua composição um conjunto motobomba, sensores de pressão e válvulas proporcionais, com o intuito de evitar que a planta atinja valores de pressão considerados como de risco para o funcionamento do sistema.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver modelos digitais da planta hidráulica;
- Comparar os modelos digitais utilizados como Sombra Digital com a planta hidráulica;
- Realizar atualização dos modelos digitais;
- Verificar sinais de alerta gerados pelo Gêmeo Digital.

1.2 Contribuições do trabalho

Parte deste trabalho consiste no desenvolvimento de um software de um Gêmeo Digital de uma planta hidráulica, com o intuito de manter a integridade, evitando entradas de atuadores fora do intervalo definido, operações que possam elevar ou diminuir as pressões na tubulação e atualizações sempre que necessários nos modelos digitais desenvolvidos, e busca contribuir para estudos posteriores sobre outras características presente na linha de um Gêmeo Digital, como a eficiência energética.

Em relação às operações realizadas, o Gêmeo Digital busca prever o que ocorrerá e evitar que manobras possam elevar a pressão na tubulação de forma que ponha em risco sua integridade, ou que pressões mínimas na tubulação não sejam atingidas, não tendo uma boa qualidade no serviço de distribuição de água.

Sempre buscando a semelhança com a planta hidráulica real, o Gêmeo Digital irá constantemente atualizar seu modelo quando a diferença entre o real e o simulado estiver acima do valor definido.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido da seguinte maneira:

- No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho, abordando os assuntos sobre sistemas de abastecimento de água, Gêmeos Digitais e redes neurais artificiais;
- No Capítulo 3 descreve-se de maneira detalhada a bancada experimental utilizada para o desenvolvimento da ferramenta computacional, bem como a metodologia utilizada;
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos;
- As conclusões deste trabalho de dissertação são apresentados no Capítulo 5.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo se busca apresentar a revisão bibliográfica dos principais conhecimentos necessários que auxiliem o entendimento deste trabalho. Serão abordados assuntos relacionados a Sistemas de Abastecimento de Água, Gêmeos Digitais, Redes Neurais Artificiais e por fim, trabalhos relacionados a Gêmeos Digitais aplicados a Sistemas de Abastecimento de Água.

2.1 Sistema de Abastecimento de Água

O sistema de abastecimento de água é composto por manancial, no qual a água é retirada para o abastecimento com qualidade e vazão adequada; captação, que representa o conjunto de estruturas e dispositivos montados junto ao manancial para retirada da água; estação elevatória (EE), responsável por transferir a água em estado bruto ou tratada para a unidade seguinte; adutora, que consiste na canalização da água que precede a rede de distribuição; a estação de tratamento de água (ETA), que consiste no conjunto de unidades responsáveis por adequar a água aos padrões de potabilidade; reservatórios, cujo objetivo é regularizar as variações de adução e distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição; e por último, a rede de distribuição, formada por tubulações destinadas a entregar ao consumidor final, água de forma contínua, em quantidade e pressão recomendada. Na Figura 1 pode-se observar a representação gráfica dos principais componentes presentes em um sistema de abastecimento de água e a representação de duas zonas do sistema de distribuição de água, uma baixa atendida por um reservatório apoiado, e uma alta, atendida por um reservatório elevado (TSUTIYA, 2006).

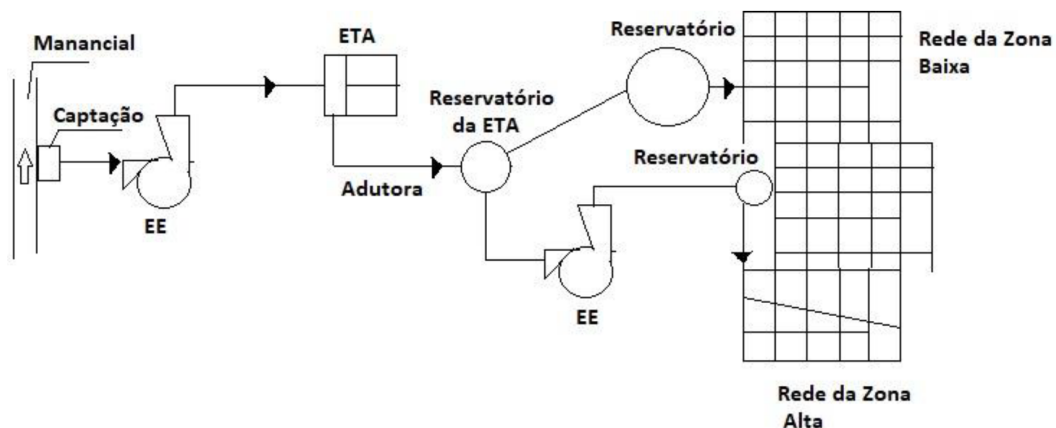


Figura 1 – Sistema de Abastecimento de Água com Zona Alta e Zona Baixa (CARVALHO JUNIOR, 2021).

Para que a água chegue à zona alta, faz-se necessário a utilização de uma estação de bombeamento para que a água ganhe a altura manométrica necessária de bombeamento, contudo, este aumento causa um aumento da pressão na zona baixa, elevando assim, as perdas por vazamento e custos de manutenção causados por rupturas nas tubulações devido ao aumento de pressão (SALVINO, 2018).

Uma forma de fazer o controle da velocidade da bomba é utilizando inversores de frequência, o que torna possível o controle da pressão na tubulação. As válvulas também possibilitam o controle da pressão, sendo possível sua instalação em diferentes pontos do sistema e facilitando o controle da pressão em vários pontos da rede (CAMBOIM; SILVA; GOMES, 2014; SOUSA, 2017).

Afim de trazer melhorias para os sistemas de abastecimento de água, foram introduzidos sistemas supervisórios SCADA, que são formados geralmente por unidades mestres, unidades remotas, sensores, atuadores e uma tecnologia de comunicação entre os componentes. Dentre as funcionalidades dos sistemas SCADA tem-se a configuração das variáveis de entrada e saída, da interface da comunicação, geração de gráficos de tendências das variáveis do sistema, geração de alarmes associados à uma variável ou condição do processo de produção, geração de históricos com dados e eventos relevantes, geração de informações para níveis gerenciais, etc (SILVA, 2017).

2.2 Gêmeo Digital

O governo alemão, visando maior produtividade e eficiência do setor industrial e novas oportunidades de mercado, com parceria de universidades e empresas, teve a iniciativa de desenvolver o conceito de fábricas inteligentes, as quais possuem alto grau de autonomia e flexibilidade, integrada a toda cadeia de valor e ciclo de vida do produto.

A iniciativa do governo alemão foi chamada de Indústria 4.0, sendo seu conceito baseado em tecnologias habilitadoras que tem chamado a atenção de grandes empresas, que enxergam grandes oportunidades de negócios e um forte impacto econômico. Logo, pesquisadores, agências governamentais e empresas preveem grandes alterações nos paradigmas que estão além da tecnologia empregada na manufatura, considerando a Indústria 4.0 como o início da quarta revolução industrial (DALENOGARE, 2018).

Na indústria 4.0 estão presentes alguns dos principais temas e conceitos utilizados atualmente, partindo do conceito de *Big-Data*, ou grande volume de dados, o poder computacional e conectividade, o surgimento de recursos de análise e inteligência de negócios, novas formas de interação homem-máquina e melhorias na transferência digital, até a integração com o mundo físico, como por exemplo a Impressão 3D (ORDÔNIO, 2020).

Focada na melhoria contínua em termos de eficiência, segurança, produtividade das operações e especialmente no retorno do investimento, a Indústria 4.0 possui muitas tecnologias e tendências facilitadoras disponíveis, porém a Internet das Coisas e Serviços, Sistemas Ciber-Físicos e *Big-Data* são consideradas como os principais pilares da indústria inteligente (COELHO, 2016).

As empresas não necessariamente terão que ter todas as tecnologias da Indústria 4.0, mas terão uma combinação que tornará possível encontrar soluções, nas quais essa combinação varia de acordo com a especificidade da empresa (ORDÔNIO, 2020).

Com as tecnologias habilitadoras, torna-se possível a integração entre o mundo real e o mundo virtual, permitindo o desenvolvimento de Gêmeos Digitais.

Segundo Glaessgen e Stargel (2012), um Gêmeo Digital (do inglês, *Digital Twin*) é uma simulação multifísica, multiescala e probabilística integrada de um sistema construído e que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico, etc., para espelhar a vida de seu gêmeo correspondente.

O Gêmeo Digital possui 3 partes principais, que são:

- Produtos físicos no Espaço Físico;
- Produtos virtuais no Espaço Virtual;
- Conexões de dados e informações que unem os dois produtos.

No Espaço Virtual, melhora-se a quantidade de informações que se tem disponível, adicionando inúmeras características comportamentais para que se possa não apenas visualizar o produto, mas também testá-lo quanto às capacidades de desempenho (GRIEVES, 2014).

O Gêmeo Digital é uma reflexão em tempo real, ou seja, o espaço virtual é um reflexo do espaço físico, podendo manter uma sincronização e fidelidade do espaço físico. Ele possui interação e convergência no espaço físico, no qual os dados gerados em várias partes no espaço físico podem se conectar entre si. Os dados obtidos no espaço físico podem ser muito abrangentes, porém, eles podem ser melhor explorados e usados de forma mais completa por meio da convergência com seu histórico. O Gêmeo Digital tem a capacidade de se atualizar em tempo real por meio da comparação do espaço virtual com o espaço físico, sofrendo assim melhorias contínuas (TAO et al., 2018).

2.2.1 Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital

Kritzinger et al. (2018) propôs que os Gêmeos Digitais fossem divididos em três categorias de acordo com seu nível de integração, como pode ser visualizado na Figura 2, que são:

- Modelo Digital: é a representação digital de um objeto físico, contudo, não possui nenhum tipo de integração com o objeto físico. Pode-se utilizar dados reais, porém a troca de dados é feita de forma manual;
- Sombra Digital: possui um fluxo de dados unidirecional do objeto físico com o objeto virtual, no qual uma mudança no objeto físico gera uma mudança no objeto digital;
- Gêmeo Digital: possui um fluxo de dados em ambas as direções, ou seja, o objeto físico envia dados para atualizar o objeto virtual e o objeto virtual pode fazer controle do objeto físico.

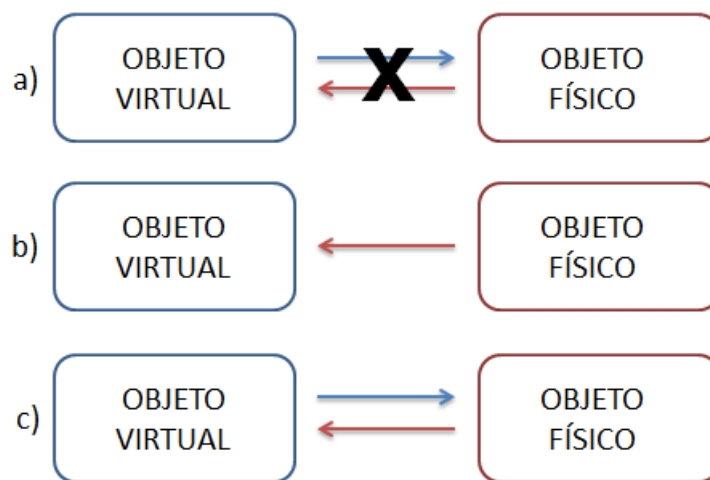


Figura 2 – a) Modelo Digital; b) Sombra Digital; c) Gêmeo Digital (Autoria Própria).

2.2.2 Funcionalidades

Ao conhecer-se a precisão do modelo, o Gêmeo Digital pode ser utilizado para a resolução de problemas de controle complexos, porém, se o modelo não for muito preciso, pode-se usá-lo como controle paralelo. Como vantagens, tem-se a possibilidade de usar regras predefinidas para monitorar todo o processo de operação, que para o ser humano pode ser tedioso e causar erros; simulação rápida e soluções de problemas, redução de custos e tempo; e identificação de gargalos no processo de fabricação (WANG; CAO; WANG, 2021).

O Gêmeo Digital pode ser utilizado para diferentes propósitos, como apoio a decisão na gestão de sistema de produção, monitoramento e melhoramento em processos de produção, suporte ao ciclo de vida de processo de máquina, flexibilização dos sistemas de produção, manutenção, aumento da segurança entre interação homem-máquina, projeto de máquinas, ambientes de laboratórios e produção, de produtos ou redesenhos de ambientes de trabalho, e por fim, pode ser utilizado para avaliar o desempenho de um GD baseado em nuvem, verificando a velocidade com que os dados são atualizados nesse tipo de ambiente (CIMINO; NEGRI; FUMAGALLI, 2019).

Em relação aos sistemas de distribuição de água, o Gêmeo Digital pode ser utilizado para o gerenciamento de pressão, simulação de operação de válvulas, previsão de demandas, otimização das configurações de bombas e válvulas, avaliação de perdas de água, análise de contaminantes em tempo real, previsão do comportamento da rede considerando algumas horas a frente, entre outros (SINGH, 2019).

2.2.3 Arquiteturas

O Gêmeo Digital necessita ter algumas características para o seu manejo, como a identificação do produto físico e de seu produto virtual, o gerenciamento de dados, os modelos digitais, as informações geradas ao longo da vida do produto físico, a Interface Homem-Máquina, e por último a comunicação entre os dados e a Interface Homem-Máquina (SCHROEDER et al., 2016).

Os autores Stark, Fresemann e Lindow (2019) desenvolveram uma abordagem estruturada chamada de Modelo de Gêmeo Digital de 8 dimensões (do inglês, *Digital Twin 8-dimension model*) conforme apresentado na Figura 3. O intuito do modelo é auxiliar no planejamento do escopo e escolha do tipo de GD. Do lado esquerdo tem-se as dimensões ligadas ao contexto e ao ambiente do Gêmeo Digital, composta pela amplitude de integração, modo de conexão, frequência de atualização e ciclo de vida do produto. Do lado direito tem-se as dimensões ligadas ao comportamento e a riqueza de capacidade, com a inteligência CPS, as capacidades de simulação, a riqueza do modelo digital e a interação humana. Cada dimensão possui três ou quatro níveis que retratam um espaço de realização diferente e/ou único. Nas dimensões do modo de conectividade e interação humana, quanto maior o nível, melhor será a riqueza e fidelidade do Gêmeo Digital, e nas dimensões de amplitude de integração e ciclo de vida quanto mais elevado forem seus níveis, maior será sua amplitude/extensão.

Contexto e Ambiente				Comportamento e Capacidade			
Ciclo de Vida do Produto	Amplitude de Integração	Modo de Conexão	Frequência de Atualização	Inteligência do Sistema Ciber-Físico	Capacidade de Simulação	Riqueza do Modelo Digital	Interação Humana
1- Início da Vida (BoL)	1- Produto/Máquina	1- Unidirecional	1- Cada Semana	1- Ação Humana	1- Estático	1- Geometria, Cinemática	1- Dispositivos Inteligentes
2- Meio da Vida (MoL)	2- Sistema de Produção/Próximo da Produção		2- Cada Dia	2- Automatizado	2- Dinâmico	2- Controle do Comportamento	2- VR/AR
	3- Ambiente de Produção	2- Bidirecional	3- Cada Hora	3- Parcialmente Autônomo	3- Ad-Hoc		
3- Fim da Vida (EoL)	4- Mundo (Interação de todos os objetos)	3- Automático	4- Tempo Real	4- Autônomo	4- Perspectiva do Futuro	3- Comportamento Físico	3- Híbrido

Figura 3 – Modelo de Gêmeo Digital de 8 Dimensões (Adaptada de [Stark, Freseman e Lindow \(2019\)](#)).

Os autores [Bevilacqua et al. \(2020\)](#) elaboraram o modelo de Gêmeo Digital apresentado na Figura 4. O mesmo é composto por quatro camadas principais, as quais são apresentadas a seguir:

- Espaço físico do processo industrial: possui os recursos físicos da indústria, como produto, equipamento, material, processo, etc. Nele estão todos os elementos da planta de produção que devem ser monitorados e detectados, podendo ser acionados e controlados de forma remota ou não;
- Sistema de comunicação: é responsável pela transferência de dados entre o Gêmeo Digital e os elementos da planta, conectando os elementos observáveis da planta a entidades digitais, e vice-versa, para sua sincronização. Nesta segunda camada ainda são necessários uma representação do modelo 3D e um plano de identificação e avaliação de riscos para configurar o sistema de simulação e a ferramenta de previsão e detecção de anomalias;
- Gêmeo Digital: o sistema do GD consiste em quatro ferramentas principais:
 - Ferramenta de controle e execução: permite que o sistema físico e o cibernético se comuniquem por meio da saída de sensores, transdutores, etc., e na entrada de controle de atuadores, interruptores, etc. Ela executa um programa e elabora sinais digitais e analógicos provenientes de sensores e direcionados aos atuadores presentes em uma planta industrial;
 - Ferramenta de simulação: permite criar modelo virtual dos processos, não só um modelo de simulação, coerente com a planta física, como também um modelo comportamental e funcional. Ela possibilita a simulação de cenário hipotéticos

sem colocar em risco a planta física e seus operadores e também é responsável por sinais de aviso quando os sinais obtidos apresentam uma discrepância muito grande com os esperados;

- Ferramenta de detecção e previsão de Anomalias: deve prever quais são as causas das falhas (detecção de anomalias) e quanto tempo o sistema pode continuar antes de quebrar ou sair dos parâmetros operacionais corretos da planta (previsão de anomalias e avaliação de vida residual);
 - Plataforma de servidor em nuvem: deve receber e armazenar dados em tempo real oriundos dos sensores e sistemas instalados na planta.
- Espaço do usuário: é oferecido aos usuários por meio da ativação de instruções operacionais para a gestão de manutenção e segurança do sistema por meio de Realidade Aumentada (AR) e Realidade Virtual (VR) ou ativação de mensagens de aviso.

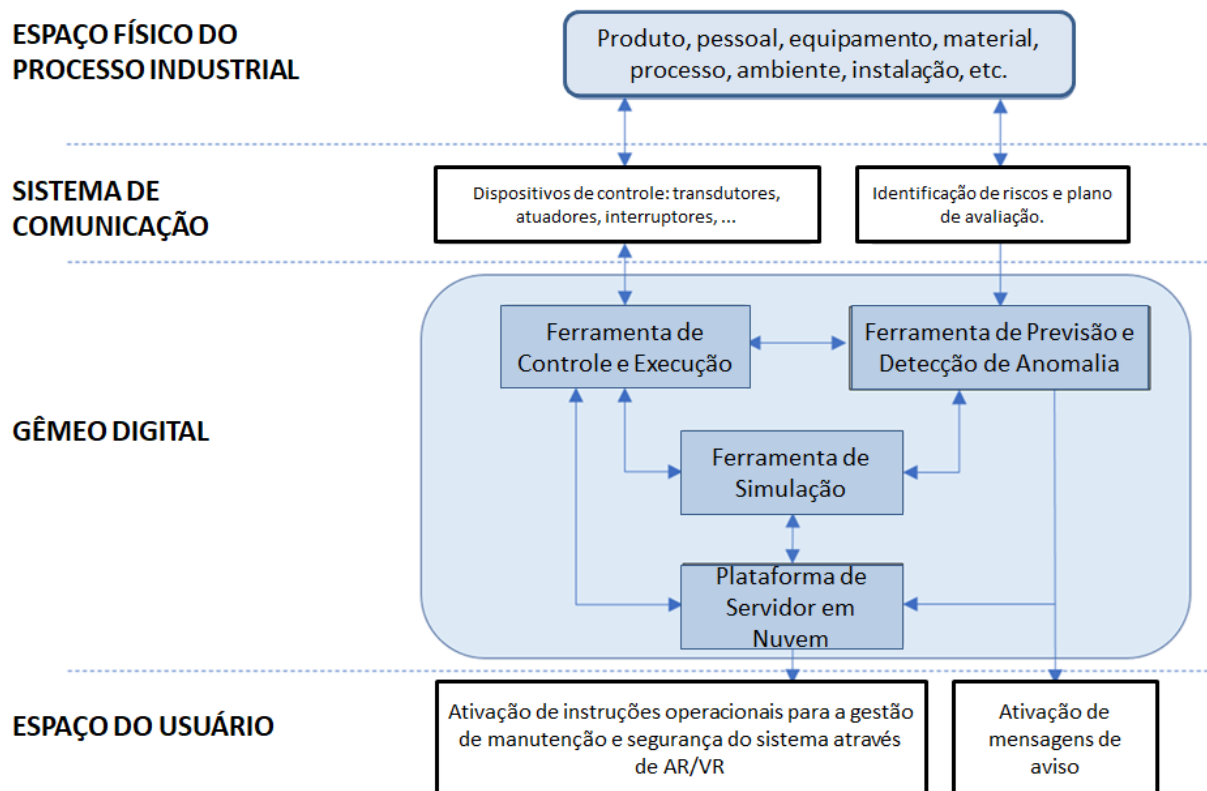


Figura 4 – Gêmeo Digital de Bevilacqua et al. (Adaptado de [Bevilacqua et al. \(2020\)](#)).

Outra abordagem considerada, foi a estrutura da aplicação do Gêmeo Digital apresentada por [Zheng, Yang e Cheng \(2019\)](#), a qual encontra-se apresentada na Figura 5 e consiste em três principais partes, que são:

- Espaço Físico: esta camada consiste em um ambiente complexo, diversificado e dinâmico, composto por pessoas, máquinas, materiais e regras. Ela possui todos

os objetos necessários para o desenvolvimento e fabricação de produtos, como equipamentos, dados do produto, recursos de computação e software. Eles estão distribuídos em diferentes ambientes e precisam ser conectados por tecnologias IoT. Em seguida, os dados do mundo físico serão coletados, integrados e utilizados para otimização;

- Camada de processamento de informações: ela é responsável por fazer a ligação entre o espaço físico e o espaço virtual, pelo mapeamento bidirecional e pela interoperabilidade dos dois espaços. Ela possui três módulos, um de armazenamento de dados, outro de processamento de dados e um terceiro de mapeamento de dados;
- Espaço virtual: os modelos dos objetos físicos estão disponíveis virtualmente como, por exemplo, modelos em 3D armazenados no banco de dados. Com os dados históricos e os obtidos em tempo real dos dois espaços, é possível que o GD fique sincronizado. Quando ocorrem distúrbios e conflitos no espaço real, os modelos virtuais podem ser testados ou até mesmo prever e realimentar as informações do espaço físico.

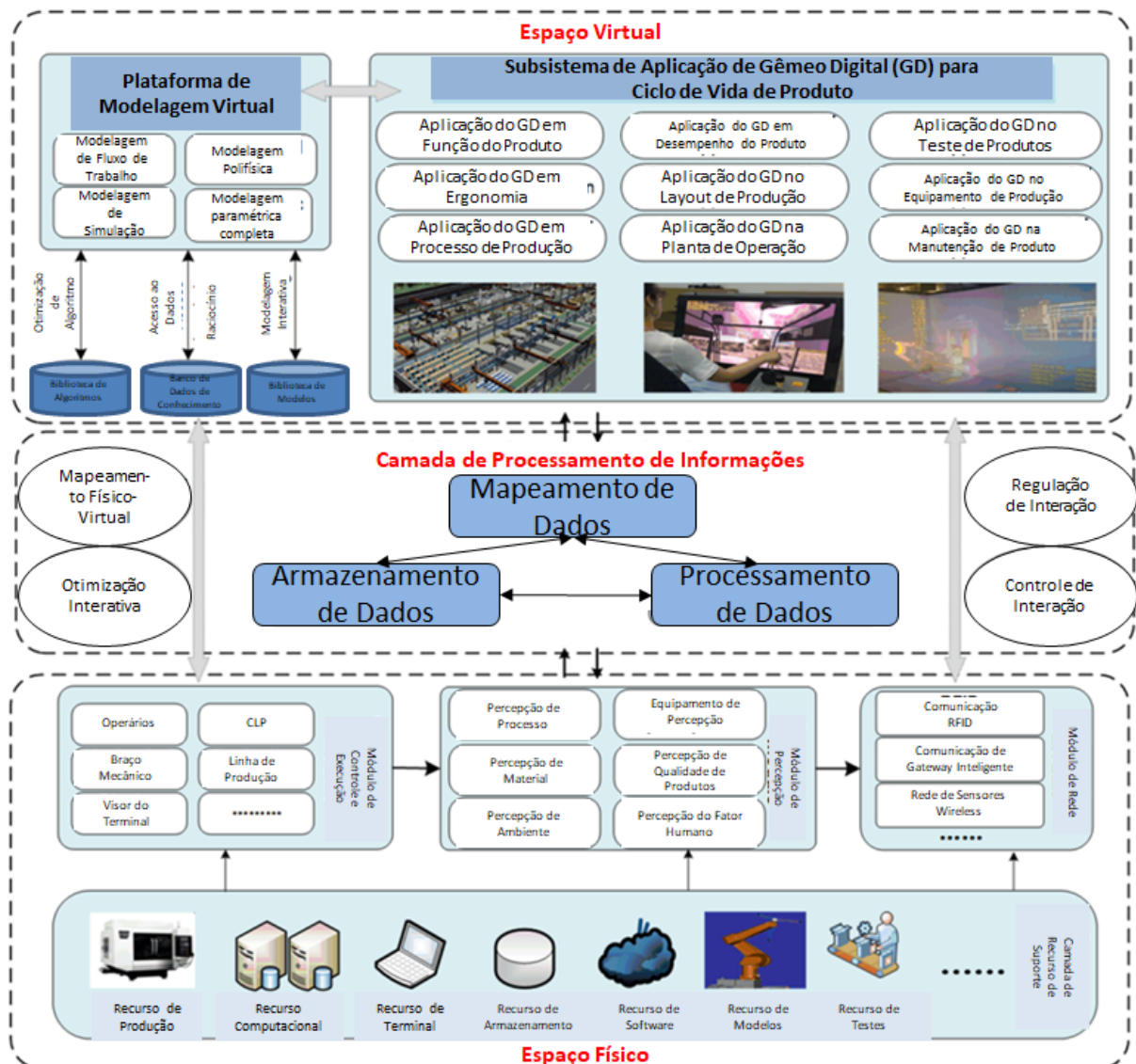


Figura 5 – Gêmeo Digital de ZHENG, YANG, CHENG (Adaptado de [Zheng, Yang e Cheng \(2019\)](#)).

Os autores [Rabelo, Magalhães e Cabral \(2020\)](#) propuseram uma arquitetura ainda preliminar da norma ISO-23247 para Gêmeos Digitais, separando o GD em quatro camadas básicas: usuários do GD (*User*); funcionalidades e serviços do GD (*Digital Twin Platform*); coleta de dados e controle do CPS (*DC&DC - Data Collection & Device Control*); e entidades de chão-de-fábrica (PM - *Physical Manufacturing*). A arquitetura proposta pelos autores é representada na Figura 6.

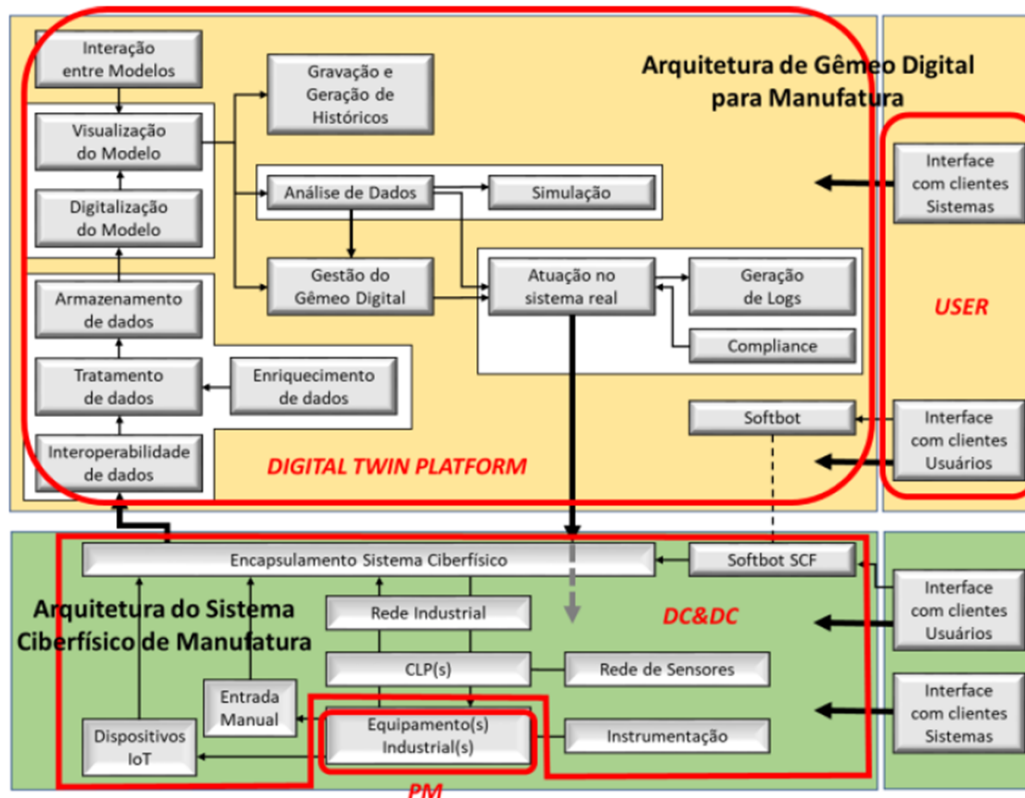


Figura 6 – Gêmeo Digital de Rabelo, Magalhães, Cabral (Adaptado de Rabelo, Magalhães e Cabral (2020)).

Do lado do Sistema Ciber-Físico, o mesmo possui um encapsulamento responsável pela comunicação entre o CPS e o ambiente externo, transformando o CPS em um provedor de serviços (funcionalidades). Ele também é responsável por centralizar, por meio de interfaces apropriadas, a interação com usuários finais e com outros sistemas-clientes.

Em um CPS podem haver diversos tipos de equipamentos, dispositivos industriais e instrumentação, tendo diferentes tipos de protocolos e redes.

A arquitetura proposta de GD possui os seguintes módulos:

- Interoperabilidade de dados: capacidade de lidar com diferentes tipos de protocolos, formatos, significados dos dados recebidos sem tratamento do CPS;
- Tratamento de dados: adaptação dos dados em função do que o GD espera receber;
- Enriquecimento de dados: adição de dados extras ao CPS, como por exemplo, o layout da fábrica;
- Armazenamento de dados: responsável por armazenar os dados necessários para o GD, com seu devido formato e tipo de repositório digital;
- Digitalização do modelo: cria o modelo digital do GD para sua posterior visualização;

- Interação entre modelos: responsável por adicionar dados de outros CPS com o objetivo de representar de forma mais fidedigna o CPS em questão;
- Visualização: trata da visualização gráfica do GD;
- Gravação e geração de históricos: grava a visualização gráfica, alguns cenários-referência ou situações de problemas, com uma respectiva geração de históricos;
- Análise de Dados: responsável pelos diagnósticos e análises descritivas, preditivas e prescritivas de possíveis problemas em questão ou previstos de ocorrerem mantendo o estado atual do CPS;
- Simulação: simulação para apoiar análises preditivas e prescritivas de cenários de tomadas de decisão;
- Gestão do Gêmeo Digital: responsável por apoiar os gestores do CPS, monitorando variáveis críticas, gerando *dashboards*, mensagens e estatísticas, e determinando atuações físicas no CPS;
- Atuação no sistema real: age no CPS para alterar seu estado em função de tomadas de decisão no GD por meio de mensagens, que podem conter dados e/ou comandos;
- *Compliance*: garante que somente as atuações previstas serão executadas em situações previstas, respeitando protocolos previstos, e por pessoas autorizadas;
- Geração de *logs*: é o registro das ações do GD sobre o CPS, para fins de auditoria, controles, etc;
- *Softbot*: responde perguntas ou envia informações sobre o GD (qualquer um dos módulos) ao usuário, como também executa ações agendadas ou autonomamente. Pode se comunicar com o *Softbot* implantado no CPS.

2.3 Redes Neurais Artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA) estão se mostrando como uma ferramenta útil para aplicações em sistemas de distribuição de água, como podemos observar nos trabalhos de [Lourencetti \(2011\)](#), no qual utiliza o simulador hidráulico EPANET para treinar a RNA com o propósito de prever consequências de diferentes estratégias operacionais, níveis finais d'água nos reservatórios, consumo energético de bombas, pressões nos nós e vazões de acordo com as condições de estado do sistema e caracterizadas por níveis iniciais de água nos reservatórios e consumos médios para cada hora.

Alguns autores apresentam soluções desenvolvidas para o controle das condições operacionais de sistemas de abastecimento de água, dentre eles, [Abe \(2014\)](#) que utiliza a

RNA treinada para calibrar modelo hidráulico no EPANET com dados obtidos a partir de sistemas reais.

O autor [Barros Filho \(2016\)](#) utilizou RNAs para controle inteligente de pressão de sistemas de distribuição de água abastecidos por bombas associados em paralelo e acionadas por inversores de frequência.

A RNAs podem ser utilizados no desenvolvimento de Gêmeos Digitais, como é possível se observar nos trabalhos desenvolvidos por [Lermer e Reich \(2019\)](#), [Zhu et al. \(2021\)](#) e [Zhang et al. \(2020\)](#).

As Redes Neurais Artificiais são baseadas em neurônios artificiais, simulando o funcionamento de um cérebro humano. O neurônio artificial apresentado na Figura 7 é uma representação gráfica baseada em um neurônio real, em que os dendritos do neurônio real representam as entradas do neurônio artificial.

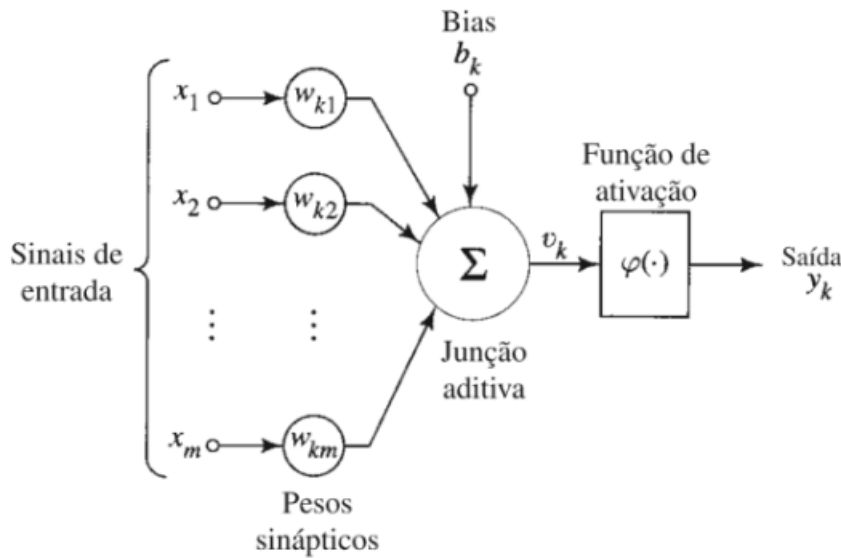


Figura 7 – Modelo não-linear de um neurônio ([HAYKIN, 2000](#)).

O corpo do neurônio artificial realiza a soma ponderada das entradas pelos seus pesos sinápticos, no qual sua saída passa por uma função de ativação, que define a saída do neurônio em termos de atividade do mesmo, a qual é apresentada na Equação 2.1.

$$y_k = f\left(\sum_{j=1}^m w_{kj}x_j + b_k\right); \quad (2.1)$$

sendo x_1, x_2, \dots, x_m os sinais de entradas; $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ são os pesos sinápticos do neurônio k ; b_k é o *bias* que tem o efeito de aumentar ou diminuir o valor da entrada líquida da função de ativação; f é a função de ativação, que restringe a amplitude do valor de saída do neurônio em um intervalo finito; e y_k é a saída do neurônio ([HAYKIN, 2000](#)).

Apenas um neurônio artificial não possui nada de surpreendente, porém quando distribuídos em camadas e seus pesos sinápticos ajustados de forma automática, o conjunto resulta em um sistema inteligente capaz de resolver diversos tipos de problemas (CASA, 2021; LOURENCETTI, 2011).

Segundo Lourencetti (2011), dentre as principais funções de ativação, as mais comuns são:

- Função linear: uma reta no plano cartesiano e não altera o valor de saída do neurônio;
- Função sigmoidal (ou logística): varia o valor entre 0 a 1 e possui o formato de S;
- Função tangente hiperbólica: varia o valor entre -1 a 1 e possui o formato de S.

Além dessas funções de ativação citadas, também tem a função de ativação ReLU ou unidade linear retificada (do inglês, *rectified linear unit*), no qual apresenta um comportamento de não alterar o valor da saída do neurônio para valores positivos e zero para valores negativos.

As Redes Neurais Artificiais são utilizadas para resolução de problemas não lineares com grande número de variáveis e que demandam de uma análise mais complexa. Ela destina-se a pensar como os seres humanos, aprendendo com as experiências, ou seja, os modelos desenvolvidos com RNAs simulam comportamentos a partir de dados do sistema nele inseridos, e podendo inclusive estimar valores para qual não foi treinada com um certo grau de precisão (SILVA, 2021; COUTINHO; TIBA; MELO, 2018).

A RNA pode ser considerada um sistema computacional paralelo composto por várias unidades de processamento simples, que estão conectados entre si e servem para calcular determinadas funções matemáticas. Como algumas das vantagens que as RNAs possuem, tem-se a tolerância a falhas e ruídos, o paralelismo massivo que as tornam muito eficientes, realizam o mapeamento da relação não-linear entrada/saída. Ela também pode tratar de problemas relacionados à classificação de padrões, aproximação de função, predição (séries temporais) e controle (SANTOS, 2021).

Geralmente a RNA pode ser composta por 3 camadas conforme representado na Figura 8, nas quais, a primeira consiste na camada de entrada, que recebe as informações do meio externo considerando as variáveis de interesse, a segunda camada é denominada de camada oculta, e é composta por neurônios responsáveis por extrair características do sistema a ser inferido, e por último a camada de saída, também composta por neurônios e responsável por apresentar os resultados finais, geralmente utilizando uma codificação específica (SANTOS, 2021).

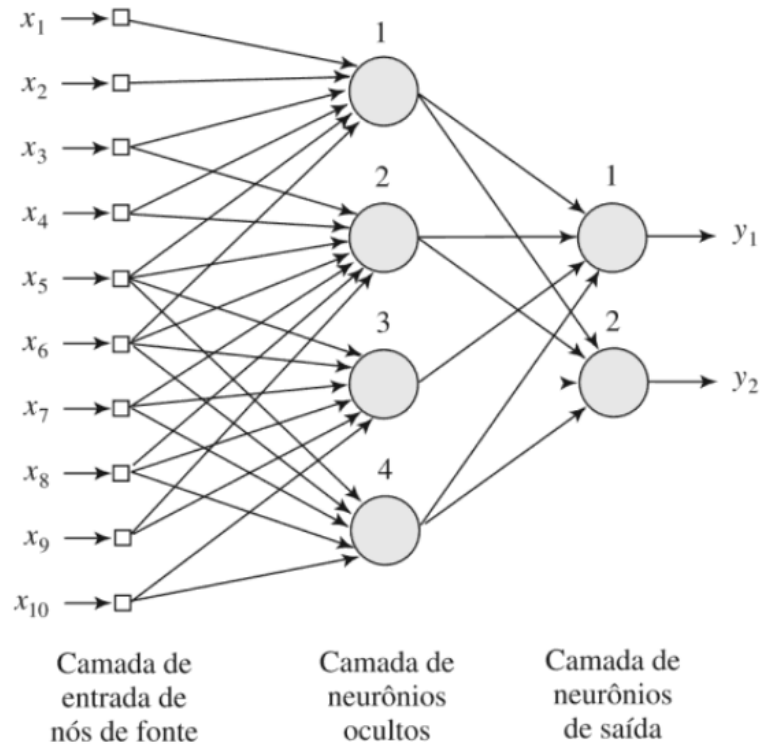


Figura 8 – Rede Neural Artificial com uma camada oculta (HAYKIN, 2000).

Dos diversos algoritmos de aprendizagem existentes, eles podem ser divididos em duas categorias, a da aprendizagem supervisionada, no qual a rede neural aprende a partir de um conjunto de dados contendo entradas e saídas do sistema, ajustando os pesos e os *bias* para que erro da saída real do sistema e da saída da rede neural seja o menor possível, e da aprendizagem não-supervisionada, cujo o objetivo é a busca de estruturas intrínsecas aos dados, sem nenhum conhecimento externo (HALLA II, 2021; PORTO FILHO, 2017).

As redes neurais artificiais possuem sua arquitetura de acordo com a disposição dos neurônios e das suas camadas. A arquitetura da rede neural *feedforward* possui a saída de uma camada sendo a entrada da outra camada, ou seja, as informações são passadas de forma sequencial, já a arquitetura das redes neurais recorrentes possuem conexões em laços ou *loops*, nas quais há retroalimentação com qualquer nó da rede, como pode ser visualizado na Figura 9 (COSTA, 2021; RANZAN, 2021).

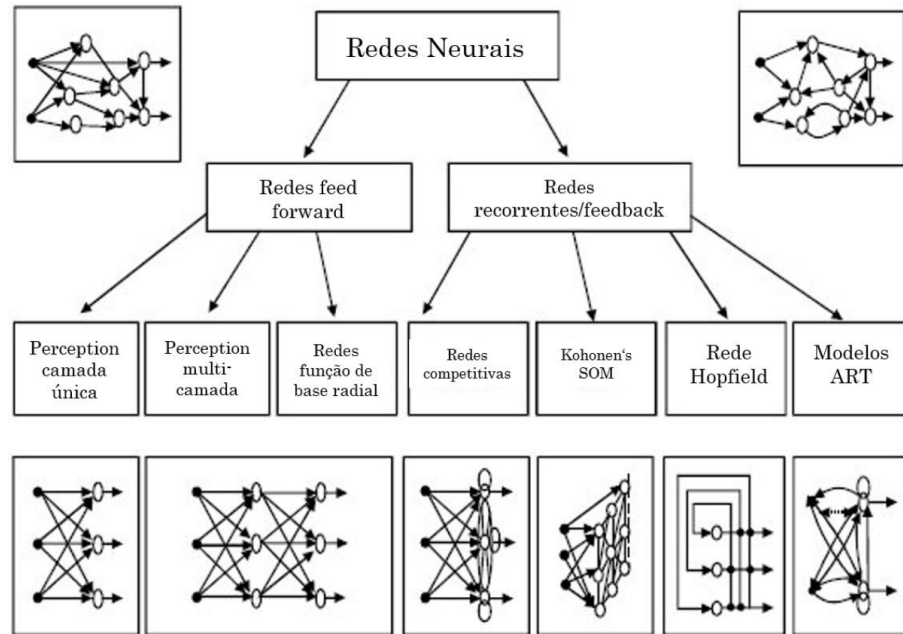


Figura 9 – Arquitetura de Redes Neurais Artificiais (RANZAN, 2021).

O algoritmo de treinamento *BackPropagation* é um algoritmo que busca minimizar o erro encontrado da saída da RNA com a saída esperada, onde o erro é retroalimentado, iniciando da última camada e seguindo recursivamente até a primeira, no qual os pesos e a *bias* são atualizados. A magnitude com que esses parâmetros são alterados a cada interação é normalmente conhecido como taxa de aprendizagem (COSTA, 2021; SANTOS, 2021; RANZAN, 2021).

O perceptron é considerado o antecessor e base das redes neurais modernas, uma unidade básica, e que quando é estruturada em múltiplas camadas forma a rede Perceptron Multicamadas (PMC). Ela é composta por uma 1 camada de entrada e uma camada de saída, podendo haver diversas camadas intermediárias. É uma rede *feedforward* e é uma das redes mais utilizadas com o algoritmo de treinamento *BackPropagation* (AGUIAR, 2010; COSTA, 2021; SILVA, 2021).

Pode-se ter também PMC recorrentes (Figura 10), tidas como um caso particular das redes realimentadas, sendo mais poderosas, porém mais complexas, tanto na análise dos resultados quanto na sua utilização (FURTADO, 2019).

Ela realiza o mapeamento entre entradas e saídas de processos que podem ser tanto não-lineares quanto variantes no tempo, tornando-se uma ferramenta bem flexível para aplicações envolvendo identificação de sistemas (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016).

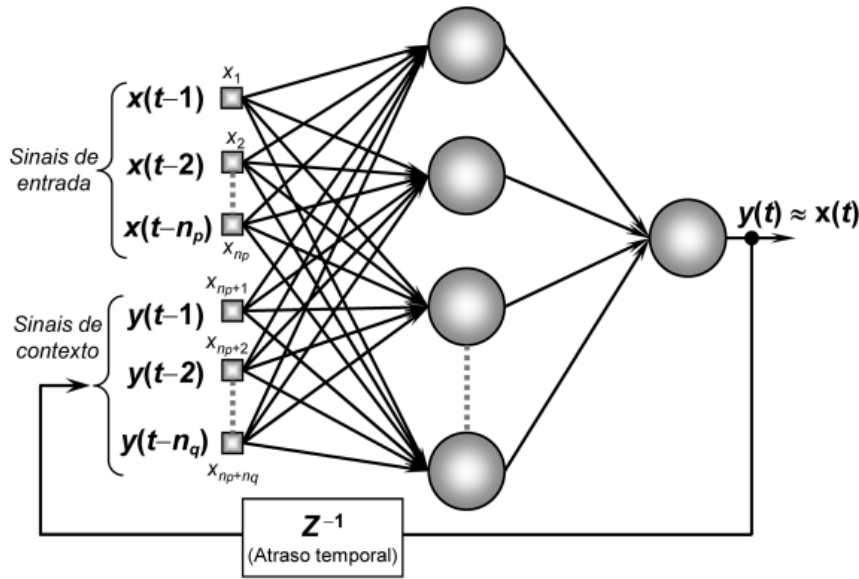


Figura 10 – Topologia de PMC recorrente (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2016).

Foram desenvolvidos diversos tipos de otimizadores a fim de melhorar o desempenho das RNAs, fornecendo ações corretivas dentro das camadas ocultas para diminuir o erro entre os resultados obtidos da rede e o desejado. Jayawardana e Bandaranayake (2021) fez uma comparação entre diferentes tipos de otimizadores, como o Adam, Adadelta, RMSProp, SGD e suas variações, para sistemas de navegação GPS (Sistema de Posicionamento Global - *Global Positioning System*) e de controle de malha fechada, buscando qual tinha o melhor desempenho para cada situação, constatando que o otimizador Adam apresentou o melhor resultado para as RNAs voltadas para sistemas de navegação, enquanto o RMSProp mostrou-se mais adequado para as RNAs dos sistemas de controle de malha fechada.

Os autores Arunsuriyasak, Boonme e Phasukkit (2019) fizeram um estudo comparativo de otimizadores voltados para detecções de vazamentos em tubulação, no qual utilizou os otimizadores Adam, Adadelta e RMSProp. O otimizador Adam obteve o melhor resultado para o modelo de previsão, apresentado uma precisão acima dos 97% para as tubulações com e sem vazamentos, em segundo lugar ficou o Adadelta com uma precisão de 76,755% para tubulações com vazamentos e 70,448% para tubulações sem vazamento, e por último, ficou o RMSProp, com precisão de 72,965% e 66,849% para tubulações com e sem vazamento, respectivamente.

2.4 Trabalhos Relacionados

Bonilla et al. (2022) propõem um algoritmo de estimação de estado (SE – *state estimation*) usando Rede Neural Convolutiva de Gráfico Temporal (T-GCNs – *temporal graph convolutional neural networks*) que permite inferir as velocidades reais de operação da bomba na rede com base nas medições de pressão e vazão disponíveis dos sensores

instalados no sistema de distribuição de água (WDS, do inglês *water distribution system*). As velocidades relativas são então injetadas em um modelo hidráulico construído utilizando o EPANET 2.2, permitindo a estimativa de pressão e vazão para toda a rede de água. Foram utilizados dados de monitoramento de duas redes de água para desenvolver e avaliar o algoritmo: a rede Patios-Villa del Rosario na Colômbia e a rede C-Town. Os resultados obtidos por meio das métricas de avaliação podem ser interpretados de forma muito favorável e refletem uma alta precisão preditiva e prognóstica, no qual o modelo desenvolvido tem a utilidade prática de contribuir para a criação e aplicação de gêmeos digitais em WDS, tornando-se uma ferramenta valiosa para detecção de anomalias em WDSs.

Já os autores [Calcut et al. \(2021\)](#) fizeram um levantamento sobre definições, conceitos e aplicações existentes em torno da implementação e uso eficiente de Gêmeos Digitais em sistemas de infraestrutura civil (CISs, do inglês *civil infrastructure systems*). Em relação a sistemas de distribuição de água, o Gêmeo Digital pode ser implementado em todos os tipos de infraestrutura de água, contanto que os dados fornecidos das medições e calibração sejam precisos para que reflita o desempenho do ativo. Como exemplo de um GD aplicado em um sistema de distribuição de água real, ele cita o da cidade de Valência na Espanha, que abastece cerca de 1,6 milhão de habitantes, no qual o GD permite fazer agendamentos para manutenção da rede, suporte a decisão e ao treinamento de operadores, além de aprofundar o conhecimento sobre a rede.

[Pedersen et al. \(2021\)](#) propõem a implementação de um Gêmeo Digital na empresa de serviços públicos VCS da Dinamarca, no qual busca implementar recursos especializados como o controle de qualidade de dados para cada sensor, otimização das instalações de novos sensores a partir do cruzamento de dados dos sensores de uma determinada região e controle dos dados de sensores de nível e vazão, diagnóstico de erro contínuo, desenvolver os melhores modelos para o planejamento e design e converter processos desconhecidos em conhecidos, enriquecer detalhes ao modelo, permitindo assim um melhoramento nos acionamento de alarmes.

[Alzamora et al. \(2021\)](#) tratam sobre a aplicação de GD em dois casos. O primeiro é da Global Omnium que opera um GD na Área Metropolitana de Valência localizada na Espanha, no qual realiza a identificação de padrão e previsão de demandas e detecção de anomalias. Possui 600 sensores conectados ao modelo real com 95% de precisão em relação a vazão e 98% para pressão. Consegue fazer simulação do passado, presente e futuro com todas as condições de operação, dá suporte sobre o melhor tempo para manutenção e outras operações, detecção de anomalias, suporte para treinamentos. O segundo é na cidade de Eindhoven, na Holanda, no qual fez uma implementação de um GD da sua rede de distribuição de água, que utiliza dados obtidos por meio de telefones celulares para entender a dinâmica da população, junto com informações do clima, espaço utilizado

e informações sobre a população, e possui simulações para três tipos de eventos, que são a semana regular, semanas quentes e períodos de férias. O GD conseguiu modelar efeitos de vazamentos e registro de válvulas incorretos, permitindo identificar áreas que apresentassem pressões baixas.

Curl et al. (2019) apresentam uma implementação a ser feita na cidade de San Diego nos Estados Unidos da América, a partir do programa *Pure Water San Diego* até o ano de 2035, no qual fornecerá um terço da água. O GD busca realizar o comissionamento e operações a longo prazo como uma plataforma de treinamento de operadores, quando as bombas devem iniciar e parar e como devem ajustar a velocidade em relação a outras operações do processo e instrumentação on-line, e em relação a qualidade da água, simulando a química da água para toda a instalação.

A Revisão Bibliográfica permitiu um embasamento para o desenvolvimento da pesquisa, conhecendo melhor o funcionamento de um Sistema de Abastecimento de Água e seus componentes, como o sistema de bombeamento de água e as formas de manter o controle da pressão na tubulação, a Indústria 4.0 e suas tecnologias habilitadoras, como, por exemplo, os Sistemas Ciber-Físicos, que permitem o desenvolvimento de ferramentas como Gêmeo Digital. O conceito e as arquiteturas de Gêmeos Digitais foram apresentadas nesse capítulo, bem como o conhecimento a ser utilizado no desenvolvimento dos modelos digitais do sistema virtual, que são as Redes Neurais Artificiais.

3 Materiais e Métodos

A seguir serão apresentados os materiais empregados e a metodologia adotada para o desenvolvimento do Gêmeo Digital proposto nesta dissertação.

3.1 Planta Hidráulica

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada uma planta hidráulica experimental localizada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) na Universidade Federal da Paraíba, que é composta por duas zonas, destacada em amarelo tem-se a Zona Alta (ZONA A) e em vermelho tem-se a Zona Baixa (ZONA B), conforme pode ser visualizado na Figura 11.

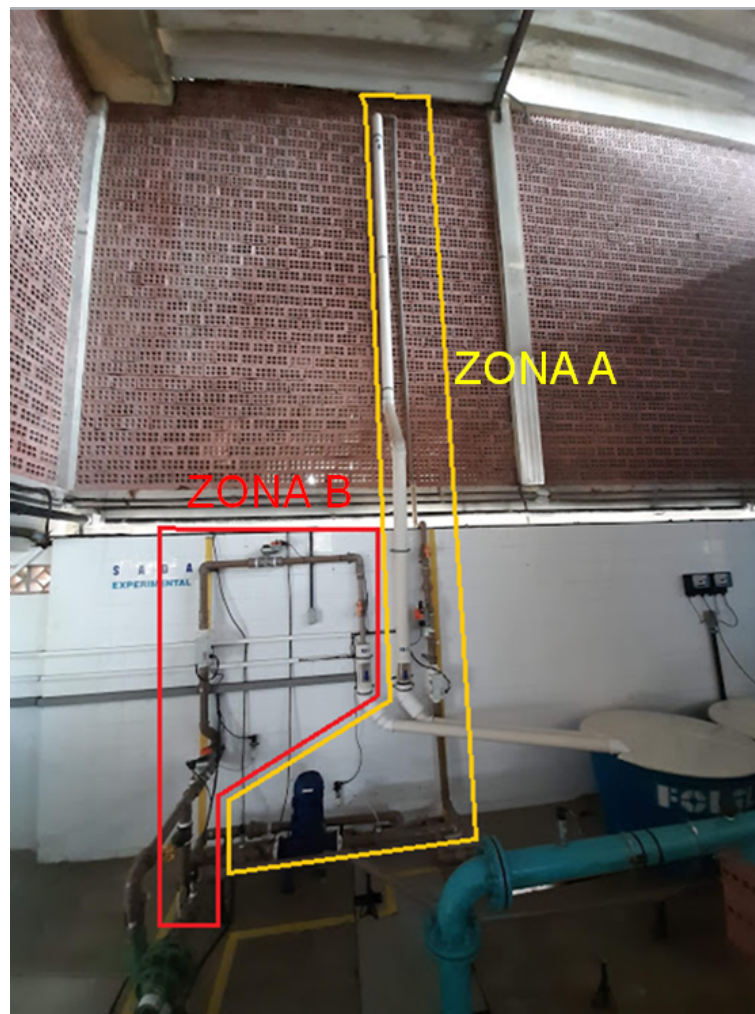


Figura 11 – Bancada Experimental do LEHNS (Autoria Própria).

A planta hidráulica é composta por dois reservatórios de 310 litros interligados entre si. O bombeamento da água no sistema é realizado por meio de um conjunto motor bomba.

A Zona Baixa possui 3 sensores de pressão, PT1, PT2 e PT3, um sensor de vazão, FT1, e duas válvulas proporcionais, CV1 e CV2. A Zona Alta é formada por um *booster*, dois sensores de pressão, PT4 e PT5, um sensor de vazão, FT2, e por uma válvula proporcional, CV3. A disposição de todos os componentes na planta é indicada visualmente com auxílio da Figura 12. Para o controle da velocidade do conjunto motor bomba e do *booster*, a bancada possui dois inversores de frequência, e para a aquisição dos dados dos sensores e para controle dos atuadores, a bancada experimental conta com dois dispositivos de aquisição de dados da *National Instruments*, o NI USB 6229 e o NI USB6221.



Figura 12 – Bancada Experimental do LEHNS (Autoria Própria).

As especificações dos principais componentes do sistema são apresentadas a seguir:

- **Válvulas Proporcionais:** são da marca [Belimo \(2019\)](#), modelo ARB24-SR, conforme pode ser visto Figura 13. A alimentação da válvula é de 24 Vcc, com faixa de operação entre 2 a 10 V e possui um ângulo de rotação de motor de 90°, na qual demora 90 segundos para sair de totalmente aberta para totalmente fechada.



Figura 13 – Válvula Proporcional, Modelo ARB24-SR ([BELIMO, 2019](#)).

- **Sensor de Pressão:** o sensor de pressão utilizado pela planta hidráulica é o TP-18, da fabricante ACROS, conforme mostrado na Figura 14. Possui uma alimentação de 24 Vcc, uma leitura de pressão entre 0-100 mBAR até 0-1600 BAR e um sinal de saída de 0 a 10 Vcc.



Figura 14 – Sensor de pressão TP-18 ([ACROS, 2007](#)).

- **Sensor de Vazão:** o sensor de vazão é o VMS038BU22040, da fabricante [Incontrol \(2014\)](#), apresentado com auxílio da Figura 15. Possui um diâmetro nominal de 38 mm, com alimentação do sensor em 24 Vcc. Sua leitura de vazão varia entre 0,1 a 10 m/s e sua saída em corrente variando de 4 a 20 mA.



Figura 15 – Sensor de vazão VMS038BU22040 (Autoria Própria).

- **Conjunto Motor Bomba:** o motor é da fabricante WEG, com potência 3 CV, tensão de alimentação de 220/380 V e rotação de 3450 rpm.

O modelo da bomba é BC-21 R 1 1/2" 3CVMANC60HZ, da fabricante Schneider, com rotação de 3450 rpm, vazão mínima de 17,5 m³/s e máxima de 41,5 m³/h, altura mínima de 2 mca e máxima de 23 mca. O conjunto motor bomba pode ser visto na Figura 16.



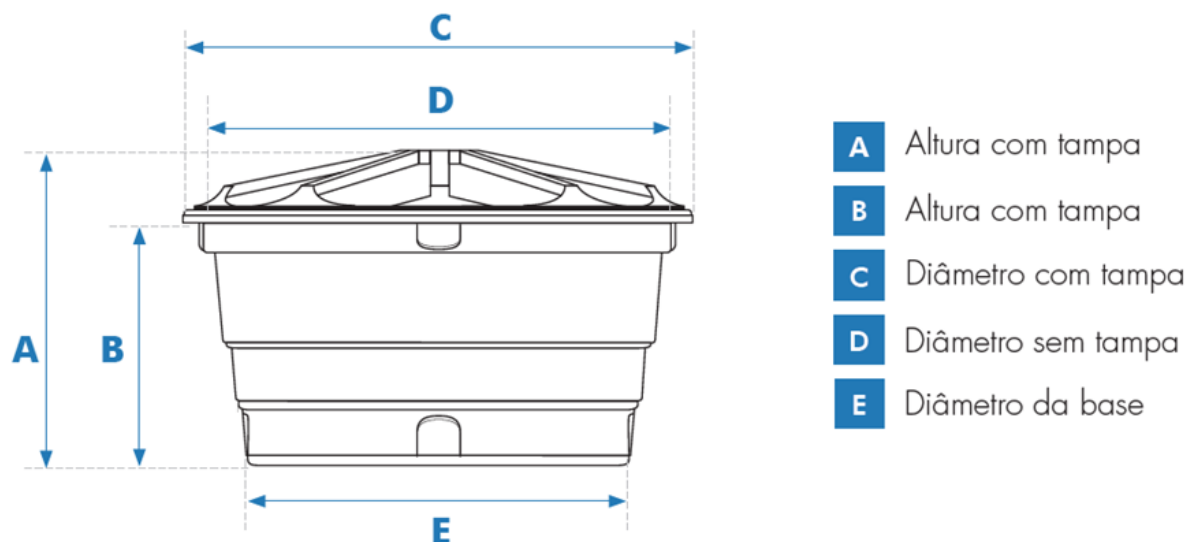
Figura 16 – Conjunto Motobomba (Autoria Própria).

- **Booster:** o modelo usado é o MEGALINE 40-160, da fabricante [KSB \(2015\)](#), apresentado na Figura 17. Possui uma potência de 1,5 CV com frequência de 60 Hz, rotação de até 1720 rpm.



Figura 17 – Booster (Autoria Própria).

- **Reservatório:** os reservatórios instalados são da fabricante [Fortlev \(2019\)](#), possuindo cerca de 310 litros e especificações são apresentadas a seguir com auxílio da Figura 18.

Figura 18 – Dimensões da caixa d'água ([FORTLEV, 2019](#)).

Sendo: $A = 0,69\text{m}$; $B = 0,54\text{m}$; $C = 1,05\text{m}$; $D = 1,04\text{m}$; $E = 0,75\text{m}$.

- *Dispositivo para controle e aquisição de dados:* os dispositivos utilizados para o controle e aquisição de dados são da fabricante *National Instruments*. O dispositivo USB-6229 apresentado na Figura 19 possui 4 saídas analógicas e 32 entradas ana-

lógicas. Já o dispositivo USB-6221 possui 2 saídas analógicas, 24 E/S digitais e 16 entradas analógicas (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022a; NATIONAL INSTRUMENTS, 2022b).



Figura 19 – Dispositivo USB-6229 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022a).

- **Inversores de frequência:** os inversores de frequência utilizados para controle da velocidade do conjunto motor bomba e do booster são da marca WEG, do modelo CFW-08, o qual pode ser visto Figura 20. Possui alimentação trifásica de 380-480 volts e corrente de entrada de 3 a 7,8 ampères e corrente de saída máxima de 6,5 ampères.



Figura 20 – Inversor CFW-08 (WEG, 2009).

3.2 Métodos

O desenvolvimento do Gêmeo Digital foi realizado com o emprego da linguagem de programação Python e foram escolhidos para modelagem os seguintes elementos da planta hidráulica: o conjunto motor bomba, as válvulas CV1, CV2 e a CV3 e os sensores de pressão PT3 e PT5, conforme destacado na Figura 21.

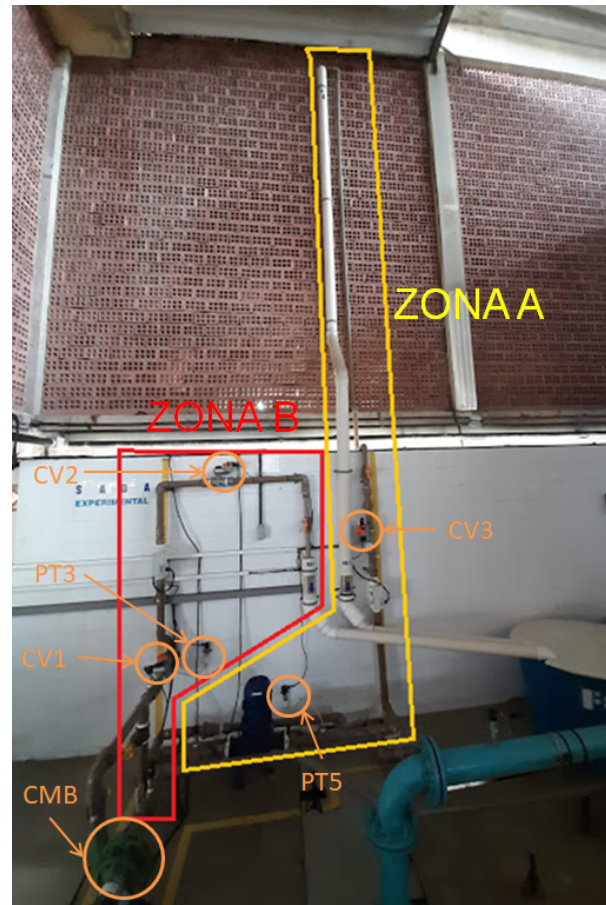


Figura 21 – Elementos da planta hidráulica utilizados no desenvolvimento da pesquisa (Autoria Própria).

3.2.1 Linguagem de Programação

Para desenvolvimento do GD aqui proposto, utilizou-se o Python na versão 3.9. O Python é uma linguagem interpretada, orientada a objetos e de alto nível. Muito atraente para o desenvolvimento rápido de aplicativos, possui sintaxe simples, suportando módulos e pacotes, incentivando a modularidade do programa e o reuso de código (PYTHON, 2022).

3.2.2 Comunicação

Para a comunicação com os dispositivos USB-6221 e USB-6229 foi utilizado um pacote fornecido pela *National Instruments*. Trata-se de uma API (*Application Programming Interface*) que interage com o driver NI-DAQmx (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021), tornando assim, possível o controle e aquisição dos dados do sistema físico, e posteriormente, o registro dos dados em arquivos de texto localmente.

Para a troca de dados com o supervisor, foi utilizado o protocolo de comunicação Modbus, no qual é um protocolo industrial que foi desenvolvido em 1979 tornando possível a comunicação entre dispositivos de automação. Originalmente destinado a transferir dados

sobre uma camada serial, o Modbus já conta com implementações para comunicação serial, TCP/IP e o protocolo de datagrama do usuário (UDP) ([NATIONAL INSTRUMENTS, 2022](#)). Para a implementação da comunicação Modbus TCP/IP ao código foi utilizado o pacote PyModbus, o qual permite a criação facilitada de scripts e/ou integração em soluções já existentes ([PYMODBUS, 2017](#)).

3.2.3 Modelo Digital

Os modelos do sistema de bombeamento de água foram criados utilizando redes neurais artificiais *feedforward* recorrentes e não recorrentes, tendo como entrada a frequência do conjunto motobomba (F_{CMB}), os ângulos das válvulas CV1, CV2 e CV3 representados por A_{CV1} , A_{CV2} e A_{CV3} respectivamente, e podendo ter a realimentação dos sensores de saída PT3 e PT5 com atrasos nas amostras representados pelo atraso unitário Z^{-1} , e duas saídas, referente aos sensores de pressão PT3 e PT5. A rede possui três camadas ocultas, nas quais serão desenvolvidos modelos digitais variando o número de neurônios de 10 em 10, partindo do primeiro modelo com 10 neurônios por camada oculta até o último modelo com 50 neurônios por camada oculta, totalizando assim, 5 modelos digitais para cada função de ativação. A rede neural da planta hidráulica está representada na Figura 22. Os modelos foram desenvolvidos com dois tipos de função de ativação, que são a sigmoide, que retorna um valor próximo de 0 para valores pequenos e próximo de 1 para valores grandes, e a ReLU (*Unidade linear retificada*), na qual para valores negativos sua saída é 0 e para valores positivos sua saída não é alterada, o que pode ser visualizado Figura 23. O otimizador utilizado na RNA desenvolvida foi o Adam.

Para o desenvolvimento dos modelos digitais foi utilizado o pacote TensorFlow, uma plataforma completa que facilita a criação e a implantação de modelos de *machine learning*, permitindo através da API Keras de alto nível criar e treinar modelos digitais ([TENSORFLOW, 2022](#)).

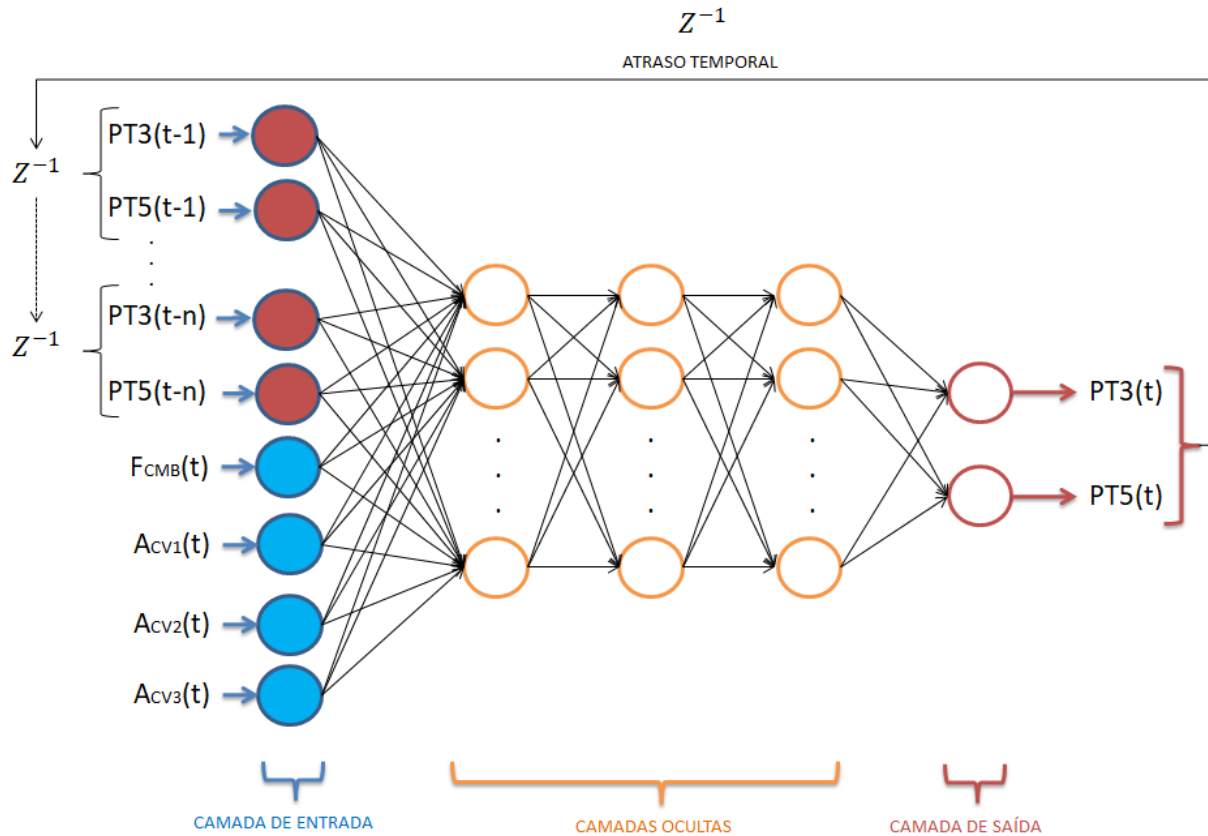


Figura 22 – Rede Neural de Planta Hidráulica (Autoria Própria).

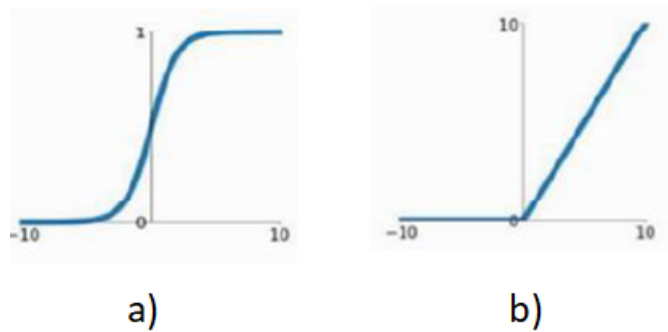


Figura 23 – Funções de ativação: a) sigmóide; b) ReLU (Adaptada de: JAYAWARDANA e BANDARANAYAKE, 2021).

O objetivo dessa metodologia é buscar a configuração que apresente o menor erro quadrático médio (EQM), conforme Equação 3.1. Os dados foram divididos da seguinte forma, para o treinamento das redes neurais foram utilizados os primeiros 70% dos dados, 15% para validação e para testes os 15% restantes. Foram considerados os melhores modelos digitais aqueles que apresentaram o menor EQM durante a fase de validação e teste dentre os modelos digitais propostos.

$$E_M = \frac{\sum_{k=1}^p (y(k) - \hat{y}(k))^2}{p} \quad (3.1)$$

O conjunto de dados para o treinamento, validação e teste do modelo digital possui um total de 13.561 amostras para cada uma das entradas, que são a frequência do conjunto motobomba, os ângulos das válvulas CV1, CV2 e CV3 e as amostras dos sensores PT3 e PT5. Para obtenção dos dados foi utilizado uma rotina que varia a frequência do conjunto motor bomba de 5 em 5 Hz em um intervalo de 30 a 45Hz, e o ângulo da válvula de 15 em 15° em um intervalo de 0 a 45°, explorando diferentes tipos de combinações. Foram observados possíveis erros nas medições, podendo existir valores negativos, sendo os mesmos substituídos pela média das últimas quatro medições.

Após o tratamento dos dados, no qual valores negativos foram substituídos, os dados foram normalizados linearmente considerando para o conjunto motobomba o valor máximo de 60 Hz e mínimo de 0 Hz, para válvula o valor máximo de 90° e mínimo de 0°, e para os sensores de pressão um valor máximo de 20 mca e mínimo de 0 mca, conforme mostrado na Equação 3.2, e após a normalização, aplicou-se uma média móvel em x_n para suavizar os dados, diminuindo assim, o efeito de ruídos que por ventura existam.

$$x_n = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}; \quad (3.2)$$

sendo x_n o valor normalizado, x_i o valor a ser normalizado, x_{min} o valor mínimo das amostras a serem normalizados e x_{max} o valor máximo das amostras do atributo a serem normalizados.

3.2.4 Sombra Digital

O melhor modelo digital obtido será utilizado para fazer simulações em paralelo com o sistema físico. Para a realização das simulações é necessário realizar no ambiente virtual o comportamento de abertura e fechamento das válvulas, que tem como característica o movimento de um grau por segundo, e do acionamento do conjunto motobomba, e posteriormente a normalização das entradas no ambiente virtual (Tratamento I). Para a realização da realimentação dos modelos digitais recorrentes, foi utilizado o resultado obtido da rede neural artificial durante a realização da operação, uma vez que existe a necessidade de poder realizar operações quando não existe comunicação com o sistema físico, e assim avaliando seu comportamento em relação aos dados reais. Após a realização das simulações, o resultado precisa ser desnormalizado (Tratamento II), para assim, ser comparado com os dados do sistema físico, o que está representado graficamente na Figura 24. Como saída, será obtido o erro gerado pela diferença do valor real e o valor gerado do modelo digital, o que permite avaliar seu desempenho.

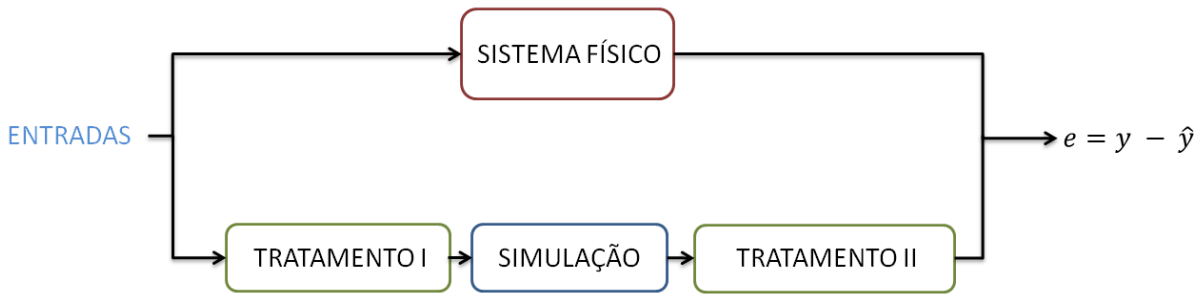


Figura 24 – Sombra Digital da Planta Hidráulica (Autoria Própria).

Uma forma de avaliar o desempenho do modelo digital em relação ao sistema real se dá a partir da utilização do erro percentual absoluto médio (MAPE - *Mean Absolute Percentual Error*), o qual encontra-se apresentado na Equação 3.3, e que permite o entendimento do resultado como uma média do erro entre o valor amostrado e o valor obtido pelo modelo.

$$MAPE(y, \hat{y}) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}}{n} \quad (3.3)$$

Em relação ao EQM, o resultado do MAPE possui menos influência dos *outliers*, que são amostras que costumam se distanciar das demais amostras por possuírem valores atípicos ou fora do padrão. Porém, se o dado real for próximo à zero, pode ocorrer elevação do resultado final, apresentando como resposta um erro percentual um pouco maior.

Na busca de ter o modelo digital mais próximo do sistema físico, e que, com o tempo, devido a qualidade dos componentes, estado dos equipamentos e outros fatores que fazem com que os dados obtidos sofram alterações, diminuindo sua precisão, necessita-se assim, de novas atualizações do modelo digital. A cada medição foi realizada uma avaliação do MAPE para determinar o erro percentual médio absoluto para cada uma das saídas, no qual um erro elevado faz com que o modelo digital seja atualizado, ocorrendo um retreinamento da sua Rede Neural Artificial, podendo ser utilizados os novos dados obtidos durante a realização da medição e os antigos dados, que consistem nos dados utilizados para treinar a RNA, ou apenas os novos dados obtidos.

Como critério após a atualização do modelo digital, foi utilizado o EQM, no qual é feita uma avaliação com 30% dos dados considerados inéditos, separados antes da atualização, no modelo atualizado e no modelo não atualizado, permanecendo o que possuir o menor erro. Foram realizados três experimentos, utilizando o modelo digital com o pior desempenho obtido a partir dos experimentos em paralelo dos modelos digitais com a planta hidráulica. Na Figura 25 pode-se observar o diagrama de fluxo da atualização do modelo digital.

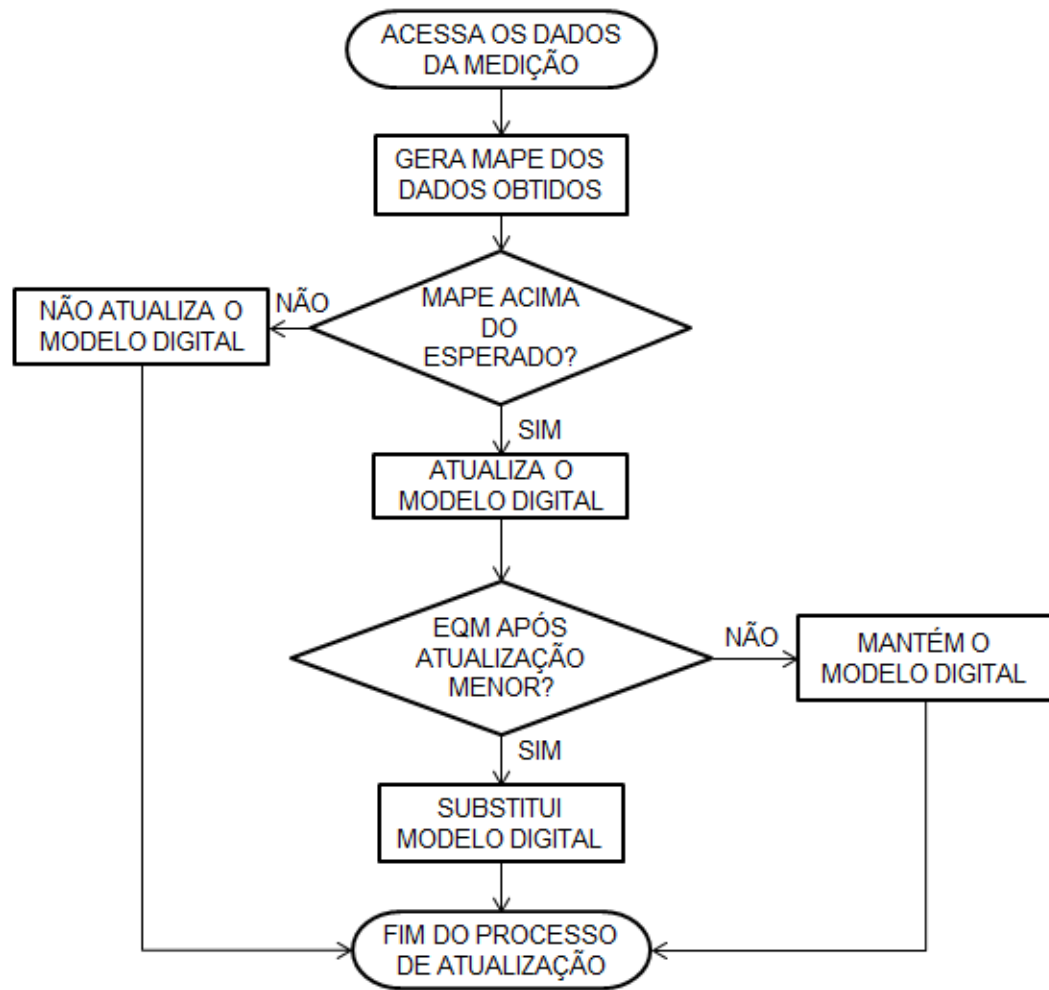


Figura 25 – Digrama de fluxo da atualização do modelo digital (Autoria Própria).

3.2.5 Gêmeo Digital

O Gêmeo Digital desenvolvido dividi-se em três camadas, que são o Espaço do Usuário, Gêmeo Digital e Espaço Físico, como apresentado na Figura 26. A comunicação entre o Espaço do Usuário e o Gêmeo Digital é realizado através do protocolo Modbus TCP/IP, enquanto a comunicação entre o Gêmeo Digital e o Espaço Físico utiliza os dispositivos da *National Instruments* e sua interface de comunicação.

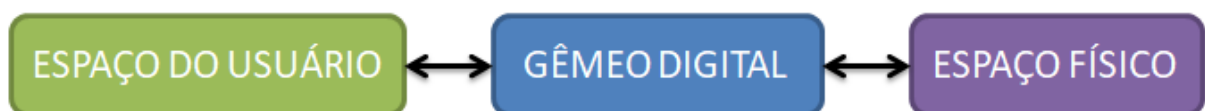


Figura 26 – Gêmeo Digital desenvolvido (Autoria Própria).

O Gêmeo Digital foi desenvolvido baseado nas características citadas por [Schroeder et al. \(2016\)](#), que são:

- Identificação do produto físico e do produto virtual;

- Gerenciamento de dados;
- Modelos digitais;
- Informações geradas ao longo da vida do produto físico;
- Sistema supervisório;
- Comunicação entre os dados e o sistema supervisório.

Na arquitetura proposta foram utilizadas as quatro camadas da arquitetura de [Bevilacqua et al. \(2020\)](#), que são o espaço físico do processo industrial, o sistema de comunicação, o Gêmeo Digital, e por último o espaço do usuário. Estão presentes também na arquitetura módulos apresentados na arquitetura de [Rabelo, Magalhães e Cabral \(2020\)](#).

O Gêmeo Digital desenvolvido está apresentado na Figura 27, no qual o bloco em verde (Região I) representa o sistema supervisório, localizado no Espaço do Usuário, o bloco em amarelo (Região II) é referente ao sistema de comunicação que liga o GD ao Espaço Físico e ao Espaço do Usuário, o bloco em azul (Região III) é referente a construção do Gêmeo Digital, e em roxo (Região IV) representa a planta física e seus dispositivos de controle e monitoramento, ambos pertencentes ao Espaço Físico.

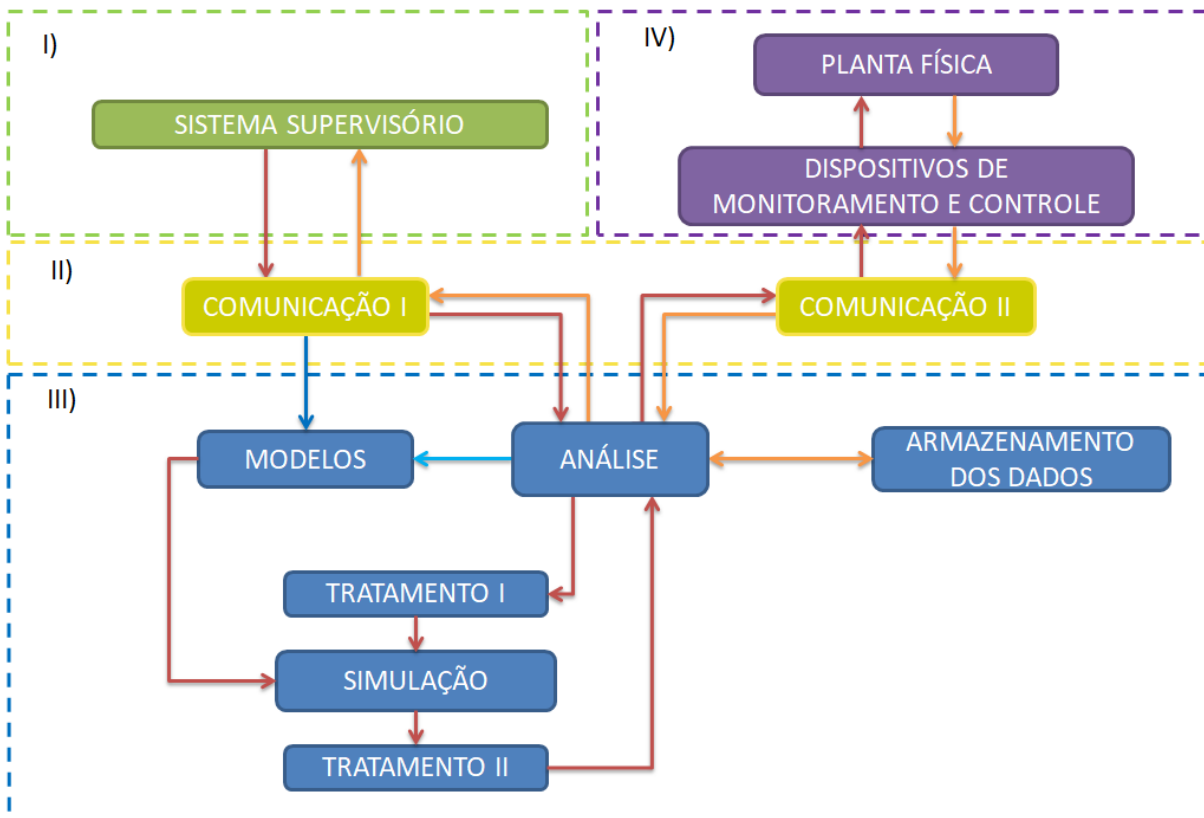


Figura 27 – Arquitetura do Gêmeo Digital desenvolvido (Autoria Própria).

As descrições dos blocos são apresentadas a seguir:

- **Sistema Supervisório:** é o meio mais próximo do usuário, o qual permite realizar o controle da planta real, visualização de dados referentes a planta real e a simulação, alertas e atualizações dos modelos para a simulação com base nos dados armazenados pela planta;
- **Comunicação I:** é referente a comunicação entre o GD e o sistema supervisório, no qual utiliza o protocolo Modbus TCP/IP;
- **Comunicação II:** comunica o GD com os dispositivos de controle utilizando a interface de comunicação da *National Instruments*;
- **Planta Física:** encontram-se os materiais utilizados no sistema de bombeamento hidráulico;
- **Dispositivos de Monitoramento e Controle:** estão localizados os sensores e atuadores da planta hidráulica;
- **Modelos:** é onde está armazenado o modelo digital utilizado para a simulação. Nele é possível fazer atualizações sempre buscando melhores modelos;
- **Tratamento I:** ocorre a simulação do comportamento das entradas dos atuadores e sua normalização para a simulação do modelo digital, haja visto que o modelo é capaz de operar com valores entre 0 e 1;
- **Simulação:** simulação a partir dos dados da entrada;
- **Tratamento II:** desnormalização dos dados da saída da simulação;
- **Análise:** bloco funcional no qual são feitas as análises dos dados, não permitindo que comandos de entrada possam colocar em risco a planta, como entradas de atuadores fora do intervalo permitido, operação que eleve a pressão nas tubulações acima do permitido, e observando se o erro encontrado entre os dados obtidos e o gerado pela simulação estão congruentes, sempre emitindo alertas e atualizando o modelo digital quando necessário;
- **Armazenamento de Dados:** é onde os dados gerados pela planta real e pela simulação estão sendo armazenados.

Na arquitetura, as setas em vermelho são referentes ao caminho de uma operação ocorrida no supervisório até chegar a planta física, passando pelo bloco de Comunicação I, posteriormente pelo bloco de Análise, no qual são feitas as análise da entradas e simulações, passando a operação realizada para a Comunicação II, que envia o valor para os atuadores presentes nos Dispositivos de Monitoramento e Controle, atuando assim na planta física.

As setas em laranja representam o caminho da aquisição dos dados da planta física, passando pelos sensores localizado nos Dispositivos de Monitoramento e Controle e indo para a Comunicação II, que posteriormente passa pelo bloco de Análise, que envia os dados para o Armazenamento dos Dados e para o bloco de Comunicação I, que posteriormente envia os dados para o sistema supervisório.

Por fim, têm-se duas setas em azul, a mais claro partindo do bloco de Análise é referente a atuação na atualização do modelo digital sempre que necessário, enquanto a mais escura, ligando o bloco de Comunicação I até o bloco Modelos, é referente a escolha do modelo digital a ser utilizado ou ao desenvolvimento de novos modelos digitais.

Para o desenvolvimento do sistema supervisório foi utilizado o ScadaBR, um software livre, gratuito e de código-fonte aberto, e que oferece todas as funcionalidades de um sistema SCADA (do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*) tradicional, sendo capaz de monitorar todos os dispositivos e oferecer acesso organizado a seus controles e parâmetros ([SCADABR, 2017](#)).

A comunicação entre o Gêmeo Digital e o supervisório foi realizada por meio do protocolo de comunicação Modbus TCP/IP, no qual o endereço para cada variável utilizada pode ser visualizado no Apêndice [A](#).

4 Resultados e Discussões

Os dados para treinamento, validação e teste foram obtidos a partir de rotinas feitas com a linguagem Python variando o conjunto motobomba (CMB) entre os valores de 0 a 45 Hz e as válvulas CV1, CV2 e CV3 no intervalo de 0 a 45°, obtendo os valores de pressão dos sensores PT3 e PT5 para diferentes tipos de combinações. Um trecho dos dados utilizados para treinamento pode ser visualizado na Figura 28, no qual observa-se em azul os valores da entrada do conjunto motor bomba, em laranja o ângulo da válvula CV1, em verde o ângulo da válvula CV2, em vermelho o ângulo da válvula CV3, e em roxo e marrom as pressões dos sensores PT3 e PT5 respectivamente.

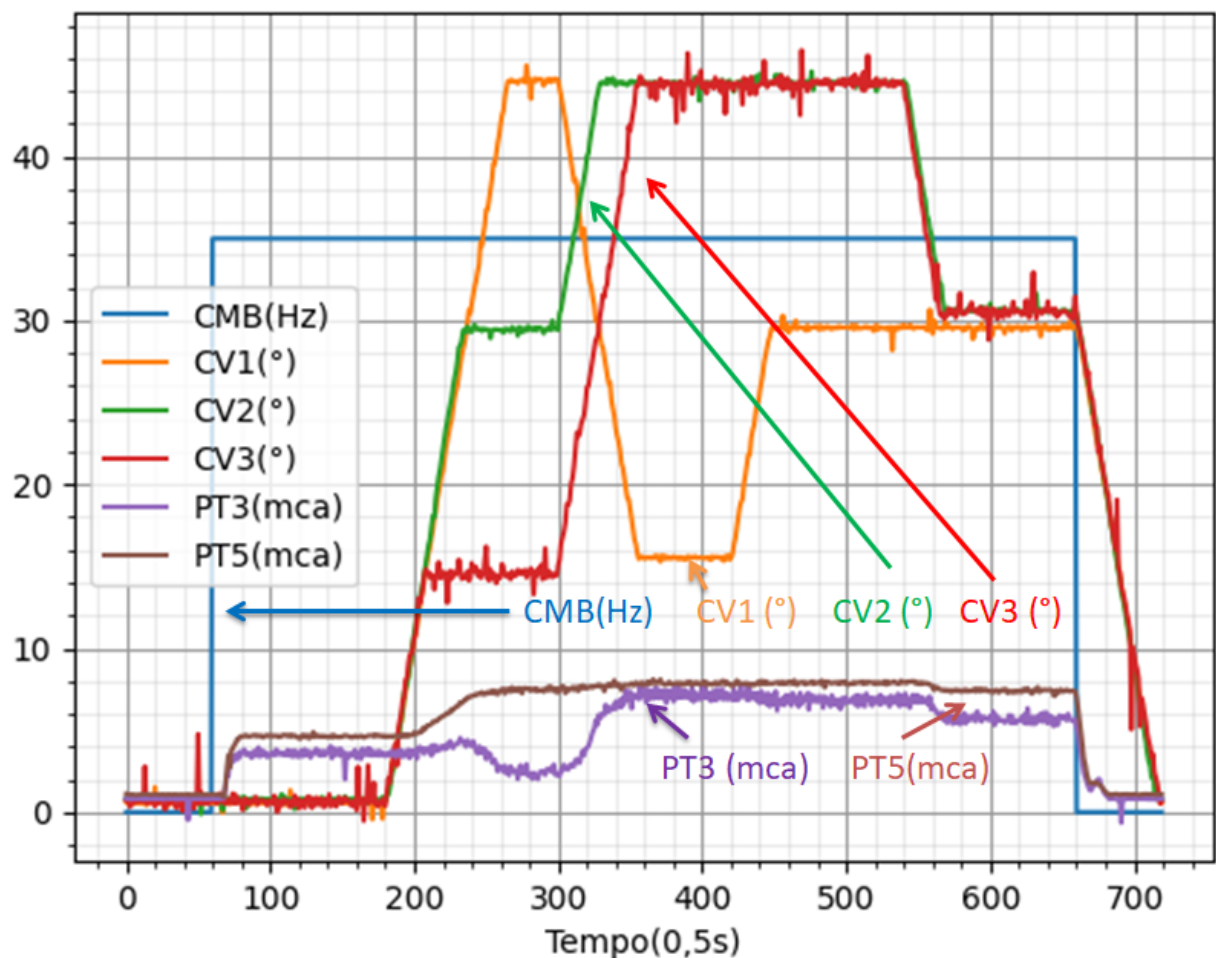


Figura 28 – Dados obtidos para treinamento (Autoria Própria).

Após o tratamento dos dados, no qual foram retirados os valores das amostras negativas, aplicado à normalização dos dados e uma suavização, o resultado pode ser visto na Figura 29.

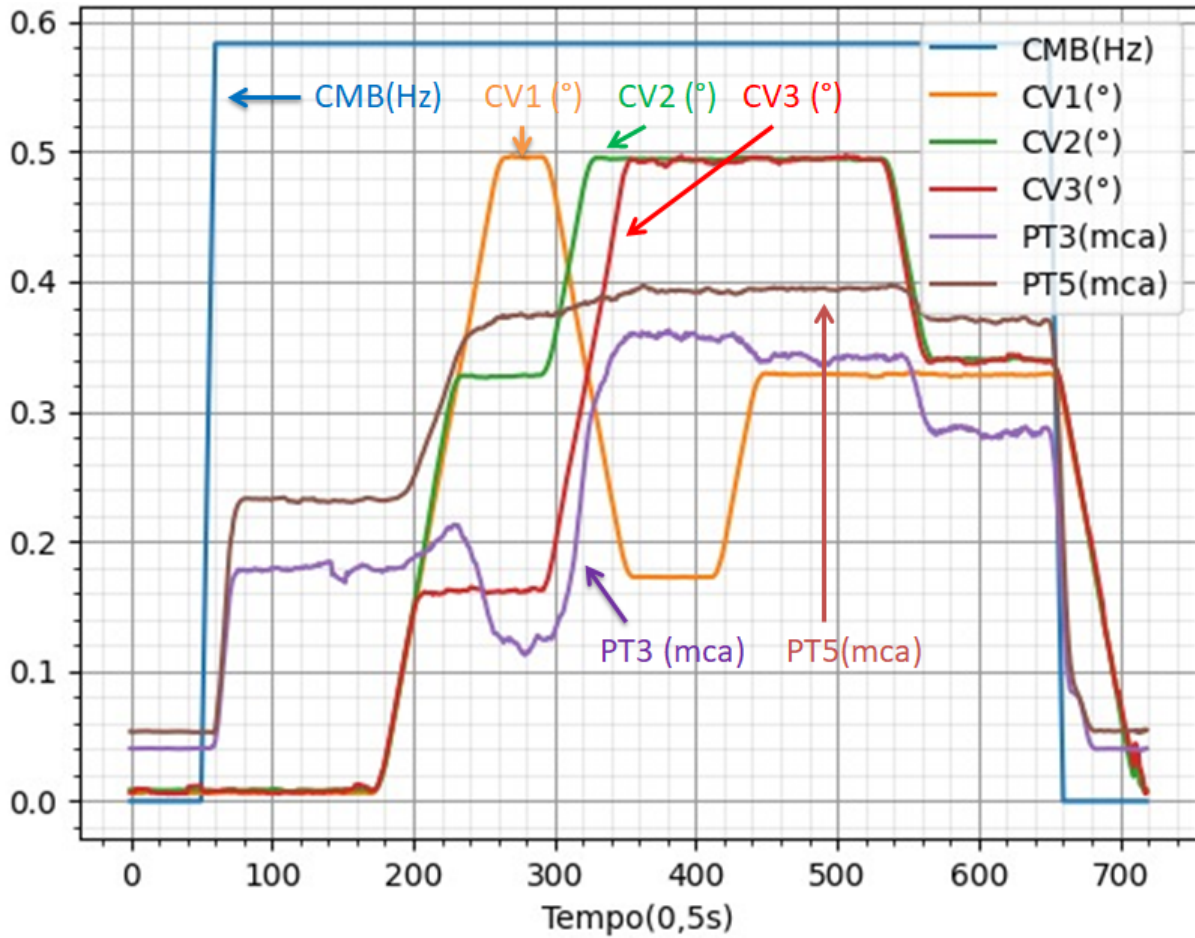


Figura 29 – Dados após tratamento (Autoria Própria).

4.1 Modelo Digital

Foram utilizadas 100 épocas para o treinamento, número visto como suficiente para a convergência do erro de treinamento até a estabilidade, e os dados foram divididos em 70% para o treinamento, 15% para validação e 15% para testes. Como critério de escolha para o melhor modelo de cada função de ativação, adotou-se o erro quadrático médio nas etapas de validação e teste. Foram desenvolvidos modelos digitais sem atraso (MD 0), com um atraso (MD 1), com dois atrasos (MD 2) e três atrasos (MD 3), e seu resultado pode ser visto na Tabela 1, na qual apresentam-se dados como a função de ativação, o número de neurônios nas camadas ocultas e o EQM.

Tabela 1 – Tabela com informações dos modelos digitais.

	Função de Ativação	Neurônios na Camada Oculta	EQM		
			Treinamento	Validação	Teste
MD 0	Sigmoide	50	$4,31 \times 10^{-4}$	$1,54 \times 10^{-4}$	$1,86 \times 10^{-4}$
	ReLU	50	$2,12 \times 10^{-4}$	$1,74 \times 10^{-5}$	$2,48 \times 10^{-5}$
MD 1	Sigmoide	40	$4,72 \times 10^{-6}$	$1,98 \times 10^{-6}$	$2,16 \times 10^{-6}$
	ReLU	30	$3,35 \times 10^{-6}$	$1,31 \times 10^{-6}$	$1,43 \times 10^{-6}$
MD 2	Sigmoide	30	$5,77 \times 10^{-6}$	$3,14 \times 10^{-6}$	$3,53 \times 10^{-6}$
	ReLU	40	$2,84 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-6}$
MD 3	Sigmoide	20	$4,48 \times 10^{-6}$	$1,86 \times 10^{-6}$	$2,08 \times 10^{-6}$
	ReLU	10	$2,96 \times 10^{-6}$	$1,96 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^{-6}$

Em relação aos modelos digitais obtidos sem atraso (MD 0), o modelo digital com a função de ativação ReLU com 50 neurônios nas suas camadas ocultas obteve um erro de treinamento, validação e teste menor do que o encontrado no melhor modelo digital com a função de ativação sigmoide, que também possui 50 neurônios nas suas camadas ocultas. O erro quadrático médio encontrado na função de ativação ReLU foram 50,81%, 88,7% e 86,66%, para o treinamento, validação e teste respectivamente, menores do que os erros encontrados com a função de ativação sigmoide.

O modelo digital MD 1, que possui um atraso na sua realimentação, possui os melhores modelos digitais com 40 neurônios em suas camadas ocultas para a função de ativação sigmoide, e de 30 neurônios nas camadas ocultas para a função de ativação ReLU. O modelo digital com os menores erros no treinamento, validação e teste, foi obtido com a função ReLU, apresentando um resultado de 29%, 33,8% e 33,8%, respectivamente, menor do que os obtidos com a função de ativação sigmoide.

O MD 2, o modelo digital que possui dois atrasos, teve o melhor modelo digital com a função sigmoide com 30 neurônios em suas camadas ocultas. Já o modelo digital com a função de ativação ReLU teve seu melhor modelo com 40 neurônios nas suas camadas ocultas, tendo um resultado no erro de treinamento 50,8% menor do que o com a função de ativação sigmoide. Em relação aos erros de validação e testes, o modelo com a função de ativação ReLU obteve um erro 52,2% e 45,9%, respectivamente, menor do que a com função de ativação sigmoide.

O modelo digital com três atrasos (MD 3) teve seus melhores modelos digitais com 20 neurônios por camada oculta para função sigmoide, enquanto na função ReLU, ficou com 10 neurônios por camada oculta. O modelo com menor erro de treinamento foi o com a função de ativação ReLU, sendo ele 33,9% menor do que o modelo com função de ativação sigmoide. Porém, o modelo com função de ativação sigmoide obteve um erro 5,1% menor na validação e 6,7% menor nos testes do que o modelo com função de ativação ReLU.

Os melhores modelos digitais obtidos com a função de ativação ReLU foram os MD 0, MD 1 e MD 2, enquanto o modelo MD 3 obteve seu melhor modelo com a função sigmoide. O modelo com menor erro de treinamento foi o modelo MD 2, porém obteve o segundo melhor resultado para validação e teste, sendo ele de 14,5% e 33,6%, respectivamente, maior do que o modelo MD 1, modelo que obteve o menor EQM nessas duas avaliações.

A seguir são apresentadas as figuras que representam o EQM de treinamento e validação para o melhor modelo digital obtido para cada atraso, no qual a Figura 30 é referente ao modelo digital MD 0, a Figura 31 ao modelo digital MD 1, a Figura 32 ao modelo digital MD 2, e por último a Figura 33 referente ao modelo digital MD 3.

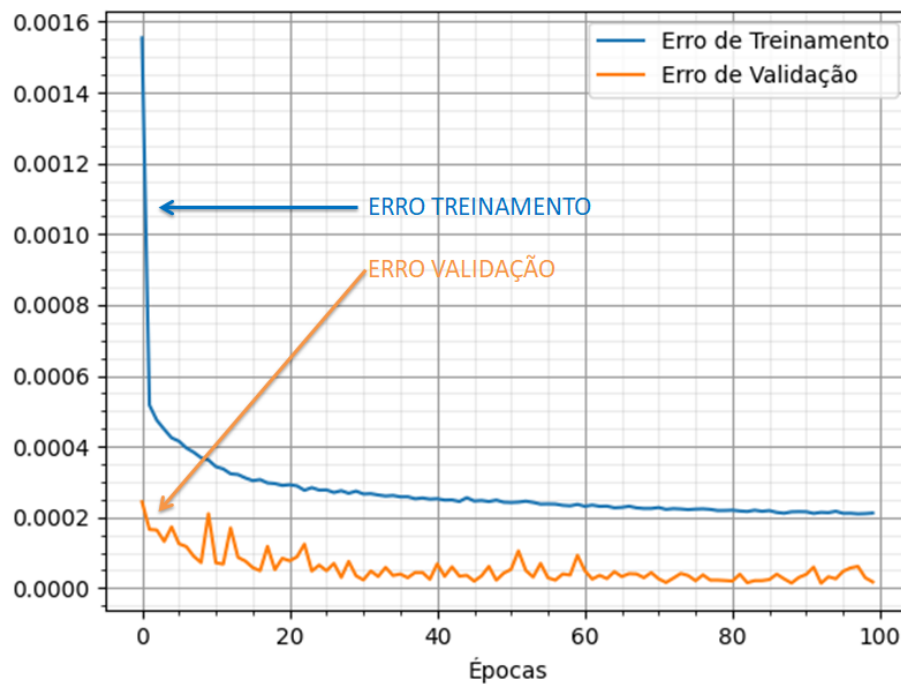


Figura 30 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 0 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).

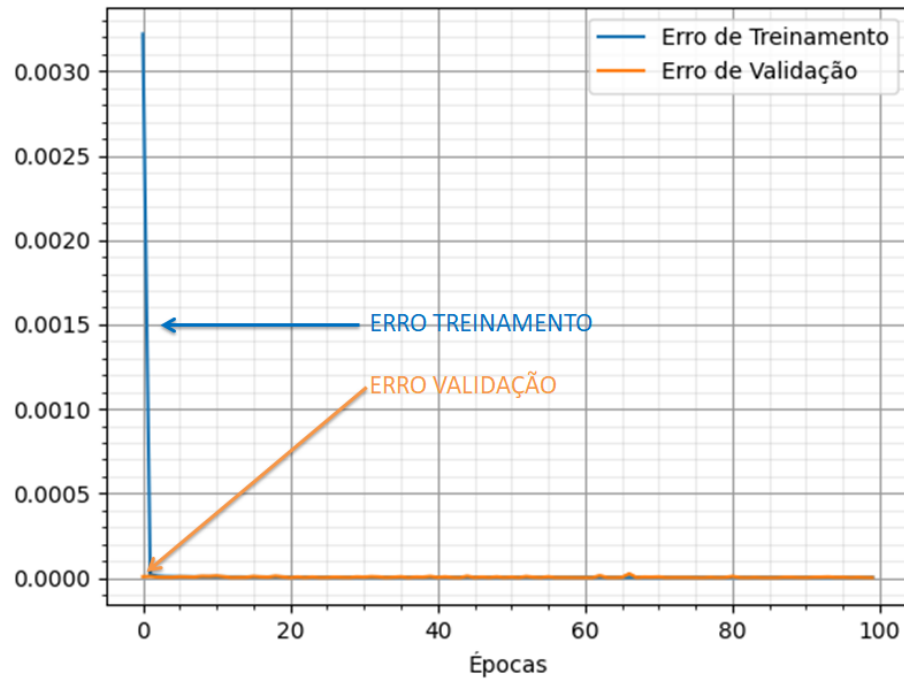


Figura 31 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 1 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).

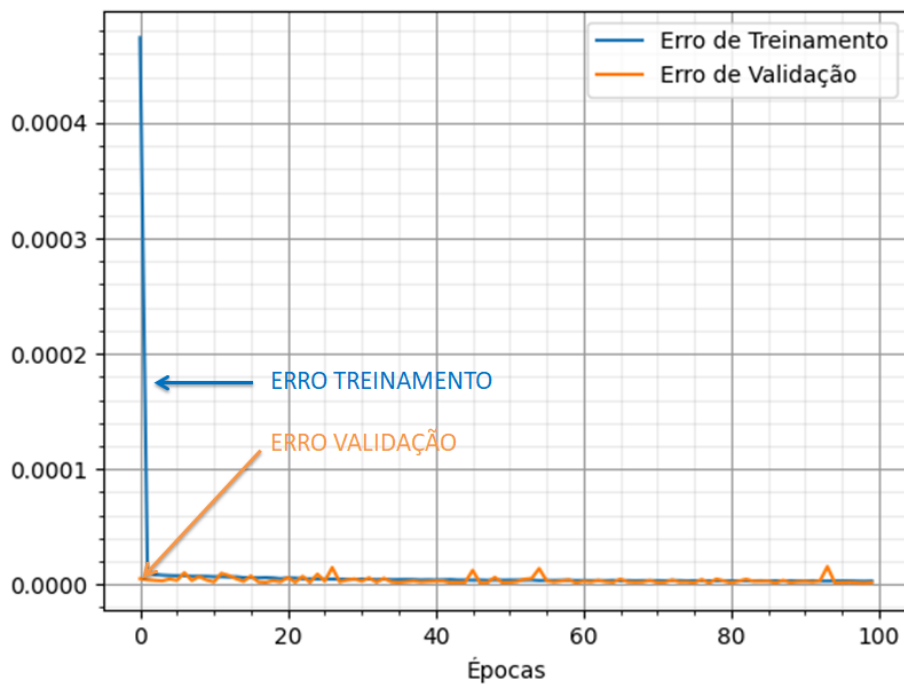


Figura 32 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 2 com a função de ativação ReLU (Autoria Própria).

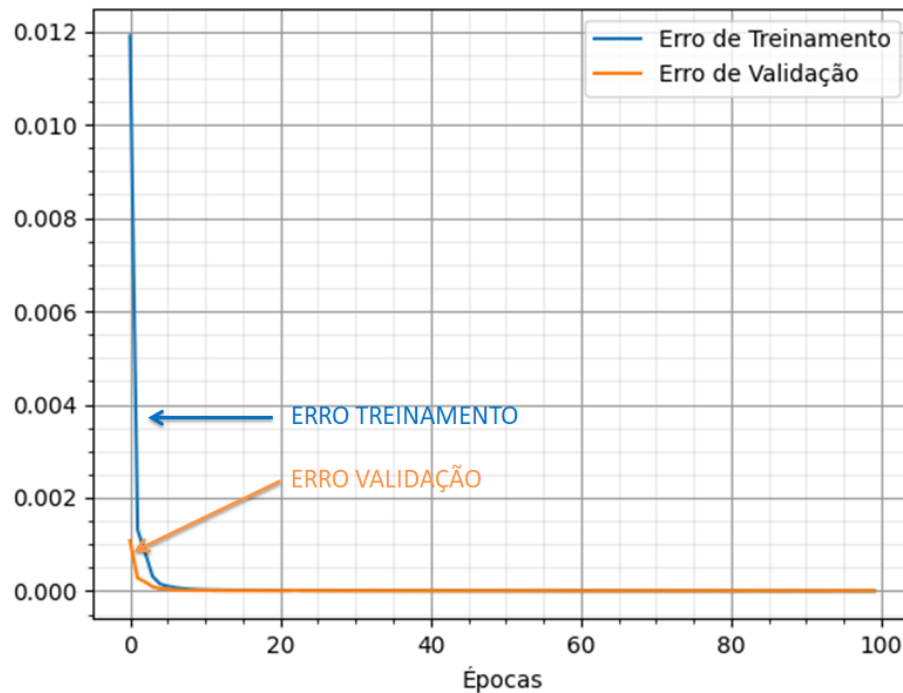


Figura 33 – EQM de treinamento e validação do modelo digital MD 3 com a função de ativação sigmoide (Autoria Própria).

4.2 Sombra Digital

Na Sombra Digital foram realizados dois tipos de experimentos diferentes, o primeiro com o melhor modelo digital para cada atraso em paralelo com o sistema físico, e o segundo, utilizando o modelo digital com o pior desempenho entre os modelos digitais obtido na primeira parte dos experimentos, realizando sua atualização com novos e antigos dados ou somente com os novos dados.

Empiricamente foi visto que o tempo de oito minutos era um tempo ótimo para a obtenção dos dados, tendo em cada experimento um valor aproximado de 1.110 amostras, sendo cerca de 840 amostras em regime permanente.

4.2.1 Experimentos com o melhor modelo digital para cada atraso

Foram realizados três experimentos utilizando o melhor modelo digital para cada atraso e foi obtido o MAPE para os dados de cada experimento, bem como o MAPE em regime permanente (MAPE RP).

4.2.1.1 Experimento 1

O primeiro experimento realizado utilizou o CMB em 40 Hz, a válvula CV1 em 15°, a válvula CV2 em 45° e a válvula CV3 em 30°, no qual permaneceu por oito minutos antes de ser desligado. A seguir pode-se observar graficamente nas Figuras 34, 35, 36 e 37 os dados obtidos para cada modelo digital.

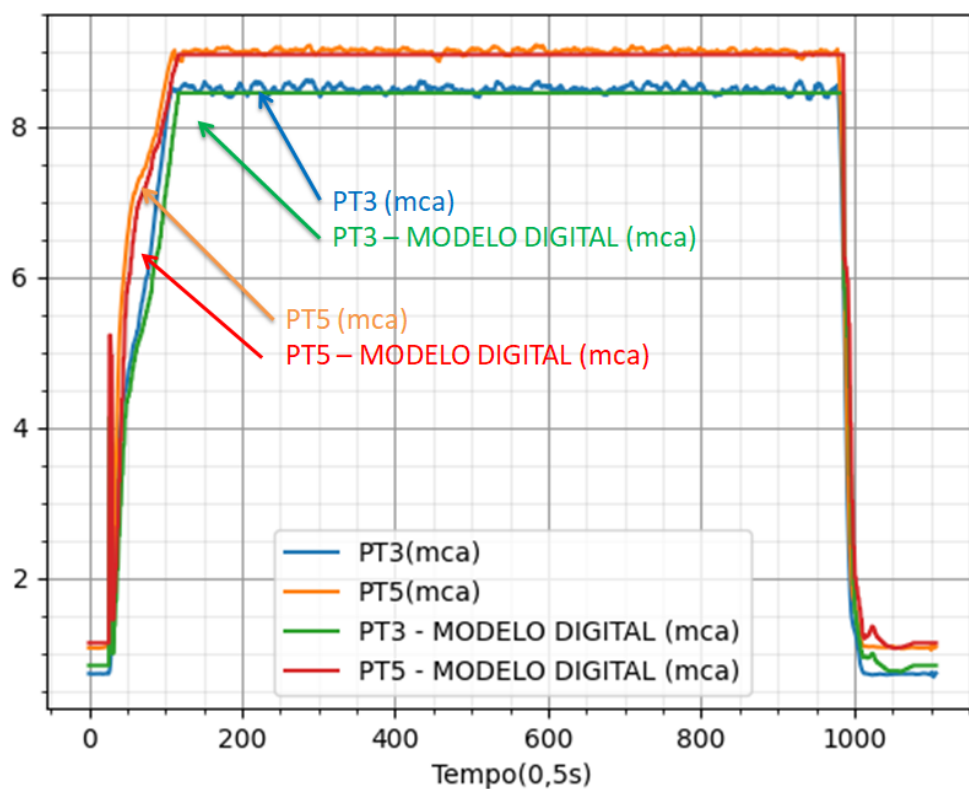


Figura 34 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 0 (Autoria Própria).

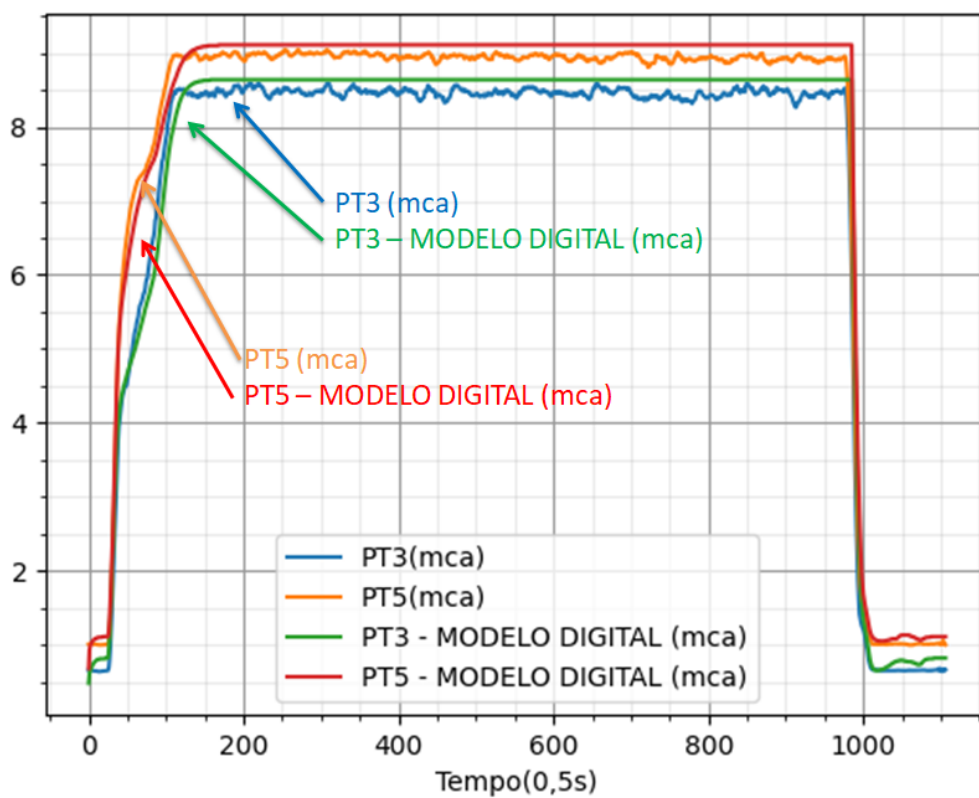


Figura 35 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 1 (Autoria Própria).

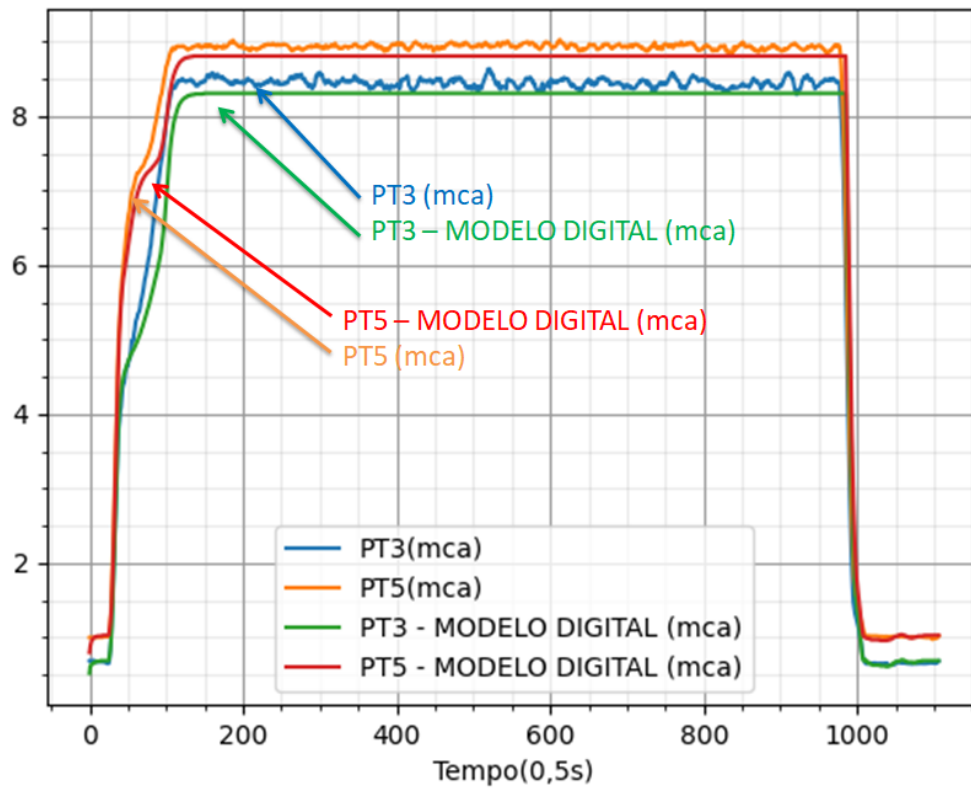


Figura 36 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 2 (Autoria Própria).

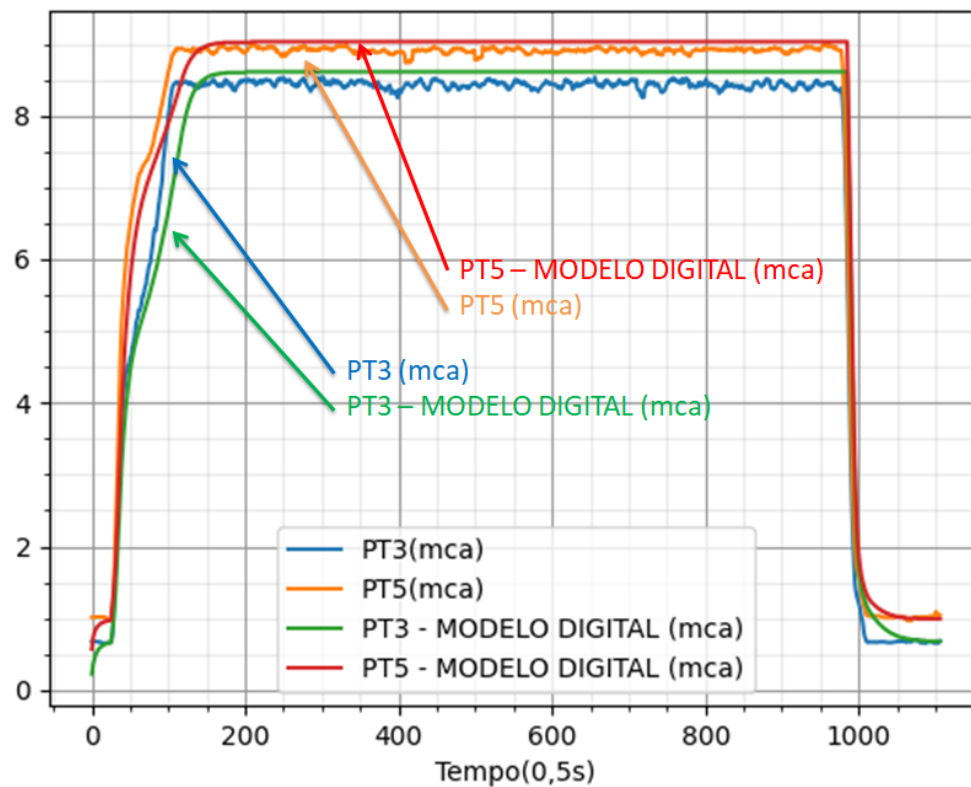


Figura 37 – Dados obtidos do experimento 1 do MD 3 (Autoria Própria).

Os resultados do MAPE e do MAPE RP para cada modelo digital podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela com informações do experimento 1 do Sombra Digital.

	MAPE (%)		MAPE RP (%)	
	PT3	PT5	PT3	PT5
MD 0	5,53	3,99	0,69	0,57
MD 1	4,97	3,37	2,08	1,79
MD 2	3,13	2,53	1,68	1,43
MD 3	5,94	3,57	2,04	1,31

O modelo digital que obteve o menor erro percentual em relação ao MAPE foi o modelo MD 2, porém o modelo digital que obteve o melhor MAPE RP foi o modelo MD 0, no qual obteve um erro percentual absoluto médio em regime permanente de 58,9% e 60,1%, para o PT3 e PT5 respectivamente, menor do que o encontrado no modelo MD 2. Em relação ao elevado valor encontrado no MAPE para o MD 0 quando comparado com o MAPE RP, isto está relacionado ao erro elevado encontrado fora do regime permanente, quando o sistema está desligado e as amostras estão próximas de zero, problema já mencionado em relação ao MAPE.

Os modelos digitais que obtiveram os piores desempenhos em relação ao MAPE foram o MD 3 para o PT3 e o MD 0 para o PT5, sendo eles 89,7% e 57,7%, respectivamente, maiores do que o valor encontrado no MD 2. Em relação ao MAPE RP, o modelo digital que obteve o pior desempenho foi o MD 1, sendo ele 201,4% e 214%, para o PT3 e PT5 respectivamente, maior do que o resultado encontrado no MD 0.

4.2.1.2 Experimento 2

O segundo experimento utilizou o CMB em 35 Hz, a válvula CV1 em 30°, a válvula CV2 em 45° e a válvula CV3 em 15°, também permanecendo em funcionamento por oito minutos antes de ser desligado. A seguir, com auxílio das Figuras 38, 39, 40 e 41 podem ser visualizados os dados obtidos para cada modelo digital.

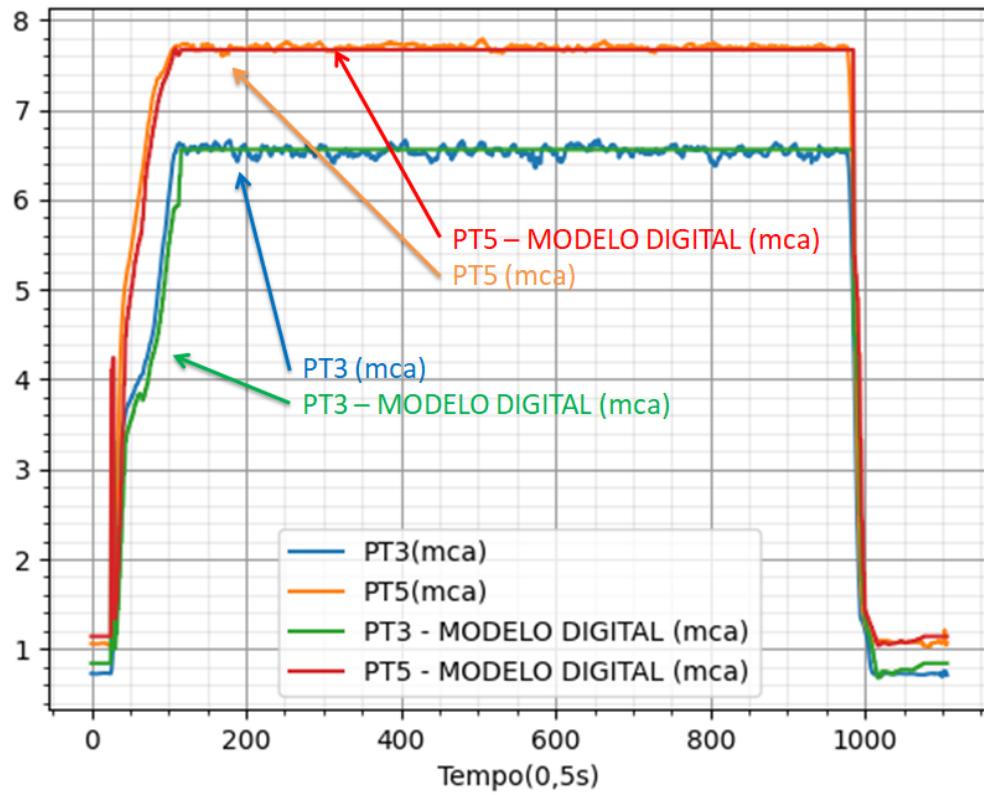


Figura 38 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 0 (Autoria Própria).

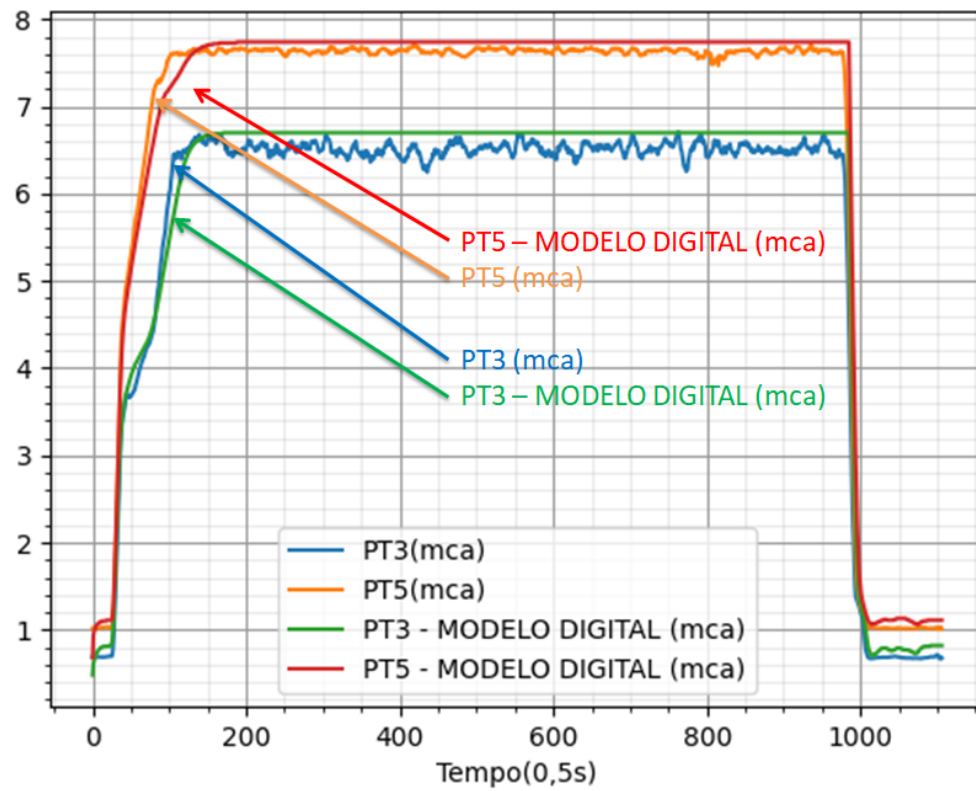


Figura 39 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 1 (Autoria Própria).

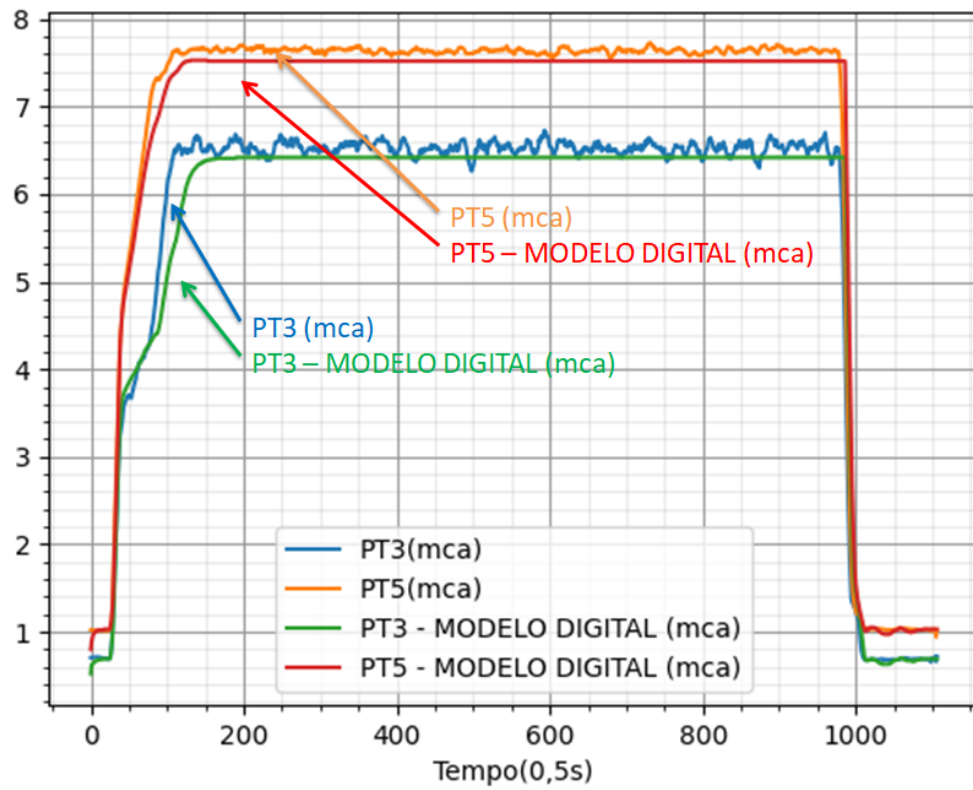


Figura 40 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 2 (Autoria Própria).

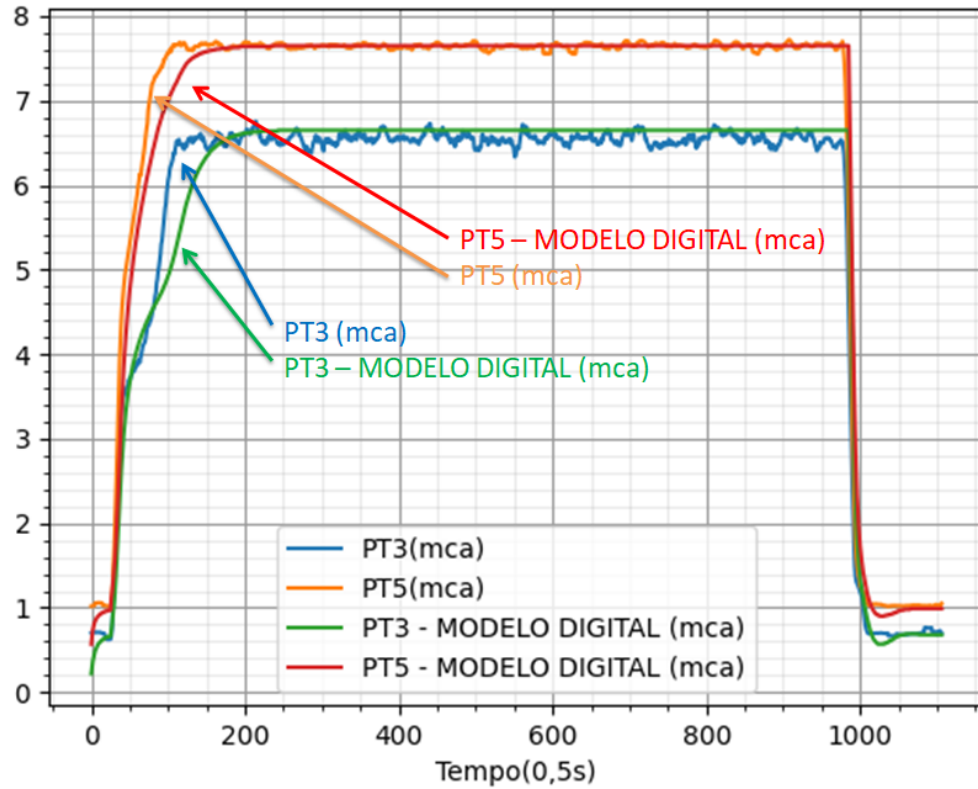


Figura 41 – Dados obtidos do experimento 2 do MD 3 (Autoria Própria).

Os resultados do MAPE e do MAPE RP para cada modelo digital são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tabela com informações do experimento 2 do Sombra Digital.

	MAPE (%)		MAPE RP (%)	
	PT3	PT5	PT3	PT5
MD 0	4,62	3,37	0,69	0,44
MD 1	5,11	3,13	2,78	1,33
MD 2	3,47	2,7	1,8	1,58
MD 3	4,29	2,99	1,67	0,34

O modelo digital que obteve o menor MAPE no experimento foi o MD 2, tendo um resultado 32,1% menor do que o pior MAPE em relação ao PT3, que encontra-se no modelo MD1, e 24,8% em relação ao pior MAPE do PT5, que encontra-se no modelo MD 0.

Em relação ao MAPE RP, o modelo MD 0 obteve o menor erro em relação ao PT3, porém, em relação ao PT5, o modelo MD3 obteve o menor erro, sendo 22,7% menor do que o encontrado no modelo MD 0.

Em relação aos modelos digitais que obtiveram os piores desempenhos no MAPE foram o MD 1 para o PT3 e o MD 0 para o PT5, sendo eles 47,26% e 24,8%, respectivamente, maiores do que o valor encontrado no MD 2. Em relação ao MAPE RP, o modelo digital que obteve o pior desempenho para o PT3 foi o MD 1, sendo ele 302,9% maior do que o resultado encontrado no MD 0, porém, em relação ao PT5, o pior resultado foi encontrado no modelo MD 2, sendo ele 364,7% maior do que o encontrado no modelo MD 3.

4.2.1.3 Experimento 3

Durante o experimento três, foram utilizados em 30 Hz o CMB, em 30° a válvula CV1, a válvula CV2 em 45° e a válvula CV3 em 15°, ficando em funcionamento por oito minutos antes de ser desligado. Os dados obtidos para cada modelo digital podem ser visualizados graficamente nas Figuras [42](#), [43](#), [44](#) e [45](#).

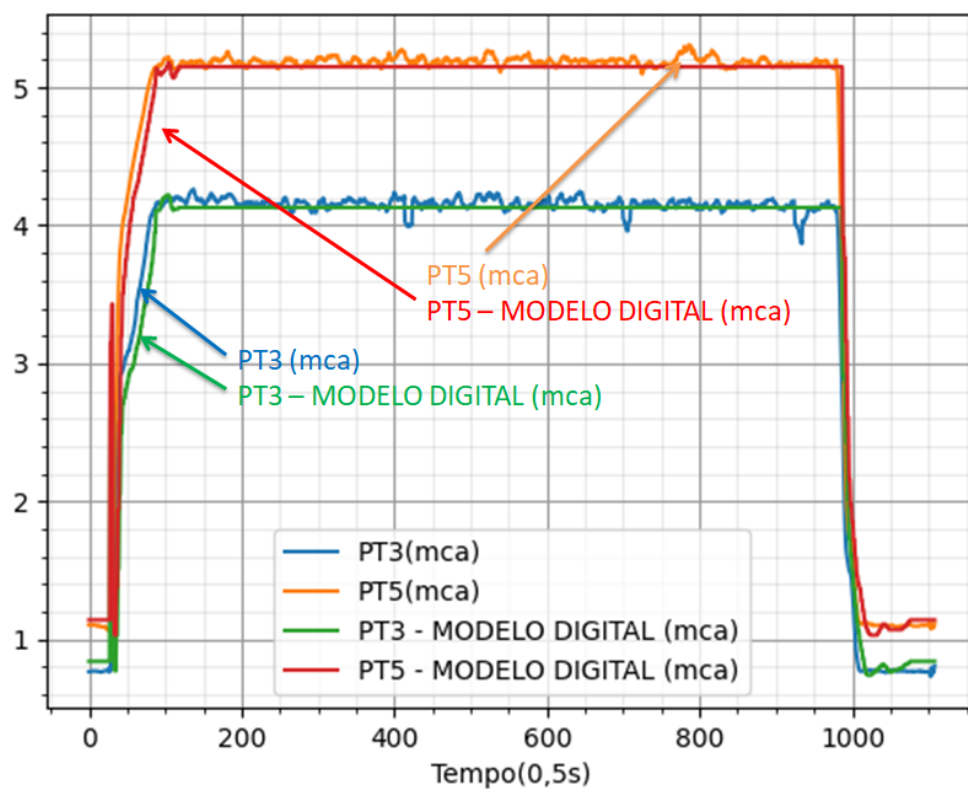


Figura 42 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 0 (Autoria Própria).

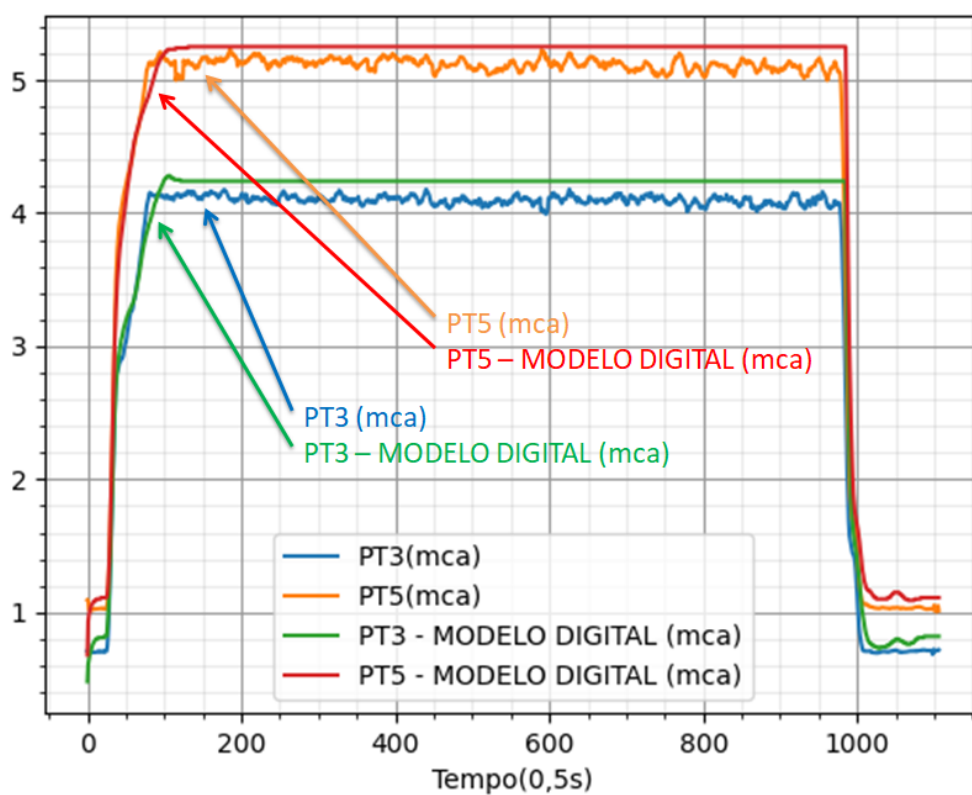


Figura 43 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 1 (Autoria Própria).

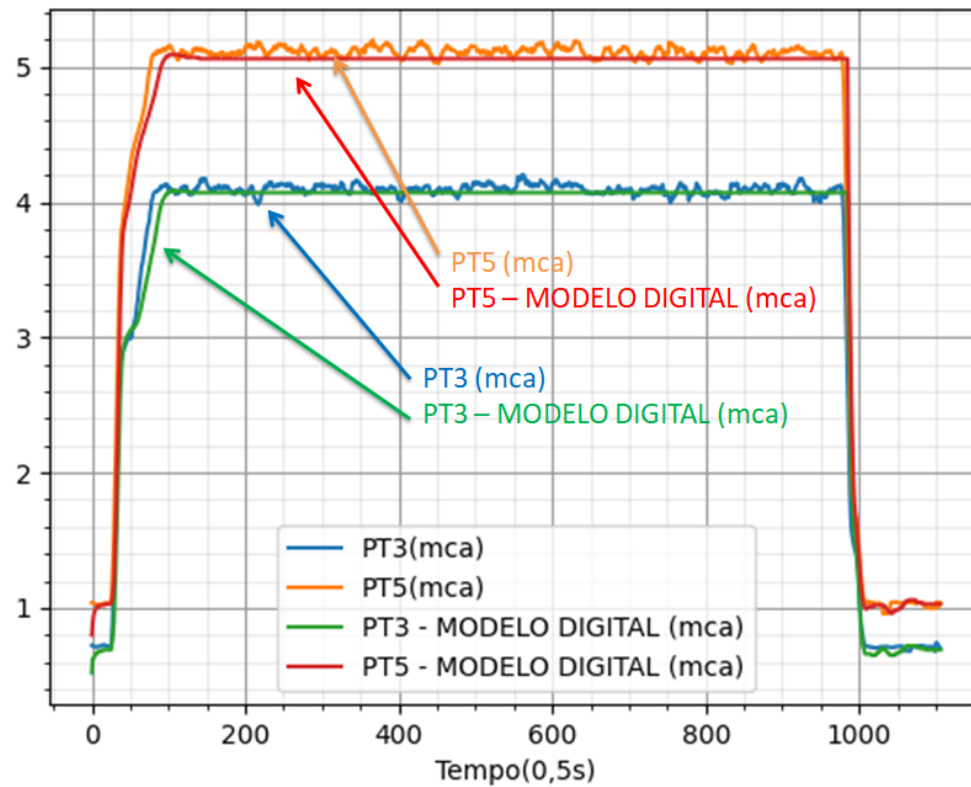


Figura 44 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 2 (Autoria Própria).

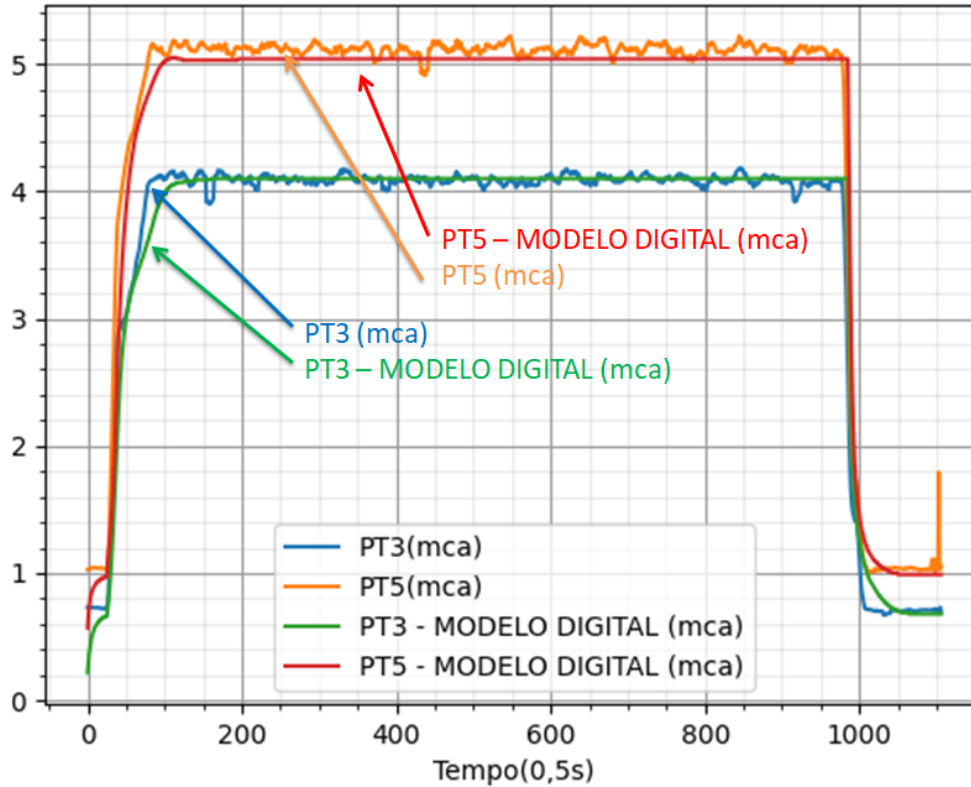


Figura 45 – Dados obtidos do experimento 3 do MD 3 (Autoria Própria).

Os resultados do MAPE e do MAPE RP para cada modelo digital podem ser visualizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela com informações do experimento 3 do Sombra Digital.

	MAPE (%)		MAPE RP (%)	
	PT3	PT5	PT3	PT5
MD 0	3,69	3,07	0,94	0,78
MD 1	5,06	3,85	3,45	2,58
MD 2	2,12	1,89	0,86	1,02
MD 3	3,37	3,17	0,74	1,53

No terceiro experimento, o menor valor de MAPE foi obtido com o modelo MD 2, sendo ele 58,1% e 50,9%, em relação ao PT3 e PT5 respectivamente, menor do que o pior valor obtido para o MAPE, que encontra-se no modelo MD 1.

Em relação ao MAPE RP, o modelo MD 3 obteve o menor erro em relação ao PT3, enquanto o modelo MD 0 obteve o menor erro para o PT5.

O modelo MD 1, modelo este que obteve o pior desempenho em relação ao regime permanente, obteve um erro 366,2% no PT3 e 230,8% no PT5 maior do que os valores encontrados nos modelos MD 3 e MD 0, respectivamente.

Dentre os modelos digitais desenvolvidos e dos experimentos realizados, o modelo que obteve o melhor desempenho a partir experimentos realizados foi o MD 2, obtendo o melhor resultado de MAPE em relação aos outros modelos. Verificou-se também a necessidade de mais dados para o seu treinamento, o que permitiria diminuir o erro do MAPE RP.

4.2.2 Experimentos realizando atualização do modelo digital

Para atualização dos modelos digitais foram realizados três experimentos com o modelo MD 1, que foi o modelo digital que obteve um dos piores desempenhos dos experimentos anteriores. Cada experimento consiste em avaliar o MAPE obtido nas medições, e que, para valores maiores do que 5%, valor visto na primeira parte dos experimento como um resultado ultrapassado pelo modelos digitais com os piores desempenhos, verificar o EQM do modelo digital antes e após a atualização, permanecendo o modelo digital com menor EQM. Quando ocorreu a substituição do modelo digital, foi realizado novamente o experimento e obtidos os novos resultados para o MAPE e MAPE RP.

4.2.2.1 Experimento 1

O experimento foi realizado com CMB em 40 Hz, a válvula CV1 em 30°, a válvula CV2 em 30° e a válvula CV3 em 45°, permanecendo por oito minutos antes de ser desligado. A seguir pode-se observar a Figura 46 com os dados do experimento representados graficamente, no qual obteve-se um MAPE de 20,63% e de 5,41% para o PT3 e PT5, respectivamente, e um MAPE RP para o PT3 de 18,83% e de 3,65% para o PT5, e na

Tabela 5 as informações relativas ao EQM das atualizações do modelo digital e se o dado foi atualizado ou não.

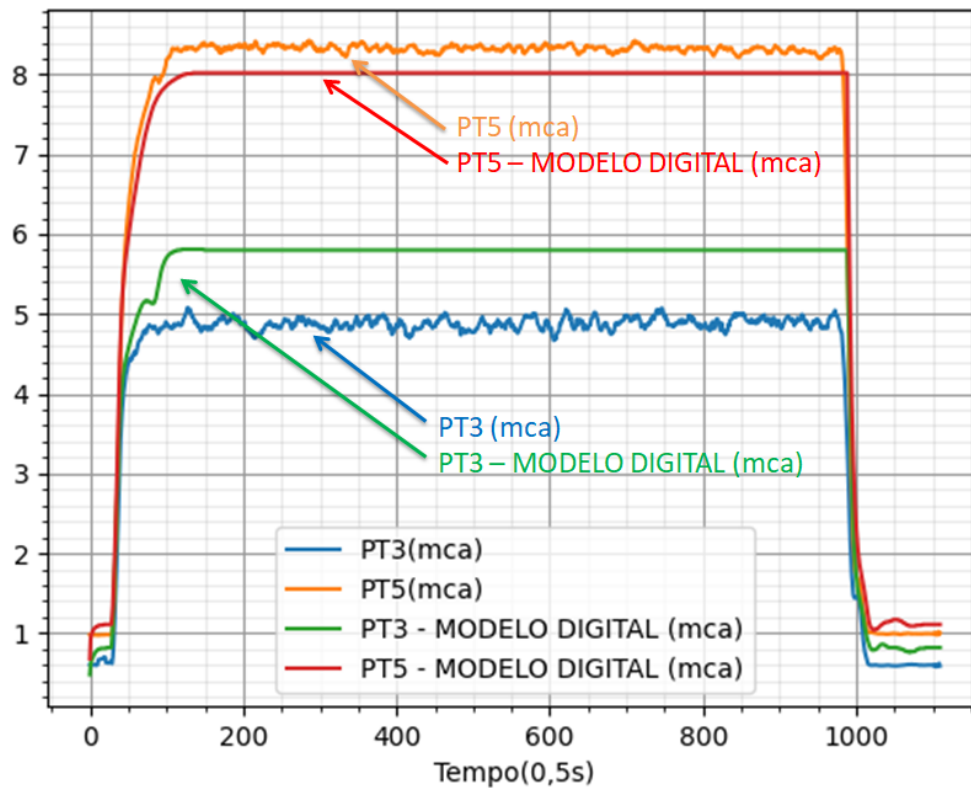


Figura 46 – Dados obtidos do experimento 1 (Autoria Própria).

Tabela 5 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 1.

	EQM		Modelo Digital Atualizado
	Antes da Atualização	Após a Atualização	
Atualização com Novos e Antigos Dados	$2,44 \times 10^{-6}$	$1,47 \times 10^{-6}$	Sim
Atualização com Novos Dados	$9,38 \times 10^{-6}$	$1,24 \times 10^{-5}$	Não

A seguir pode-se visualizar o experimento do modelo digital atualizado com novos e antigos dados na Figura 47 e na Tabela 6 os resultados numéricos do MAPE e do MAPE RP.

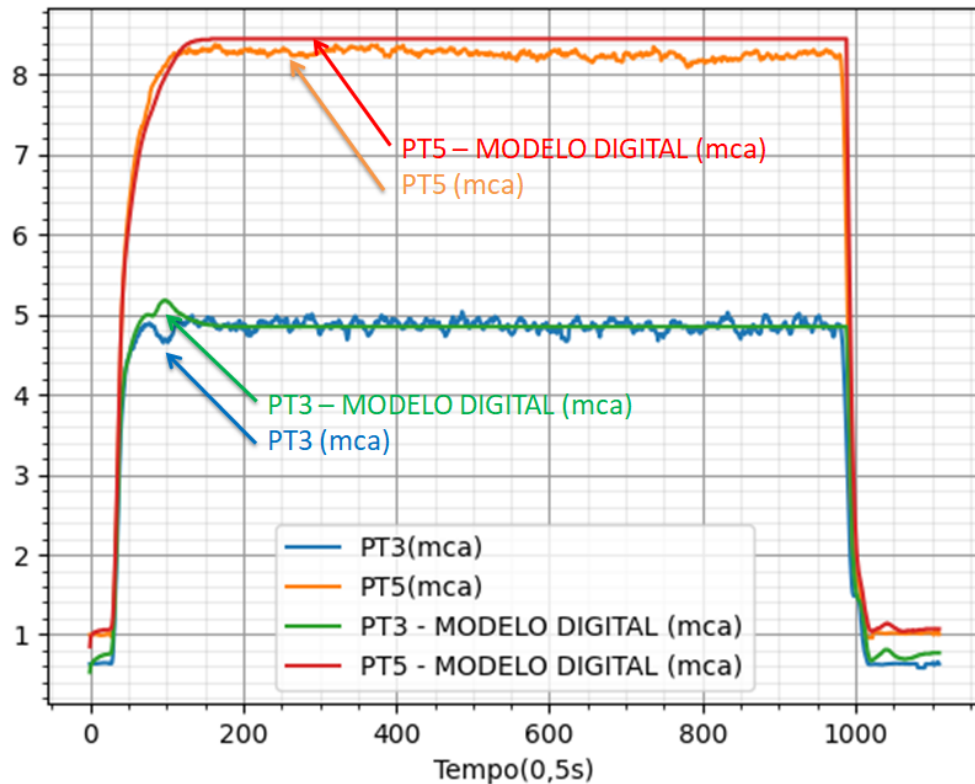


Figura 47 – Dados obtidos do experimento 1 do modelo digital atualizado com novos e antigos dados (Autoria Própria).

Tabela 6 – Tabela com informações do experimento 1 da atualização do modelo digital.

	MAPE (%)		MAPE RP (%)	
	PT3	PT5	PT3	PT5
Sem Atualização	20,63	5,41	18,83	3,65
Atualização com Novos e Antigos Dados	3,98	3,47	1,09	2,25
Atualização com Novos Dados	X	X	X	X

No primeiro experimento, o modelo digital foi atualizado apenas com os novos e antigos dados, uma vez que o EQM após a atualização do modelo digital utilizando apenas novos dados foi maior do que o modelo digital antes da atualização. O resultado obtido do modelo digital atualizado em relação ao MAPE apresentou uma redução de 80,7% para o PT3 e de 35,8% para o PT5. Em relação ao MAPE RP, o PT3 apresentou uma redução de 94,2%, enquanto o PT5 reduziu em 38,3%.

4.2.2.2 Experimento 2

No segundo experimento realizado, utilizou-se o CMB em 35 Hz, a válvula CV1 em 30°, a válvula CV2 em 45° e a válvula CV3 em 30°, permanecendo nessa operação por oito minutos. Na Figura 48 pode-se observar os dados representado graficamente

do experimento, no qual obteve-se um MAPE para o PT3 de 6,76% e para o PT5 de 4,39%, e um MAPE RP para o PT3 de 3,05% e para o PT5 de 2,57%, e na Tabela 7 são apresentadas as informações relativas ao EQM das atualizações do modelo digital e se o mesmo foi atualizado ou não.

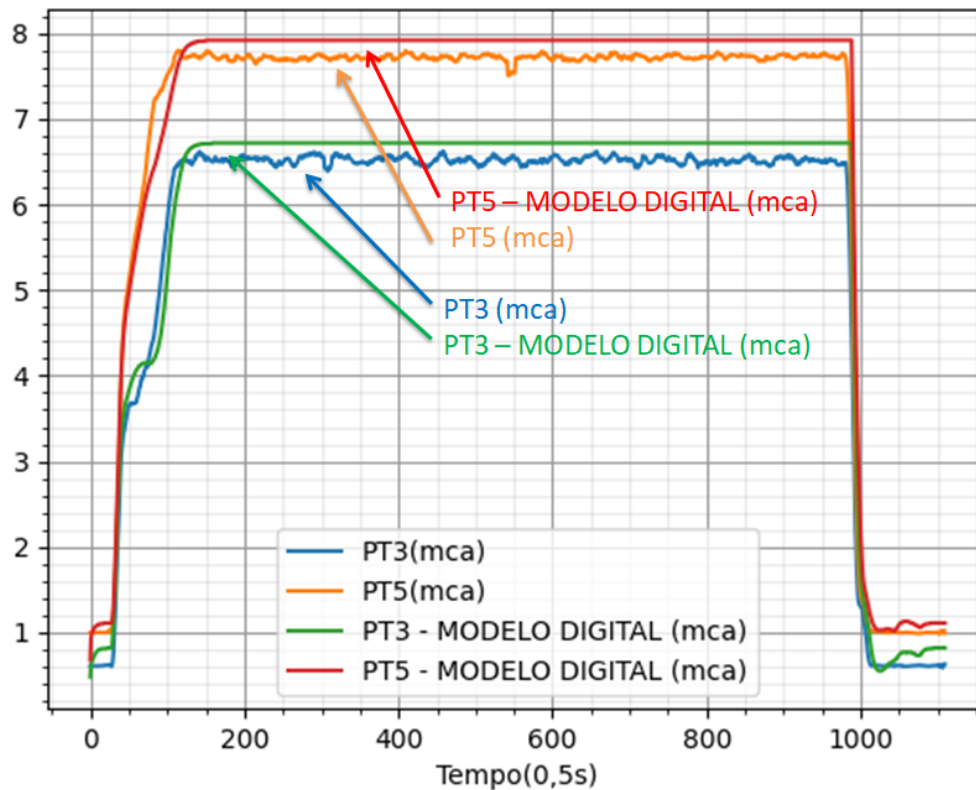


Figura 48 – Dados obtidos do experimento 2 (Autoria Própria).

Tabela 7 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 2.

	EQM		Modelo Digital Atualizado
	Antes da Atualização	Após a Atualização	
Atualização com Novos e Antigos Dados	$2,89 \times 10^{-6}$	$1,23 \times 10^{-6}$	Sim
Atualização com Novos Dados	$2,32 \times 10^{-6}$	$7,56 \times 10^{-6}$	Não

O modelo digital foi atualizado apenas com novos e antigos dados, pois em relação a atualização que utiliza apenas os novos dados, apresentou um erro maior após a atualização dos dados do que o não atualizado. Na Figura 49 são apresentados os dados obtidos nos experimentos dos modelos digitais atualizados com novos e antigos dados. Os resultados do MAPE e do MAPE RP são apresentados numericamente na Tabela 8.

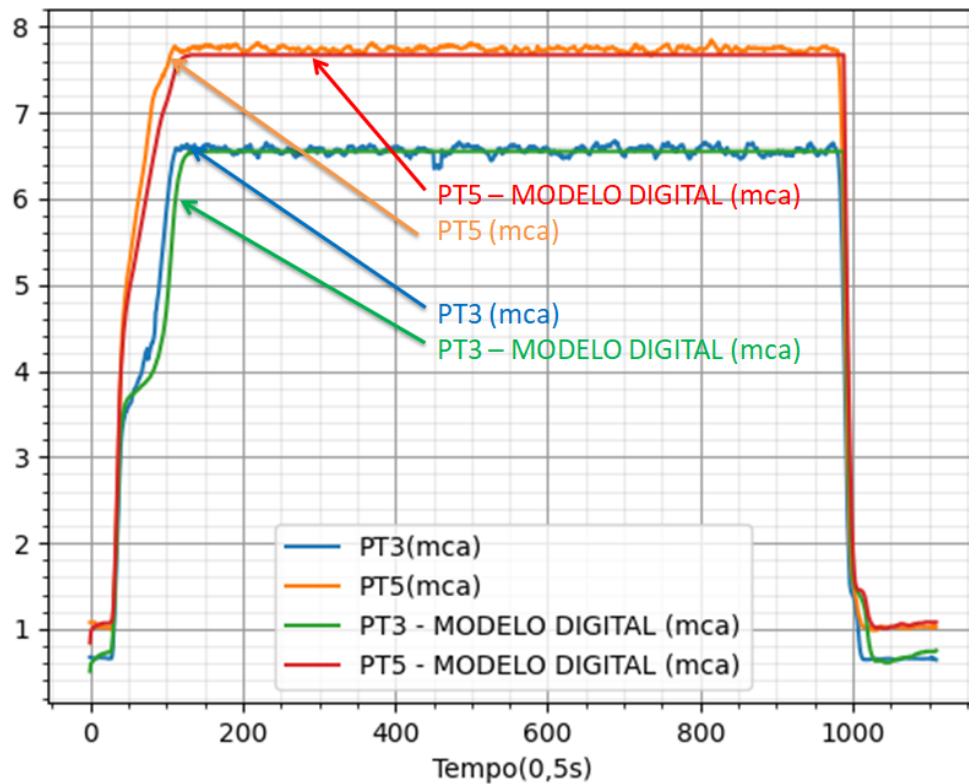


Figura 49 – Dados obtidos do experimento 2 do modelo digital atualizado com novos e antigos dados (Autoria Própria).

Tabela 8 – Tabela com informações do experimento 2 da atualização do modelo digital.

	MAPE (%)		MAPE RP (%)	
	PT3	PT5	PT3	PT5
Sem Atualização	6,76	4,39	3,05	2,57
Atualização com Novos e Antigos Dados	3,69	2,66	0,59	0,92
Atualização com Novos Dados	X	X	X	X

O modelo atualizado com novos e antigos dados obteve um melhor desempenho em relação ao modelo sem atualização, apresentando uma redução nos resultados do MAPE e MAPE RP, sendo eles de 45,4% e 39,4%, em relação ao MAPE do PT3 e PT5 respectivamente, e de 80,6% e 64,2%, em relação ao MAPE RP do PT3 e PT5, respectivamente.

4.2.2.3 Experimento 3

O último experimento foi realizado considerando o CMB em 30 Hz, a válvula CV1 em 45°, com 45° na válvula CV2 e a válvula CV3 em 15°, permanecendo nessa operação por oito minutos. Na Figura 50, pode-se observar os dados representado graficamente do experimento, que obteve no MAPE um valor de 8,28% para o PT3 e de 4,19% para o PT5, e no MAPE RP obteve-se um resultado de 0,97% para o PT3 e de 0,71% para o PT5. Na

Tabela 9 são apresentadas as informações relativas ao EQM das atualizações do modelo digital e se os valores do modelo digital foram atualizados ou não.

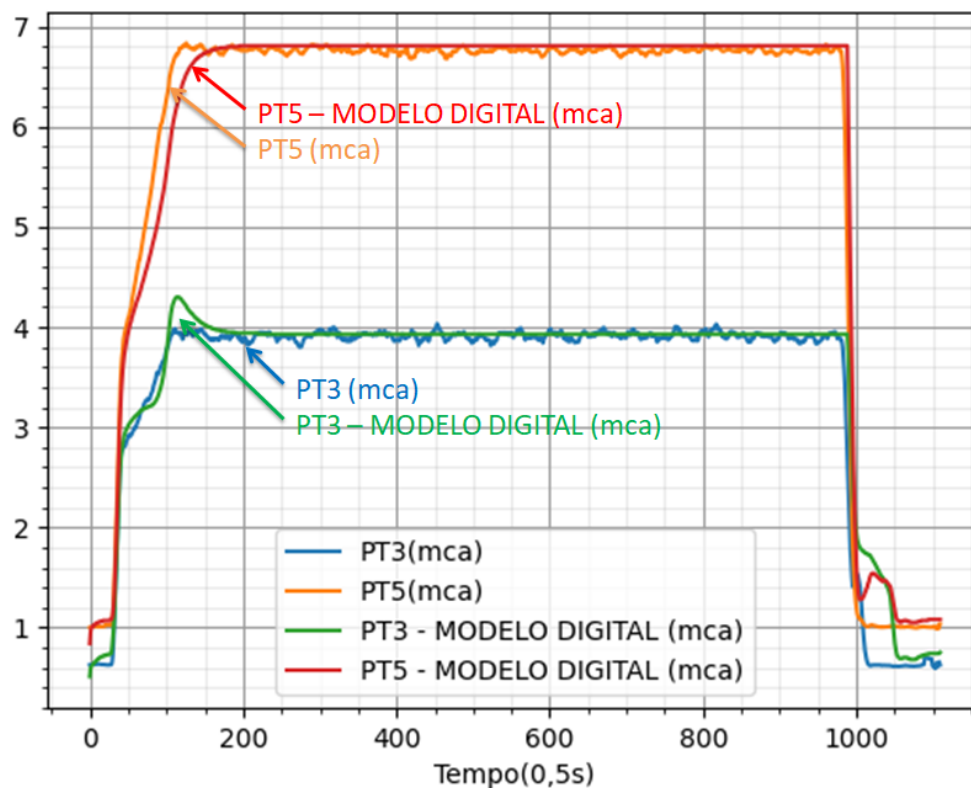


Figura 50 – Dados obtidos do experimento 3 (Autoria Própria).

Tabela 9 – Tabela com informações sobre o EQM da atualização do modelo digital do experimento 3.

	EQM		Modelo Digital Atualizado
	Antes da Atualização	Após a Atualização	
Atualização com Novos e Antigos Dados	$1,22 \times 10^{-6}$	$1,84 \times 10^{-6}$	Não
Atualização com Novos Dados	$2,33 \times 10^{-6}$	$8,72 \times 10^{-6}$	Não

O modelo digital não foi atualizado com nenhum dos dois tipos de atualização, que são com os novos e antigos dados e apenas com os novos dados. Em todas as duas atualizações o erro encontrado após a atualização foi maior do que o erro do modelo não atualizado.

Os resultados obtidos com os modelos atualizados foram satisfatórios, apresentando uma melhora em relação ao modelo digital não atualizado. Em relação aos dois tipos de atualização, temos que uma desta, a com novos e antigos dados, conseguiu atualizar o modelo digital em dois experimentos, enquanto não houve nenhuma atualização do modelo ao utilizar apenas os novos dados, apresentando assim, a atualização com os novos

e antigos dados uma melhor opção na busca para deixar o modelo digital sempre o mais próximo do sistema físico.

4.3 Gêmeo Digital

Foram desenvolvidos supervisórios no software ScadaBR para realizar o manejo do Gêmeo Digital (GD), realizando a comunicação por meio do protocolo Modbus TCP/IP, com base nos endereços de memória que encontram-se apresentados no Apêndice A. Na Figura 51 pode-se observar a tela inicial do supervisório de configuração desenvolvido para a avaliação do Gêmeo Digital.

LENHS
Laboratório Eficiência Energética e
Hidráulica em Saneamento

1 Taxa de Atualização das Amostras: ms

2 Limitadores dos Atuadores
CMB: Hz
CV1: °
CV2: °
CV3: °

3 Suporte à Operações
Valor Máximo da Pressão: mca
Valor Mínimo da Pressão: mca
Valor Máximo da Predição do PT3: mca
Valor Máximo da Predição do PT5: mca

4 Atualização do Modelo Digital
MAPE Máximo PT3: %
MAPE Máximo PT5: %
 Atualizar com Antigos e Novos Dados
MAPE PT3: %
MAPE PT5: %
 Modelo Digital Atualizado

5 Criação de Novo Modelo Digital
Atraso do Modelo Digital(t-n):
Número de Épocas:
 Iniciar Criação do Modelo Digital

Legenda:
— Valores obtidos do Gêmeo Digital

Figura 51 – Tela Inicial do supervisório de configuração do Gêmeo Digital (Autoria Própria).

A seguir, explica-se cada item presente nessa tela do supervisório:

- 1 - é relacionado a configuração da taxa de atualização dos dados;
- 2 - são os limitadores das entradas dos atuadores, no qual não permite entradas maiores do que as configuradas nesses campos;

- 3 - esse item é relacionado ao suporte a operações, no qual é configurado uma pressão máxima e mínima para a planta hidráulica, não permitindo que operações realizadas façam com que a pressão fique fora desse intervalo. As pressões finais da operação pode ser visualizadas nas caixas de informações em roxo;
- 4 - ele permite configurar o MAPE para cada um dos sensores de saída PT3 e PT5, que quando excedido, realiza a atualização podendo ser com novos e antigos dados, ou apenas com novos dados. A caixa de informações em roxo mostra o MAPE do arquivo obtido da última medição realizada, e caso o modelo digital seja atualizado, um alerta luminoso é aceso;
- 5 - permite a criação de novos modelos digitais, podendo ser configurado o atraso do modelo digital, bem como o número de épocas a serem treinadas.

Por padrão, a taxa de atualização é de 500 milissegundos, os atuadores são limitados em 45 Hz para o conjunto motobomba e 45° para as válvulas, no suporte a operações, a pressão é limitada a 15 mca. Em relação a atualização dos modelos, o MAPE máximo é de 5% e o treinamento utiliza novos e antigos dados, e por último, o desenvolvimento de novos modelos, com 100 épocas como padrão.

A segunda tela do supervisório criada foi a de controle da planta hidráulica, na qual são mostradas as informações sobre alertas, sensores e atuadores. Na Figura 52 é apresentada a interface desenvolvida.

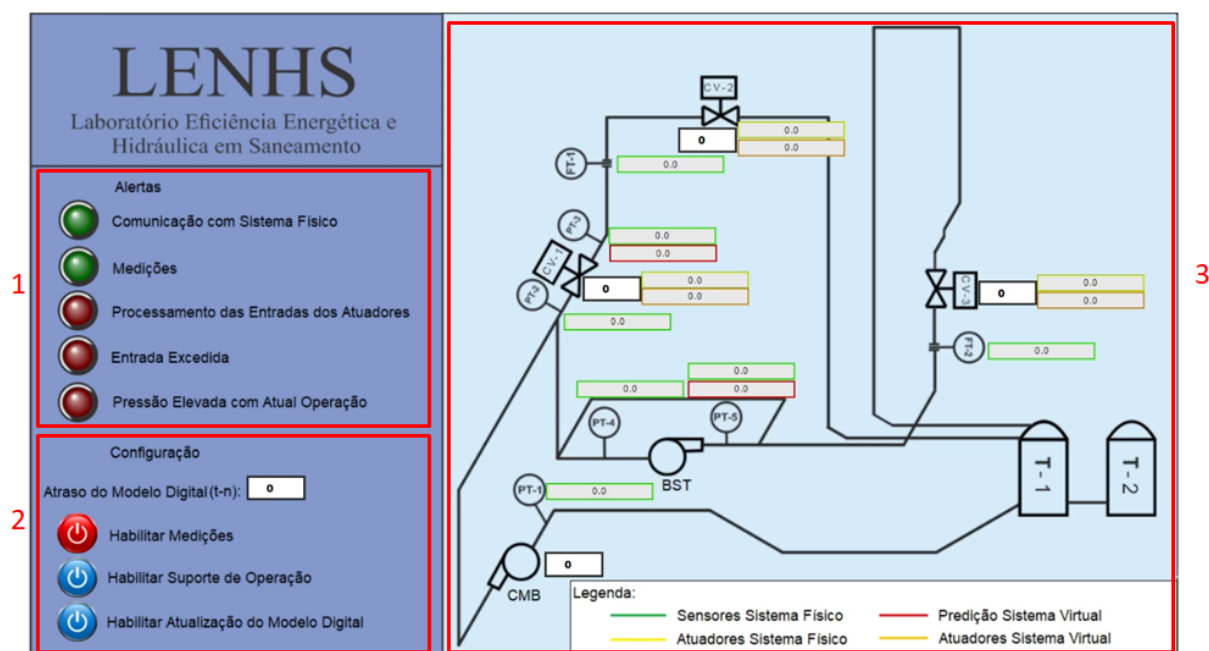


Figura 52 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital (Autoria Própria).

A seguir, explica-se cada item apresentado na figura:

- 1 - são os alertas luminosos, mostrando quando o sistema está em comunicação com o sistema físico, se as medições estão sendo realizadas, alertas relacionados ao processamento das entradas dos atuadores, se uma entrada foi excedida em relação ao valor configurado e se para a atual operação a pressão obtida está acima do configurado;
- 2 - neste item são configurados o atraso do modelo a ser utilizado, também é possível habilitar o início das medições, além de poder configurar se deseja ou não o suporte a operações e a atualização do modelo digital ao final da medição;
- 3 - no terceiro item estão presentes as informações relacionados ao sistema físico e virtual, no qual é possível visualizar nas caixas de informações em verde os valores obtidos dos sensores de pressão e vazão, em amarelo os valores obtidos das válvulas, em vermelho a predição realizada pelo GD sobre os sensores PT3 e PT5, e em laranja os valores do GD para o comportamento das válvulas. Também permite realizar as operações variando o valor do CMB e das CVs.

É iniciado por padrão o modelo digital igual a 0 e o suporte a operações e atualização dos modelos digitais habilitados.

O GD é composto por três pastas, como pode-se visualizar na Figura 53, dentre as quais, na pasta "Arquivos Complementares" encontram-se as imagens dos supervisórios (Figura 54).

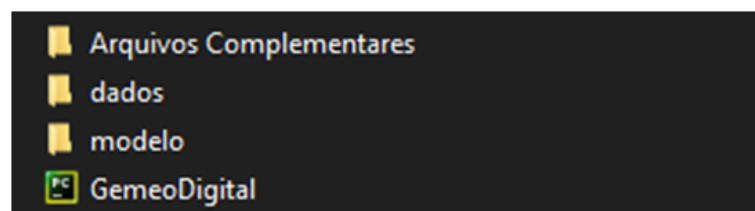


Figura 53 – Pastas do Gêmeo Digital (Autoria Própria).

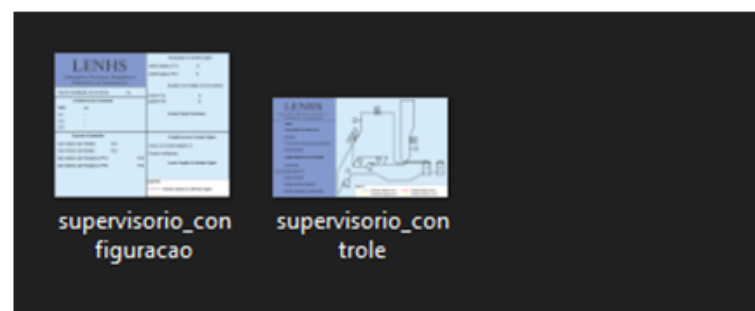


Figura 54 – Pasta "Arquivos Complementares" (Autoria Própria).

Na pasta "dados", como pode-se visualizar na Figura 55, estão armazenados os dados obtidos nas medições com comunicação com a planta, junto com a pastas de "figura",

que armazena os gráficos gerados a partir das informações dos atuadores, saída dos sensores PT3 e PT5 e suas respectivas predições, com a pasta "figura__pressoes", no qual são plotado apenas as informações dos sensores PT3 e PT5 e suas respectivas predições, a pasta "dados processados", armazena os dados tratados para uso de treinamento dos modelos digitais junto com a subpasta com os dados plotados graficamente das operações realizadas, e por último, tem-se a pasta "dados simulação offline", no qual encontram-se os dados gerados de operações que não existem comunicação com o sistema físico.

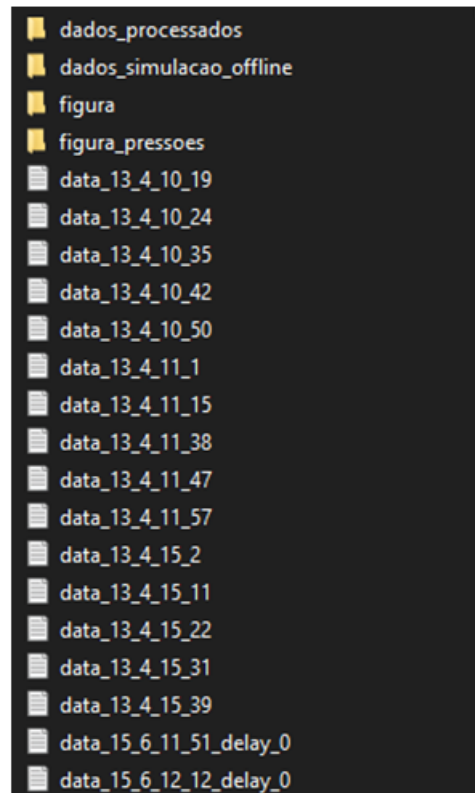


Figura 55 – Pasta "dados"(Autoria Própria).

Por último existe a pasta "modelo"(Figura 56), na qual estão armazenado os modelos digitais e respectivas pastas com suas informações armazenadas, como o EQM gerado por cada modelo digital durante a sua criação, bem como os gráficos do EQM de treinamento e validação para cada modelo digital.

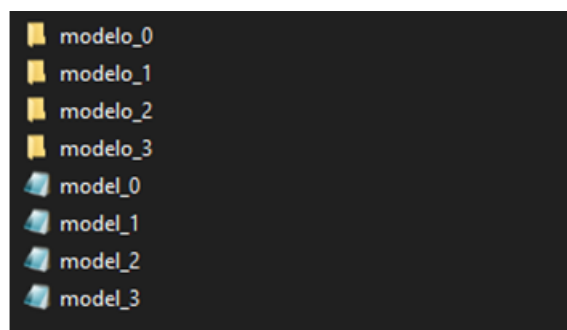


Figura 56 – Pasta "modelo"(Autoria Própria).

4.3.1 Experimentos

Os experimentos foram realizados utilizando a válvula CV2 limitada a 30° e a pressão máxima limitada em 8 mca, como podemos observar na Figura 57.





LENHS Laboratório Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento	
Taxa de Atualização das Amostras: <input type="text" value="500"/> ms	Atualização do Modelo Digital MAPE Máximo PT3: <input type="text" value="5"/> % MAPE Máximo PT5: <input type="text" value="5"/> %  Atualizar com Antigos e Novos Dados MAPE PT3: <input type="text" value="0.0"/> % MAPE PT5: <input type="text" value="0.0"/> %  Modelo Digital Atualizado
Limitadores dos Atuadores CMB: <input type="text" value="45"/> Hz CV1: <input type="text" value="45"/> ° CV2: <input type="text" value="30"/> ° ← CV3: <input type="text" value="45"/> °	Criação de Novo Modelo Digital Atraso do Modelo Digital(t-n): <input type="text" value="0"/> Número de Épocas: <input type="text" value="100"/>  Iniciar Criação do Modelo Digital
Suporte à Operações Valor Máximo da Pressão: <input type="text" value="8"/> mca ← Valor Mínimo da Pressão: <input type="text" value="0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT3: <input type="text" value="0.0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT5: <input type="text" value="0.0"/> mca	Legenda:  Valores obtidos do Gêmeo Digital

Figura 57 – Supervisório configurado para a realização dos experimento do Gêmeo Digital (Autoria Própria).

Quando as medições são habilitadas, tem-se a seguinte tela de controle, os alertas luminosos de comunicação com o sistema físico e medições ficam acesos, como é possível verificar na Figura 58.

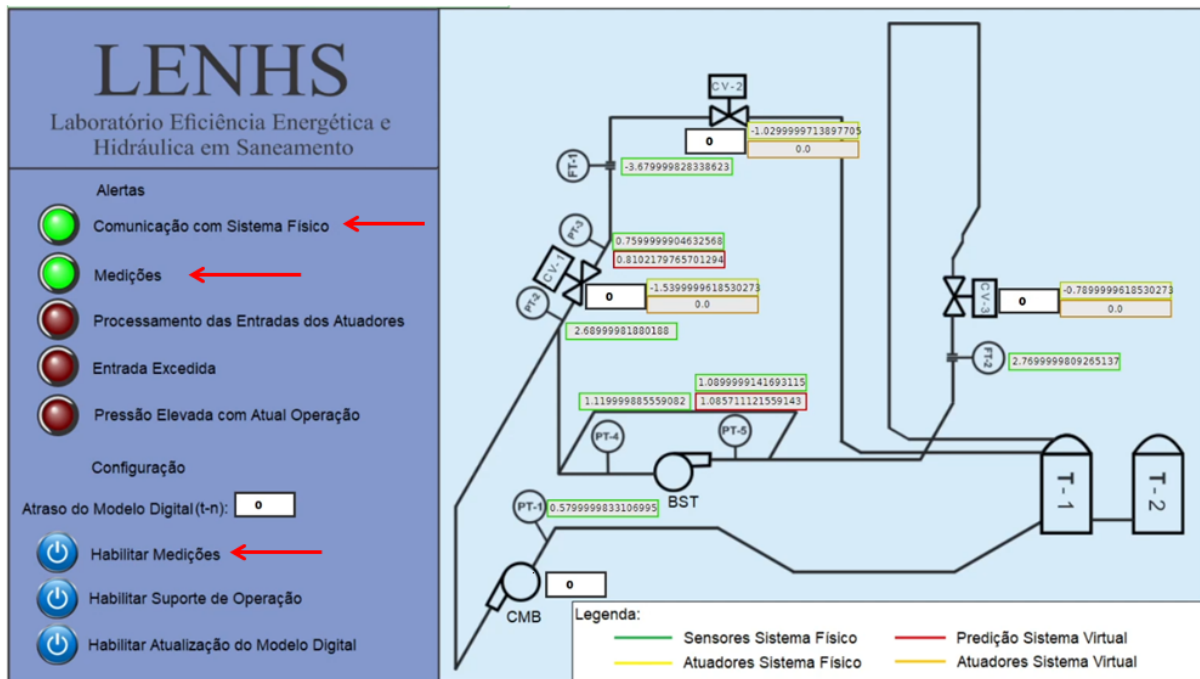


Figura 58 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com medições habilitadas (Autoria Própria).

4.3.1.1 Experimento 1

O primeiro experimento consistiu na verificação das entradas dos atuadores do Gêmeo Digital, no qual utilizou-se a válvula CV2 para realizar os testes. O primeiro teste realizado consistiu em aplicar uma entrada no atuador maior que a permitida, como pode-se verificar na Figura 59.

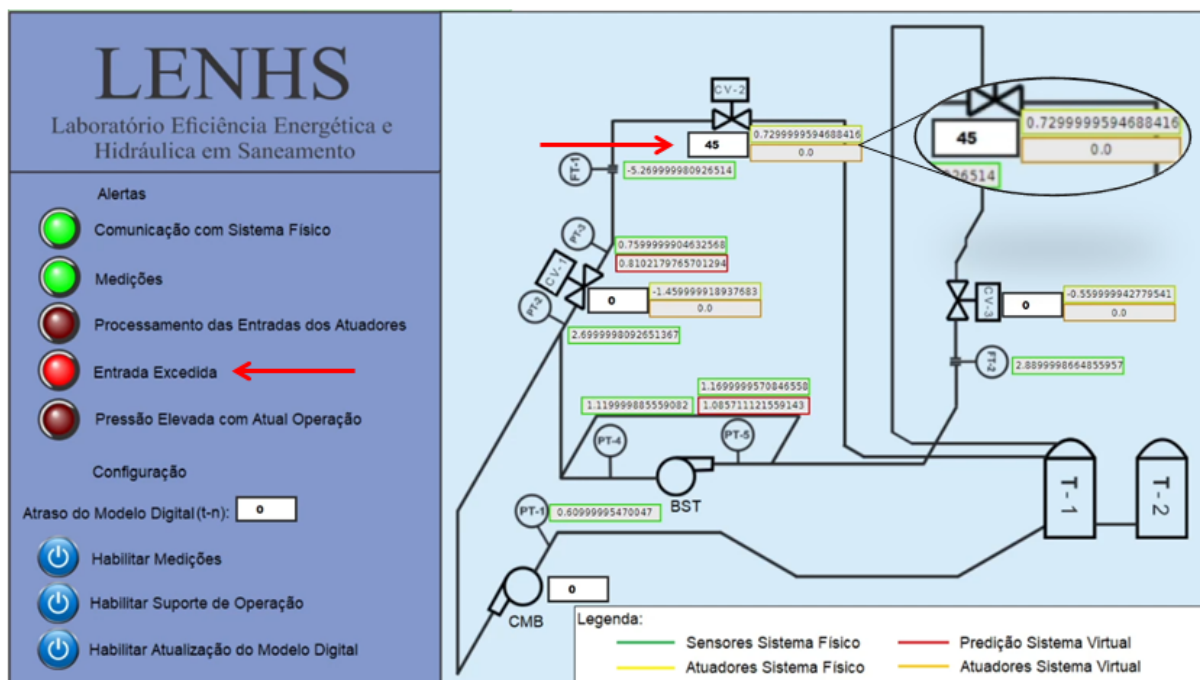
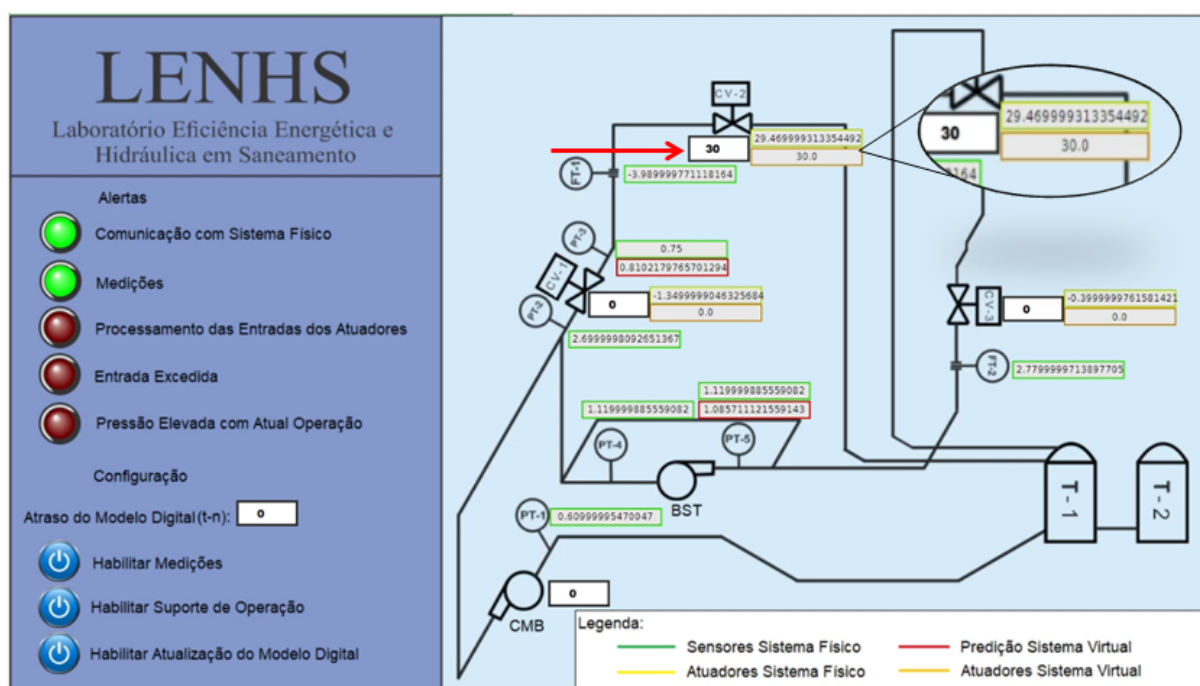


Figura 59 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada maior que a permitida na CV2 (Autoria Própria).

Como observado na Figura 59, o alerta luminoso sobre a entrada excedida acendeu e não foi permitida a realização da operação. Na Figura 60 é possível visualizar que, quando é aplicada uma entrada dentro do intervalo configurado, o alerta luminoso sobre a entrada excedida é desligado e a entrada é aplicada no sistema físico.



4.3.1.2 Experimento 2

O segundo experimento é relacionado ao sistema de suporte a operações do GD, no qual ele realiza a predição para a atual operação, permitindo ou não que ela seja executada, de acordo com os valores configurados de pressões na planta hidráulica. A primeira operação consistiu em colocar o CMB a 40 Hz, como é possível visualizar na Figura 61.

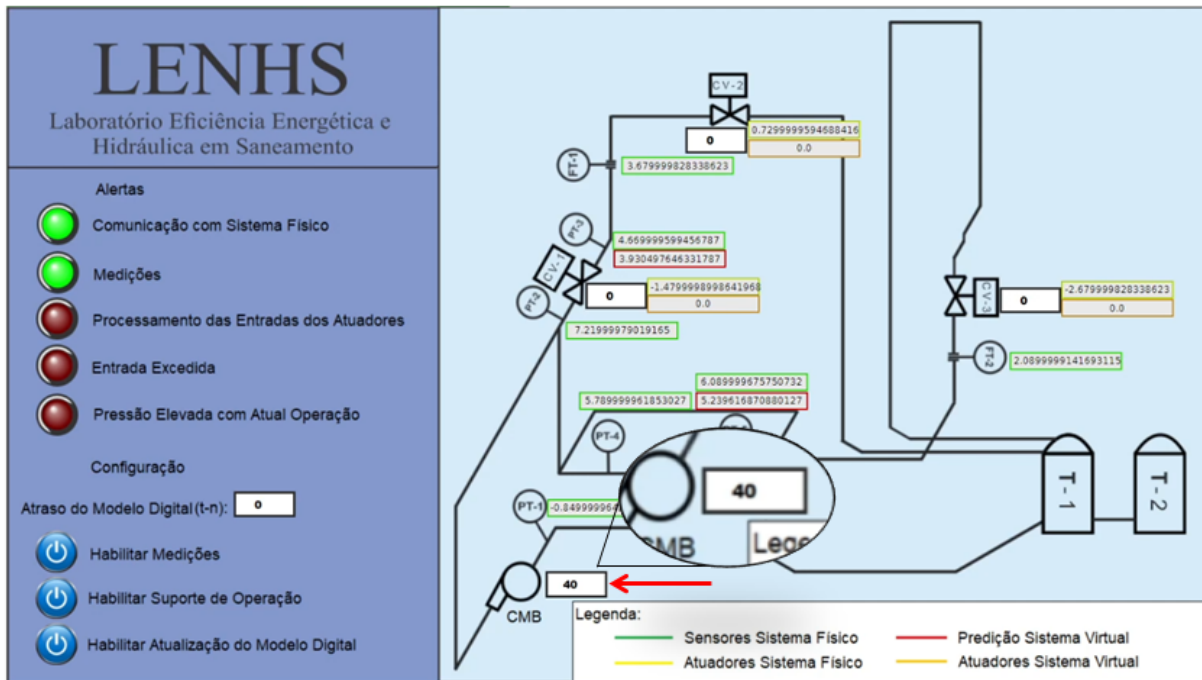


Figura 61 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada de 40 Hz no CMB (Autoria Própria).

Ao realizar a segunda operação, que consiste em aplicar 45° na válvula CV1, como é possível se visualizar na Figura 62, o GD acendeu o alerta luminoso de processamento de entradas enquanto realiza o processamento da entrada e por último acendeu o alerta luminoso de pressão elevada para a atual operação durante cinco segundos, não permitindo a realização da operação conforme é possível observar na Figura 63.

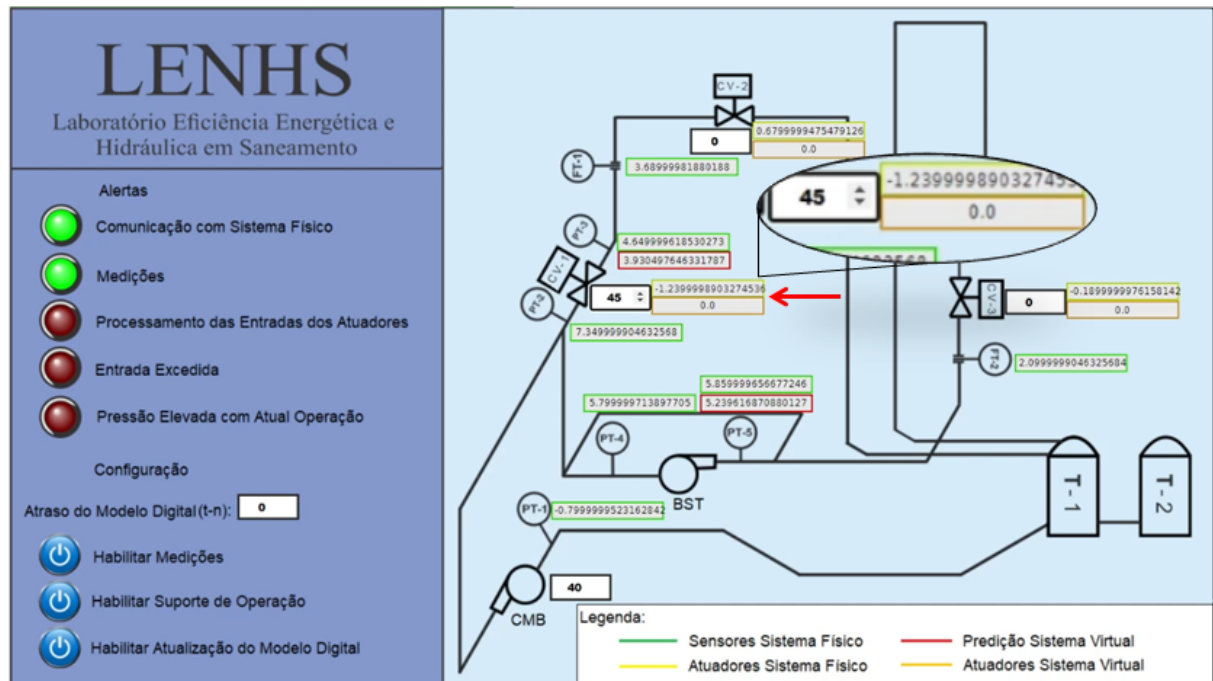


Figura 62 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital com entrada de 45° no CV1 (Autoria Própria).

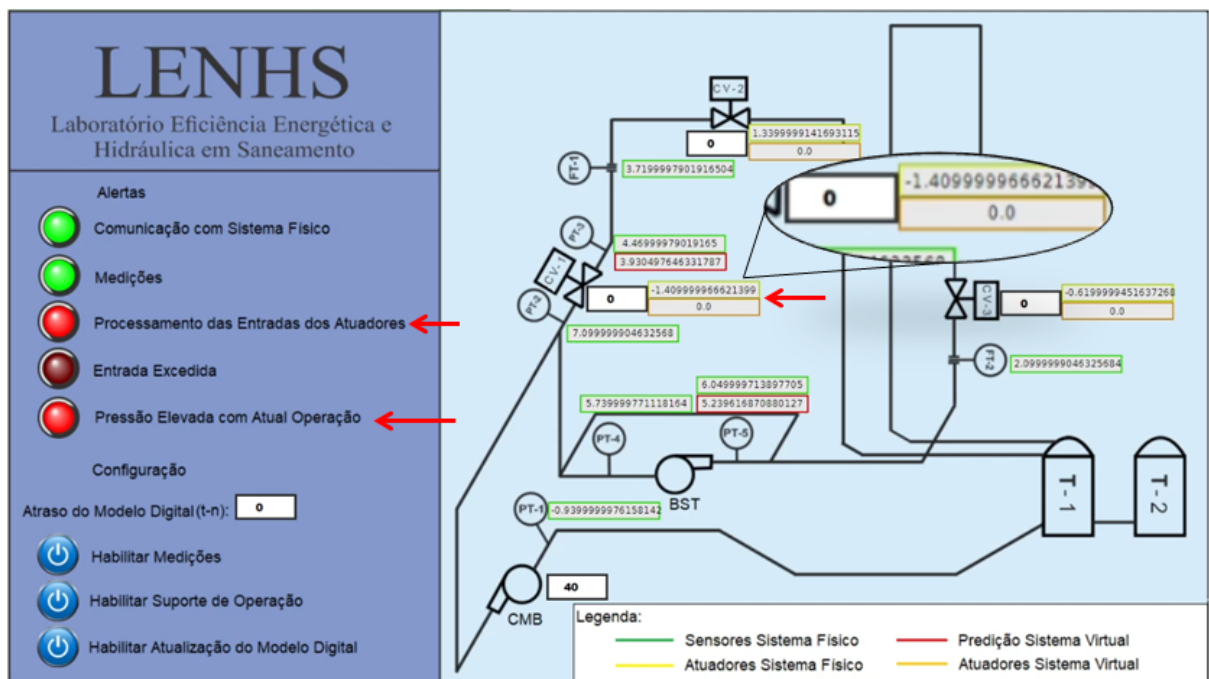


Figura 63 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital após processamento da entrada (Autoria Própria).

Isso aconteceu devido a operação elevar a pressão no PT5 acima do valor configurado, como podemos visualizar na Figura 64, no qual o valor obtido foi de 8,39 mca.





LENHS Laboratório Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento	
Taxa de Atualização das Amostras: <input type="text" value="500"/> ms	Atualização do Modelo Digital MAPE Máximo PT3: <input type="text" value="5"/> % MAPE Máximo PT5: <input type="text" value="5"/> %  Atualizar com Antigos e Novos Dados MAPE PT3: <input type="text" value="0.0"/> % MAPE PT5: <input type="text" value="0.0"/> %  Modelo Digital Atualizado
Limitadores dos Atuadores CMB: <input type="text" value="45"/> Hz CV1: <input type="text" value="45"/> ° CV2: <input type="text" value="30"/> ° CV3: <input type="text" value="45"/> °	Criação de Novo Modelo Digital Atraso do Modelo Digital(t-n): <input type="text" value="0"/> Número de Épocas: <input type="text" value="100"/>  Iniciar Criação do Modelo Digital
Suporte à Operações Valor Máximo da Pressão: <input type="text" value="8"/> mca Valor Mínimo da Pressão: <input type="text" value="0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT3: <input type="text" value="1.6017013788223267"/> mca Valor Máximo da Predição do PT5: <input type="text" value="8.396142959594727"/> mca <div style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 10px; display: inline-block; margin-top: 10px;"> PT3: <input type="text" value="1.6017013788223267"/> mca PT5: <input type="text" value="8.396142959594727"/> mca </div>	Legenda:  Valores obtidos do Gêmeo Digital

Figura 64 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital após processamento da entrada (Autoria Própria).

Na Figura 65 pode-se verificar que após ser configurado o valor máximo de pressão para 15 mca no suporte a operação, o valor final para operação desejada no sistema físico, foi de aproximadamente 8,33 mca no PT5.

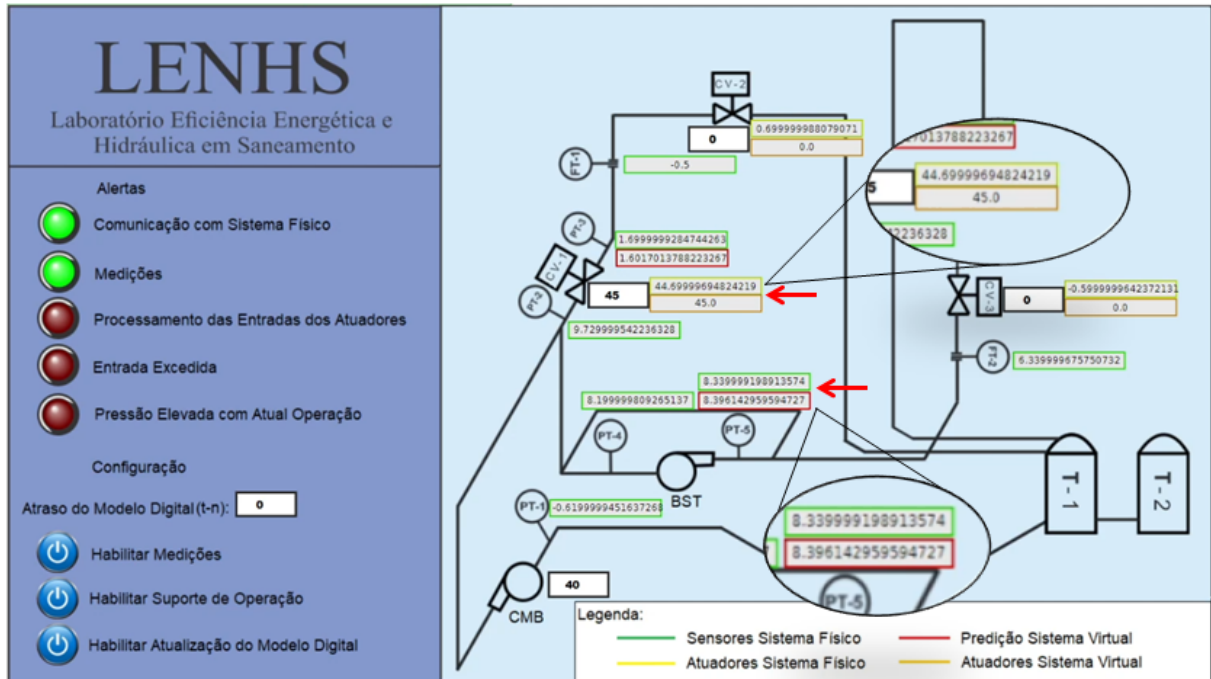


Figura 65 – Supervisório de controle do Gêmeo Digital operação desejada realizada (Autoria Própria).

4.3.1.3 Experimento 3

O experimento 3 consistiu na atualização do modelo digital após a medição realizada. Após a desabilitação das medições, é realizada a verificação dos dados obtidos da medição, e caso o MAPE das saídas do PT3 e PT5 sejam maior a 5%, é realizado o treinamento do modelo digital, permanecendo aquele que obtiver o menor EQM com os dados de validação. Na Figura 66 é possível visualizar o MAPE obtido para o PT3 e PT5, sendo eles de 9,94% e 5,82%, respectivamente. Também observa-se através do alerta luminoso que o modelo digital foi atualizado.








LENHS	
Laboratório Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento	
Taxa de Atualização das Amostras: <input type="text" value="500"/> ms	Atualização do Modelo Digital MAPE Máximo PT3: <input type="text" value="5"/> % MAPE Máximo PT5: <input type="text" value="5"/> %  Atualizar com Antigos e Novos Dados MAPE PT3: <input type="text" value="9.9385404586792"/> %  MAPE PT5: <input type="text" value="5.822731018066406"/> %   Modelo Digital Atualizado 
Limitadores dos Atuadores CMB: <input type="text" value="45"/> Hz CV1: <input type="text" value="5"/> MAPE PT3: <input type="text" value="9.9385404586792"/> % CV2: <input type="text" value="3"/> MAPE PT5: <input type="text" value="5.822731018066406"/> % CV3: <input type="text" value="45"/>	
Suporte à Operações Valor Máximo da Pressão: <input type="text" value="15"/> mca Valor Mínimo da Pressão: <input type="text" value="0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT3: <input type="text" value="1.6017013788223267"/> mca Valor Máximo da Predição do PT5: <input type="text" value="8.396142959594727"/> mca	Criação de Novo Modelo Digital Atraso do Modelo Digital(t-n): <input type="text" value="0"/> Número de Épocas: <input type="text" value="100"/>  Iniciar Criação do Modelo Digital Legenda:  Valores obtidos do Gêmeo Digital

Figura 66 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital após atualização do modelo digital (Autoria Própria).

4.3.1.4 Experimento 4

No quarto experimento foi realizado o desenvolvimento de novos modelos, no qual foi utilizado o atraso igual a zero para o modelo digital, 100 épocas para o treinamento dos modelos, e após habilitado o botão para início da criação do modelo digital, o sistema irá ficar desenvolvendo os novos modelos digitais até desabilitar novamente o botão, indicando a finalização do processo. Na Figura 67 pode-se ver a utilização do sistema de criação de novos modelos digitais.





LENHS	
Laboratório Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento	
Taxa de Atualização das Amostras: <input type="text" value="500"/> ms	
Limitadores dos Atuadores CMB: <input type="text" value="45"/> Hz CV1: <input type="text" value="45"/> ° CV2: <input type="text" value="45"/> ° CV3: <input type="text" value="45"/> °	
Suporte à Operações Valor Máximo da Pressão: <input type="text" value="15"/> mca Valor Mínimo da Pressão: <input type="text" value="0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT3: <input type="text" value="0.0"/> mca Valor Máximo da Predição do PT5: <input type="text" value="0.0"/> mca	
Atualização do Modelo Digital MAPE Máximo PT3: <input type="text" value="5"/> % MAPE Máximo PT5: <input type="text" value="5"/> %  Atualizar com Antigos e Novos Dados MAPE PT3: <input type="text" value="0.0"/> % MAPE PT5: <input type="text" value="0.0"/> %  Modelo Digital Atualizado	
Criação de Novo Modelo Digital Atraso do Modelo Digital(t-n): <input type="text" value="0"/> ← Número de Épocas: <input type="text" value="100"/> ←  Iniciar Criação do Modelo Digital ←	
Legenda:  Valores obtidos do Gêmeo Digital	

Figura 67 – Supervisório de configuração do Gêmeo Digital realizando criação de novos modelos digitais (Autoria Própria).

O sistema supervisório desenvolvido para o GD permitiu realizar todo o manuseio do sistema físico e virtual, podendo realizar configurações de parâmetros ou até mesmo a criação de novos modelos digitais.

5 Conclusões

Neste trabalho foi abordado o desenvolvimento de um gêmeo digital de um sistema de bombeamento de água. Este desenvolvimento foi dividido em três etapas, sendo elas: desenvolvimento do modelo digital; o uso do modelo como Sombra Digital e a atualização do modelo digital. Na sequência foi realizada a integração do Gêmeo Digital com o supervisor do sistema, o que permitiu a visualização de informações e alertas, bem como o controle do sistema por completo. Diferentemente dos trabalhos relacionados abordados na revisão bibliográfica, a pesquisa concentrou-se no sistema de bombeamento de água, utilizando Redes Neurais Artificiais como modelo.

Os modelos digitais desenvolvidos utilizaram um conjunto de dados obtidos a partir de operações realizadas na planta hidráulica, na qual houve a necessidade de tratamento dos dados antes de iniciar o treinamento da RNA, como o uso da média móvel para diminuir o efeito dos ruído presente nos dados. Foram desenvolvidos modelos com até três atrasos, possuindo três camadas ocultas com seus neurônios variando de 10 até 50, e duas funções de ativação diferentes, buscando assim o menor EQM na validação e teste entre os modelos digitais. Os melhores modelos digitais com atraso obtiveram um EQM menor do que os melhores modelos digitais sem atraso, no qual o modelo digital com dois atrasos, a topologia utilizando a função de ativação ReLU e 40 neurônios nas suas camadas ocultas apresentou o menor erro no treinamento, enquanto que o modelo com um atraso, a função de ativação ReLU e 30 neurônios nas suas camadas ocultas apresentou o menor erro na validação e teste.

Atuando como Sombra Digital, foi colocado o melhor modelo digital para cada tipo de atraso desenvolvido em paralelo com a planta física, e obteve-se durante cada experimento, o erro percentual absoluto médio (MAPE) de cada medição realizada, bem como o erro percentual absoluto médio em regime permanente (MAPE RP). Observou-se durante o experimento, que o modelo digital que apresentou o melhor desempenho, obtendo o menor valor de MAPE durante os experimentos, foi o com dois atrasos, modelo este, que apresentou um dos melhores resultados na primeira etapa do desenvolvimento do Gêmeo Digital. Os modelos digitais que conseguiram os melhores resultados em regime permanente foram os modelos sem atraso e com três atrasos, mostrando que, em comparação com o modelo com dois atrasos que alcançou um melhor MAPE, não obteve um bom desempenho fora do regime permanente.

Na busca constante de melhorar o modelo digital para obter uma maior fidelidade com o sistema físico, o modelo com um atraso, que ficou entre os piores resultados obtidos em paralelo com a planta física, foi submetido a novos experimentos em paralelo com

planta física, sendo atualizado com novos e antigos dados ou apenas com novos dados, e que, a partir da avaliação do EQM do modelo atualizado e do não atualizado com dados separados antes da atualização, permaneceu o que apresentou o menor resultado. Os experimentos nos quais o modelo digital foi atualizado, obtiveram um desempenho melhor do que os modelos antes da atualização, mostrando a importância do retreinamento constante dos modelos na busca da maior semelhança com o sistema físico.

A partir da realização das etapas anteriores foi possível o desenvolvimento do Gêmeo Digital, a partir da integração da comunicação Modbus TCP/IP, a qual permitiu todo o seu manejo e configurações de parâmetros por meio de qualquer sistema supervisório, como por exemplo, o ScadaBR.

Foi possível realizar experimentos que poderiam pôr em risco a integridade da planta física e seu comportamento em relação a atualização e criação de novos modelos digitais. O primeiro experimento consistiu na inserção de entradas nos atuadores fora do intervalo determinado, o que resultou na identificação por parte do sistema, não permitindo a continuidade da operação, até que uma nova entrada dentro do intervalo permitido fosse inserida; O segundo experimento realizado foi voltado para a predições de operações, sendo realizada uma operação que elevasse a pressão na tubulação além do permitido. Verificou-se a indicação da pressão elevada pelo sistema desenvolvido, não permitindo que a operação fosse realizada; O terceiro experimento compreendeu em realizar a avaliação do MAPE da última medição, o qual ficou acima do valor de 5% configurado previamente. A partir da atualização do modelo digital, foi possível substituir o modelo em avaliação pelo novo modelo; E por último foi realizado o desenvolvimento de um novo modelo digital com atraso igual a zero, no qual, após a finalização do processo de criação do novo modelo, o botão de inicialização desabilitou-se automaticamente, podendo ser novamente realizado novas operações no Gêmeo Digital.

Com os experimentos realizados como Gêmeo Digital, observou-se seu comportamento em relação a falhas humanas, não permitindo realização de operações que pusessem em risco a integridade da planta física, aumentando a segurança durante seu uso e permitindo a realização de configurações de parâmetros e criação de novos modelos digitais diretamente de um supervisório.

Referências

- ABE, N. *Proposição de Calibração de Redes de Sistemas de Abastecimento de Água Através de Método Híbrido*. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Citado na página 15.
- ACROS. *ATRANSMISSOR DE PRESSÃO: TP-ST18*. Itu, SP, Brasil, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 25.
- AGUIAR, F. G. *Utilização de Redes Neurais Artificiais para Detecção de Padrões de Vazamento em Dutos*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Citado na página 19.
- ALZAMORA, F. M. et al. Digital twins-a new paradigm for water supply. *HydroLink 2021-2 Artificial Intelligence*, 2021. Citado na página 21.
- ARUNSURIYASAK, P.; BOONME, P.; PHASUKKIT, P. Investigation of deep learning optimizer for water pipe leaking detection. In: IEEE. *2019 16th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. [S.l.], 2019. p. 85–88. Citado na página 20.
- BARROS FILHO, E. G. d. *SISTEMA INTELIGENTE PARA O CONTROLE DE PRESSÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ABASTECIDAS POR BOMBAS ASSOCIADAS EM PARALELO*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Citado na página 16.
- BELIMO. *ARB24-SR Technical Data Sheet*. Hinwil, Suíça, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 11, 24 e 25.
- BEVILACQUA, M. et al. Digital twin reference model development to prevent operators' risk in process plants. *Sustainability*, MDPI, v. 12, n. 3, p. 1088, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 11, 1, 2, 10 e 36.
- BONILLA, C. A. et al. A digital twin of a water distribution system by using graph convolutional networks for pump speed-based state estimation. *Water*, MDPI, v. 14, n. 4, p. 514, 2022. Citado na página 20.
- CALLCUT, M. et al. Digital twins in civil infrastructure systems. *Sustainability*, MDPI, v. 13, n. 20, p. 11549, 2021. Citado na página 21.
- CAMARINHA-MATOS, L. M.; FORNASIERO, R.; AFSARMANESH, H. Collaborative networks as a core enabler of industry 4.0. In: SPRINGER. *Working conference on virtual enterprises*. [S.l.], 2017. p. 3–17. Citado na página 1.
- CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S. A. d.; GOMES, H. P. Aplicação de técnicas fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 19, p. 67–77, 2014. Citado na página 6.

- CARVALHO JUNIOR, M. *Consumo e perdas no sistema de abastecimento de água de Guaratuba, Pontal do Paraná e Matinhos (Litoral do Paraná)*. Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Campus avançado Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 5.
- CASA, L. *Detectando Partes Humanas em Ambiente Não Controlados*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Citado na página 17.
- CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 113, p. 103130, 2019. Citado na página 8.
- COELHO, P. M. *Rumo à Indústria 4.0*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Citado na página 7.
- COLOMBO, A. W. et al. Industrial cyberphysical systems: A backbone of the fourth industrial revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 6–16, 2017. Citado na página 2.
- COSTA, N. L. d. *Uso e Estabilidade de Seletores de Variáveis Baseados nos Pesos de Conexão de Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação de Informática, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- COUTINHO, F. A. de B.; TIBA, C.; MELO, R. O. de. Modelagem de um sistema de bombeamento fotovoltaico utilizando redes neurais artificiais e comparativo com modelagem tradicional. In: *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 17.
- CURL, J. M. et al. Digital twins: the next generation of water treatment technology. *Journal-American Water Works Association*, John Wiley & Sons, Ltd Chichester, UK, v. 111, n. 12, p. 44–50, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.
- DALENOGARE, L. S. *A Indústria 4.0 no Brasil: Um Estudo dos Benefícios Esperados e Tecnologias Habilitadoras*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Citado na página 6.
- DEEPALI, V.; SANDIP, M. Investigating effect of pipe closure as pressure deficient condition on water distribution network using epanet. In: *2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7. Citado na página 1.
- FLORES, T. K. S. *Controle Adaptativo Utilizando o Critério da Máxima Correntropia Aplicado a um Sistema de Bombeamento de Água*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Citado na página 1.
- FORTLEV. *Catálogo Técnico: Caixa D'água FORTLEV*. Camaçari, BA, Brasil, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 27.

- FRANCO, D. J. et al. A review on current and old scada networks applied to water distribution systems. In: IEEE. *2019 First International Conference of Intelligent Computing and Engineering (ICOICE)*. [S.l.], 2019. p. 1–11. Citado na página 1.
- FURTADO, M. I. V. Redes neurais artificiais: uma abordagem para sala de aula. *Ponta Grossa, PR. Atena Editora*, 2019. Citado na página 19.
- 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 7.
- GRIEVES, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, Florida Institute of Technology, v. 1, n. 2014, p. 1–7, 2014. Citado na página 7.
- HALLA II, R. *Rede Neural Artificial para Análise de Parâmetros Cinemáticos no Polimento de Porcelanatos*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Citado na página 18.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. [S.l.]: Bookman Editora, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 11, 16 e 18.
- INCONTROL. *MEDIDOR DE VAZÃO ELETROMAGNÉTICO*. São Paulo, SP, Brasil, 2014. Citado na página 25.
- JAYAWARDANA, J. R.; BANDARANAYAKE, T. S. Analysis of optimizing neural networks and artificial intelligent models for guidance, control, and navigation systems. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, v. 3, n. 3, p. 743–759, 2021. Citado na página 20.
- 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 7.
- KSB. *Manual Técnico: Bomba em linha MEGAINÉ*. São Paulo, SP, Brasil, 2015. Citado na página 26.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, Elsevier, v. 3, p. 18–23, 2015. Citado na página 2.
- LERMER, M.; REICH, C. Creation of digital twins by combining fuzzy rules with artificial neural networks. In: IEEE. *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.], 2019. v. 1, p. 5849–5854. Citado na página 16.
- LOURENCETTI, F. H. *Estudo da reprodução do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água via redes neurais artificiais (RNAs)*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.

NATIONAL INSTRUMENTS. *NI-DAQmx Python Documentation*. 2021. Disponível em: <<https://nidaqmx-python.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 15 set. 2021. Citado na página 30.

NATIONAL INSTRUMENTS. *The Modbus Protocol In-Depth*. 2022. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>>. Acesso em: 18 abril 2022. Citado na página 31.

NATIONAL INSTRUMENTS. *USB-6229: Dispositivo de E/S multifunção*. 2022a. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6229.html>>. Acesso em: 26 jan. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 28.

NATIONAL INSTRUMENTS. *USB-6221: Dispositivo de E/S multifunção*. 2022b. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6221.html>>. Acesso em: 26 jan. 2022. Citado na página 28.

ORDÔNIO, M. V. C. d. S. *Brasil e China no Mundo 4.0: Uma Visão a Partir da Política Industrial*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Economia, Universidade Federal de Alagoas, Marceió, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

PEDERSEN, A. N. et al. Living and prototyping digital twins for urban water systems: towards multi-purpose value creation using models and sensors. *Water*, MDPI, v. 13, n. 5, p. 592, 2021. Citado na página 21.

PORTO FILHO, C. H. *Técnicas de Aprendizado Não Supervisionado Baseadas no Algoritmo da Caminhada do Turista*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação Interunidades de Bioengenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Citado na página 18.

PYMODBUS. *PyModbus - A Python Modbus Stack*. 2017. Disponível em: <<https://pymodbus.readthedocs.io/en/latest/readme.html>>. Acesso em: 18 abril 2022. Citado na página 31.

PYTHON. *What is Python? Executive Summary*. 2022. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/essays/blurb/>>. Acesso em: 26 jan. 2022. Citado na página 30.

RABELO, R. J.; MAGALHÃES, L. C.; CABRAL, F. G. Uma proposta de arquitetura de referência de gêmeo digital para sistemas ciberfísicos em um cenário de indústria 4.0. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Citado 5 vezes nas páginas 11, 2, 13, 14 e 36.

RANZAN, L. *Explicativas e Detecção de Inconformidade de Predição Aplicadas à Espectroscopia por Fluorescência*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 11, 18 e 19.

SALVINO, L. R. *Eficiência Energética em Sistemas Pressurizados de Distribuição de Água com o Uso de Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Citado na página 6.

- SANTOS, D. E. C. d. *Regressão e Deep Learning Aplicados em Modelagem de Árvore Individual para Eucalipto*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- SCADABR. 2017. Disponível em: <<http://www.scadabr.com.br/>>. Acesso em: 22 abril 2022. Citado na página 38.
- SCHROEDER, G. N. et al. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 49, n. 30, p. 12–17, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 2, 9 e 35.
- SILVA, F. R. M. d. *Implantação e Desenvolvimento de uma Rede de Automação Industrial e Sistema SCADA para Estação de Tratamento de Água Purificada*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Citado na página 6.
- SILVA, I. N. d.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. *Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas*. 2. ed. São Paulo, SP, Brasil: Artliber Editora Ltda., 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 19 e 20.
- SILVA, T. F. *Avaliação dos Impactos dos Fatores de Pré-Abate no Dripping Test de Frango Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- SINGH, K. *Real Time Digital Twin of Water Distribution Network*. 2019. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/real-time-digital-twin-water-distribution-network-keshvinder-singh/>>. Acesso em: 07 jan.2022. Citado na página 9.
- SOUSA, R. d. *Uso de Válvulas Redutoras de Pressão na Otimização de Redes Setorizada de Distribuição de Água*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017. Citado na página 6.
- 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 3 vezes nas páginas 11, 9 e 10.
- 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 7.
- TENSORFLOW. *Por que usar o TensorFlow*. 2022. Disponível em: <<https://www.tensorflow.org/about>>. Acesso em: 20 jun.2022. Citado na página 31.
- TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de água*. 3. ed. São Paulo: [s.n.], 2006. Citado na página 5.
- WANG, Y.; CAO, Y.; WANG, F.-Y. Anomaly detection in digital twin model. In: *IEEE. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. [S.l.], 2021. p. 208–211. Citado na página 8.

WEG. *FREQUENCY INVERTER MANUAL*. [S.l.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 29.

ZHANG, S. et al. A product quality monitor model with the digital twin model and the stacked auto encoder. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 113826–113836, 2020. Citado na página 16.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Springer, v. 10, n. 3, p. 1141–1153, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 13.

ZHU, Y. et al. A knowledge graph based construction method for digital twin network. In: IEEE. *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*. [S.l.], 2021. p. 362–365. Citado na página 16.

APÊNDICE A – Endereço de Memórias da Comunicação Modbus TCP/IP

Tabela 10 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Bobina(*Coil Status*).

Bobina(Coil Status)		
Offset	Endereço	Função
0	0x00	Iniciar Medições
1	0x01	Habilitar Atualização
2	0x02	Habilitar Predição da Pressão
3	0x03	Embaralhamento dos Dados dos Modelos Digitais
4	0x04	Habilitar a Criação de Novos Modelos

Tabela 11 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Entrada Discreta(*Input Status*).

Entrada Discreta (Input Status)		
Offset	Endereço	Função
0	0x00	Alerta de Comunicação com a Planta Física
1	0x01	Alerta de Início das Medições
2	0x02	Alerta de Entrada Excedida
3	0x03	Alerta de Pressão Elevada
4	0x04	Alerta de Processamento das Entradas
5	0x05	Alerta de Modelo Digital Atualizado

Tabela 12 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Registrador *Holding*.

Registrador Holding		
Offset	Endereço	Função
0	0x00	Entrada do CMB
2	0x02	Entrada da CV1
4	0x04	Entrada da CV2
6	0x06	Entrada da CV3
8	0x08	Limite da Entrada do CMB
10	0x0a	Limite da Entrada da CV1
12	0x0c	Limite da Entrada da CV2
14	0x0e	Limite da Entrada da CV3
16	0x10	Atraso do Modelo Digital
18	0x12	MAPE do PT3 para Atualização
20	0x14	MAPE do PT5 para Atualização
22	0x16	Tipo dos Dados para Atualização do Gêmeo Digital (0 - Novos Dados/1 - Novos e Antigos Dados)
24	0x18	Taxa de Atualização das Amostras
26	0x1a	Valor Mínimo da Pressão na Tubulação
28	0x1c	Valor Máximo da Pressão na Tubulação
30	0x1e	Número de Épocas para Treinamento do Modelo Digital

Tabela 13 – Tabela com informações dos endereços de memória na faixa de registro Registrador de entrada (*Input Register*).

Registrador de entrada (Input Register)		
Offset	Endereço	Função
0	0x00	PT1 Planta Física
2	0x02	PT2 Planta Física
4	0x04	PT3 Planta Física
6	0x06	PT4 Planta Física
8	0x08	PT5 Planta Física
10	0x0a	FT1 Planta Física
12	0x0c	FT2 Planta Física
14	0x0e	CV1 Planta Física
16	0x10	CV2 Planta Física
18	0x12	CV3 Planta Física
20	0x14	CMB Modelo Digital
22	0x16	CV1 Modelo Digital
24	0x18	CV2 Modelo Digital
26	0x1a	CV3 Modelo Digital
28	0x1c	PT3 Modelo Digital
30	0x1e	PT5 Modelo Digital
32	0x20	PT3 Valor Máximo da Predição
34	0x22	PT5 Valor Máximo da Predição
36	0x24	MAPE do PT3 dos Dados da Última Medição
38	0x26	MAPE do PT5 dos Dados da Última Medição
40	0x28	EQM do PT3 dos Dados da Última Medição
42	0x2a	EQM do PT5 dos Dados da Última Medição
44	0x2c	EQM do Modelo Digital Antes da Atualização
46	0x2e	EQM do Modelo Digital Após da Atualização