UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ VINÍCIUS SANTOS DE ARAÚJO

MONITORAMENTO E CONTROLE DE PRESSÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO IOT E CONTROLE FUZZY

JOÃO PESSOA
2021

JOSÉ VINÍCIUS SANTOS DE ARAÚJO

MONITORAMENTO E CONTROLE DE PRESSÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO IOT E CONTROLE FUZZY

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como requisito complementar para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do professor Dr. Juan Moisés Maurício Villanueva.

João Pessoa
2021

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

A663m Araújo, José Vinícius Santos de.
MONITORAMENTO E CONTROLE DE PRESSÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO IOT E CONTROLE FUZZY / José Vinícius Santos de Araújo. - João Pessoa, 2021.
80 f. : il.

Orientação: Juan Villanueva.
TCC (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Fuzzy. 2. ESP8266. 3. ScadaLTS. 4. Python. 5. Controle. 6. Pressão. I. Villanueva, Juan. II. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 621.3(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-CRB-15 - 198

JOSÉ VINÍCIUS SANTOS DE ARAÚJO

MONITORAMENTO E CNTROLE DE PRESSÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO IOT E CONTROLE FUZZY

Trabalho de conclusão de curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Assinatura: _____

Prof. Juan Moises Mauricio Villanueva

(Orientador)

Assinatura: _____

Prof.

Documento assinado digitalmente

gov.br

ADEMAR VIRGOLINO DA SILVA NETTO

Data: 12/12/2021 09:20:26-0300

Verifique em https://verificador.iti.br

Assinatura: _____

Prof. Carlos Alberto de Souza Filho

Documento assinado digitalmente

gov.br

CARLOS ALBERTO DE SOUZA FILHO

Data: 13/12/2021 16:32:39-0300

Verifique em https://verificador.iti.br

Assinatura: _____

MSc. Altamar Alencar Cardoso

João Pessoa, 02 de dezembro de 2021.

Dedico àqueles que vêm me apoiando ao longo da vida facilitando a minha caminhada. Em especial, aos meus pais Braz e Neves e meu irmãozão Jônatas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me proporcionar saúde, clareza e uma família maravilhosa que me deu todo o suporte necessário para conquistar um diploma universitário. Em especial aos meus pais José Braz e Maria das Neves que sempre acreditaram e lutaram para que a gente tivesse a capacidade de sermos independentes e correr atrás de nossos sonhos.

Agradeço ao meu irmão Jônatas, o melhor parceiro que eu poderia ter ao longo dessa caminhada para a vida adulta, sempre um apoiando ao outro nos momentos difíceis, estudando juntos os assuntos em comum e compartilhando todos os momentos felizes.

Agradeço também a todos meus familiares que não deixaram a gente desamparados nem por um instante enquanto nossos pais estavam morando longe. A todas as minhas tias e avó que agiram como uma mãe pra mim.

Muito obrigado a todos os professores que participaram desta caminhada até o final do curso, a todas os desafios oferecidos em cada disciplina e principalmente o conhecimento por eles proporcionados. Em especial agradeço ao meu professor orientador Juan por ter sido o primeiro influenciador para eu ter escolhido a ênfase de controle e automação e também por ter aberto as portas dos diversos programas acadêmicos que a universidade proporciona, sendo orientador de monitoria, pesquisa e por fim estágio e TCC.

Agradecimento também as amizades realizadas ao longo do curso que ajudaram a tornar essa caminhada mais leve e divertida, em especial a Josman e Carol que além de amigos para a vida foram as principais parcerias de projetos acadêmicos, aos amigos da ênfase e os amigos de outros cursos como Renan, Abimael, Dudu, Matheus, Gabrielle, Lillian e Vicente que tornaram os dias melhores e mais leves. Todos esses e outros não citados contribuíram de alguma forma para meu desenvolvimento.

E claro, agradecimento a Márcio e toda a equipe da Cagepa pela amizade e confiança depositada em mim!

RESUMO

As perdas hidroenergéticas inerentes à sistemas de abastecimento de água é uma problemática frequente pela qual as concessionárias de água sofrem todos os dias. O controle da pressão da rede é fundamental para a diminuição dessas perdas proporcionando abastecimento de qualidade aos consumidores, economia de energia elétrica e a preservação das tubulações por excesso de pressão. No entanto, para obter esses benefícios é necessário superar algumas dificuldades como fazer o sensoriamento de pressão de unidades consumidoras geograficamente distantes, desenvolver de uma lógica de controle que seja capaz de fazer uso dos dados destes sensores e que seja uma solução viável de bom custo-benefício. Nesse contexto, esse trabalho tem o propósito de desenvolver um sistema de monitoramento e controle de pressão para redes de abastecimento de água, utilizando o microcontrolador ESP8266 para coleta de dados advindo de sensores de pressão para o sistema supervisório ScadaLTS integrado, via API REST, a uma solução de controle por lógica *fuzzy* desenvolvido em *Python.*

Palavras-chave: Fuzzy, ESP8266, ScadaLTS, Python, Controle, Pressão.

ABSTRACT

As hydroenergetic losses inherent to water supply systems, it is a frequent issue by which water utilities supply every day. The control of network pressure is essential to reduce these losses, providing quality supply to consumers, saving electricity and preserving piping from excess pressure. However, to obtain these benefits it is necessary to overcome some difficulties such as sensing the pressure of geographically distant consumer units, developing a control logic that is capable of making use of the data from these sensors and at the same time being a good solution cost benefit. Therefore, this work has the purpose of developing a pressure monitoring and control system for water supply networks, using the ESP8266 microcontroller to collect data from pressure sensors for the integrated ScadaLTS supervisory system, via REST API, a fuzzy logic control solution developed in Python.

Keywords: Fuzzy, ESP8266, ScadaLTS, Python, Control, Pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de Abastecimento de Água 16
Figura 2: Altura Estática..... 17
Figura 3: Curva do sistema..... 18
Figura 4: Dinâmica do consumo diário de água..... 19
Figura 5: Ação da válvula sobre a curva do sistema. 20
Figura 6: Operação eficiente de um sistema hidráulico 21
Figura 7 Impacto da variação da rotação na bomba. 22
Figura 8: Sistema de Monitoramento. 23
Figura 9: Estrutura de comunicação do Modbus RTU. 26
Figura 10 Pacote de dados Modbus RTU. 28
Figura 11 Pacote de dados Modbus RTU. 28
Figura 12: Configurações do Modbus TCP com o servidor. 29
Figura 13: RNA Perceptron simplificada. 32
Figura 14: Funções de Ativação para RNAs. 32
Figura 15: Rede Perceptron Multicamadas. 32
Figura 16: Sistema de Controle em Malha Aberta. 34
Figura 17: Sistema em Malha Fechada. 35
Figura 18: Espectro de cores. 37
Figura 19: Função de Pertinência Trapezoidal. 38
Figura 20: Exemplo de Fuzzyficação. 39
Figura 21: Mapa da rede de abastecimento do R12. 43
Figura 22: Transdutor de pressão. 44
Figura 23: Circuito de condicionamento para medição de pressão pela ESP 8266. 44
Figura 24 Relação entre a pressão medida e seu respectivo valor convertido para digital. 45
Figura 25: Válvula elétrica do tipo borboleta. 45
Figura 26: Conjuntos motobomba: Disposição em campo. 46
Figura 27 Compensação do R12 46
Figura 28: Apoiados do R12 47
Figura 29: Inversores de frequência do R12 47
Figura 30: Quadro de comando do R12 48
Figura 31: Esquemático da EEA do R12..... 49

Figura 32 Esquemático da comunicação entre o ScadaLTS e os inversores de frequência. ... 51
Figura 33: Pressão medida nas unidades consumidoras. Azul: Unidade consumidora nº1; Vermelho: Unidade consumidora nº2 52
Figura 34: Diagrama de Blocos do controle fuzzy do processo 53
Figura 35: Conjuntos Fuzzy: a) Erro; b) Diferença do erro e c) Incremento de frequência.... 55
Figura 36: Comportamento desejado do sistema 56
Figura 37: Superfície de relação entre as entradas e saídas das variáveis fuzzy 57
Figura 38: Diagrama da metodologia proposta 58
Figura 39: Relação de entradas x saídas da RNA 59
Figura 40: Resultado da simulação do modelo mal sucedido: a) Simulação de pressão e b) Simulação de frequência 61
Figura 41: Relação de entradas x saídas da RNA 62
Figura 42: Curva adimensional de consumo genérico. 62
Figura 43: Comparação entre a simulação e os dados reais: a) Pressão; b) Frequência 63
Figura 44: Relação de entradas x saídas da RNA 64
Figura 45: Comparação entre a pressão estimada pela RNA e a pressão real 65
Figura 46: Pressão controlada prevista pela RNA 66
Figura 47: Frequência simulada baseado na referência de pressão 66
Figura 48 Comparação Pressão Simulada x Pressão Real 67
Figura 49: Comparação Frequência Simulada x Frequência Real 67
Figura 50 Teste de Sombreamento entre o controle vigente e o nebuloso 69
Figura 51: Pressão na rede produzida pelo controle vigente 69
Figura 52: Controle Fuzzy em operação, 1ºdia. 70
Figura 53: Controle de pressão via Fuzzy, 1ºdia 71
Figura 54: Controle Fuzzy em operação, 2ºdia 72
Figura 55: Controle de pressão via Fuzzy, 2ºdia. 73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 11

1.1 Motivação..... 11

1.2 Objetivos..... 12

1.2.1 Objetivo Geral..... 12

1.2.2 Objetivos Específicos..... 13

1.3 Estrutura do Trabalho..... 13

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 15

2.1 Sistema de abastecimento de água..... 15

2.1.1 Curva característica do sistema..... 17

2.1.2 Curva característica das bombas..... 20

2.1.3 Inversores de Frequência..... 22

2.2 Sistema de monitoramento e supervisão..... 22

2.2.1 SCADALTS..... 24

2.2.2 Dispositivos IoT..... 25

2.2.3 Protocolo Modbus RTU e Modbus TCP..... 26

2.2.3.1 Pacote de dados..... 27

2.2.4 Protocolo HTTP..... 30

2.3 Modelagem do sistema..... 31

2.3.1 Redes Neurais Artificiais..... 31

2.4 Sistema de controle..... 34

2.4.1 Lógica *fuzzy*..... 36

2.4.1.1 Conjuntos *fuzzy*..... 37

2.4.1.2 Funções de pertinência..... 38

2.4.1.3 Variáveis Linguísticas..... 38

2.4.1.4 Fuzzyficação..... 39

2.4.1.5 Regras *fuzzy*..... 40

2.4.1.6 Defuzzyficação..... 40

3 MATERIAIS E MÉTODOS..... 42

3.1 Descrição do Problema: Estação Elevatória de Água R12..... 42

3.2 Materiais..... 43

3.3 Métodos..... 49

3.3.1 Utilizando recursos do SCADALTS..... 50

3.3.2 Modelagem do processo utilizando Redes Neurais Artificiais..... 52

3.3.3 Desenvolvimento do controle *fuzzy* em *Python*..... 53

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 58

4.1 Análise do controle sobre o modelo em RNA..... 59

4.2 Analise do controle sobre a EEA R12..... 68

5 CONCLUSÕES..... 75

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 77

1. INTRODUÇÃO

Nesta seção será feita uma introdução a respeito das dificuldades enfrentadas pelas empresas de abastecimento de água no fornecimento deste recurso essencial para a população, ressaltando as vantagens da utilização de sistemas supervisórios, tecnologias *IoT* (*Internet of Things*) e controles modernos associados a inversores de frequência como solução para otimizar a operação.

1.1 Motivação

As perdas hidroenergéticas inerentes à sistemas de abastecimento de água (SAA) é um tema de alta relevância, devido à grande quantidade de água consumida para bombeamento e as elevadas perdas de água (SILVA, 2020), principalmente considerando um contexto de escassez hídrica e de altos custos de energia elétrica (SNIS, 2018). Segundo relatório do SNIS de 2018, as perdas de água na distribuição, isto é, a diferença entre o volume produzido e o consumido, no Brasil é de aproximadamente 38,5%. No Nordeste as perdas alcançam média de 46%.

Em consonância com as elevadas perdas do sistema, o aumento de tamanho e complexidade das redes de distribuição de água têm exigido grandes esforços no âmbito técnico, organizacional e financeiro das empresas de saneamento (CAMBOIM ET.AL, 2014). Desse modo, as empresas de saneamento básico têm sofrido fortes pressões para a redução de gastos e aumento na qualidade do serviço prestado, especialmente no Brasil após a sanção do novo Marco Legal do Saneamento Básico que exigirá que condições estruturais e padrões de qualidade adequados do serviço prestado (BRASIL, 2020).

Nesse cenário, ações que visam minimizar os prejuízos relacionados a ineficiente gestão do transporte de água mostram-se fundamentais e urgentes, sobretudo na aplicação e modernização de sistemas de controle e monitoramento capazes de otimizar as decisões operacionais. Implementação e ampliação de sistemas *SCADA* (*Supervisory, Control And Data Acquisition*), tecnologias *IoT* (*Internet of Things*) de baixo custo, modelagem do sistema via IA (Inteligência Artificial) e controles modernos são algumas das ações que podem fornecer maior eficiência operacional.

Segundo Tsutiya (2008) o controle de pressão é fundamental para a redução das perdas reais de água em um Sistema de Abastecimento de Água (SAA), por ser o principal

fator que influencia o número de vazamentos e a vazão desses vazamentos. O controle de pressão também contribui para a redução do consumo energético do sistema, uma vez que os conjunto motobomba não necessitam operar sempre a plena carga devido a dinâmica variável do consumo hídrico ao longo do dia.

Nesse contexto, um grande desafio para controlar a pressão hidrostática em redes de abastecimento de água refere-se a distância entre os sensores (relés de nível, macromedidores de vazão, sondas hidrostáticas e outros) e os atuadores do processo (conjuntos motobomba, inversores de frequência e válvulas) que dificulta relacioná-los fisicamente via cabeamento. Muitas vezes, uma estação elevatória de água está a mais de 3 km de uma de suas zonas de influência.

Dessa maneira, a utilização de protocolos industriais de padrão de meio físico Ethernet juntamente de tecnologias *IoT* de baixo custo se apresentam como uma boa alternativa para unir os elementos do processo de controle, tendo em vista que a internet se tornou um recurso abundante e barato na sociedade atual o que possibilita o envio e recebimento de dados de praticamente qualquer lugar do mundo a baixo custo.

Diante de tais considerações, esse trabalho tem o propósito de desenvolver um sistema de monitoramento e controle de pressão para redes de abastecimento de água, utilizando o microcontrolador ESP8266 para coleta de dados advindo de sensores de pressão para o sistema supervisório ScadaLTS, integrado via API REST a uma solução de controle por lógica *fuzzy* desenvolvido em *Python.*

1.2 Objetivos

Neste tópico será pontuado os objetivos propostos por este trabalho, começando pelo objetivo geral e depois os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor uma solução de monitoramento e controle de baixo custo de uma rede de abastecimento de água, utilizando o ScadaLTS como sistema supervisório, ESP8266 e sensores de pressão hidrostáticos para coleta de dados da rede hidráulica e lógica *fuzzy* desenvolvida em *Python* para controle, com a finalidade de garantir uma pressão adequada para os consumidores e a saúde das tubulações.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Monitorar a pressão hidrostáticas dos consumidores em uma rede de abastecimento de água utilizando o microcontrolador ESP8266;
- Implementar o protocolo Modbus TCP no controlador da Siemens;
- Modelar uma rede de abastecimento de água através de redes neurais artificiais;
- Simular o controle de velocidade de rotação de conjuntos motobomba no modelo criado;
- Enviar dados do Python para o ScadaLTS via protocolo HTTP;
- Coletar dados de monitoramento do ScadaLTS para o Python via API REST;
- Controlar a pressão de unidades consumidoras de 2 pontos da rede através do controle da velocidade de rotação de conjuntos motobomba via lógica *fuzzy;*
- Implementação de um sistema de controle fuzzy baseado em um conjunto de regras obtidos por especialistas e no modelo criado em redes neurais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Além deste capitulo introdutório, este trabalho contém mais 5 capítulos os quais estão organizados da seguinte maneira:

No capítulo 2 será desenvolvido a fundamentação teórica contextualizando o funcionamento geral de um sistema de abastecimento de água, como é o comportamento de uma rede hidráulica e os elementos que influenciam a pressão da rede. Além disso, será contextualizado os demais recursos que são utilizados no trabalho como o ScadaLTS, modelagem com Redes Neurais Artificiais, monitoramento via ESP8266 e detalhadamente sobre a lógica *fuzzy*.

No capítulo 3 será apresentado o cenário do estudo de caso para qual foi implementado a solução proposta pelo trabalho, contextualizando sobre os equipamentos presentes em campo e seus impactos sobre a dinâmica do sistema de abastecimento de água.

Além disso, será mostrado o passo a passo da aplicação mostrando como cada etapa interage com a outra, isto é, como os dados interagem com o ScadaLTS, como o *Python* interage com o ScadaLTS e como o ScadaLTS interage com os equipamentos de campo.

No capítulo 4 serão apresentados os resultados da aplicação da solução em *Python*, primeiramente sobre um modelo desenvolvido com Redes Neurais Artificiais e finalmente aplicando na rede de distribuição de água.

No capítulo 5 chega-se ao fim do trabalho, onde é feito um saldo da contribuição do trabalho para as esferas acadêmica e empresarial, revisitando os principais pontos positivos e negativos da solução e a direção que os próximos trabalhos podem estar seguindo para ampliar os benefícios obtidos. Por fim, no capítulo 6 tem-se a finalização do trabalho com as referências bibliográficas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será realizada a fundamentação teórica dos elementos e recursos que são explorados por este trabalho, começando por definir um sistema de abastecimento de água, seus componentes, seu funcionamento e as principais dificuldades inerentes as redes de abastecimento de água, descrevendo algumas das soluções que pesquisas têm proposto para otimizar a eficiência da rede.

Posteriormente, será descrito sobre os elementos do sistema de monitoramento que estão sendo utilizados como ferramenta para cumprimento de uma das etapas do trabalho, descrevendo a respeito do sistema supervisório ScadaLTS, da placa de desenvolvimento para aplicações em *IoT* ESP8266 e dos protocolos de comunicação Modbus RTU e Modbus TCP e o protocolo de internet HTTP.

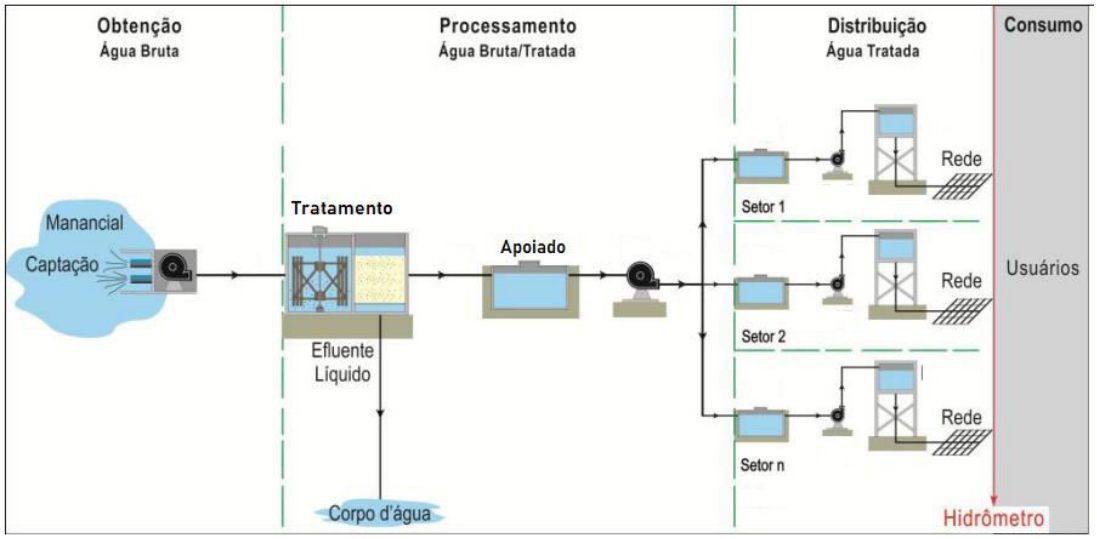
Em seguida, será abordado de maneira mais direta sobre redes neurais artificiais e sua capacidade de aprender padrões de comportamento através de dados e, por fim, será abordado sobre os sistemas de controle de maneira geral, características dos principais tipos de controle e os mais utilizados em redes de abastecimento de água e especificamente do controle *fuzzy* e seus componentes.

2.1 SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O Sistema de Abastecimento de Água é composto por estruturas, equipamentos e dispositivos que têm como finalidade fornecer água com qualidade, quantidade e regularidade adequadas de modo que atenda as demandas dos usuários, segundo os padrões requeridos para o consumo (PEREIRA & CONDURÚ, 2014).

Para a entrega da água aos consumidores, o transporte de água atravessa por 3 etapas as quais compreendem a obtenção, o processamento e a distribuição. Na obtenção é retirado e transportado a água bruta de mananciais para as unidades de processamento, sendo constituído por unidades específicas de captação, elevação e adução de água bruta; estando nas unidades de processamento, a água é tratada para estar apta as exigências da parte consumidora (domiciliar, industrial, comercial, etc.), sendo constituído por unidades de tratamento, reservação, elevação e adução de água tratada e, por fim, o setor de distribuição é responsável por entregar a água tratada para os consumidores (PEREIRA & CONDURÚ, 2014). É ilustrado na Figura 1 essas 3 etapas.

Figura 1 - Sistema de Abastecimento de Água.



Fonte: PEREIRA & CONDURÚ, 2014 adaptado.

Concentrando-se na etapa de distribuição de água tratada, de acordo com PEREIRA & CONDURÚ (2014) os elementos que compõem o setor de distribuição de água são compreendidos pela Elevatória de Água Tratada (EAT), o reservatório apoiado, o reservatório elevado e a rede de distribuição de água.

O reservatório apoiado é normalmente enterrado e que, como o próprio nome sugere, tem a função de apoio no sistema de distribuição, atuando como uma reserva extra de água tratada sendo essencial em momentos que o volume de água requerido pela demanda da rede é maior do que o volume afluente.

Nas EATs estão presentes os conjuntos motobomba que recalcam água do reservatório apoiado até o reservatório elevado, a qual por sua vez abastece as unidades consumidoras. No entanto, em algumas situações a água é bombeada diretamente para as unidades consumidoras sendo requerido uma avaliação de desempenho hidro-energético mais rigorosa.

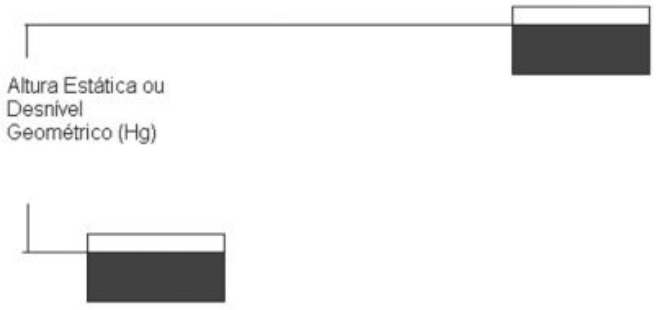
Desse modo, parte do sucesso e da eficiência do sistema de distribuição de água passam pelo conhecimento das características da rede de distribuição e dos conjuntos motobomba, os quais devem estar equalizados de acordo com as pressões estabelecidos pela norma ABNT NBR 12218/1994 que exige que a pressão mínima da rede seja de pelo menos 10 mca e de no máximo 50mca.

2.1.1 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA

De maneira geral, quando é considerado um sistema formado por uma ou várias tubulações e a vazão que flui por ele, é comum representar em um gráfico a variação da perda de carga em função da vazão, dominando esse gráfico de curva do sistema (ELETROBRÁS, 2005). Matematicamente, a curva do sistema é o somatório das perdas de carga estáticas e dinâmicas as quais variam de acordo com certas circunstâncias particulares como a diferença de cota entre o ponto de fornecimento e o de consumo de água e de características da tubulação como a presença de estreitamentos, válvulas, mudanças de direção, etc.

As perdas de cargas estáticas referem-se a altura geométrica a qual água deve ser bombeada para superar a diferença de cota de um ponto A para um ponto B. A altura geométrica é independente da vazão e, portanto, é um valor constante sendo por isso também chamado de altura estática. É ilustrada na Figura 2 o conceito de altura estática.

Figura 2 - Altura estática.



Fonte: ELETROBRAS, 2005.

As perdas de cargas dinâmicas são separadas em perdas de carga distribuídas e perdas de carga localizadas: a primeira refere-se a perdas que se dá ao longo das tubulações de forma contínua; a segunda refere-se a perda que ocorre devido em pontos que apresentam descontinuidades na perda distribuída, ou seja, em pontos em que é provocado um atrito significativamente maior do que o provocado por um escoamento contínuo.

Juntando as perdas de carga dinâmicas e a perda de carga estática, tem-se a Equação (1) para modelagem da curva do sistema, onde HMT é a altura manométrica total, H_G é a altura geométrica, h_p é a perda de carga distribuída e h_L é a perda de carga localizada:

$$HMT = H_G + h_p + h_L \tag{1}$$

Devido as caraterísticas quadráticas das cargas dinâmicas e das perdas de carga distribuídas costumarem ser muito maiores que as perdas de cargas localizadas, é muito comum generalizar a Equação (1) para uma versão mais simplificada, a qual se despreza as perdas de carga localizada, conforme pode ser observada pela Equação (2), onde Q é a vazão volumétrica e α_1 é deduzido a partir da equação de carga distribuída de Darcy-Weisbach apresentado na Equação (3).

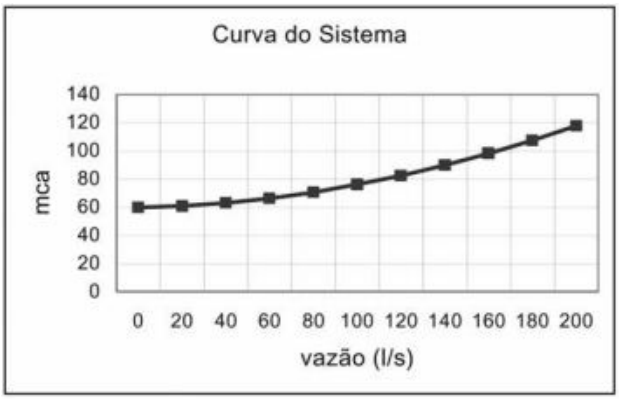
$$HMT = H_G + \alpha_1 \cdot Q^2 \tag{2}$$

Equação de perda de carga distribuída de Darcy-Weisbach, em que *L* é o comprimento e *D* o diâmetro da tubulação, *g* a aceleração da gravidade, *f* um fator que modela o estado de conservação das paredes internas da tubulação e *p* a razão entre comprimento da circunferência interna da tubulação e o diâmetro:

$$h_p = \overbrace{\frac{8 \cdot f \cdot L}{p^2 \cdot g \cdot D^5}}^{\alpha_1} \cdot Q^2 \tag{3}$$

Dessa maneira, uma representação gráfica das cargas do sistema pode ser criada e estudada para melhor projetar os conjuntos motobombas necessários que atendem as características do sistema, conforme ilustração da Figura 3.

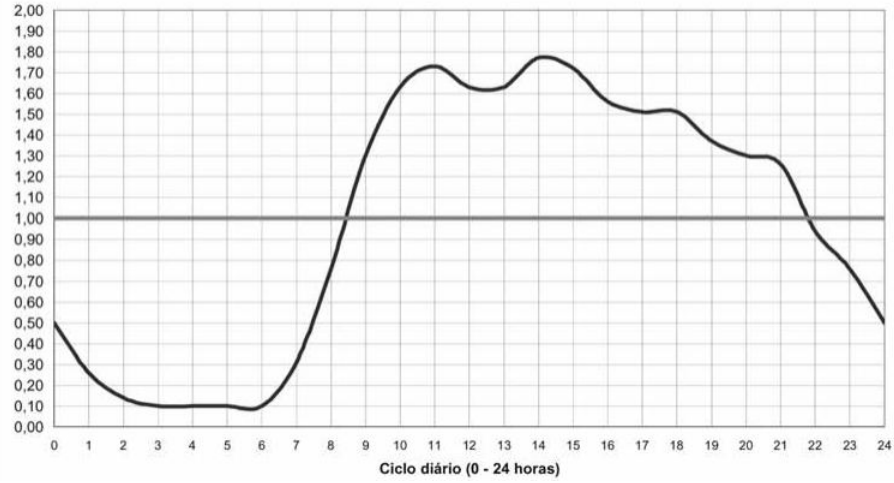
Figura 3 - Curva do sistema.



Fonte: ELETROBRAS, 2005.

A curva apresentada na Figura 3 refere-se ao um comportamento típico do sistema. Ao longo do dia seu ponto de operação varia de acordo com a dinâmica do consumo, apresentando grandes diferenças entre os horários de pico e os de baixo consumo, conforme pode ser visto na Figura 4.

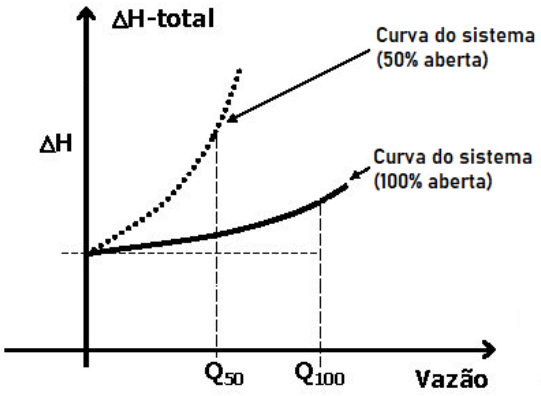
Figura 4 - Dinâmica do consumo diário de água.



Fonte: Eletrobras, 2005.

Essa volatilidade do comportamento do sistema, implica a necessidade de se regular as ações do abastecimento, de modo a evitar o excesso ou a deficiência de volume de água que percorre as tubulações, diminuindo rompimentos e a interrupção do abastecimento. Uma das ações que alteram o comportamento do sistema é a utilização de válvulas redutoras de pressão (VRP), que aumentam a pressão manométrica total do sistema, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Ação da válvula sobre a curva do sistema.



Fonte: Autor.

Apesar da ação de válvulas permitir a adequação da curva do sistema para a redução da pressão na rede, sua utilização deve ser feita de maneira moderada, tendo em vista que aumentar a altura manométrica total da rede discriminadamente diminui a eficiência energética do abastecimento.

Sendo assim, uma maneira mais eficiente de atender a demanda dinâmica dos consumidores é através da variação da rotação da bomba, que permite aumento ou diminuição no fornecimento de água sem aumentar a altura manométrica total do sistema.

Na subseção 2.1.2, que será abordada logo a seguir, será explicado mais detalhadamente as características da bomba e como ela interage com o sistema ao ter sua rotação variada e na subseção 2.1.3 sobre a utilização de inversores de frequência e suas vantagens.

2.1.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA

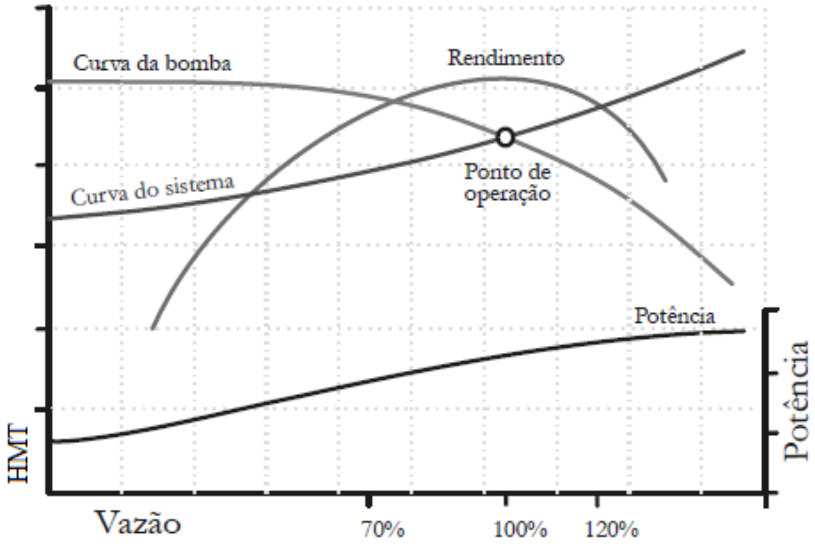
Uma vez que se conhecesse a curva do sistema, torna-se mais eficiente o processo de escolha dos conjuntos motobomba que serão utilizados para atender a demanda dos consumidores, tendo em vista que os catálogos dos fabricantes de bombas hidráulicas também fornecem a curva de vazão versus pressão que a bomba é capaz de fornecer sendo apenas necessário, portanto, cruzar a curva do sistema com a curva da bomba para que ambos funcionem de maneira equalizada.

Dessa maneira, baseado na curva do sistema é possível calcular, utilizando a Equação 4, qual será a potência hidráulica necessária aplicada por uma bomba para deslocar água (peso específico da água representado pela letra γ) numa taxa Q (vazão) entre dois pontos cuja diferença de energia é HMT.

$$P = \gamma \cdot Q \cdot HMT \tag{4}$$

Para que se obtenha um funcionamento ótimo do ponto de vista elétrico, é muito importante que a escolha da bomba considere que esta deva operar na maior parte do tempo próximo ao seu ponto de máximo rendimento. Desse modo, o ponto de cruzamento da curva do sistema com a curva da bomba deve ocorrer na região ótima do rendimento da bomba, conforme pode ser observado pela Figura 6.

Figura 6 - Operação eficiente de um sistema hidráulico Vazão x HMT.



Fonte: BEZERRA et. al, 2010.

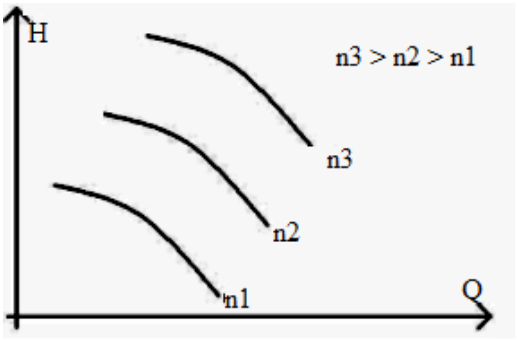
Aliado ao ponto de máximo rendimento da bomba, é importante determinar a potência de saída do conjunto motobomba, considerando tanto o rendimento da bomba quanto do motor. Nesse caso, a Equação 4 evolui para a Equação 5 sendo adicionado aos cálculos o rendimento da bomba e do motor representados por η_b e η_m, respectivamente.

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot HMT}{\eta_b \cdot \eta_m} \tag{5}$$

Através da Equação 5 torna-se possível determinar potência consumida pelo conjunto motobomba. No entanto, como citado na subseção 2.1.1, há momentos em que o sistema necessita de um volume de água menor, considerando que a demanda de água é variável ao longo do dia, o que torna desperdício de energia elétrica operar com a bomba a máxima velocidade. Dessa maneira, através do uso de variadores de frequência, é possível economizar energia fazendo o conjunto motobomba operar a uma velocidade inferior sem abrir mão na qualidade do abastecimento.

Essa mudança na velocidade de rotação da bomba, provoca um deslocamento na curva vazão versus pressão da bomba, proporcionando adaptação às necessidades da rede, evitando excessos no fornecimento e diminuindo transtornos de interrupção do abastecimento devido a vazamentos. É ilustrado graficamente na Figura 7 o comportamento da curva da bomba com regulação na velocidade de rotação, sendo representado pela variável n.

Figura 7 - Impacto da variação da rotação na bomba.



Fonte: Eletrobrás, 2005.

2.1.3 Inversores de Frequência

O equipamento variador de velocidade citado na subseção 2.1.2 que é capaz de alterar a velocidade de rotação do conjunto motobomba é o inversor de frequência, também denominado de conversor de frequência. Esse equipamento, além de controlar a velocidade de rotação de um motor, vem embarcado com uma série de utilidades atuando como dispositivo de proteção para problemas como desbalanceamento entre fases, sobrecarga, queda de tensão, entre outros, possibilitando controle do motor também pelo torque, proporcionando partida suave e redução de consumo de potência reativa através da filtragem de harmônicos (SILVA, 2011).

Segundo Rodrigues (2007) a utilização de inversores de frequências pode evitar desperdícios ao melhorar o controle operacional do sistema e segundo Camboim et. al (2014) o uso de inversores de frequência têm se tornado unânime.

Dessa forma, muitas pesquisas tem estudado a utilização de inversores de frequência para fazer o controle de pressão na rede de abastecimento, muitos com ênfase na eficiência energética como em Camboim et. al (2014), Moura et. al (2017) e Diniz et. al (2019). Ainda há trabalhos estudando a utilização de inversores para elevatórias de esgoto como o de Sebastião (2017).

2.2 Sistemas de Monitoramento e Supervisão

Um sistema supervisório é um ingrediente essencial para a obtenção da eficiência de um processo industrial permitindo, através da coleta de dados realizados por dispositivos de

aquisição de dados, que informações das instalações físicas (também referida como plantas) sejam monitoradas e rastreadas (COELHO, 2010).

Também conhecidos como sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), os sistemas supervisórios, por meio de tecnologias de computação e comunicação, conseguem agrupar dados coletados dos mais variados equipamentos de campo, ainda que estes estejam dispersos geograficamente, e apresentá-los de maneira amigável para o operador por meio de recursos gráficos e conteúdo multimídia.

Dessa maneira, um sistema de monitoramento e supervisão é composto de três elementos básicos: o SCADA que está no topo da pirâmide agrupando, atuando e fornecendo visualização dos dados e informações coletados; os dispositivos de aquisição que são responsáveis por extrair os dados dos equipamentos de campo e enviar estes dados para o sistema SCADA; e por fim os equipamentos de campo que mensuram e atuam sobrem as variáveis do processo. Esse sistema é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Sistema de Monitoramento.

Fonte: Autor.

Nas subseções seguintes será detalhado o funcionamento das camadas do sistema de monitoramento, começando pela camada mais alta explicando pela opção da utilização do ScadaLTS como sistema SCADA, realçando seus pontos positivos; na subseção seguinte será explanado sobre os dispositivos de aquisição utilizados, o ESP8266 e o controlador da SIEMENS da linha S7-1200 que além de ter sido utilizado para funções de controle abordado em seções mais avançadas, foi utilizado como *gateway* de Modbus TCP para RTU, protocolos industriais que serão detalhados mais a frente, a fim de se comunicar com os equipamentos de

campo e, por fim, sobre os protocolos de comunicação que são utilizados entre as camadas do sistema de monitoramento.

2.2.1 ScadaLTS

O ScadaLTS é um sistema supervisório, originado de uma ramificação do supervisório brasileiro de código aberto ScadaBR, como solução para aplicações de processos de automação. Foi desenvolvido em Java, sendo capaz de rodar em qualquer sistema operacional, com interface 100% *web* que permite acesso e controle de dispositivos e processos através de computadores, tablets e smartphones.

Possui diversos recursos disponíveis, as quais estão listados a seguir, baseado no site dos desenvolvedores (ScadaLTS e ScadaBR):

- *Engine* de alarmes e eventos parametrizáveis;
- Alarmes sonoros;
- Sistema de permissões por usuários;
- Relatórios de variáveis, alarmes e eventos;
- *Engine* de "*scripts*" para controle e automação.
- Aquisição de dados em mais de 20 protocolos como: Modbus TCP/IP e Serial, OPC, DNP3, IEC, Serial ASCII, HTTP;
- Variáveis calculadas (com funções matemáticas, estatísticas, e lógica em geral);
- Visualização de dados (variáveis ou "tags") em tempo-real;
- Registro contínuo das variáveis em Banco de Dados (*Datalogger*);
- Construção de telas gráficas (HMI ou Sinópticos).

Além disso, para aquisição de dados, o ScadaLTS conta com mais de 20 protocolos de comunicação como Modbus TCP/IP, Modbus RTU, BACNET, DNP3, IEC 101, OPC DA, ASCII Serial, HTTP *Listerners* e *Receivers* entre outros. Todos esses recursos são comuns entre o ScadaBR e o ScadaLTS. No entanto, o ScadaLTS possui um destaque importante, que se refere a possibilidade de interação com os dados via API REST.

Uma API (tradução literal para Interface de Programação de Aplicativos) é um meio pela qual dois sistemas (ou softwares) diferentes podem se comunicar, sendo um protocolo de troca de dados entre sistemas. Nesse contexto, com o API REST do ScadaLTS é mais fácil

extrair e enviar informações do supervisório por meio de diversas linguagens de programação que possuem suporte para HTTP, como *Python* (a qual foi utilizado para os propósitos do trabalho), Matlab, C++, entre outras. Dessa maneira, é possível explorar os dados usufruindo do melhor das tecnologias disponíveis, como inteligência artificial, algoritmos de otimização, lógica *fuzzy*, entre outros.

2.1.2 Dispositivos IoT

Para integrar os medidores de pressão hidrostática presentes na cidade ao ScadaLTS, será utilizado as chamadas tecnologias *IoT* de baixo custo, escolhendo dentre as placas de desenvolvimento disponíveis no mercado uma que contenha pelo menos uma entrada analógica para leitura do sensor hidrostático e que seja capaz de se conectar com a internet. Sendo assim, para esse propósito, optou-se pela utilização da placa de desenvolvimento ESP8266.

Estas placas se sobressaem em relação as outras placas de desenvolvimento como as várias versões do Arduino, por exemplo, pelo menor preço, pela capacidade de conexão com a internet e ainda poder utilizar a própria *scketch* do Arduíno para programação, aproveitando da quantidade de material didático disponível pela internet e sua popularidade para aplicações com robótica e eletrônica.

As capacidades da ESP8266 são o suficiente para as necessidades do trabalho, considerando que sua aplicação precisa atender à dois requisitos: Na Tabela 1 é apresentado suas especificações técnicas.

Tabela 1 - Especificação Técnica do NodeMCU V3 ESP8266.

Pinos/Funções	**Nome**	**Descrição**
Energia	Micro-USB, 3.3V, GND, Vin	**Micro-USB:** Alimentação 7 – 12V. **3.3V:** Tensão constante de 3,3V **GND:** Pinos Terra **Vin:** Alimentação Externa
Controle	EN, RST	Pino e Botão para resetar a ESP8266.
Analógico	A0	Leitura analógica de 0 - 3,3V (10 bits)
GPIO	GPIO1 to GPIO16	16 Pinos digitais
Outros	-	**Flash Memory:** 4 MB **SRAM:** 64 KB **Clock Speed:** 80 MHz **Antena PCB**

Fonte: Espressif, ESP8266EX *Datasheet.*

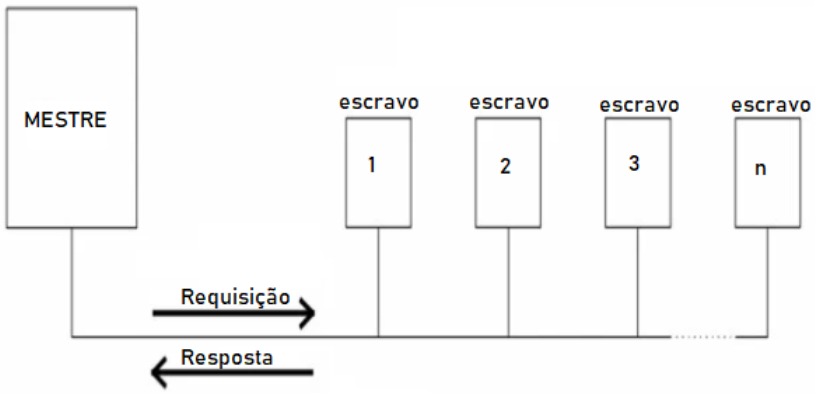
2.1.3 Modbus RTU e Modbus TCP

Modbus é um protocolo de comunicação desenvolvido e publicado pela Modicon® em 1979 a qual estabeleceu uma estrutura de mensagens que possibilita a comunicação entre equipamentos industriais. Inicialmente o protocolo foi desenhado para transmitir informações serialmente, por meio do padrão físico RS-232 e posteriormente RS-485. No entanto, acompanhando a evolução dos processos industriais, o Modbus passou a suportar também padrões de rede como meio físico possibilitando o uso do protocolo pelos padrões MAP e Ethernet, sendo originado o Modbus TCP (TCP – *Transmission Control Protocol*).

A troca de dados do protocolo Modbus RTU (RTU – *Remote Terminal Unit*) é baseado numa arquitetura de mestre e escravo, a qual um dispositivo atua como mestre e os demais dispositivos atuam como escravos, respondendo às solicitações do mestre. Cada um dos dispositivos recebem um endereço que os identifica no meio físico, sendo reservado o endereço 0 para o mestre e os endereços de 1 – 247 para os escravos.

Nesse contexto, o Modbus RTU é transmitido sobre redes seriais operando sob um sistema half-duplex onde apenas um transmissor pode estar ativo por vez. Nesse sistema, a comunicação é iniciada por um transmissor (mestre) que faz uma solicitação direcionada a um receptor específico (escravo) baseado em seu endereço. O escravo, por sua vez, está sempre monitorando o barramento pronto para receber uma solicitação do mestre, a qual executa uma ação caso a solicitação realizada tenha sido para ele. Esse processo é exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura de comunicação do Modbus RTU.



Fonte: Autor.

De maneira similar ao Modbus RTU, o protocolo Modbus TCP aproveita parte da estrutura de troca de dados do protocolo Modbus RTU, mas tendo os incrementos de operar pelo meio físico Ethernet e de diminuir a limitação da topologia mestre-escravo a qual no Modbus TCP tem-se o clientes-servidor que permite que requisições possam ser realizadas a partir de vários clientes. Para entender melhor as semelhanças e diferenças entre as duas versões do protocolo Modbus, será detalhado a estrutura do pacote de dados na subseção 2.1.3.1.

2.2.3.1 Pacotes de dados

Para efetivar a comunicação entre dois equipamentos sob o protocolo Modbus RTU, deve ser estabelecido alguns parâmetros para o mestre e o escravo. São basicamente 4 parâmetros os quais devem ser ajustados de acordo com as limitações dos equipamentos e as necessidades da aplicação, necessitando que todos os equipamentos estejam equalizados:

- *Baud Rate*: determina a velocidade de transmissão dos bits do pacote Modbus. O Protocolo não especifica um valor recomendado, sendo comumente utilizado uma taxa de 9600 bits/s ou 19200 bits/s;
- *Silent Time:* determina o tempo de silêncio que uma requisição/resposta realiza para indicar que o pacote de dados enviado já está concluído.
- Paridade: verifica a integralidade dos dados, checando se a paridade contada pela mensagem recebida é a mesma da mensagem enviada. Pode-se optar por paridade ímpar, par ou não ter paridade.
- *Stop Bit:* determina o final do pacote de dados, estabelecendo se o pacote de dados vai finalizar com bit de parada e a quantidade de bits.

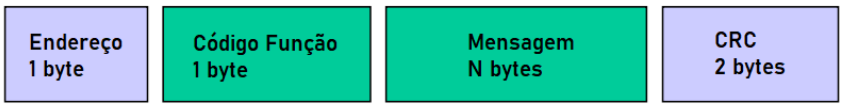
Fundamentalmente, o pacote de dados Modbus possui 3 elementos essenciais que organizam a interação entre o mestre e os escravos, os quais estão presentes tanto no Modbus RTU quanto no Modbus TCP:

- Endereço: determina qual escravo irá responder a requisição do mestre;

- ❖ Código da Função: determina qual operação o escravo irá realizar (leitura ou escrita de registradores ou bobinas, por exemplo);
- ❖ Mensagem: dependendo do código da função, determina qual o endereço e quantidade de registrador(es) ou bobina(s) a serem lidos ou ainda o valor a ser escrito em determinado registrador ou bobina.

Considerando esses 3 elementos fundamentais, na Figura 10 é apresentado a estrutura do pacote de dados, a maneira como é organizada e o tamanho de cada elemento. O CRC (também chamado de *Cheksum*) é um elemento adicional necessário garantir a integridade dos dados transmitidos, além da própria paridade.

Figura 10 - Pacote de dados Modbus RTU.

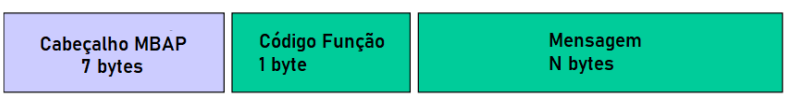


Fonte: Autor.

De maneira paralela, o Modbus TCP aproveita boa parte da estrutura de dados do Modbus RTU, concatenando antes do pacote PDU o cabeçalho MBAP. Nesse pacote de 7 bytes há um identificador de transações (2 bytes) que é útil para processamentos simultâneos de várias requisições, o identificador de protocolo (2 bytes) que para Modbus TCP é igual a 0, o campo *Length* (2 bytes) que indica a quantidade restante de bytes do pacote do Modbus TCP e o campo *Unit ID* (1 byte) que é o endereço do escravo (muito utilizado para *gateways*).

Outro diferencial em relação ao Modbus RTU é que o Modbus TCP dispensa o campo CRC, uma vez que o pacote TCP possuem verificação de erro incorporada e garantem a coerência e entrega dos dados, economizando 2 bytes do pacote. É ilustrado o pacote completo do Modbus TCP na Figura 11.

Figura 11 - Pacote de dados Modbus TCP.

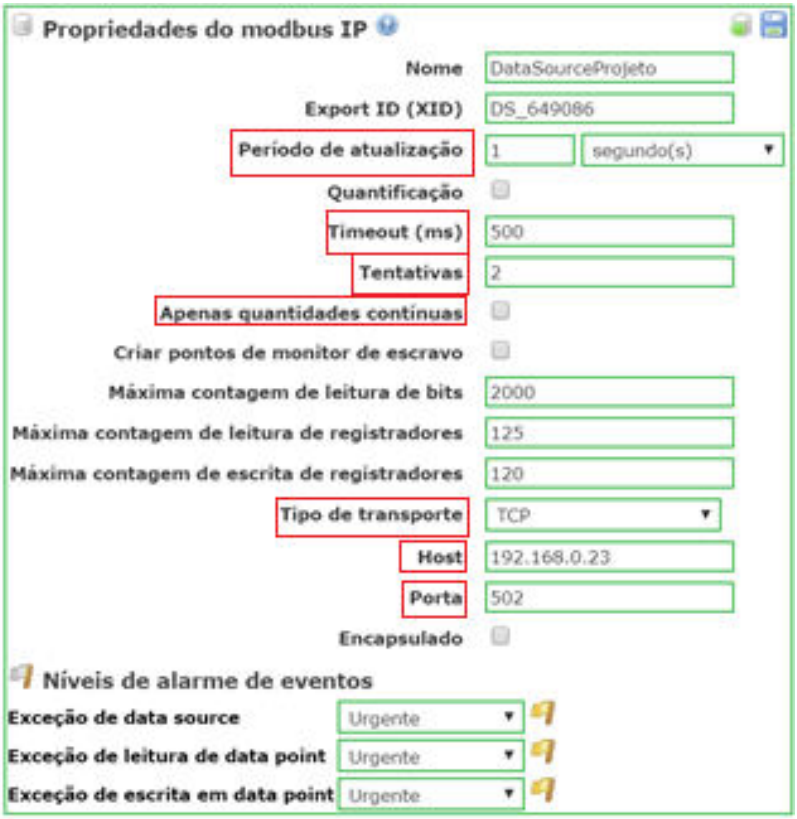


Fonte: Autor.

Um ponto importante para detalhar é sobre como o cliente direciona sua requisição para o servidor. Para isso acontecer é necessário que ambos estejam sob a mesma rede de

internet e que o cliente direcione a requisição através do IP do equipamento que está atuando como servidor. No meio físico Ethernet, não há motivos para se preocupar com *Baud Rate*, paridade e *stop bit*, pois o próprio pacote TCP garante a integridade dos dados. Na Figura 12 é possível observar algumas das configurações que são realizadas em um sistema supervisório (ScadaLTS da figura) para consolidar o Modbus TCP.

Figura 12 - Configurações do Modbus TCP com o servidor.



Fonte: ScadaLTS.

Ademais configurações não citadas, tem-se o tempo de *Timeout* que se refere ao tempo em que o cliente deve esperar por uma resposta até considerar que o servidor não conseguiu responder a tempo e reenviar a mesma requisição. No caso, o número de tentativas é o número máximo de vezes que o cliente irá enviar uma mesma requisição em espera de uma resposta; O *Host* é o endereço IP do servidor e a porta é a porta do servidor configurada para receber as requisições do cliente que tem como padrão a porta 502.

- **Exemplo: Leitura de registradores com endereço de memória igual a 100 via Modbus TCP**

Desconsiderando o pacote MBAP, supondo uma requisição de leitura de 5 registradores a partir do endereço de memória 100, na Tabela 2 é apresentado como seria o pacote de mensagem de requisição do cliente e o de resposta do servidor. Importante perceber, que o conteúdo de cada mensagem é diferente e possuem tamanhos variados, o que exige atenção durante o desenvolvimento do programa no servidor para receber e enviar as solicitações desejadas.

Tabela 2 - Leitura de Registradores

Requisição			**Resposta**		
Tamanho	Descrição	Valor	Tamanho	Descrição	Valor
Byte	Código Função	3	Byte	Código Função	3
Word	Endereço 1º Registrador	0060h	Byte	Quantidade Bytes	QtdReg*2
Word	Qtd Registradores (QtdReg)	0005h	N Bytes	Dados Registradores	...

Fonte: Autor.

2.2.4 Protocolo HTTP

O HTTP é um protocolo de comunicação (na camada de aplicação segundo o Modelo OSI) utilizado para sistemas de informação de hipertexto (FRYSTYK et al, 1996). Para as configurações no ScadaLTS a implementação é simples já que ele atua como um *receiver*, isto é, apenas recebendo dados. Deste modo, supondo que o acesso ao ScadaBR seja por meio do endereço "http://localhost:8080/ScadaBR," a URL dos dados enviados deve ser direcionado para "http://localhost:8080/ScadaBR/httpds", com a terminação "httpds" referindo-se a HTTP *datasource*.

Considerando o fato de que o sistema supervisório ScadaLTS atua apenas como *receiver* para o protocolo HTTP, o seu uso é mais apropriado para equipamentos em que se deseja fazer apenas leitura de dados, como no caso de sensores no geral. E nesse caso, não há requisições por parte do sistema supervisório, tendo as configurações todas realizadas pelo dispositivo que ler as medições dos sensores.

Para esse propósito a utilização da placa ESP8266 é apropriado, uma vez que ela pode ser esse dispositivo que faça as leituras dos sensores, processa-os e se conecta a internet para enviar ao sistema supervisório. Tudo isso a um baixo custo, sendo encontrado por cerca de 25 reais em lojas virtuais.

2.3 Modelagem do sistema

Uma das maneiras mais seguras de otimizar a operação de um processo industrial real é através da realização de simulações de um modelo virtual da planta. A partir de uma modelagem adequada, é possível analisar o comportamento de um sistema quando submetido a um conjunto de entradas que ao serem aplicado ao modelo produzem um conjunto de saídas.

A modelagem, portanto, reduz as chances de que um processo industrial físico se comporte de uma maneira inesperada quando submetido as mesmas entradas simuladas previamente, o que proporciona maior confiabilidade à uma aplicação de ser implementada e operar com sucesso.

Uma das ferramentas computacionais utilizadas para fazer modelagens de sistemas e processos industriais são as redes neurais artificiais (RNA), tema da subseção 2.3.1. A modelagem por meio das RNA são eficazes quando não é possível a construção de modelos do tipo "caixa-branca", definidos por meio de equações diferencias, funções de transferência ou espaço de estados. Usualmente, está limitação é evidenciada em sistemas não lineares e variantes no tempo.

2.3.1 Redes Neurais Artificiais

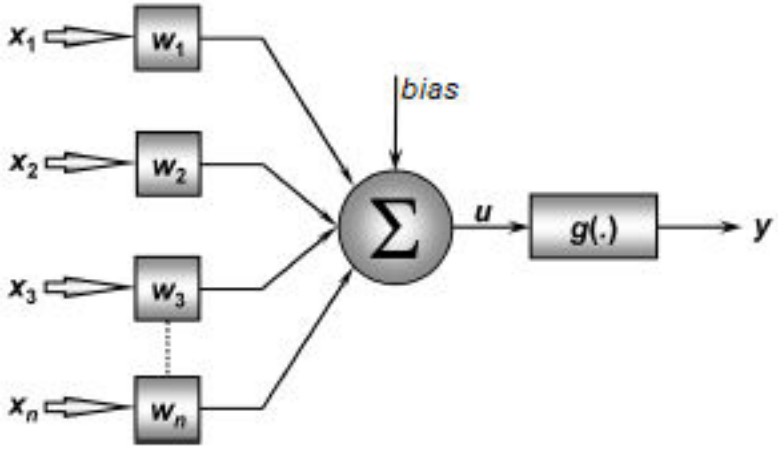
Segundo Furtado (2019) uma Rede Neural Artificial (RNA) é uma estrutura de conexões na qual o processamento é distribuído por um grande número de pequenas unidades densamente interligadas. Dessa forma, uma rede neural artificial possui uma grande quantidade de elementos processadores, os neurônios, interligados através de conexões que variam em grau de conectividade, denominado peso da conexão ou sinapse.

Sendo bio-inspirado nos mecanismos do raciocínio, os neurônios artificiais são compostos por estruturas lógicas-matemática que simulam a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico (FURTADO, 2019). Dessa maneira, os neurônios artificias atuam processando matematicamente um conjunto de entradas para produzir um conjunto de saídas.

Segundo Silva et.al (2016), o *Perceptron* é a forma mais simples de configuração de uma RNA sendo ainda umas das topologias das mais utilizadas atualmente. Para ilustrar sua arquitetura, na Figura 13 tem-se o exemplo de uma estrutura típica da rede *Perceptron* com apenas um neurônio, onde x são entradas, w termos de ponderação (também chamados de

pesos sinápticos), *bias* é o erro sistemático que funciona como um *offset*, *g(.)* a função de ativação e *u* o potencial de ativação.

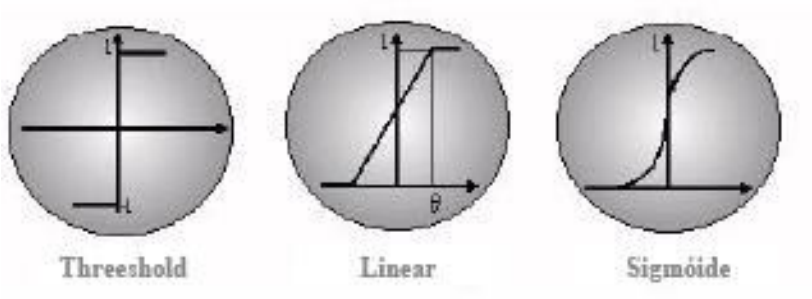
Figura 13 – RNA Perceptron simplificada.



Fonte: SILVA et. al (2016), adaptado.

As funções de ativação dos neurônios artificiais são funções que irão tratar de realizar o processamento final do conjunto de entradas, tendo variadas formas que devem ser escolhidas de acordo com o tipo de problema que se deseja solucionar, dentre eles: aproximação universal de funções, reconhecimento de padrões, identificação e controle de processos, otimização de sistemas ou previsão de séries temporais, etc. Na Figura 14 é apresentado algumas das principais funções de ativação.

Figura 14 – Funções de Ativação para RNAs.



Fonte: FURTADO (2019).

Desse modo, matematicamente, uma RNA do tipo *Perceptron* pode ser expresso pelas Equações 6 e 7.

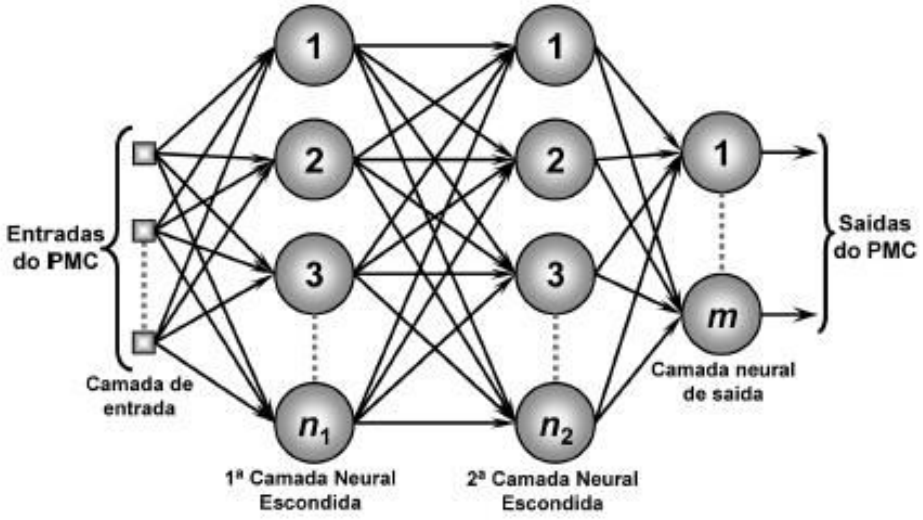
$$u = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i + bias \tag{6}$$

$$y = g(u) \tag{7}$$

Considerando o aprendizado supervisionado, o processo de treinamento de uma RNA envolve, de uma maneira simplificada, o ajuste dos pesos sinápticos para aproximar os valores de saídas calculados pela rede pelos valores de saídas esperados, ou seja, atuando na redução do erro na saída. A realização do ajuste desses pesos é feita pelo algoritmo denominado *backpropagation* ou algoritmo de retropropagação do erro.

Para aprimorar o desempenho das redes *Percepetron*, geralmente utiliza-se a topologia de múltiplas camadas (*MLP, Multi-Layer-Perceptron*) que são caracterizadas pela presença de pelo menos uma camada intermediária de neurônios, também chamado de camada oculta, situada entre a camada de entrada e a de saída. É ilustrado esse tipo de rede na Figura 15.

Figura 15 – Rede Perceptron Multicamadas.



Fonte: SILVA et. al (2016).

A teoria da aprendizagem de uma rede neural é muito mais extensa do que a abordada pelo trabalho, no entanto, esses conceitos são o suficiente para se entender o que acontece nas etapas de aprendizado de uma rede, compostas por 4 passos básicos: 1) Seleção de um conjunto de dados de entradas e saídas relacionados a qual deseja-se que a rede neural aprenda um padrão; 2) Separação dos dados em dados de treinamento e dados de validação,

normalmente, recomendado pela literatura, uma proporção entre 60% a 80% para dados de treinamento e o restante para validação; 3) Aplicação dos dados de treinamento à rede neural e 4) Validação da rede treinada.

Considerando a integridade e a qualidade dos dados, o desempenho do MLP irá depender da correlação entre os dados de saídas e os dados de entrada e dos parâmetros escolhidos para o processo de treinamento, isto é, o número de neurônios por camada, a quantidade de camadas, a função de ativação, o número de épocas (ou iterações) máximas para a RNA aprender e a taxa de aprendizagem.

Devido a tantas variáveis envolvidas que influenciam no desempenho de uma RNA, muitas vezes sua parametrização é considerada uma arte, dependente muito da experiência do desenvolvedor e de experimentações empíricas.

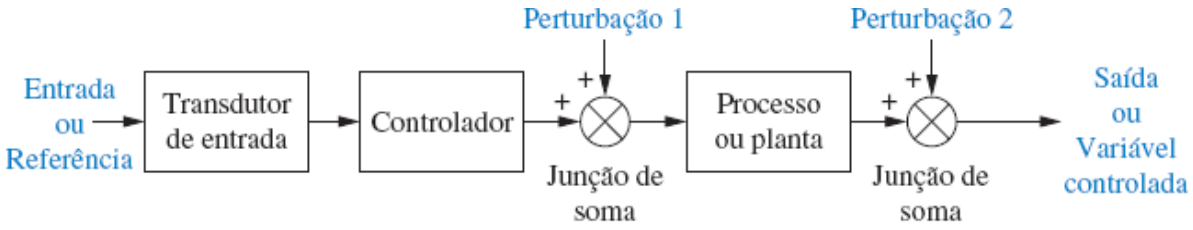
2.4 Sistema de Controle

Segundo Nise (2017) "um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada". Nesse caso, o desempenho desejado possui dois parâmetros de qualidade: a resposta transitória e o erro em regime permanente.

Para perceber o conceito desses dois parâmetros pode-se pensar em um dos controles mais simples presentes no cotidiano: o carro. Ao dirigir um carro, por exemplo, pode-se desejar que ele se desloque mais rápido ou mais devagar, com maior ou menor aceleração, tudo isso comandado pelo ser humano através da marcha e dos pedais. Essa velocidade que desejamos alcançar é chamada na literatura de *set-point*; a diferença entre a velocidade atual (constante) e o *set-point* é o erro em regime permanente e período em que se está acelerando até atingir a velocidade desejada é a resposta transitória.

Esse é um típico sistema que opera em malha aberta uma vez que possui imprecisão, nenhuma adaptação a variações externas (perturbações) e dependência do julgamento e da estimativa humana. Esses sistemas são representados na literatura pelo seguinte diagrama de blocos, similares ao da Figura 16.

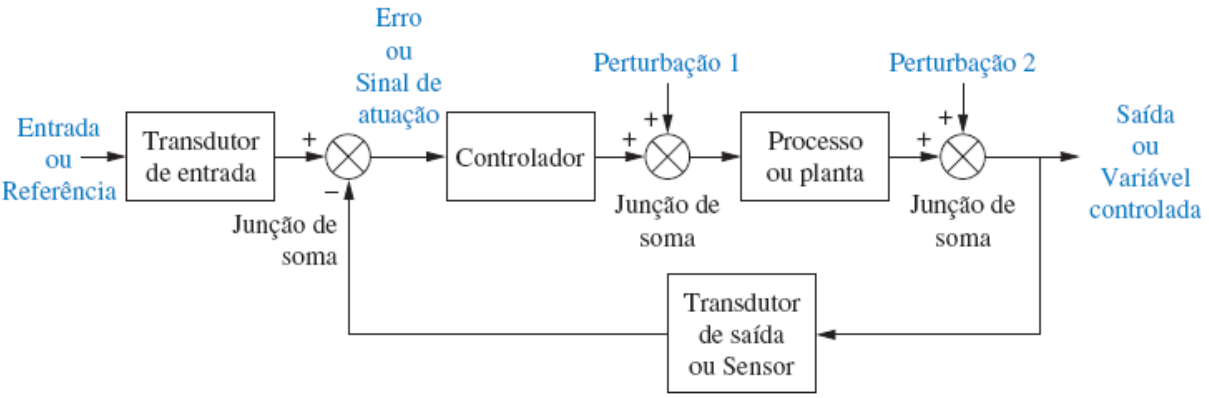
Figura 16 - Sistema de Controle em Malha Aberta.



Fonte: Nise (2017).

Para um sistema operar com mais precisão e controle, é fundamental que ele seja realimentado com o sinal de saída para que um controlador comande os atuadores e os ajustem para que a saída obtenha o desempenho desejado. Com a informação da referência desejada e o valor atual da saída, é possível saber a diferença entre esses dois valores, ou seja, o erro e utilizar alguma rotina de controle especifica para alcançar a resposta ideal. Essa maneira de interagir com o processo é compatível com um sistema em malha fechada, conforme pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Sistema em Malha Fechada.



Fonte: Nise (2017).

No que se refere, as ações de controle encontrados na literatura para solucionar o problema de controle de pressão em redes de abastecimento de água, tem o trabalho Sanz et. al (2012) que simula um controle da família PID a duas válvulas redutoras de pressão para controlar as pressões mínimas e máximas de uma área em Barcelona. Suas simulações indicaram que a redução da pressão na rede poderia diminuir, naquela área, as perdas por vazamento em cerca de 3,65% salvando 11m^3 de água por dia.

Já Moura et.al (2017a) propõe o uso de uma rede neural adaptativa para manutenção ótima da altura manométrica do sistema de bombeamento estudado, eliminando excesso de

pressão em pontos críticos. Para isso ele propõe a regulação da velocidade da bomba como atuador para controlar a pressão na rede. Por meio de testes em uma bancada experimental, Moura treinou uma rede neural para desenvolver um controlador neural adaptativo utilizando o Algoritmo de Levenberg-Marquardt apresentando baixo erro máximo no regime estacionário (máximo de 1,52%) e acompanhando o sinal de referência, mesmo estes sendo variados ao longo do tempo.

Já em Moura et.al (2017b) é proposto um controle Fuzzy Neural para garantir as características positivas de cada um dos controladores: o controlador neural adaptativo em prol de um bom desempenho no regime transitório e o controlador Fuzzy em prol de um bom desempenho em regime permanente. Sua proposta se demonstrou muito robusta, uma vez que seu sistema proposto não necessita de modelagem prévia da planta, adapta-se a diferentes condições operacionais e mantém o compromisso com a saída desejada.

Moreira et.al (2021) compara a ação de três topologias de controladores modernos: o controlador Fuzzy, o Neural e o Neural-Fuzzy. Também compara o desempenho em relação a eficiência energética e a pressão média do sistema ao longo do dia, mostrando ótimo desempenho dos controladores neural e neuro-fuzzy, reduzindo em até 79,3% o consumo energético em certos instantes do dia em comparação a um sistema sem controle.

Assunção (2016) propôs a utilização de um controlador fuzzy-derivativo para controlar a pressão de uma adutora de 1200mm manipulando o ângulo de abertura de uma válvula via ScadaBR com o objetivo de manter a pressão entre 76 e 84mca, conseguindo automatizar o processo que antes era realizado por um operador.

Nesse trabalho, será proposto um controle fuzzy-derivativo para o controle de pressão em uma rede de abastecimento de água considerando o bom desempenho do controle fuzzy aplicado em sistemas não lineares encontrados na literatura. Dessa maneira, nas próximas subseções será detalhado sua teoria e características.

2.4.1 Lógica *fuzzy:*

A lógica *fuzzy* (em tradução livre, lógica nebulosa) é uma lógica que simula os modos de raciocínios que são aproximados ao invés de exatos (GOMIDE, 1994). Sua simplicidade de implementação, capacidade de manusear informações qualitativas, imprecisas e incertas e bom desempenho mesmo com problemas cuja modelagem matemática é impraticável torna a lógica *fuzzy* um poderoso resolvedor de problemas.

A lógica *fuzzy* fica mais simples de se entender ao tentar classificar um espectro de cores como claro e escuro como na Figura 18, por exemplo. A classificação como clara e escura é muito relativa, podendo uma mesma cor ser considerada como clara e escura, por fontes diferentes. Esse processo torna-se ainda mais imprevisível quando se amplia o leque de opções para pouco claro ou muito escuro, podendo haver muitas diferenças entre classificações realizada por pessoas diferentes.

Figura 18 - Espectro de cores.

Fonte: Web.

A lógica *Fuzzy*, portanto, trata de assimilar esse espectro de classificações para formar uma resposta definitiva, que não é binária, mas um valor relativo entre dois extremos baseado nas classificações (regras) *fuzzy* criadas a partir do conhecimento do sistema, mesmo que este também seja relativo.

A criação dessa classificação é modelada em conjuntos *fuzzy*, o tema da subseção a seguir.

2.4.1.1 Conjuntos *Fuzzy*

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é bem definido. Dado um determinado conjunto *A* em um universo *X,* os elementos deste universo podem pertencer ou não àquele conjunto (TANSCHEIT, 2021). Isso é expresso pela função característica f_A apresentada na Equação 8.

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 \text{ se e somente se } x \in A \\ 0 \text{ se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (8)$$

Zadeh (1976) propôs uma caracterização mais ampla de maneira que o conceito de pertinência de um elemento passe a ser caracterizada por graus de pertencimento a um

conjunto, assumindo valores infinitos no intervalo [0,1]. Dessa maneira, um conjunto *A* no universo *X* é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x)$: X → [0,1] representado por um conjunto de pares ordenados, conforme a Equação 9 onde $\mu_A(x)$ indica o grau que x pertence a um conjunto *A*.

$$A = \{\mu_A(x)/x)\} \quad x \in X \tag{9}$$

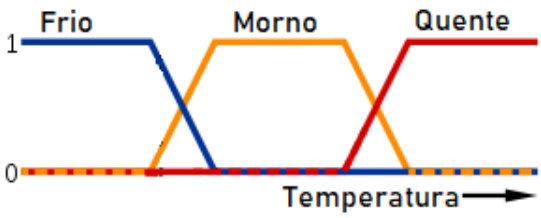
Na subseção seguinte será abordado com mais detalhes sobre as funções de pertinência, quais as mais comuns encontrados na literatura e seus contextos.

2.4.1.2 Funções de pertinência

A função de pertinência pode possuir diversas formas e são melhor representadas considerando o contexto em que são utilizadas. No geral, elas são definidas a partir da experiência e do conhecimento de um grupo de especialistas, mas também podem ser definidas por intermédio de funções analíticas. De maneira padrão, utilizam-se as formas triangular, trapezoidal e Gaussiana (TANSCHEIT, 2004).

A título de exemplificação, é desejado classificar a temperatura da água de um chuveiro elétrico como frio, morno e quente. Considerando opiniões de diversas pessoas pode-se criar a função de pertinência, a qual devido o entendimento particular de cada indivíduo possui muita relatividade e, portanto, uma determinada temperatura poderá pertencer a vários conjuntos ao mesmo tempo, tendo graus de frio, morno e quente. Sendo assim, uma função de pertinência possível poderia ser construída conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Função de Pertinência Trapezoidal.



Fonte: Web, adaptado.

2.4.1.3 Variáveis Linguísticas

As variáveis linguísticas são variáveis que dão nomes aos conjuntos *fuzzy*. No exemplo apresentado na seção 2.1.4.2 as variáveis linguísticas foram os nomes “Frio”, “Morno” e “Quente”. De maneira geral, os valores de uma variável linguística poder ser criados a partir de termos primários como “alto”, “baixo”, “médio”, “grande”, por exemplo, de conectivos lógicos como “e”, “não” e “ou” e de modificadores como “muito” ou “pouco”, por exemplo (TANSCHEIT, 2004).

A finalidade das variáveis linguísticas é proporcionar uma maneira organizada de caracterização de problemas complexos ou mal definidos. Formalmente, uma variável linguística possui 5 elementos (TANSCHEIT, 2004):

- N: Nome da variável;
- T(N): Conjunto de nomes dos valores linguísticos;
- X: Universo de discurso;
- G: Regra Sintática para gerar valores de N como composição de elementos de T(N);
- M: Regra Semântica, para associar cada valor gerado em G em conjunto *fuzzy* em X.

Considerando o problema da subseção 2.4.1.2 teríamos a seguinte variável linguística:

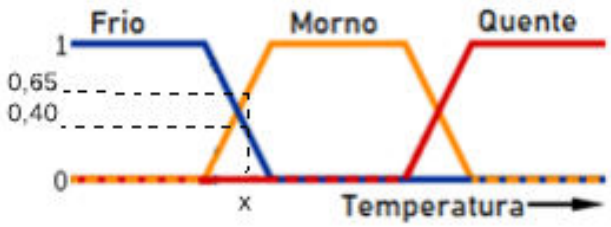
- N: Temperatura do chuveiro elétrico;
- T(N): {Frio, Morno, Quente};
- X: 0 a 100ºC, por exemplo;
- G: temperatura *não fria* e *não quente*¸ por exemplo;
- M: associação do valor dada a regra em G a um significado.

2.4.1.4 Fuzzyficação

A Fuzzyficação é a etapa que se obtém o grau de pertinência das entradas em relação ao conjuntos *fuzzy* criados (ASSUNÇÃO, 2016). Considerando, sua função de pertinência, a entrada é codificada para um valor entre [0,1] de modo a ter um valor de pertinência para cada conjunto específico e, para o exemplo da subseção 2.4.1.2 para um valor de x fictício teriam

como graus de pertinência μ(x=Frio) = 0,65, μ(x=Morno) = 0,40 e μ(x=Quente) = 0 conforme ilustração da Figura 20.

Figura 20 - Exemplo de Fuzzyficação.



Fonte: Web, adaptado

.

2.4.1.5 Regras Fuzzy

As regras *fuzzy* abrigam o conhecimento do processo de acordo com os dados e o grupo de especialistas, sendo descritas de forma qualitativa através de implicações lógicas da forma *se ... então*, representando uma relação $R_{A \rightarrow B}$ a qual uma ou mais variáveis antecedentes (entradas) fornecem uma ou mais variáveis consequentes (saídas) (TANSCHEIT, 2004).

Sendo outro ponto-chave da lógica *fuzzy* a construção adequada das implicações lógicas exige domínio da lógica proposicional, que lida com proposições que são verdadeiras ou falsas. Segundo Tanscheit (2004), a combinação dessas proposições para criar novas proposições são realizadas a parir de 3 operações básicas:

- Conjunção ($p \wedge q$): Verdade simultânea das duas proposições (em booleano é o operador *And*);
- Disjunção ($p \vee q$): Verdade entre uma das proposições (em booleano é o operador *Or*);
- Implicação ($p \rightarrow q$): regra *se ... então*.

Dessa maneira, após os antecedentes entrarem no processo de fuzzyficação e serem transformados pelas regras *fuzzy*, os novos valores deverão ser processados para serem convertidos em grandezas práticas para aplicação aos atuadores. Este processo é denominado defuzzyficação, tema da próxima subseção.

2.4.1.6 Defuzzyficação

O processo de defuzzyficação trata de interpretar a informação gerada a partir do processo de fuzzyficação e inferência. Esse processo é fundamental, pois é necessário que as saídas do controlador *fuzzy* sejam saídas precisas de acordo com a grandeza física em que se está atuando.

Na literatura há 2 principais métodos de defuzzyficação mais utilizados sendo estes o centro de gravidade (também chamado de centroide) e a média dos máximos. Utilizando o método do centro de gravidade, a saída resultante será o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais. Já no método da média dos máximos o valor de saída é dado tomando-se a média entre os elementos extremos no universo correspondente aos maiores valores da função de pertinência do consequente (TANSCHEIT, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será recapitulado a problemática do abastecimento em uma rede de distribuição de água, tomando como exemplo um estudo de caso realizado em uma estação elevatória de água e suas unidades consumidoras descrevendo os elementos que a compõe, as restrições do sistema e a meta de desempenho desejado.

Tendo como meta maior o controle da pressão de unidades consumidoras por meio da regulação da velocidade de rotação de um inversor de frequência, também foi implementado rotinas de controle para controlar o nível dos apoiados e o nível da compensação por meio da regulação do ângulo de abertura de válvulas elétricas do tipo borboleta.

Além disso será descrito sobre todos os elementos presentes ao estudo de caso sejam eles equipamentos, ferramentas computacionais ou rotinas de controle e o papel de cada um em busca do abastecimento de água eficiente.

3.1. Descrição do Problema: Estação Elevatória de Água R12

Uma problemática comum de uma rede de abastecimento de água refere-se à regulação da pressão que chega às unidades consumidoras por dois principais motivos:

1) Algumas empresas de abastecimento de água ainda não modernizaram seu sistema de monitoramento, de forma que muitas vezes não se tem os dados (ao menos digitalizados) sobre a pressão atual nas unidades consumidoras não havendo um parâmetro adequado para avaliar a qualidade do abastecimento;
2) Quando se tem os dados de pressão ainda sobra outro empecilho: a distância da EEA das unidades consumidoras é razoavelmente alta (quilômetros de maneira geral) o que dificulta a aferição de pressão localizado nas unidades consumidoras para um controlador localizado na EEA de maneira cabeada, impondo uma dificuldade de referência para o controlador.

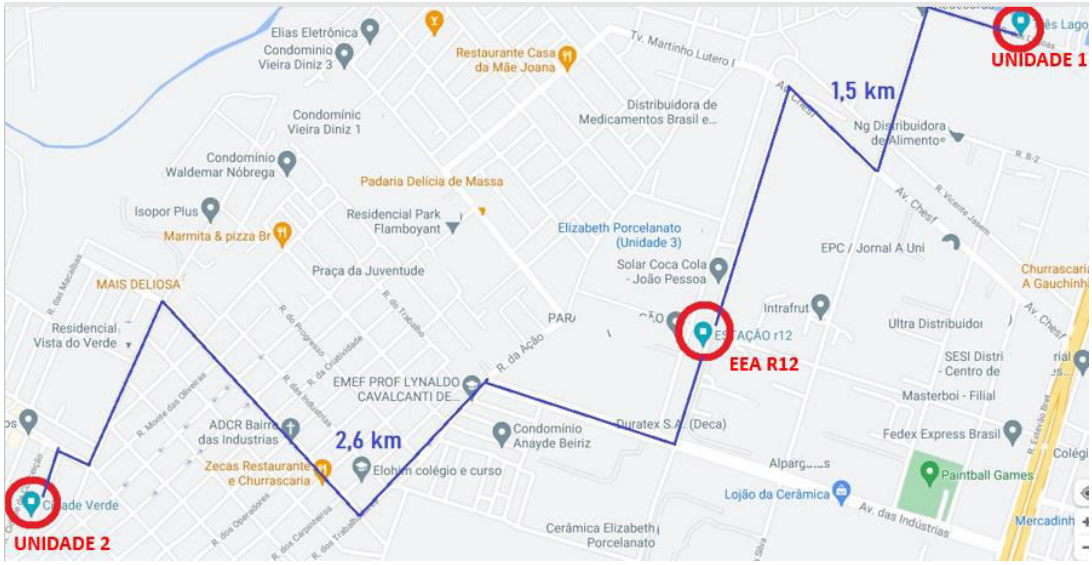
Dessa maneira, muitas vezes o controle é realizado por um operador que opera sobre o ligar/desligar dos conjuntos motobomba tendo como referência o nível da compensação, atuando para manter o nível da caixa d'água elevado e, consequentemente ter altura

manométrica suficiente para abastecer a população, mas com o compromisso de se evitar o extravasamento da caixa d'água.

No entanto, outra restrição para o sistema refere-se a nível dos apoiados, pois os conjuntos motobomba não podem operar estando com eles a baixo nível, uma vez que a entrada de ar na sucção da bomba é danosa à sua vida útil. Desse modo, o controle da chegada de água aos apoiados é fundamental também.

Tais problemáticas estão presentes na EEA R12. Essa estação elevatória de água localizada no Bairro das Indústrias em João Pessoa abastece a região com zonas de influência a distâncias superiores a 2,5km, conforme pode ser observado na Figura 21. Seu principal problema é durante o período noturno, quando a demanda por água cai fortemente provocando um rápido crescimento de pressão na rede e, consequentemente, torna o rompimento das tubulações frequente.

Figura 21 - Mapa da rede de abastecimento do R12.



Fonte: Autor.

3.1 Materiais

A rede de abastecimento do R12 conta com duas unidades monitoradas, sendo a Unidade 2 a ponta da zona de influência do R12. Suas pressões são aferidas utilizando uma ESP8266 e um transdutor de pressão para cada ponto de medição, localizados dentro de estabelecimentos com acesso à internet de propriedade da empresa ou de seus funcionários, garantindo a manutenção das medições.

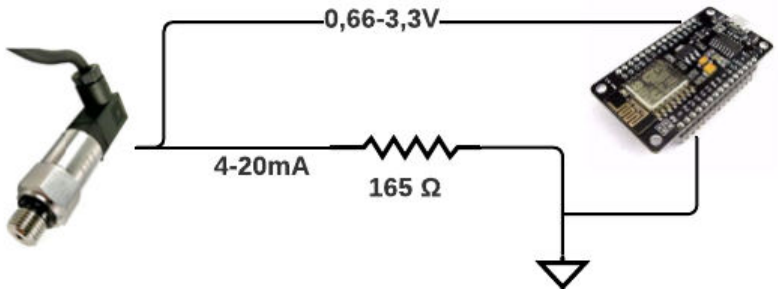
O transdutor de pressão utilizado, mostrado na Figura 22 tem alimentação elétrica de 12V e fornece sinal de leitura de 4-20mA sendo incompatível com a leitura analógica da ESP8266 de 0-3,3V. Nesse sentido, é utilizado um circuito para condicionamento de sinal que envolve apenas um resistor de 165Ω para promover um sinal de leitura analógica de 0,66-3,3V.

Figura 22 - Transdutor de pressão.

Fonte: Web.

É ilustrado na Figura 23 o circuito de condicionamento utilizado para condicionar o sinal de corrente dado pelo sensor hidrostático para um sinal de tensão elétrica permitindo realização de leitura analógica pela ESP8266.

Figura 23 – Circuito de condicionamento para medição de pressão pela ESP 8266.



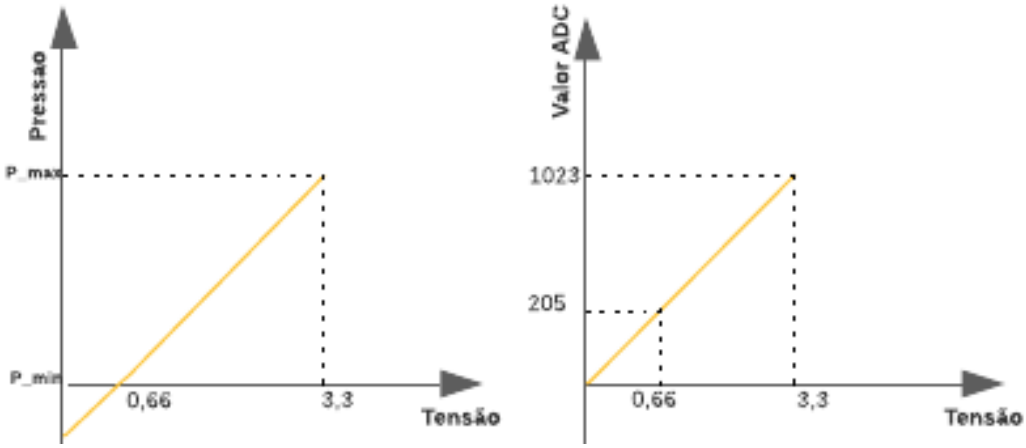
Fonte: Autor.

A leitura dos dados realizados pela ESP8266 é fornecida para o sistema supervisório por meio do protocolo HTTP Receiver a cada 12 segundos totalizando 5 medições por minuto. Além disso, foi configurado para o banco de dados armazenar a média dos valores medidos a cada um minuto. Devido a característica lenta do sistema hidráulico em relação a outros processos industriais, essa taxa de amostragem se mostra satisfatória.

Ademais, para converter a leitura analógica de tensão em pressão usou-se o fato de que a resolução do conversor analógico-digital da ESP8266 é de 10 bits. Dessa forma, o valor de 3,3V corresponde ao valor de 1023 ($2^{10} - 1$). Desse modo, considerando que os sensores

hidrostáticos da distribuição medem de 0 - 50mca, tem-se que a relação entre a pressão medida e o valor convertido para digital é conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24: Relação entre a pressão medida e seu respectivo valor convertido para digital.



Fonte: Autor.

Sobre os elementos presentes, especificamente, na EEA do R12 tem-se:

- **1 Válvula elétrica do tipo borboleta:**

Essa válvula está posicionada na entrada dos apoiados. São válvulas do tipo analógica que podem ser controladas via entrada de controle de 4 – 20mA, sendo 4mA representando a válvula totalmente fechada e 20mA para válvula totalmente aberta. Ela foi conectada em uma das saídas analógicas do CLP da Siemens S7-1200, de maneira direta, sem circuitos de condicionamento. Na Figura 25 é possível observar a válvula presente no apoiado.

Figura 25 - Válvula elétrica do tipo borboleta.

Fonte: Autor.

- **Dois conjuntos motobomba:**

Os motores são da fabricante WEG como potência nominal de 45kW. As bombas são do fabricante Ingersoll com potência vazão de 363m^3/h. Os conjuntos estão posicionados em paralelo, mas operam de maneira alternada: um dia opera o conjunto 1 e no outro o conjunto 2. Na Figura 26 é possível observar os conjuntos motobomba em ação e a disposição deles em campo.

Figura 26 - Conjuntos motobomba: Disposição em campo.

Fonte: Autor.

- **Compensação:**

A caixa d'água da elevatória possui altura manométrica máxima de 17,5m. Seu abastecimento acontece por meio dos mesmos dois conjuntos motobomba que abastecem a população, de modo que a água injetada de uma tubulação principal é ramificada em duas sendo uma para o enchimento da compensação e a outra para abastecimento da população. Dessa maneira, a caixa d'água pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 – Compensação do R12.

Fonte: Google Maps, 2021.

❖ **Apoiados:**

A EEA do R12 possui dois apoiados aos quais estão interligados um ao outro. O nível máximo do apoiado é de aproximadamente 3m. Na Figura 28 é possível observá-los.

Figura 28 – Apoiados do R12.

Fonte: Google Maps, 2021.

❖ **Inversores de Frequência:**

A regulação de velocidade de rotação dos conjuntos motobomba é realizado por inversores de frequência da fabricante Danfoss© da linha CF202. O controle da velocidade de rotação pode ser feito por meio de uma entrada de referência ou enviando valores via comunicação serial no registrador de controle de velocidade.

Neste inversor, o controle de velocidade é feito considerando que o envio do valor 16384 implica que o motor rotacionará com a velocidade máxima configurada e 0 com velocidade mínima. Na Figura 29 é possível observar o inversor de frequência dentro do painel de controle.

Figura 29 – Inversores de Frequência do R12.

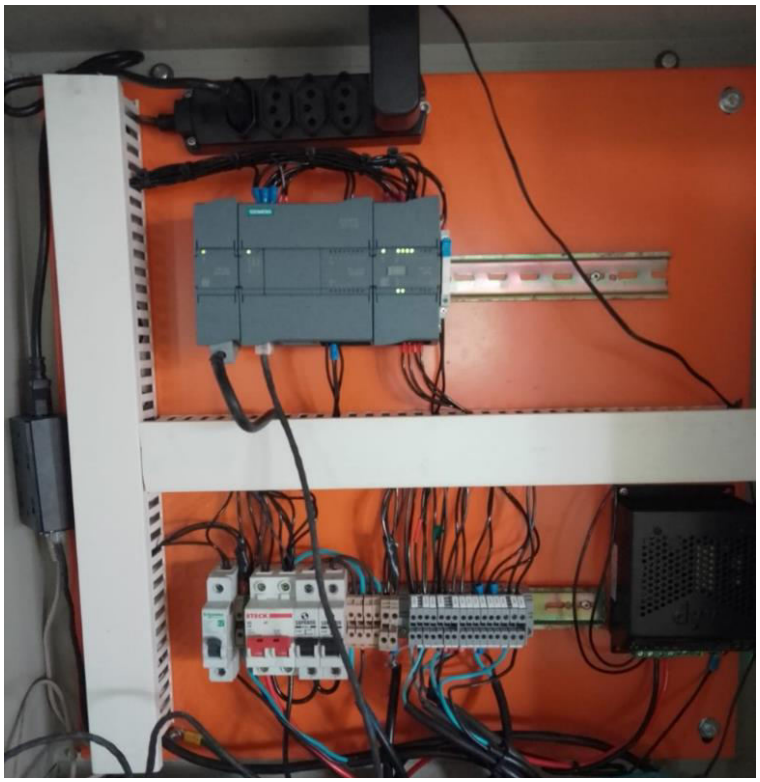
Fonte: Autor.

❖ **Controlador:**

Para comunicação e controle dos elementos da elevatória foi utilizado o controlador da Siemens® da linha S7-1200 DC/DC/DC que possui 8 entradas digitais, 6 saídas digitais, uma entrada analógica 0 – 10V mais dois módulos de expansão: 1) Módulo RS232/485 para comunicações seriais, sendo utilizado para fazer Modbus RTU com os inversores de frequência e 2) Módulo de expansão para entradas e saídas analógicas, contendo 4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas.

A instalação do controlador no painel de comando pode ser observada na Figura 30:

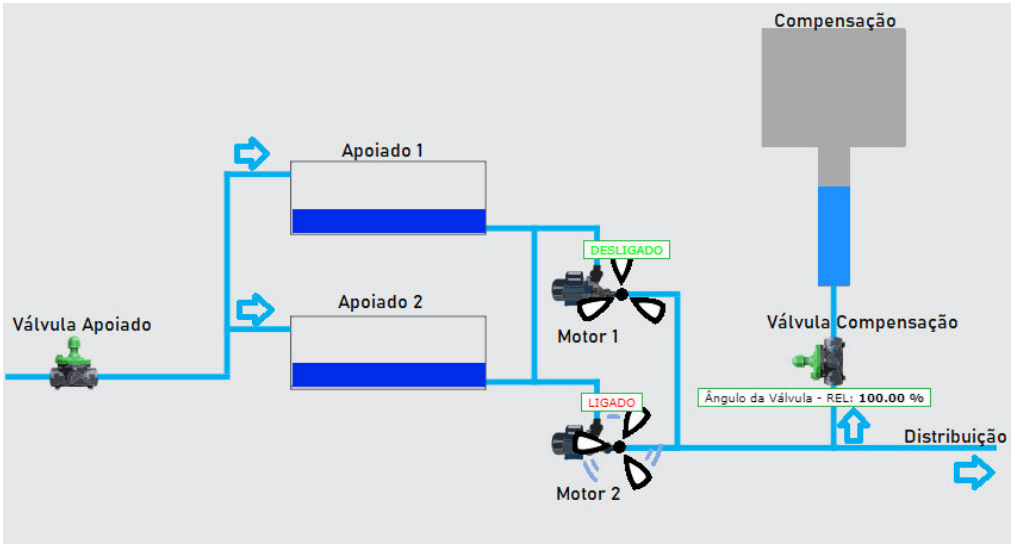
Figura 30 – Quadro de comando do R12.



Fonte: Autor.

Para enfatizar o design do processo, na Figura 31 é apresentado um esquemático da EEA com os elementos citados anteriormente, os motores, os apoiados, as válvulas e a caixa d'água, mostrando também os caminhos da água injetada pelos conjuntos motobomba.

Figura 31 – Esquemático da EEA do R12



Fonte: CAGEPA, 2021.

3.2 Métodos

Nessa seção será abordado de maneira mais detalhada o uso de cada recurso e material utilizado, considerando cada uma das etapas:

1. Leitura e aquisição de sensores e atuadores
    a. Sensores hidrostáticos localizados na distribuição via ESP8266;
    b. Sensores hidrostáticos, válvulas e inversores de frequência localizados na EEA via CLP S7-1200;
2. Controle local
    a. Nível dos apoiados;
3. Controle remoto
    a. Modelagem do sistema com RNA por meio de dados históricos em Python;
    b. Desenvolvimento do controlador fuzzy em Python;
    c. Validação do controle fuzzy sobre modelo em RNA;
    d. Leitura de dados em tempo real do ScadaLTS via API REST e Python;
    e. Envio de dados para o ScadaLTS após passagem pelo controlador fuzzy.

3.2.1 Utilizando recursos do ScadaLTS

Para ser possível consolidar o controle remotamente via Python, foi necessário utilizar três principais recursos do ScadaLTS: a possiblidade de coleta de dados de pressão em tempo real armazenados no banco de dados do sistema supervisório através de API REST; o envio de dados da velocidade de rotação dos motores e da pressão na rede através do protocolo Modbus TCP e HTTP *receiver*, respectivamente e o conjunto eventos e tratadores de eventos que possibilita a aplicação do valor de uma variável em outra.

Descrevendo sobre o primeiro, o API REST do ScadaLTS permite integração segura entre um programa externo e os dados armazenados no banco de dados associado ao supervisório. É possível fazer leituras e escritas de dados, acessar parâmetros do supervisório com simples palavras chaves e ainda garantindo a segurança devido ao requisito da API de autenticar o acesso por meio do uso de um usuário e senha válidos.

Em especial, dois métodos GET desta API são utilizados:

- /auth/{username}/{password}

Este método permite o acesso aos demais métodos da API ao se escrever nos campos *username* e *password* valores válidos, garantindo que apenas pessoas que estão cadastradas como usuários para o sistema supervisório.

- /point_value/getValue/{xid}

Este método envia dados em formato json referentes ao datapoint desejado a partir do acesso direto ao banco de dados, por meio do xid, código atribuído pelo ScadaLTS que identifica a variável desejada.

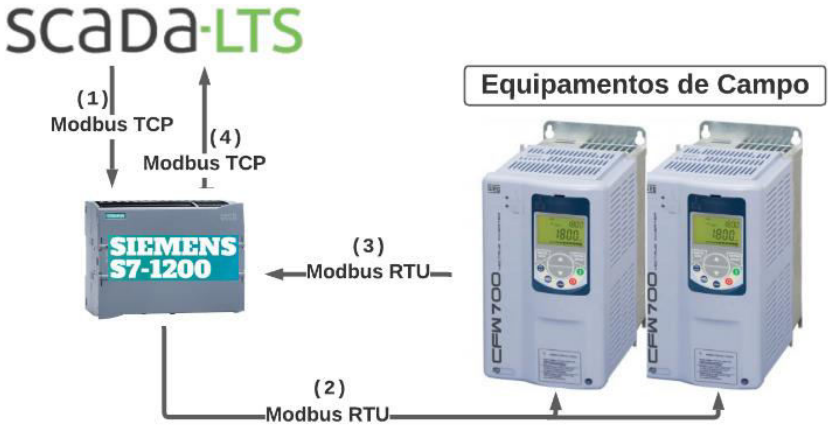
Desse modo, em Python criou-se uma rotina para leitura de dados do ScadaLTS que faz requisições pela API a cada 1 minuto, por meio da biblioteca *requests*, ao mesmo tempo em que o sistema supervisório armazena os dados desejados no banco de dados. Essas requisições são realizadas para atualizar o controlador fuzzy sobre o estado atual do processo com o conhecimento das entradas (pressão na distribuição) e saídas (velocidade de rotação dos motores) atuais.

Abordando, agora, sobre o envio de dados para o ScadaLTS estabeleceu-se 3 fontes da qual os dados partem: do controlador localizado na EEA; das ESP8266 localizadas na região

de distribuição e de um computador da CAGEPA a qual está implementada a lógica nebulosa que envia a velocidade de referência para o sistema supervisório.

Para a comunicação com o controlador é utilizado o protocolo Modbus TCP, uma vez que se deseja que o controlador envie dados, mas também receba comandos a partir do sistema supervisório. O controlador, por sua vez, se comunica com os inversores de frequência por meio do protocolo Modbus RTU, atuando como um *gateway* entre o ScadaLTS e os inversores. O esquemático do passo a passo de como se dá essa comunicação pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 – Esquemático da comunicação entre o ScadaLTS e os inversores de frequência.



Fonte: Autor.

Para a comunicação com as ESP8266 foi utilizado o protocolo HTTP *receiver* considerando que o único objetivo das placas é ler a saída do sensor de pressão hidrostático e enviar o valor da medição para o ScadaLTS, não havendo necessidade de receber nenhum comando do supervisório.

Para a comunicação do controlador nebuloso programado em Python foi utilizado, também, o protocolo HTTP receiver. Apesar do programa em Python necessitar fazer leituras e envio de dados pelo ScadaLTS, as leituras já são realizadas através da API, que requisita do supervisório os dados de interesse (pressão e frequência de rotação dos motores) em tempo real. Por simplicidade e facilidade de implementação optou-se em realizar o envio das saídas do controlador nebuloso via HTTP, também pela biblioteca *requests*.

Por fim, para o ScadaLTS enviar comandos para os equipamentos de campo, é aplicado o recurso de tratadores de eventos, a qual a variável de velocidade de referência de rotação dos motores em HTTP é aplicada a variável de velocidade de referência de rotação

dos motores em Modbus TCP, finalizando o caminho final do sistema de controle proposto pelo trabalho.

3.2.2 Modelagem do processo utilizando redes neurais artificiais

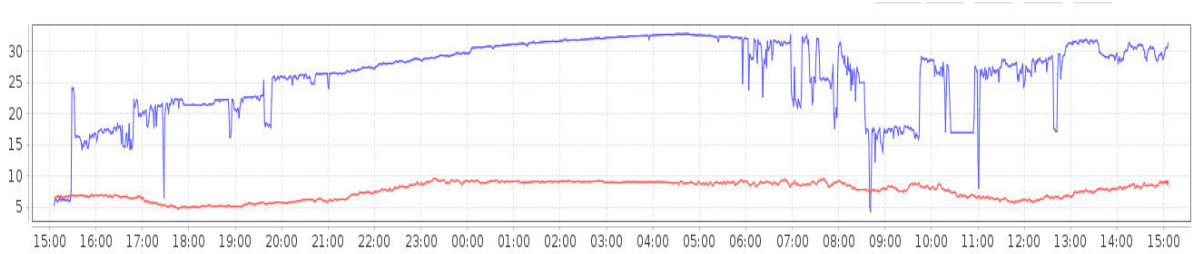
A utilização das capacidades de redes neurais artificiais teve como finalidade a obtenção de um modelo virtual da rede hidráulica em estudo, possibilitando a realização de simulações do comportamento da rede sob a aplicação de diferentes sinais de atuação do controlador nebuloso. Deste modo, diminui-se os riscos de expor a rede hidráulica real a comportamentos indesejados, estimando situações reais e otimizando os parâmetros do controlador *fuzzy* para melhor desempenho quando aplicado a rede real.

Para modelar o sistema de abastecimento do R12, fez-se uso do recurso de geração de relatórios do ScadaLTS que permite que dados sejam organizados em planilhas CSV, de acordo com o período de tempo desejado. Esses dados contém os valores históricos dos datapoints selecionados os quais foram utilizados para compor o banco de dados de treinamento e validação da RNA.

Para o estudo de caso proposto, foi coletado dados de 15 dias de operação da rede de abastecimento de água, tendo no total 21600 amostras, com tempo de amostragem de 1 minuto entre cada amostra.

O controle de pressão da elevatória está baseado em um controlador de velocidade incremental que considera apenas o erro entre o set-point e pressão atual da unidade consumidora nº2. A decisão de utilizar apenas uma unidade consumidora como variável de entradas foi realizada após conversas com especialistas, uma vez que a pressão medida na unidade consumidora nº1 sofre com variações devido ao local de instalação do medidor hidrostático ser em uma torneira a qual casualmente é aberta provocando variações bruscas na medição de pressão. Na Figura 33 é possível observar o comportamento da pressão ao longo de um dia nas duas unidades consumidoras.

Figura 33 – Pressão medida nas unidades consumidoras. Azul: Unidade consumidora nº1; Vermelho: Unidade consumidora nº2.



Fonte: CAGEPA, 2021.

Como é possível observar na Figura 33, a pressão medida na unidade consumidora nº1 de azul, frequentemente, cai bruscamente, com valores superiores a 5mca em muitas vezes, ficando uma referência muito instável para ser utilizado. Dessa maneira, foi descartado seu uso. Por outro lado, a pressão medida na unidade 2, em vermelho, é mais apropriada para ser o sinal de controle de referência, por ser a unidade que sofre com menos pressão na rede e por ter uma medição de maior qualidade com mais estabilidade.

O controle vigente que produziu os dados coletados pelo relatório é extremamente simples (também criado pelo autor) que, no entanto, provoca variações. A frequência de rotação do conjunto motobomba que está operando é incrementada de acordo com a diferença entre a pressão de referência e a pressão medida, com incrementos discretizados. Na Tabela 3 é mostrado como funciona o controle vigente.

Tabela 3 – Controle utilizado para modelagem.

Erro (set-point - pressao atual)	Δf
Erro>2	0,9
2>Erro>1	0,6
1>Erro>0,3	0,3
Erro<-2	-0,9
-0,3<Erro<-1	-0,6
-1<Erro<-0.3	-0,3

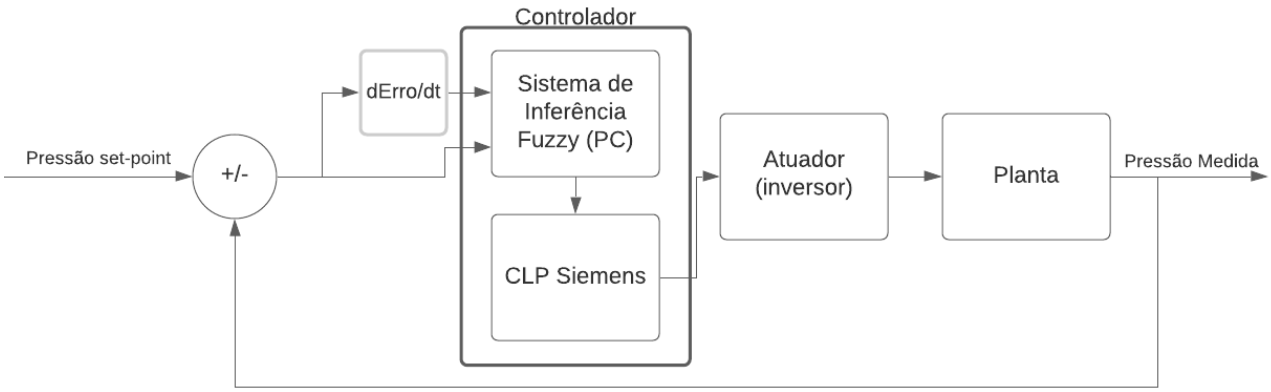
Fonte: Autor.

3.2.3 Desenvolvimento de controle fuzzy em Python

Para entender melhor como atua o controlador fuzzy sobre a planta em estudo, na Figura 34 é apresentado um diagrama de blocos do sistema de controle. O controlador é composto por dois equipamentos, sendo um computador com a lógica fuzzy escrita em

Python que envia para o CLP – que este interage com os atuadores – o sinal de atuação de maneira direta através do ScadaLTS.

Figura 34 – Diagrama de Blocos do controle fuzzy do processo.



Fonte: Autor.

A opção pela utilização de um controlador fuzzy a outros controladores tradicionais, como os controladores do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo), se dá principalmente pelo desempenho mais baixo dos controladores tradicionais diante de processos industriais de difícil modelagem matemática e não-linearidades (SIMÕES & SHAW, 1999), como é o caso de um processo de hidráulico.

Por outro lado, os controladores nebulosos possuem algumas vantagens práticas sendo confiáveis, robustos e resistentes a perturbações externas pela característica do processamento independente de cada regra. Além disso, o ajuste das regras fuzzy são mais simples podendo ser testados individualmente para cada situação específica, sendo eficazes tanto para sistemas lineares quanto para não-lineares (SIMÕES & SHAW, 1999).

Nesse sentido, o desenvolvimento da lógica fuzzy e suas regras é parte fundamental do desempenho de um controlador fuzzy. É muito importante o conhecimento da planta juntamente com o conhecimento dos especialistas para determinar, por exemplo, se o incremento de velocidade de rotação do conjunto motobomba é pequeno ou grande o suficiente para alterar a pressão medida para um valor mais próximo do desejado.

Segundo Moura (2017) o número de termos das funções de pertinência recomendado é entre dois e sete. Em tese quanto maior o número de conjuntos maior é a precisão do controle nebuloso. Entretanto, para valores superiores a sete, não há melhorias significativas (SIMÕES & SHAW, 2007, apud. MOURA; et.al 2017a).

Tanto Moura (2017) quanto Flores (2019), em seus respectivos trabalhos para controle de pressão pela regulação de velocidade de um inversor de frequência, optaram por utilizar 2 variáveis de entrada para o controlador nebuloso, sendo elas o erro e a diferença entre erro atual e o anterior, saída como sendo o incremento de frequência a ser realizado, com 7 conjuntos para cada variável e lógica nebulosa do tipo mandani.

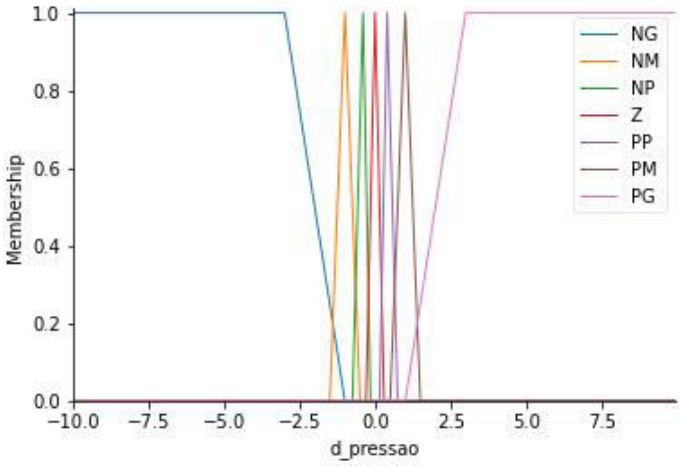
Utilizando-os como referência, foi construído os conjuntos e a regras da lógica nebulosa, mas alterando algumas regras e faixas de valores do conjuntos, devido as diferenças entre este estudo de caso e os das referências: o processo da estação elevatória de água do R12 possui um tempo de resposta mais lento, as atualizações de velocidade, devido à limitações, são realizadas a cada um minuto (um tempo muito maior em relação as referências citadas) e há certos momentos do dia em que a demanda da rede é superior a capacidade do conjunto motobomba fornecer água para o sistema.

Considerando essas premissas, as variáveis linguísticas de entrada podem assumir 7 possíveis valores: “PG” (Positivamente Grande), “PM” (Positivamente Médio), “PP” (Positivamente Pequeno), “Z” (Zero), “NP” (Negativamente Pequeno), “NM” (Negativamente Médio) e “NG” (Negativamente Grande). Já a variável linguística de saída pode assumir os seguintes valores: “IG” (Incremento Grande), “IM” (Incremento Médio), “IP” (Incremento Pequeno), “Z” (Zero), “DP” (Decremento Pequeno), “DM” (Decremento Médio) e “DG” (Decremento Grande).

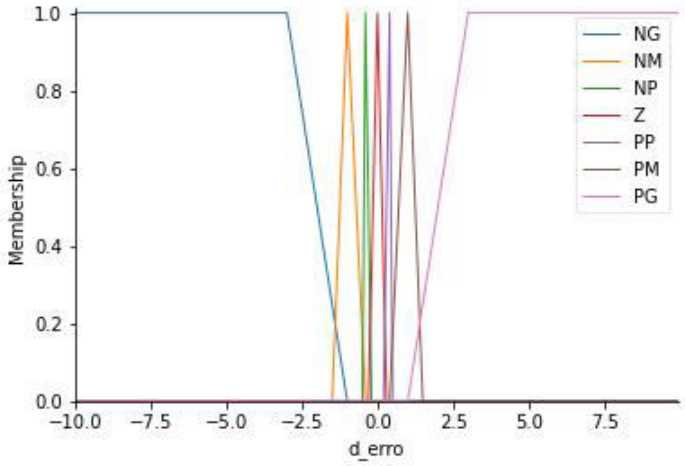
Nas Figuras 35a, 35b e 35c pode ser observado os conjuntos fuzzy construídos de cada variável linguística do erro, da diferença entre o erro atual e o anterior e do incremento de frequência, respectivamente, utilizando como função de pertinência a função triangular.

Figura 35 – Conjuntos Fuzzy: a) Erro; b) Diferença do erro e c) Incremento de frequência.

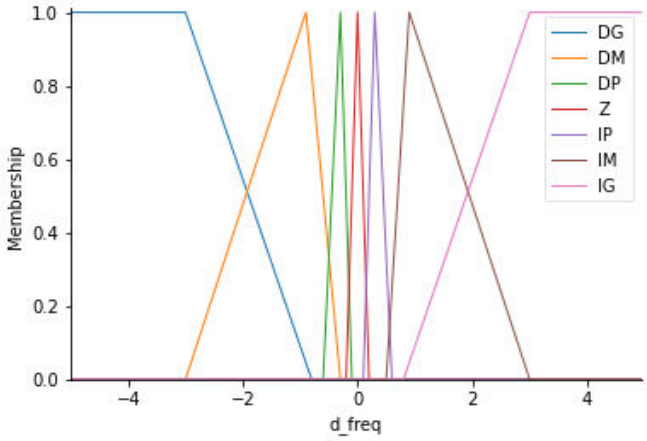
a)



b)



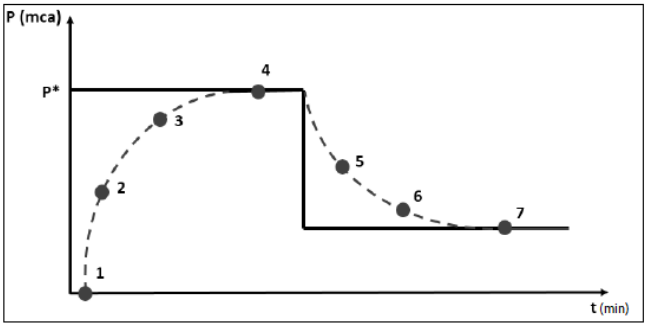
c)



Fonte: Autor.

A interação entre esses conjuntos pode ser observada por meio das regras nebulosas desenvolvidas. A ideia principal para a criação das regras é que o incremento/decremento da frequência seja realizado de acordo com erro e a diferença entre o erro atual e o anterior, de maneira que os incrementos sejam grandes quando a diferença entre o set-point e a pressão medida seja alta ao passo que o incremento também seja suavizado à medida que o delta do erro seja considerado alto, uma vez que o delta do erro alta indica se a correção da pressão está indo rápida demais. Na Figura 36 é ilustrado o comportamento desejado.

Figura 36 – Comportamento desejado do sistema.



Fonte: Flores (2019), adaptado.

Na Tabela 5 é apresentado as regras fuzzy desenvolvidas pensando neste comportamento desejado. Foram apenas utilizados lógicas *and* para a interação entre os conjuntos, como exemplo, caso erro NG e diferença do erro NG, a variação da frequência deve ser DP.

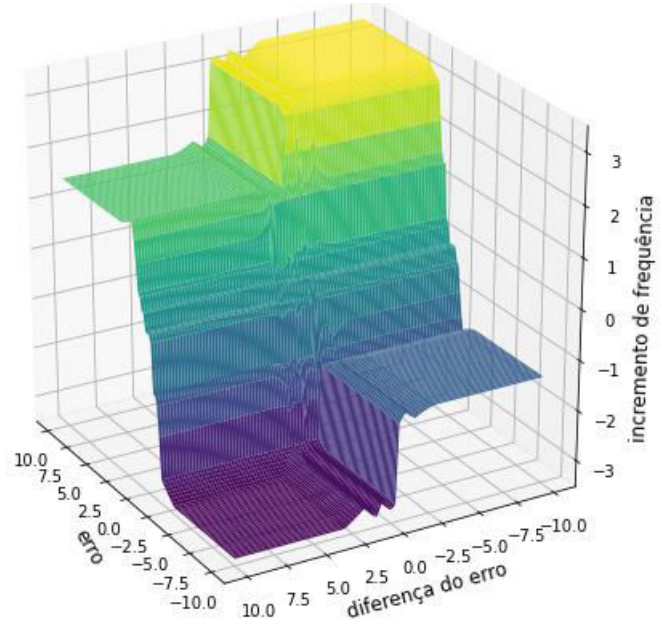
Tabela 5 – Regras Fuzzy

		DIFERENÇA DO ERRO						
		NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
ERRO	NG	DP	DP	DP	DM	DM	DG	DG
	NM	Z	DP	DM	DM	DM	DM	DM
	NP	Z	Z	DP	DP	DP	DP	DM
	Z	IP	Z	Z	Z	Z	Z	DP
	PP	IM	IM	IP	Z	IP	Z	Z
	PM	IM	IM	IM	IM	IM	IM	IP
	PG	IG	IG	IG	IM	IM	IM	IM

Fonte: Autor.

Uma boa indicação de que a interação entre as regras e os conjuntos fuzzy está adequada é observando a superfície de relação entre as entradas e saída, de modo a verificar a suavidade das mudanças nos valores de saída para diferentes valores de entrada. Na Figura 37 pode-se observar a superfície gerada.

Figura 37 – Superfície de relação entre as entradas e saídas das variáveis fuzzy.



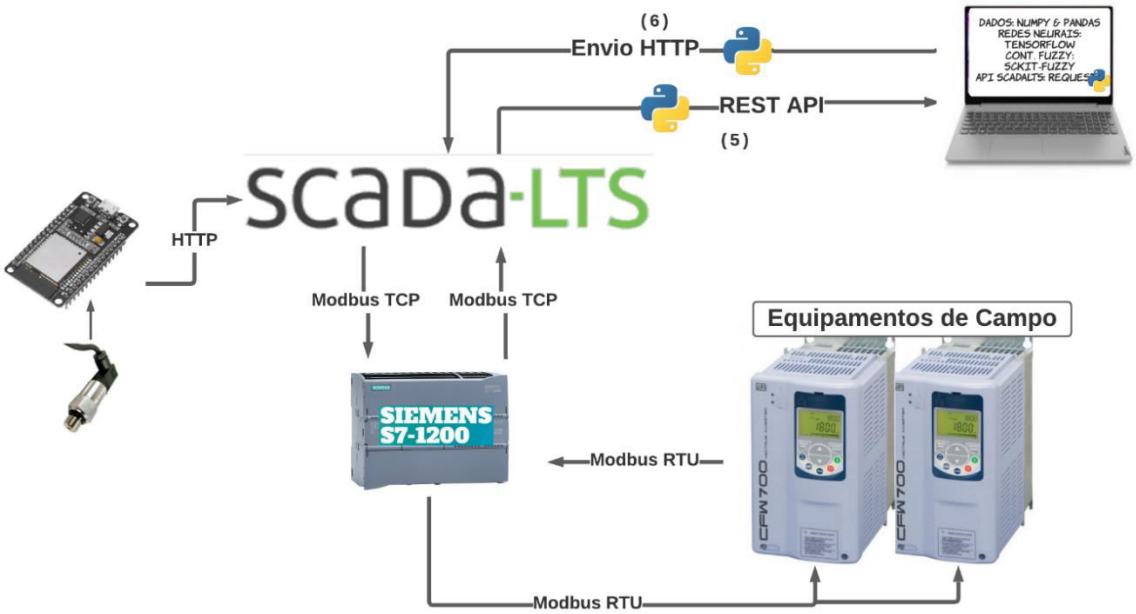
Fonte: Autor.

Todo o desenvolvimento da lógica *fuzzy* foi realizado utilizando a biblioteca skfuzzy a qual tem suporte para as mais variadas configurações, desde diversos tipos de funções de pertinência como sigmoide, triangular e trapezoidal até os métodos de defuzzyficação como o centro de gravidade (o que foi utilizado para o estudo de caso) e a média dos valores máximos.

Para resumir toda a metodologia proposta, á apresentado na Figura 38 um diagrama de blocos mostrando toda a cadeia de controle, incluindo as medições dos sensores hidrostáticos em campo até o envio do sinal de atuação gerado pela lógica *fuzzy* para os atuadores. Como é possível notar o controlador nebuloso está localizado em um computador. No entanto, a situação ideal é esta lógica estar embarcada em um hardware mais barato com este propósito junto a unidade de bombeamento de água e com acesso a mesma rede de internet, para diminuir a necessidade de 3 redes de internet diferentes.

Também seria possível direcionar os dados de medições enviados pela ESP 8226 para o CLP, de modo a permitir o desenvolvimento uma lógica de controle interna ao CLP. Pode-se também escolher outra placa de desenvolvimento que seja capaz de fazer comunicação *Lora*, um dos mais meios físicos de comunicação gratuitos a distância, para evitar a utilização de internet.

Figura 38 – Diagrama da metodologia proposta.



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será apresentado e discutido acerca dos resultados alcançados pela solução proposta, inicialmente, comparando o desempenho do controle sob um modelo da EEA R12 criado por uma RNA com o controle vigente e posteriormente o efeito do controle na EEA R12 real.

Em relação a subseção de análise de resultados sobre o modelo em RNA será discutido previamente sobre os dados de entrada e os dados de saída para treinamento e validação da RNA, de modo a descrever algumas modelagens realizadas que foram mal sucedidas e seus principais defeitos, e posteriormente analisar a modelagem bem-sucedida que e quais foram os motivos de seu melhor desempenho.

4.1. Análise dos resultados sobre o modelo em RNA

Criando o modelo através da modelagem via RNA com os dados coletados, foi ajustado e avaliado os parâmetros do controlador nebuloso no controle da pressão da unidade consumidora nº2, de maneira a aprimorar os incrementos/decrementos da frequência de rotação do inversor de frequência para operarem apropriadamente.

Para avaliar o desempenho da lógica nebulosa utilizou-se as mesmas restrições da planta real: frequência máxima de rotação igual à 62,5 Hz, frequência mínima de rotação igual à 43 Hz e pressão de set-point igual à 9mca, 1mca a menos que o mínimo pré-estabelecido pela norma ABNT NBR 12218, definido tal valor após conversas com especialistas que concluíram que era o melhor para a preservação da rede.

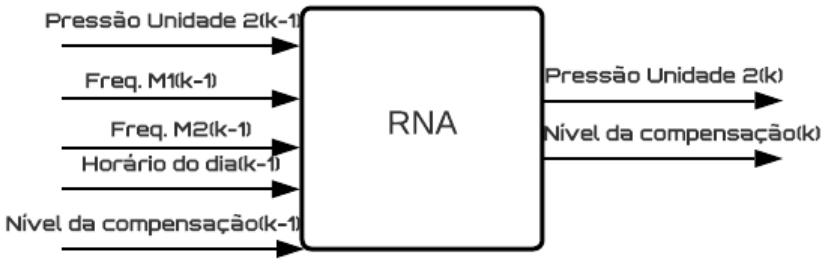
Portanto, para todos os modelos desenvolvido foi analisado o desempenho do controlador nebuloso sob condições de dados diferentes, com entradas e saídas diferentes, variando o número de neurônios por camada, as funções de ativação utilizadas (*selu* e *relu*) e o otimizador (*Adam* e *Nadam*).

Nesse contexto, para fazer a modelagem do sistema havia a disponibilidade de 5 variáveis sendo a pressão na unidade consumidora nº1, a pressão na unidade consumidora nº2, a frequência de rotação dos dois motores e o nível da compensação. Todos eles com uma taxa de amostragem de uma amostra por minuto. Em cada modelagem inseriu-se novas variáveis para melhor representar o sistema, como será mostrado nos marcadores a seguir.

- **Modelagem mal sucedida nº1:**

A modelagem mal sucedida nº1 ficou baseado na relação de entradas versus saídas da RNA conforme esquema da Figura 39.

Figura 39 – Relação de entradas x saídas da RNA.



Fonte: Autor.

Na modelagem da primeira rede neural artificial, após variação de vários parâmetros neurais, estabeleceu-se as seguintes configurações:

- 2 camadas ocultas com 30 e 20 neurônios cada;
- 5 entradas: nível da compensação, frequência de rotação do motor 1, frequência de rotação do motor 2, pressão da unidade consumidora nº2 e o horário do dia;
- 2 saídas: pressão da unidade consumidora nº2 e nível da compensação;
- Função de ativação: relu;
- Otimizador: Nadam.
- Número de épocas: 5000.

O horário do dia foi uma variável introduzida que foi utilizada para todos os modelos apresentados neste trabalho, com o objetivo de ser a variável que sugira para a RNA a informação da demanda horária de água, uma vez que a dinâmica de consumo é maior em determinados horários (nos chamados horários de pico) e menores em outros horários (como de madrugada quando a maioria dos consumidores estão dormindo).

Dessa forma, considerou-se que essa informação poderia ser fundamental para a RNA entender que a frequência máxima de rotação, em horários de pico, não é suficiente para elevar ou manter a pressão na rede, enquanto em horários de baixo consumo a frequência máxima de rotação provoca um rápido aumento na pressão da rede.

Portanto, apenas para ilustrar, com uma taxa de amostragem de 1 minuto tem-se 1440 amostras de dados por dia o que dá 1440 minutos ($60 \text{ minutos} \times 24 \text{ horas}$). Então, dado um

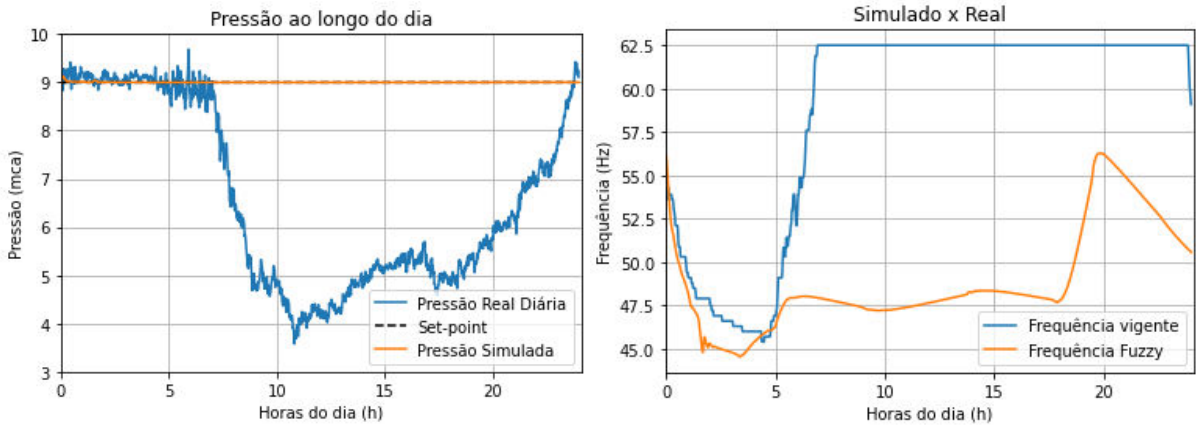
conjunto de dados coletados as 8h e 25min, temos que seu respectivo valor de horário do dia igual a 505 minutos ($8 \times 60 + 25$). Essa matemática foi realizada para todas as amostras.

Com toda a configuração neural e de entradas e saídas realizados, gerou-se o modelo da EEA do R12, sendo entregue como resultado um erro quadrático médio de 0,0473 e um erro percentual médio de 2,7951%, considerado valores positivos uma vez que não foi realizado um trabalho de limpeza de dados faltantes e *outliers*.

Desse modo, após a modelagem da rede e a implementação da lógica fuzzy foi realizado a primeira simulação dos efeitos do controlador nebuloso sob a EEA do R12 modelada. Inicialmente, observando para o gráfico da Figura 40(a) pode-se concluir que o controle nebuloso obteve sucesso em comparação com o controle vigente, uma vez que ele foi capaz de manter a pressão na rede seguindo a referência de 9mca. No entanto, observando a Figura 40(b) percebe-se a incongruência da simulação:

Figura 40 – Resultado da simulação do modelo mal sucedido: a) Simulação de pressão e b) Simulação de frequência.

a) b)



Fonte: Autor.

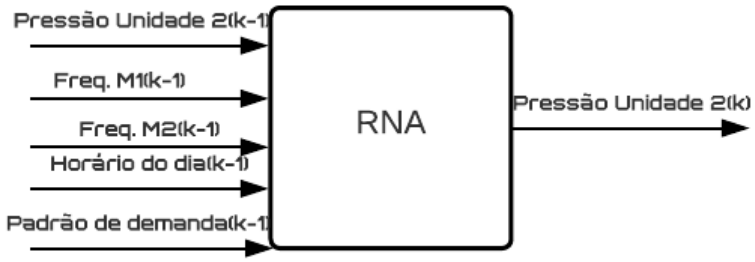
A incongruência do modelo é que ele não percebe, apenas pelos dados fornecidos, que em determinados horários a demanda na rede é maior exigindo maior injeção de água. Segundo a modelagem, seria possível a rede manter-se equalizada em qualquer faixa de horário, o que é uma possibilidade falsa uma vez que após as 6 horas da manhã a demanda começa a crescer de modo que mesmo que o conjunto motobomba opere em máxima rotação nesse horário ele não é capaz manter a pressão na rede, voltando para o valor de referência apenas após as 22h.

Essa informação sugeriu que acrescentar como entrada à RNA o perfil de consumo diário poderia melhorar o desempenho da rede. No entanto, essa informação não estava disponível o que levou a uma tentativa de modelagem nº2 do sistema acrescentando como nova variável de entrada um perfil de consumo genérico padrão.

- **Modelagem mal sucedida nº2:**

A modelagem mal sucedida nº2 ficou baseado na relação de entradas versus saídas da RNA conforme esquema da Figura 41.

Figura 41 – Relação de entradas x saídas da RNA.



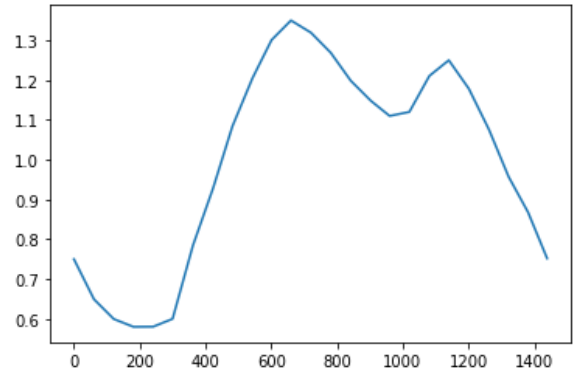
Fonte: Autor.

Considerando uma nova variável a ser inclusa para a modelagem, estabeleceu-se a seguinte configuração para o modelo:

- 2 camadas ocultas com 30 e 20 neurônios cada;
- 5 entradas: frequência de rotação do motor 1, frequência de rotação do motor 2, pressão da unidade consumidora nº2, horário do dia e padrão de demanda genérico;
- 1 saída: pressão da unidade consumidora nº2;
- Função de ativação: selu;
- Otimizador: Nadam.
- Número de épocas: 5000.

Para inserir os dados do padrão de demanda genérico ao grupo de dados de entrada foi coletado amostras a partir de um gráfico apresentado no trabalho de Guidi (2017) que aferiu uma série temporal de vazão em um ponto de demanda específico no município de Franca - SP. Na Figura 42 é apresentado o gráfico gerado a partir dessa referência, apresentando a curva adimensional de consumo.

Figura 42 – Curva adimensional de consumo genérico.



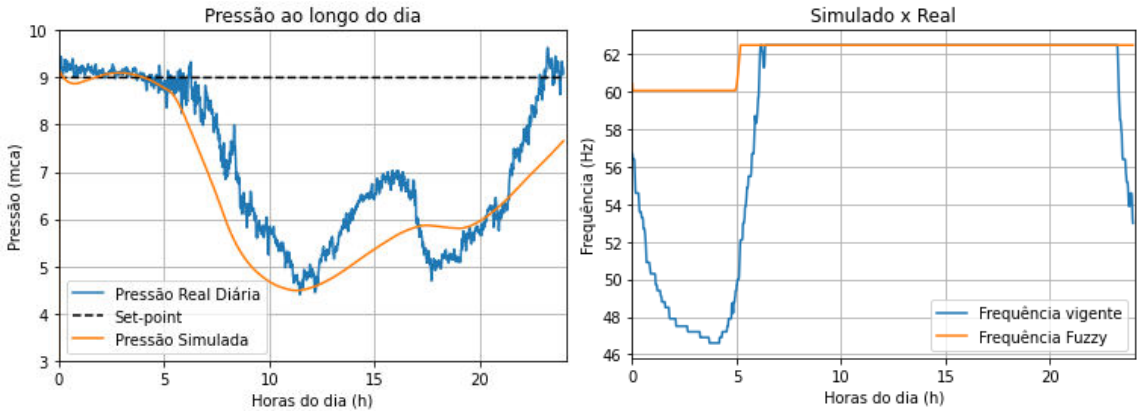
Fonte: Autor.

A partir desse novo dado que se repete diariamente, foi modelado o sistema. Dessa forma, essa nova RNA apresentou um melhor desempenho em relação a modelagem mal sucedida nº1 entregando erro médio quadrático igual à 0,0197 e erro percentual médio de 1,3856%, o que é um bom sinal à priori.

Com isso, observou-se uma melhoria da pressão simulada em relação a pressão real diária apresentando algum grau de correção entre elas, mas novamente existe uma certa incongruência entre a frequência de rotação real e a frequência de rotação simulada, sendo perceptível durante o horário de menor demanda entre as 0 – 6h onde o valor de frequência simulada provocaria um aumento na pressão, o que não ocorre, como é mostrado na Figura 43a) e Figura 43b).

Figura 43 – Comparação entre a simulação e os dados reais: a) Pressão; b) Frequência.

a) b)



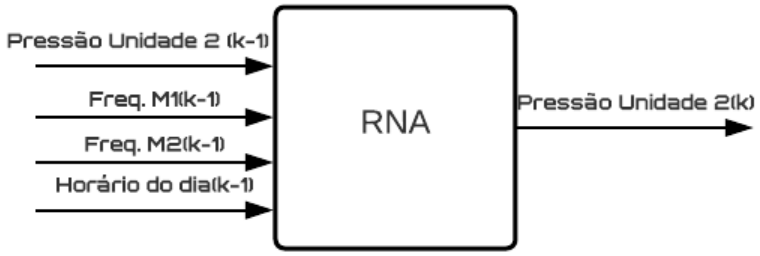
Fonte: Autor.

Novamente, a modelagem mostrou-se falha. Alternativamente, considerando que a demanda entre as 0 – 6h possui menores variações em relação as demais faixas de horários, seguiu-se para mais uma proposta de modelagem, agora limitando os dados de entrada do modelo para a faixa de horário citada de menor demanda, excluindo da modelagem como entrada o perfil de consumo diário genérico, prezando a qualidade da modelagem nessa faixa de horário

- **Modelagem bem sucedida:**

A modelagem bem sucedida ficou baseado na relação de entradas versus saídas da RNA conforme esquema da Figura 44.

Figura 44 – Relação de entradas x saídas da RNA.



Fonte: Autor.

Para este processo de treinamento da RNA, após vários testes com diferentes parâmetros, foram utilizadas as seguintes configurações:

- 2 camadas ocultas com 30 e 20 neurônios cada;
- 4 entradas: frequência de rotação do motor 1, frequência de rotação do motor 2, pressão da unidade consumidora nº2 e o horário do dia;
- 1 saída: pressão da unidade consumidora nº2;
- Função de ativação: relu;
- Otimizador: Nadam.
- Número de épocas: 5000.

A validação do modelo é realizada utilizando os dados que foram previamente separados em duas categorias: os dados de treinamento utilizados para criar o modelo e os dados de validação para avaliar o desempenho do modelo.

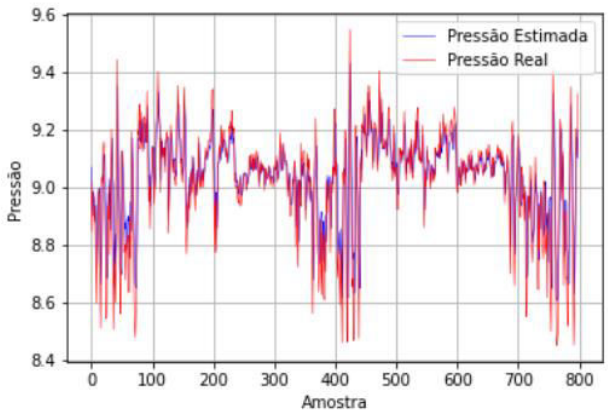
Na Tabela 4, portanto, é mostrado o desempenho obtido pelo modelo considerando como parâmetros o erro quadrático médio e o erro percentual médio.

Tabela 4 – Desempenho da Rede Neural.

Desempenho	Erro quadrático médio	Erro percentual médio (%)
Treinamento	0,0150	0,8393
Validação	0,0203	0,9485

Na Figura 45 é apresentado o gráfico comparando os valores de saída reais da pressão na unidade consumidora 1 e os valores de saída previstos pela RNA.

Figura 45 – Comparação entre a pressão estimada pela RNA e a pressão real.

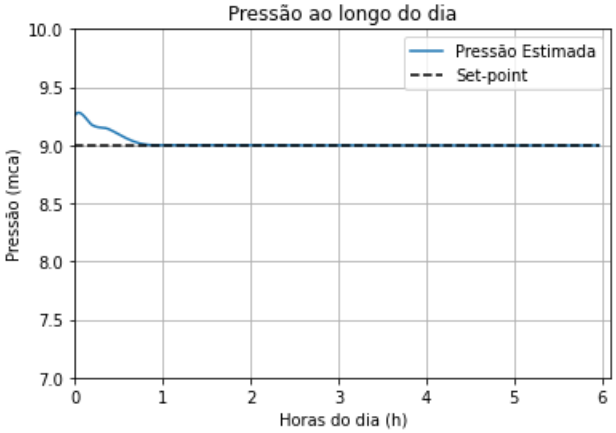


Fonte: Autor.

Para avaliar o desempenho da simulação, foi realizado uma comparação entre o comportamento real da rede utilizando o controle vigente e o comportamento da rede durante a simulação controlado pelo controlador fuzzy. Dessa maneira, para inicializar as simulações foi utilizado como entradas os valores reais no minuto zero coletados do sistema SCADA, de modo que os demais minutos até as 06:00h são dados pela RNA e a lógica nebulosa.

Na Figura 46 pode ser observado o comportamento diário da pressão na unidade consumidora nº2, prevista pela RNA utilizando como entrada a frequência de rotação do inversor de frequência dada pelo controlador fuzzy. Como pode ser observado o controle está funcionando satisfatoriamente, acompanhando bem a referência e com pequeno sobrevalor de aproximadamente 1%. Os valores do eixo horizontal indicam o minuto atual que está sendo marcado.

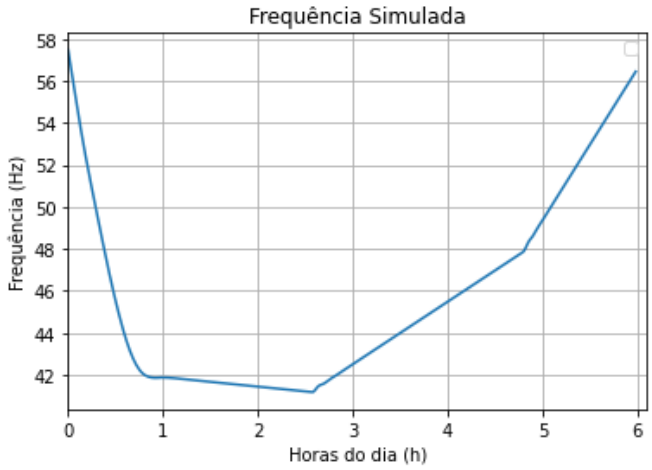
Figura 46 – Pressão controlada prevista pela RNA.



Fonte: Autor.

Para esses valores de pressão, os respectivos os valores de frequência são dados pela Figura 47. Comparando com o gráfico da pressão estimada da Figura 39, nota-se que a frequência de rotação do inversor está de fato descendo quando há uma diferença negativa de pressão.

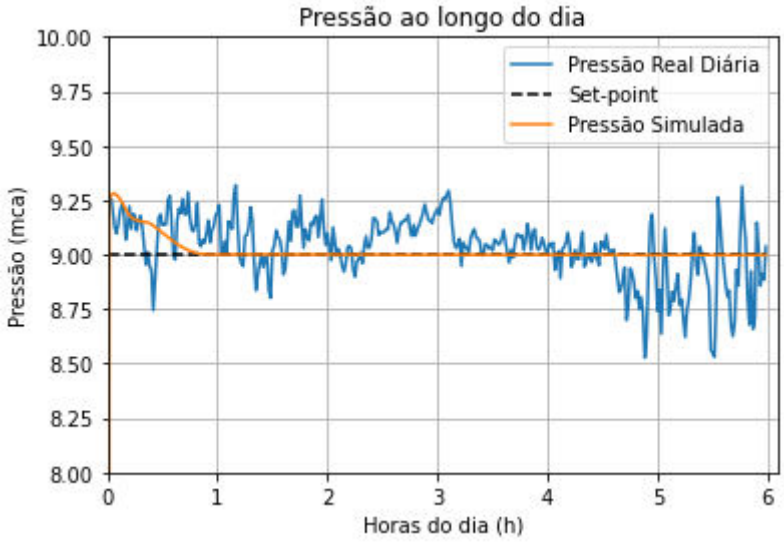
Figura 47 – Frequência simulada baseado na referência de pressão.



Fonte: Autor.

Na Figura 48 é apresentado uma comparação entre a pressão simulada e a pressão real da rede, a qual o controle nebuloso se apresenta mais estável do que o controle vigente, apresentando menos mudanças nas variações de pressão.

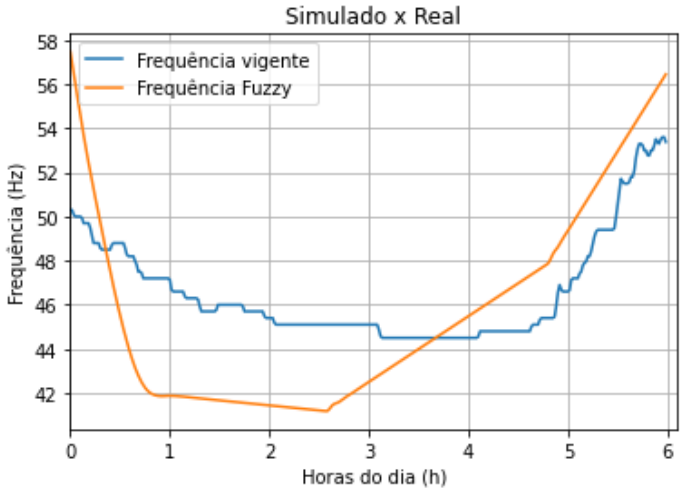
Figura 48 - Comparação Pressão Simulada x Pressão Real.



Fonte: Autor.

É apresentado na Figura 49 uma comparação entre a frequência de rotação resultante da lógica fuzzy e frequência de rotação resultante do controle vigente. Interessante notar que ambas as frequências possuem certa correlação, no entanto, o controle nebuloso mostrou-se mais estável no controle da pressão.

Figura 49 - Comparação Frequência Simulada x Frequência Real.



Fonte: Autor.

4.2. Análise dos resultados na EEA R12

Uma vez que o desenvolvimento da lógica de controle nebulosa tem como objetivo ser introduzida em um sistema hidráulico real de distribuição de água, os cuidados devem ser redobrados não havendo espaço para equívocos ou excesso de empirismos que podem ser prejudiciais para todo o conjunto do serviço. Esse cuidado foi a principal razão para a construção de um modelo para validação da lógica nebulosa.

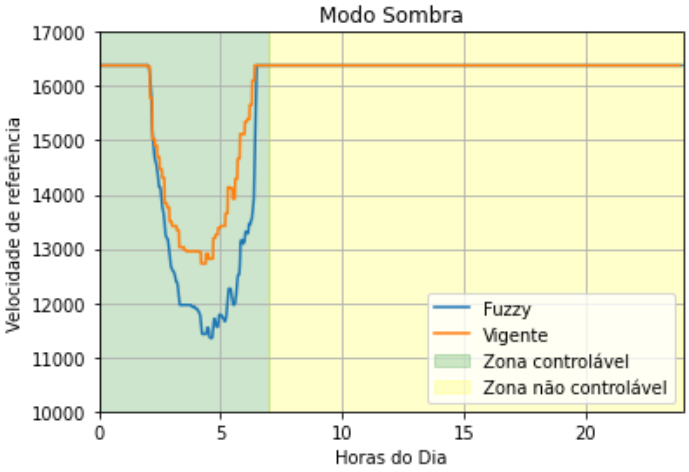
E por esse mesmo motivo que, como uma etapa anterior à aplicação do controle sobre o processo, foi realizado mais uma validação da lógica nebulosa. Para comparar se o controle nebuloso possuía coerência com uma lógica de controle bem-sucedida, realizou-se um teste de sombreamento. Esse teste funciona da seguinte maneira: ambas as lógicas de controle são monitoradas e registradas por um determinado período de tempo, mas apenas a lógica vigente envia os valores de referência de velocidade para os inversores de frequência com a lógica nebulosa apenas sombreando. O objetivo principal desse teste é verificar a coerência entre ambas as lógicas.

Havendo resultados positivos pode-se aplicar a lógica nebulosa com mais segurança sobre a rede de distribuição. Desse modo, chega-se à parte final do trabalho onde se aplica a lógica nebulosa aos inversores, observando o comportamento da rede e da velocidade de rotação dos conjuntos motobomba quando submetida a lógica nebulosa e realizado uma comparação entre as duas lógicas de controle considerando como parâmetros de desempenho a estabilidade na pressão na rede, a diferença energética entre os controles e a variação de frequência dos conjuntos motobomba.

- **Teste de sombreamento:**

Após enviar os valores processados pelo controlador nebuloso desenvolvido em Python para o sistema supervisório, foi possível fazer uma comparação entre os sinais de atuação do controle vigente escrito em uma variável meta do ScadaLTS e do controlador nebuloso. Conforme pode ser visto na Figura 50, considerando uma inspeção visual dos sinais de atuação observa-se que o controlador nebuloso acompanha o controlador vigente, mas atuando teoricamente, de maneira mais econômica uma vez que a velocidade de referência enviada é inferior ao controle vigente. Cabe ressaltar mais uma vez que o sistema com um único motor em operação não consegue fornecer água suficiente em todos os momentos do dia, devido ao consumo dos horários de pico ser superior a capacidade de fornecimento do conjunto motobomba. No gráfico da Figura 50 a zona não controlável começa quando a velocidade de referência satura.

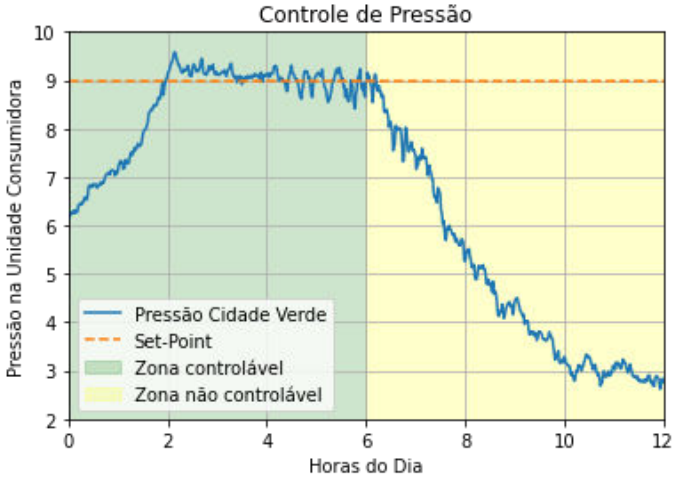
Figura 50 – Teste de Sombreamento entre o controle vigente e o nebuloso



Fonte: Autor.

O sinal de atuação enviado pelo controlador vigente escrito em uma variável meta do ScadaLTS, resultou na pressão da rede apresentada na Figura 51. Para esta forma de controle, pode-se observar alguns parâmetros de desempenho: um sobrevalor de cerca de 6,33% considerando que o valor de referência desejado é de 9mca; durante a faixa de pressão controlável (entre as 02:00 – 06:00) observa-se um pequeno erro em regime permanente ao passo em que se observa também uma pequena oscilação em torno do valor de set-point.

Figura 51 – Pressão na rede produzida pelo controle vigente.



Fonte: Autor.

Em horários superiores às 6 horas da manhã, a demanda dos consumidores é superior a capacidade do motor de suprir essa demanda o que justifica a queda da pressão na rede.

Portanto, o estudo do desempenho que serão apresentados do controlador nebuloso será mais direcionado para os horários possíveis de controlar a pressão na rede.

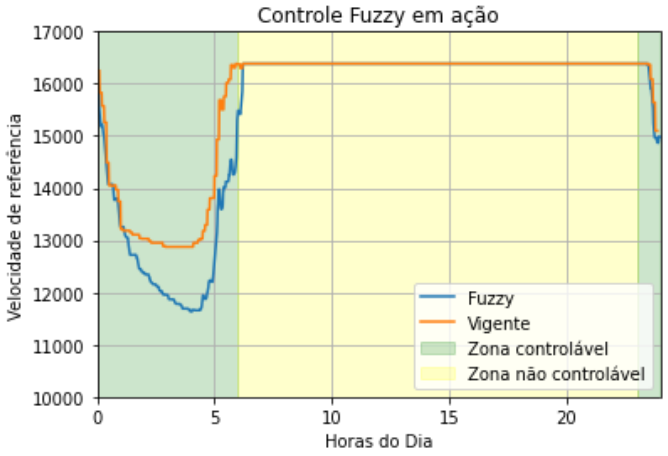
- **Aplicando o Controlador Nebuloso:**

Superado o teste de sombreamento, foi enfim aplicado o controle nebuloso sobre a rede hidráulica. Para analisar o desempenho da solução proposta, este controlador foi aplicado sobre a rede para comandar as ações de controle dos inversores de frequência por 2 dias e observar quais foram os benefícios baseado para os consumidores e para a empresa de distribuição de água.

- **DIA 1 da aplicação:**

Na Figura 52 pode-se observar a relação entre os sinais de atuação do controlador nebuloso e o controlador vigente, mas agora, com o controlador nebuloso comandando as ações de controle. Conforme acontecido no teste de sombreamento, o controlador nebuloso acompanhou a mesma tendência de ser mais econômico que o controlador desenvolvido com uma variável meta do ScadaLTS, enviando uma velocidade de referência inferior.

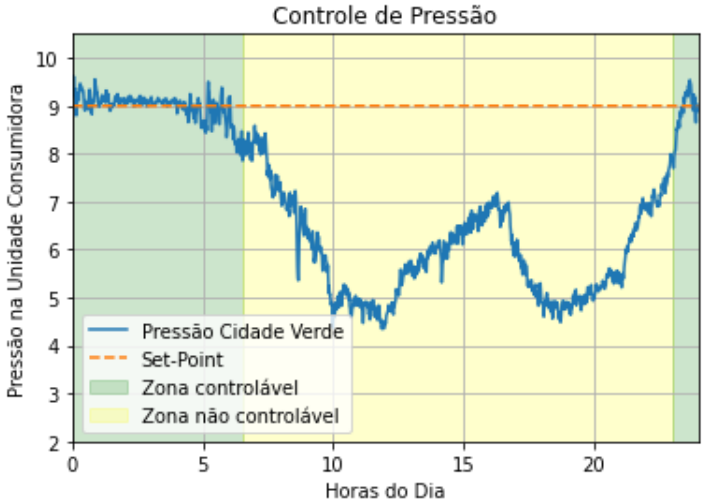
Figura 52 – Controle Fuzzy em operação, 1ºdia.



Fonte: Autor.

O sinal de atuação do controlador nebuloso resultou no comportamento da rede que pode ser observada na Figura 53. É possível notar o controlador nebuloso atuou de maneira mais estável, com erro em regime permanente menor do que o controle vigente. No entanto, o sobrevalor resultante do controlador foi de aproximadamente 6,78%, um aumento pequeno em relação ao controlador vigente.

Figura 53 – Controle de pressão via Fuzzy, 1ºdia.



Fonte: Autor.

Do ponto de vista econômico, foi coletado também a potência de atuação dos motores quando controlados pelo controlador nebuloso e estimado da potência de atuação dos motores (através do sinal de atuação) se estivessem sobre a lógica de controle vigente, para analisar a diferença energética diária entre ambas formas de controle.

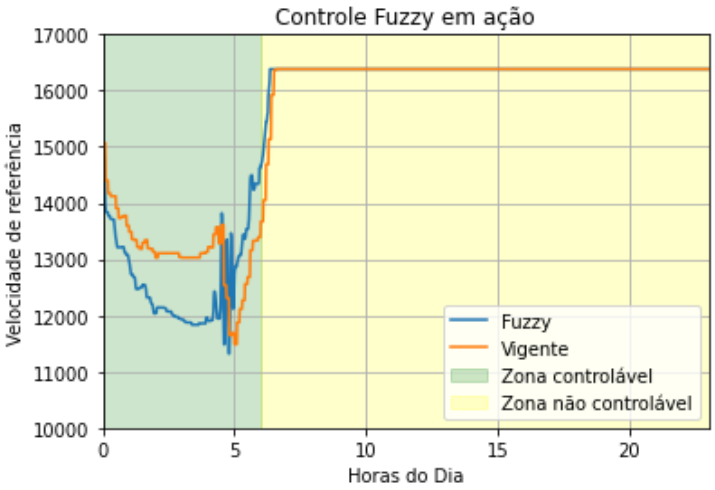
Para o sinal de controle que parte do controlador vigente tem uma energia gasta estimada de 954.40kWh em um dia, enquanto uma energia calculada do controle fuzzy de aproximadamente 926.79kWh em um dia, representando uma economia de um pouco mais de 27,6kWh diário.

Esse conjunto de desempenhos torna o dia 1 de aplicação da lógica de controle nebulosa muito satisfatório, propiciando benefícios a nível de controle e a nível financeiro para a concessionária.

- **DIA 2 da aplicação:**

Na Figura 54, tem-se a comparação entre os sinais de atuação de controle durante o segundo dia de operação do controlador nebuloso. Desta vez, houve um comportamento não desejado que provocou um grau de instabilidade no controle de pressão da rede. É possível observar entre as 04:00 – 05:00h variações bruscas nos sinais de atuação, tanto o do controle vigente quanto do controle fuzzy.

Figura 54 – Controle Fuzzy em operação, 2ºdia.

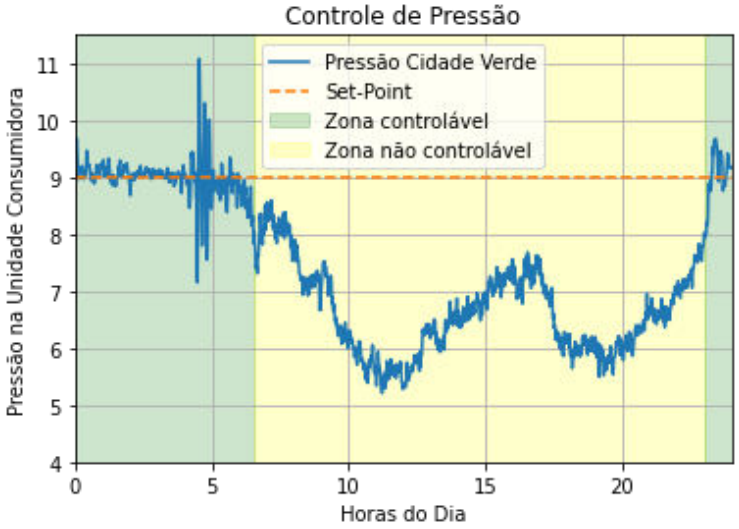


Fonte: Autor.

A certeza sobre origem desta variação brusca é desconhecida, no entanto, supõe-se que foi devido ao seguinte fator: em alguns poucos momentos a interação entre o Python e a API com o ScadaLTS falha, resultando atrasos nos tempos de requisição entre supervisório e controlador nebuloso. Este atraso pode ter feito o controlador nebuloso perceber uma variação de pressão muito alta, gerando sinais de atuações bruscos, refletindo na pressão aplicada a rede. No entanto, esse defeito pode ser sanado aprimorando os parâmetros dos conjuntos e regras fuzzy dando mais robustez para esse tipo de situação.

Essa variação brusca provocou seus impactos na rede. Nada perigoso que comprometa a saúde da rede, mas que prejudicou momentaneamente a estabilidade do controle de pressão, conforme pode ser visto na Figura 55.

Figura 55 – Controle de pressão via Fuzzy, 2ºdia.



Fonte: Autor.

O sobrevalor registrado após as 20 horas foi de 7,5%. A instabilidade registrada para o controle de pressão entre as 04:00 – 05:00h pode ser facilmente correlacionada com as variações bruscas do sinal de atuação do controlador nebuloso, considerando que as variações bruscas de atuação foram refletidas de uma maneira praticamente instantânea da pressão na rede.

Desse modo, percebe-se que ainda há um gargalo importante que pode ser aprimorado em relação aos parâmetros do controlador nebuloso. A diminuição da taxa de amostragem de um minuto e um ajuste fino dos parâmetros fuzzy podem vir a melhorar a qualidade do controle.

Para mitigar os impactos das falhas na comunicação, pode-se ainda experimentar a utilização de uma função que atue durante esses períodos estimando o valor da medição de pressão que não foi coletada pelo controlador nebuloso, que pode ser baseado na tendência de crescimento ou na em uma média móvel, por exemplo.

Considerando que o sistema não obteve êxito em manter estável o controle de pressão no segundo dia de operação, a realização de uma análise energética foi descartada já que não faz sentido observar a economia de energia obtida por uma lógica de controle que apresentou falhas em seu objetivo principal de controlar a pressão na rede.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma solução de monitoramento e controle baseado em Python para controlar a pressão de uma rede de abastecimento de água real. A solução envolveu: a utilização de protocolo Modbus TCP para leitura e escrita de dados de equipamentos de campo, em especial à inversores de frequência os quais são fundamentais na variação da velocidade de rotação dos conjuntos motobombas; utilização de placas ESP8266 para envio de leituras de sensores de pressão posicionadas na distribuição; ScadaLTS como sistema supervisório e Python para modelar a rede de distribuição e projetar o controlador nebuloso.

O uso de Python para os propósitos do trabalho se estendeu em 3 processos: modelagem com redes neurais artificiais de uma rede de distribuição de água; projeto de controlador fuzzy a qual foi previamente validado no modelo desenvolvido no 1º processo e integração com o ScadaLTS via API REST para baixar dados do supervisório em tempo real e enviar sinais de controle de volta para o sistema supervisório para que este possa ser enviado para os inversores de frequência em campo.

A proposta do trabalho apresenta uma contribuição importante a nível acadêmico e a nível profissional, uma vez que abre as portas para a utilização de lógicas de controle mais avançadas sem a necessidade de embarcar em um CLP, podendo ser implementados em uma linguagem de programação simples como Python. A contribuição é ampliada com a possiblidade de se extrair dados em tempo real de um sistema supervisório importante como o ScadaLTS e utilizá-los para um propósito de controle.

E sobre o controlador nebuloso, este se mostrou competente em controlar a pressão de uma unidade consumidora em uma rede de abastecimento de água real, mesmo com limitações das amostras de pressão só poderem ser acessadas de um em um minuto e dos conjuntos motobomba não serem capazes de fornecer água suficiente para manter a pressão na rede em horários de alta demanda. No entanto, no horário de baixo consumo que é o período mais importante no que se refere a evitar o rompimento de tubulações devido ao crescimento demasiado de pressão na rede, o controlador cumpriu seu papel.

Sendo assim, considerando tais colocações, trabalhos futuros podem explorar a utilização de outras linguagens de programação para o desenvolvimento da integração com dados de um sistema supervisório, ou ainda, explorar técnicas mais genéricas para coleta de dados de sistemas supervisórios, de modo que a integração funcione de maneira similar para uma variedade de sistemas supervisórios. Uma alternativa de acesso a dados para sistemas

supervisórios *web* é a utilização de técnicas de *web-scraping* (em tradução livre, raspagem de dados) que são capazes de extrair dados de quaisquer páginas *web*.

Outra linha de estudo seria a de utilizar técnicas de controle mais modernas como o controle neuro-fuzzy, que têm o potencial de oferecer um desempenho melhor conforme acontecido em alguns trabalhos citados.

Para finalizar o trabalho, todo o trabalho de TCC, sua concepção e técnicas que nele foram utilizadas são frutos dos aprendizados adquiridos durante o curso de engenharia elétrica somados aos desafios encontrados em atividades extracurriculares como extensão, P&D e monitorias. Cada atividade exigindo competência e habilidades novas a serem adquiridas. Desse modo, o conhecimento atrelado a desenvoltura para resolver problemas de engenharia foram essenciais para o encerramento deste ciclo acadêmico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12218. Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público. 1994.

ASSUNÇÃO, F. N. O. **Controlador Fuzzy implementado em ScadaBR para o controle de pressão numa adutora de água em Florianópolis.** Monografia (Gradução) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BEZERRA, Saulo de Tarso M. et. al. Controle automático de pressão em sistemas de distribuição de água. **SISTEMAS DE SANEAMENTO - EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.** João Pessoa, 1ºEdição, p. 9 – 29, 2010.

BRASIL, Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Marco do Saneamento Básico (Atualização da Lei 11.445/07).

CAMBOIM, W. L. L. et al. **Aplicação de técnicas Fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água.** Eng Sanit Ambient, v.19 n.1, p. 67-77, jan/mar 2014a.

CAMBOIM, Will L. L. et al. **Aplicação de técnicas Fuzzy no controle de pressão em sistemas de abastecimento de água.** Eng Sanit Ambient, v.19, n.1, p. 67-77, 2014b.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005

COELHO, Marcelo S. **Apostila de Sistemas Supervisórios**. São Paulo, 2010.

DINIZ, Mikaele L. et. al. **Controle Inteligente de Pressão Hidráulica com Ênfase na Eficiência Energética.** Simpósio Brasileiro de Automação – SBAI, Ouro Preto, MG, outubro, 2019.

FURTADO, M. I. V. **REDES NEURAIS ARTIFICIAS: Uma abordagem para sala de aula.** Atena Editora, 2019.

GOMIDE, F. A. C e GUDWIN, R. R. **MODELAGEM, CONTROLE, SISTEMAS E LÓGICA FUZZY.** SBA Controle & Automação, v.4, n.3, 1994.

GUIDI, J. M. M. **ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA UTILIZANDO DADOS OBTIDOS POR SISTEMAS SUPERVISORES REMOTOS ESTUDO DE CASO: MUNICÍPIO DE FRANCA-SP.** FENASAN, 2017.

MOURA, Geraldo de Araújo. et al. **Sistema de Controle Fuzzy Neural para Operação Ótima de Redes de Distribuição de Água.** XV Seminário Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje, SEREA2017, 2017a.

MOURA, G. A.; GOMES, H. P.; SILVA, S. A.; BEZERRA, S. T. M.; OLIVEIRA, J. K. C. **REDE NEURAL ADAPTATIVA APLICADA AO CONTROLE DE PRESSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA**. FENASAN, 2017b.

NISE, Norman S. **ENGENHARIA DE SISTEMAS DE CONTROLE** , 7ªed, 2017.

PEREIRA, José A. R.; CONDURÚ, Marise T. **ABASTECIMENTO DE ÁGUA: Informação para Eficiência Hidroenergética.** João Pessoa/PB: Editora Universitária, 2014.

RODRIGUES, W. **Critérios para o Uso Eficiente de Conversores de Frequência em Sistemas de Bombeamento de Água.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2007.

SANZ, G.; PÉREZ, R; SÁNCHEZ, R; **Pressure Control of a Large Scale Water Network using Integral Action.** IFAC Proceedings Volumes, V. 45, p. 270-275, 2012.

SEBASTIÃO, Leandro de Medeiros. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de automação e controle para as estações elevatórias de esgoto do município de Criciúma/SC.** Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SILVA, E. D. C. **Eficientização Energética para um Sistema de Distribuição de Água.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFPB/CT – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA ENGENHARIA E CIÊNCIAS APLICADAS: fundamentos teóricos e aspectos práticos.** 2º ED., 2016.

SILVA, Leonardo Perpétuo. **INVERSOR DE FREQUÊNCIA.** Monografia (Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas) - Centro de Instrução Almirante Graça Aranha. Rio de Janeiro, 2011.

SIMÕES, M. G. & SHAW, I. S. **CONTROLE E MODELAGEM FUZZY.** Editora Blucher, 2ªEd, 1999.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, Ministério do Desenvolvimento Regional. **24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto.** Brasília, 2018.

TANSCHEIT, Ricardo. **SISTEMAS FUZZY.** Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água:** Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistema de Abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2. Salvador: ReCESA, 2008.

ZADEH, L.A. **Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility**. Fuzzy Sets and Systems, vol. 1, p. 3-28, 1976.