



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



Thaís Christine Borges da Silva

**Relatório de Estágio de Atividades
Desenvolvidas no Laboratório de Eficiência
Energética e Hidráulica em Saneamento
(LENHS): Modelagem de Sistemas**

João Pessoa

2018

Thaís Christine Borges da Silva

**Relatório de Estágio de Atividades Desenvolvidas no
Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em
Saneamento (LENHS): Modelagem de Sistemas**

Relatório de Estágio Integrado submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba como exi-
gência para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Departamento de Engenharia Elétrica

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

João Pessoa

2018

Thaís Christine Borges da Silva

Relatório de Estágio de Atividades Desenvolvidas no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS): Modelagem de Sistemas

Relatório de Estágio Integrado submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal da Paraíba como exi-
gência para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. João Pessoa, 12 de junho de 2018:

**Prof. Dr. Juan Moises Mauricio
Villanueva**
Orientador

Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes
Supervisor

**Prof. Dr. Carlos Alberto de Souza
Filho**
Avaliador Interno

João Pessoa
2018

Agradecimentos

Agradeço à minha família, pelo apoio contínuo ao longo da vida, por todo esforço que me permitiu seguir em frente e pelas risadas constantes quando as adversidades surgiam.

Ao meu namorado pela paciência e compreensão incansáveis ao longo dessa jornada, por estar sempre presente e me incentivando a fazer o meu melhor e principalmente pelo amor.

À minha segunda família, Tânia, Jessé e Tayná, que tenho tanta sorte de fazer parte, pelo apoio e por sempre me receberem de braços abertos e me fazer sentir tão acolhida.

Ao meu orientador, Juan Moises Mauricio Villanueva, pelos ensinamentos que me ajudaram a crescer como futura engenheira, pela paciência e dedicação.

Aos meus amigos Giselle, Nicolas, Igor, Isabela, Rafael, por todo pensamento positivo, pelas conversas profundas e outras nem tanto, viagens e momentos tão preciosos, e à Georgia, pela companhia tão importante e especial nessa jornada tão longa pela graduação, do começo ao fim.

À Lupin, Boomer, Black e Lino, pela leveza, teimosia, brincadeira e amor que deixam tudo mais leve e dissipam o estresse.

Identificação

EMPRESA:

Nome: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento

Endereço: Campus Universitário BR 101, s/n, Bloco do Centro de Tecnologia

Bairro: Castelo Branco

Cidade e Estado: João Pessoa-PB

Tel.:(83) 3216-7200

CEP: 58051-900

ESTÁGIO:

Área de Atuação: Centro de Controle Operacional

Data de Início: 09/04/2018

Data de Término: 01/06/2018

Carga Horária Semanal: 30 horas

Carga Horária Total: 240 horas

Supervisor do Estágio: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

Resumo

Este relatório apresenta as principais atividades desenvolvidas ao longo do estágio supervisionado realizado pela aluna do curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, durante o período de 09/04/2018 a 01/06/2018. Foi desenvolvido um modelo da rede de distribuição de água presente no laboratório com o objetivo de implementar posteriormente uma estratégia de controle, de forma a simular uma rede real de distribuição de água e suas variações de pressão e vazão. Para a realização das atividades descritas nesse relatório, utilizou-se *softwares* como *LabView* e *Matlab*. Os resultados experimentais e aplicados na supervisão da planta são mostrados e analisados.

Palavras-chave: Identificação de Sistemas. Rede Neural. Supervisório. SCADA. Modelo.

Abstract

This report presents the main activities developed during the supervised internship conducted by the undergraduate student in Electrical Engineering at the Federal University of Paraíba, in the Laboratory of Energy Efficiency and Hydraulics in Sanitation, in the period from 09/04/2018 to 01 / 06/2018. A model of the water distribution network was developed in the laboratory with the objective of implementing a control strategy in order to simulate a real network of water distribution and its variations of pressure and flow. In order to carry out the activities described in this report, it was used softwares like LabView and Matlab. The experimental and applied results in the supervisor of the plant are shown and analyzed.

Keywords: System Identification. Neural Network. SCADA. Model.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento . . .	13
Figura 2 – Organograma das atividades do LENHS	13
Figura 3 – Detalhes internos de um sensor de pressão	16
Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sensor de vazão	18
Figura 5 – Controlador Lógico Programável	19
Figura 6 – Componentes de um Controlador Lógico Programável	20
Figura 7 – Modelo de Neurônio Artificial	22
Figura 8 – Modelo de RNA com múltiplas camadas	24
Figura 9 – Sistema de Distribuição no Supervisório	25
Figura 10 – Sensor de pressão: PTX 7217	26
Figura 11 – Sensor de vazão: VMS 038	27
Figura 12 – Válvula proporcional: LRB24-SR	28
Figura 13 – Aquisições para frequência constante e ângulo variando.	29
Figura 14 – Aquisições para frequência constante e ângulo variando.	30
Figura 15 – Entradas e saída da RNA.	31
Figura 16 – Entradas e saída da RNA.	31
Figura 17 – Treinamento da Rede Neural.	32
Figura 18 – Validação da Rede Neural	33
Figura 19 – Erro da Rede Neural	33
Figura 20 – Treinamento da Rede Neural	34
Figura 21 – Validação da Rede Neural	35
Figura 22 – Erro da Rede Neural	35
Figura 23 – Rede neural implementada no <i>LabView</i>	36
Figura 24 – Controle da planta implementado no <i>Matlab</i>	37
Figura 25 – Saída da planta após aplicação do controle.	37

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do transdutor de pressão PTX 7217	26
Tabela 2 – Características do transdutor de pressão TP-ST18	27
Tabela 3 – Características do transdutor de vazão VMS 038	27
Tabela 4 – Características da válvula proporcional LRB24-SR	28

Lista de abreviaturas e siglas

LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
CT	Centro de Tecnologia
CCO	Centro de Controle Operacional
CC	Corrente Contínua
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
RNA	Redes Neurais Artificiais

Lista de símbolos

η	Rendimento
V_e	Força Eletromotriz
B	Fluxo Magnético
v	Velocidade do Líquido
Q	Fluxo
A	Área
D	Diâmetro

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento	12
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivos Gerais	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	Organização do Documento	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Redes de Distribuição de Água	15
2.2	Sensores e Atuadores	15
2.2.1	Transdutores de Pressão	16
2.2.2	Transdutores de Vazão	17
2.2.3	Válvula Proporcional	18
2.3	Controlador Lógico Programável	19
2.4	Supervisão	19
2.5	Identificação de Sistemas	20
2.6	Redes Neurais Artificiais	21
3	ATIVIDADES	25
3.1	Descrição do Sistema	25
3.2	Medições de Pressão e Vazão	28
3.3	Identificação do Sistema Baseado em Redes Neurais Artificiais	30
4	RESULTADOS	32
4.1	Treinamento da RNA	32
4.2	Rede Neural no Supervisório	35
4.3	Controle do Sistema	36
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	39

1 Introdução

Este relatório descreve as atividades realizadas no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS Nordeste) no período compreendido entre 09/04/2018 até 01/06/2018 com o objetivo de aplicar os conhecimentos aprendidos durante o curso de graduação de Engenharia Elétrica, particularmente os conhecimentos da área de controle e automação.

1.1 Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento

O LENHS está localizado no Centro de Tecnologia (CT) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), inicialmente era o Laboratório de Hidráulica, criado em Junho de 1975, com uma área de aproximadamente 600 m². Apenas em 2001 o Laboratório de Hidráulica passou a dividir espaço com o Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. O LENHS destina-se às aulas práticas de disciplinas dos cursos de graduação e pós graduação em Engenharia Civil, Mecânica e Elétrica, além de desenvolver atividades de apoio à pesquisa e extensão (GOMES, 2007).

Coordenado pelo Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes, o LENHS é resultado do desenvolvimento de ações integrantes do Programa Nacional de Eficiência Energética no Saneamento Ambiental – PROCEL SANEAR – das Centrais Elétricas Brasileiras S. A. – ELETROBRÁS. Uma foto da estrutura do laboratório é mostrada na Figura 1.

São atividades desenvolvidas pelo laboratório na área de controle e automação as seguintes (GOMES, 2007):

- Apresentação de um sistema completo de automação em sistemas de distribuição;
- Controle de pressão e vazão através de válvulas de controle eletrônicas;
- Controle de pressão e vazão através de inversores de frequência nos motores;
- Desenvolvimento de sistemas de controle para aplicação em saneamento;
- Monitoramento de grandezas elétricas;
- Monitoramento de grandezas hidráulicas em redes de distribuição;
- Simulação de vazamentos na rede.

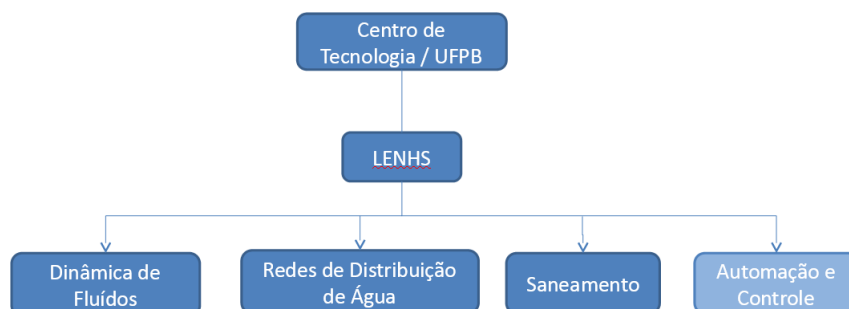
Figura 1 – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento



Fonte: Gomes (2007)

Um organograma das atividades realizadas no LENHS é mostrado na Figura 2, com destaque para a área onde foi realizado o estágio. Realizado no Centro de Controle Operacional (CCO), o estágio foi supervisionado pelo Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes, coordenador do laboratório e professor do departamento de Engenharia Civil, e feito sob orientação do Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva, professor do departamento de Engenharia Elétrica.

Figura 2 – Organograma das atividades do LENHS



Fonte: Autora

1.2 Objetivos

O estágio supervisionado é obrigatório para a conclusão do curso de graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, e tem como principal objetivo permitir que o estudante vivencie na prática a rotina de uma empresa para que tenha o conhecimento e a experiência profissional necessária para o ingresso no mercado de trabalho.

1.2.1 Objetivos Gerais

Desenvolvimento de modelos de identificação de sistemas baseados em Redes Neurais Artificiais para uma rede de distribuição de água do LENHS.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se destacar os seguintes pontos:

- Utilização da Rede de Distribuição de Água utilizando Redes Industriais do LENHS;
- Modelagem de Sistemas: Rede de distribuição primaria considerando perturbações;
- Aprimoramento de um Supervisório para o monitoramento;

1.3 Organização do Documento

Além do capítulo de introdução este relatório de estágio está composto por mais 3 capítulos, os quais são descritos sucintamente:

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica que foi necessária para a realização das atividades de estágio.

No Capítulo 3 são mostradas detalhadamente as atividades desenvolvidas no estágio.

No Capítulo 4 são expostos os resultados obtidos das atividades realizadas.

No Capítulo 5 o trabalho é finalizado com as conclusões.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentados os conhecimentos necessários para a realização das atividades deste estágio. Primeiramente, serão apresentados os conceitos de uma rede de distribuição de água. Em seguida, os conhecimentos básicos referentes a sensores, atuadores e controlador lógico programável são discutidos. Por fim, o embasamento teórico para a realização de identificação de sistemas é apresentado.

2.1 Redes de Distribuição de Água

Uma rede de distribuição de água é o conjunto de elementos hidráulicos (tubulações, conexões, bombas, válvulas e reservatórios) interconectados, com a finalidade de conduzir e distribuir a água para os pontos de consumo em quantidade e qualidade aceitável. Representa todo o processo de fornecimento de água tratada que vai desde sua obtenção até sua utilização por parte da população, ou seja, compreende sua captação em águas profundas ou no manancial, estação elevatória, adutora para conduzir a água bruta, estação de tratamento, reservatórios, rede de distribuição e por fim ligações domiciliares.

A modelagem hidráulica é aplicada em todo o sistema de abastecimento, entretanto a rede de distribuição além de ser, das etapas do sistema de abastecimento, a que mais requer investimentos, também é a que mais agrupa incertezas quanto à demanda, vazamentos, obstruções e o estado dos equipamentos e acessórios (GOMES, 2009).

2.2 Sensores e Atuadores

Sensores são elementos que detectam um sinal ou estímulo e produzem uma saída mensurável (FRANÇA, 2007), enquanto transdutores são dispositivos utilizados para converter uma ou mais quantidades físicas e modificar, se necessário, essas informações para fornecer um sinal de saída resultante (GONÇALVES, 2003).

Os atuadores são classificados como transdutores de saída e são utilizados para converter a energia elétrica em outro tipo de energia, como para gerar movimentos mecânicos ou executar uma ação. Este movimento pode ser virtualmente de qualquer forma, tais como o bloqueio, de aperto ou ejeção (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010).

Na planta presente no laboratório, o transdutor de pressão utilizado é do tipo piezoresistivo e o transdutor de vazão é do tipo eletromagnético, os seus princípios de funcionamento são apresentados a seguir.

2.2.1 Transdutores de Pressão

Em uma coluna de líquido existe uma diferença de pressão que depende da altura de coluna e da massa específica do líquido e independe da área e da forma do recipiente. Ignorando-se as variações da gravidade, a pressão da coluna de um líquido é:

$$P = \rho_1 g h \quad (2.1)$$

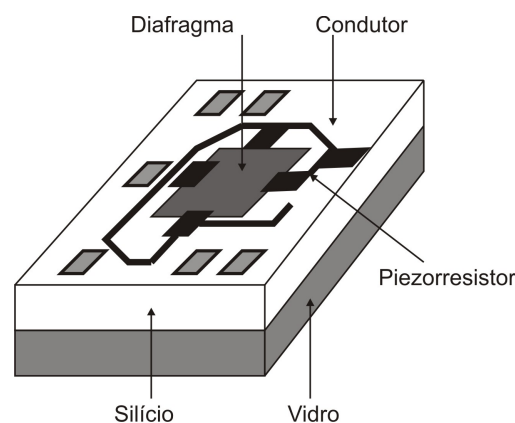
onde P é a pressão, ρ_1 é a massa específica do líquido, g é a aceleração da gravidade e h a altura onde se deseja calcular a pressão.

No caso de um recipiente contendo um fluido, para suas paredes se manterem estacionárias a força exercida pelo meio pressurizado deve ser balanceada por uma força oposta e de igual intensidade. Um sensor que possa medir essa força oposta nas proximidades da parede do recipiente é classificado como um sensor de vazão.

O princípio de funcionamento de transdutores de pressão piezo-resistivos consiste na variação da resistência elétrica de elementos sensores quando submetidos a uma força. Um elemento que realiza essa função é o extensômetro de resistência elétrica e é o principal componente desse tipo de sensor.

Para a fabricação de um sensor de pressão piezo-resistivos, os extensômetros são integrados em um diafragma no próprio silício utilizando a mesma técnica de fabricação de Circuitos Integrados. Os elementos piezo-resistivos, o diafragma e a estrutura do sensor são construídos na mesma pastilha de silício, essa configuração está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Detalhes internos de um sensor de pressão



Fonte: Brusamarello e Balbinot (2010)

Uma pequena deflexão mecânica vai causar uma variação de resistência dos extensômetros instalados no substratos através de uma membrana deixada no bloco semiconductor

para funcionar como diafragma. As variações de resistência são transformadas em variação de tensão que é proporcional à variação de pressão aplicada no sensor.

A implementação eletrônica desse tipo de sensor exige um grande cuidado, pois entre as grandes desvantagens desse sensor estão a geração de sinais relativamente baixos e a sensibilidade em relação a variações de temperatura (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010). Embora os transdutores piezelétricos não sejam capazes de medir as pressões estáticas, eles são amplamente utilizados para avaliar fenômenos de pressão dinâmica associados a explosões, pulsações ou condições de pressão dinâmica em motores, foguetes, compressores e outros dispositivos pressurizados que sofrem alterações rápidas (OMEGA Engineering Inc., 2012).

2.2.2 Transdutores de Vazão

Os transdutores de vazão por eletromagnetismo são parte da família de medidores não-invasivos e medem a velocidade média de líquidos condutivos. Seu princípio de operação é baseado no fato que um líquido condutor, movendo perpendicularmente ao campo magnético, induz uma tensão elétrica sobre o condutor que é proporcional à velocidade do líquido. A força eletromotriz (f.e.m.) induzida é gerada perpendicularmente nas direções do fluxo do campo magnético (BRUSAMARELLO; BALBINOT, 2010) e é descrita pela Lei de Faraday:

$$V_e = \int_a^b \vec{v} \times \vec{B} \, dL \quad (2.2)$$

onde V_e é a força eletromotriz induzida do ponto a ao ponto b , \vec{B} é a massa específica de fluxo magnético, a e b são as localizações dos eletrodos e \vec{v} é a velocidade do líquido. Considerando que \vec{v} e \vec{B} são uniformes e que são ortogonais entre si e com V_e , a integral da Equação 2.3 transforma-se em:

$$V_e = \vec{v} L \vec{B} \quad (2.3)$$

A vazão é dada pela Equação 2.4, para uma tubulação a área A é calculada pelo diâmetro D , o que resulta na Equação 2.5. Substituindo a Equação 4 na Equação 2.3, temos a tensão elétrica induzida como uma função do fluxo.

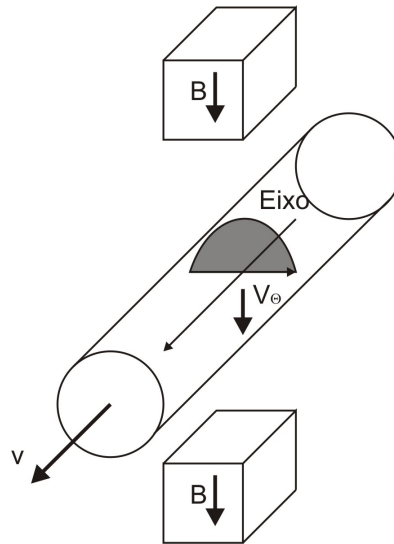
$$Q = A \vec{v} \quad (2.4)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.5)$$

$$V_e = \frac{4BQ}{\pi D} \quad (2.6)$$

Uma ilustração do princípio de funcionamento do sensor de fluxo pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – Princípio de funcionamento de um sensor de vazão



Fonte: Brusamarello e Balbinot (2010)

2.2.3 Válvula Proporcional

Válvulas de controle podem ser operadas facilmente usando um solenoide. Os controles de solenoide têm um sistema de controle digital: uma válvula é aberta quando o solenoide é energizado e fechado quando é desenergizado ou vice-versa. Eles são muito rápidos em sua operação e, portanto, geram pressão e surtos de fluxo nas unidades de controle de potência de fluidos. Se as válvulas de controle puderem ser gradualmente abertas ou fechadas como uma torneira de casa operada manualmente, isso resultará em uma transição gradual entre uma posição totalmente aberta e uma totalmente fechada. Essas válvulas são operadas por componentes eletrônicos, em vez de apenas sinal elétrico. A vantagem dessas válvulas é que elas oferecem maior flexibilidade no projeto e na operação do sistema. Eles também diminuem a complexidade do circuito de energia hidráulica, especialmente para processos que exigem várias saídas de velocidade ou força.

A força de saída exercida pela armadura de um solenoide de corrente contínua (CC) depende da corrente que flui através dele. Este conceito fundamental pode ser usado no projeto de um solenoide CC proporcional no qual a força exercida pela armadura é proporcional à corrente que flui através dele e independente do movimento da armadura sobre a faixa de trabalho do solenoide.

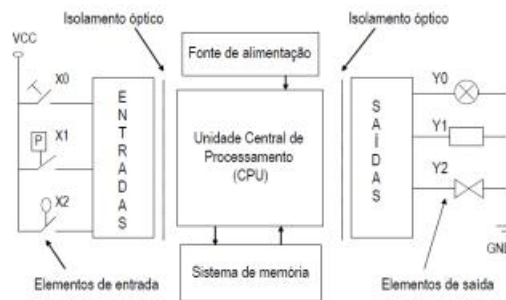
O controle elétrico para a válvula proporcional normalmente usa uma corrente variável ao invés de uma tensão variável. Se um sistema de controle de tensão for adotado,

qualquer variação na resistência da bobina causada pela mudança de temperatura resultará em uma mudança na corrente. Esse problema é eliminado usando um sistema de controle por corrente. É possível controlar uma força eletricamente. Aplicando a força a uma mola de compressão, sua deflexão pode ser controlada (Jagadeesha T, 2013).

2.3 Controlador Lógico Programável

Um controlador lógico programável (CLP) é uma forma especial de controlador microprocessado que usa memória programável para armazenar instruções e implementar funções como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética para controlar máquinas e processos. O funcionamento geral de um CLP é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Controlador Lógico Programável



Fonte: Guerra (2012)

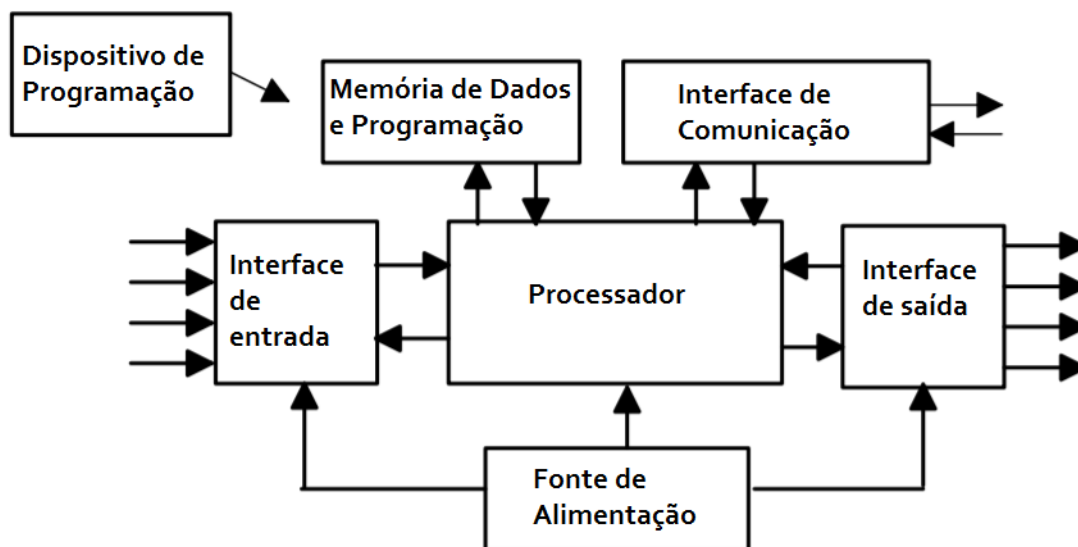
Os CLPs têm a grande vantagem do mesmo controlador básico poder ser usado com uma ampla gama de sistemas de controle. Para modificar um sistema de controle e as regras a serem usadas, tudo o que é necessário é que um operador digite um conjunto diferente de instruções. Não há necessidade de religar. O resultado é um sistema flexível e econômico que pode ser usado com sistemas de controle que variam bastante em sua natureza e complexidade.

Normalmente, um sistema CLP possui os componentes funcionais básicos da unidade do processador, memória, unidade de fonte de alimentação, interface de entrada/saída, interface de comunicação e o dispositivo de programação (BOLTON, 2015). A Figura 6 mostra o arranjo básico.

2.4 Supervisório

Sistemas supervisórios, também conhecidos como SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), tiveram seu uso difundido no começo do século 20, época em que a

Figura 6 – Componentes de um Controlador Lógico Programável



Fonte: Adaptado de Bolton (2015)

capacidade computacional era limitada e por isso sua função ficou restrita a permitir a visualização e a operação de um processo de maneira remota, através de uma interface homem-máquina. Nos dias atuais, um sistema supervisório deve ser multifuncional e permitir muito mais do que a mera operação do processo.

A tecnologia SCADA permite a visualização do sistema em tempo real com a possibilidade de armazenamento dos dados coletados pelo sistema, tornando a operação das plantas mais eficientes e confiável, desta forma, as indústrias passaram a basear seus relatórios e ferramentas gerenciais nos dados providos do sistema de supervisão.

De maneira simplificada, podemos definir que o sistema supervisório é composto por telas, base de dados e drivers de comunicação. As informações exibidas nas telas de um sistema supervisório são provenientes de dados coletados de dispositivos presentes no campo, como por exemplo o CLP. A comunicação entre esses dispositivos e o SCADA é feito através dos mais variados protocolos de comunicação industrial, como por exemplo o Modbus ou Fieldbus (PAIOLA, 2011).

2.5 Identificação de Sistemas

Segundo Åström e Eykhoff (1971), "...[modelo] é uma representação simplificada dos aspectos essenciais de um sistema existente (ou de um sistema a ser construído), que apresenta o conhecimento do sistema de uma forma utilizável". Um modelo tenta reproduzir os aspectos essenciais do comportamento do sistema, simplificando escolhendo

as propriedades mais significativas. As técnicas de modelagem podem ser classificadas como:

- Caixa Branca: realização de experimentos simples para investigar as leis físicas ou químicas envolvidas;
- Caixa Preta construção de um modelo baseado apenas em dados (dados-driven) sem ter conhecimento prévio do sistema. O modelo descreve como as saídas dependem das entradas, não como o sistema realmente é, e caracteriza a dinâmica do sistema (atrasos, velocidade, oscilações e outras), embora a interpretação física dos resultados não seja direta;
- Caixa Cinza: é uma técnica intermediária em que as peculiaridades das leis internas não são totalmente conhecidas, portanto, ela é baseada tanto no conhecimento do sistema quanto na análise de dados experimentais.

A identificação do sistema é o processo de derivar um modelo matemático de um sistema dinâmico com base na observação de entrada-saída de dados experimentais (CHINARRO, 2014).

Na etapa do projeto do experimento, as circunstâncias da coleta de dados de entrada e saída são determinadas, os sinais de excitação são projetados. A construção do sinal de excitação depende do conhecimento prévio sobre o sistema. Por exemplo, diferentes sinais de excitação devem ser usados para identificar um sistema linear e não linear; a excitação depende de o sistema ser estático ou dinâmico, determinístico ou estocástico, etc. Em geral, temos que selecionar os sinais de entrada que excitarão o sistema de tal forma que os dados de entrada-saída possam ser observados durante o experimento, com conhecimento suficiente sobre o sistema. Na identificação do sistema, muitas vezes é necessário projetar experimentos novos e significativamente modificados durante o processo de identificação, onde o conhecimento coletado dos experimentos anteriores é utilizado (HORVATH, 2003).

2.6 Redes Neurais Artificiais

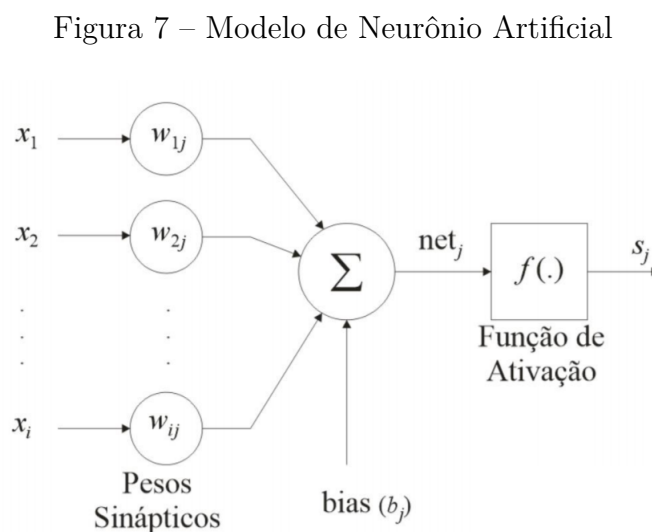
Redes neurais artificiais (RNA) não se aproximam da complexidade do cérebro, no entanto, existem duas semelhanças importantes entre redes neurais biológicas e artificiais. Primeiro, os blocos de construção de ambas as redes são dispositivos computacionais simples (embora os neurônios artificiais sejam muito mais simples que os neurônios biológicos), altamente interconectados. Em segundo lugar, as conexões entre os neurônios determinam a função da rede (HAGAN et al., 1996).

O estudo das redes neurais artificiais é motivado por sua similaridade com sistemas biológicos, que consistem em células nervosas muito simples, mas numerosas, trabalhando

massivamente em paralelo e têm a capacidade de aprender. Não há necessidade de programar explicitamente uma rede neural, ela pode aprender com amostras de treinamento. Um resultado desse procedimento de aprendizado é a capacidade das redes neurais de generalizar e associar dados. Após um treinamento bem-sucedido, uma rede neural pode encontrar soluções razoáveis para problemas semelhantes da mesma classe que não foram explicitamente treinados. Isso, por sua vez, resulta em um alto grau de tolerância a falhas contra dados de entrada ruidosos (KRIESEL, 2007).

Uma rede neural artificial é composta por várias unidades de processamento, cujo funcionamento é bastante simples. Essas unidades geralmente são conectadas por canais de comunicação que estão associados a determinado peso. As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma Rede Neural Artificial vem das interações entre as unidades de processamento da rede. A proposta de McCulloch e Pitts (1943) para uma unidade de processamento pode ser resumida da seguinte maneira e é ilustrada na Figura 7:

- Sinais são apresentados à entrada;
- Cada sinal é multiplicado por um número, ou peso, que indica a sua influência na saída da unidade;
- É feita a soma ponderada dos sinais que produz um nível de atividade;
- Se este nível de atividade exceder um certo limite (*threshold*) a unidade produz uma determinada resposta de saída.



A entrada escalar x_i é multiplicada pelo peso w_{ij} para formar wx , um dos termos enviados para a soma. Se relacionarmos este modelo simples com o neurônio biológico, o peso w corresponde à força de uma sinapse, o corpo celular é representado pela soma e pela função de transferência, e a saída do neurônio representa o sinal no axônio. A equação geral da RNA é descrita como:

$$net_j = \sum x_i w_{ij} + b_j \quad (2.7)$$

onde i refere-se ao neurônio e j se refere à extremidade de entrada da sinapse à qual o peso se refere. A entrada está sempre relacionada a um neurônio na camada de entrada. O b_j se refere ao bias que tem como efeito aumentar ou diminuir a entrada da rede para a função de ativação, dependendo se é positivo ou negativo, respectivamente (HAYKIN, 2007).

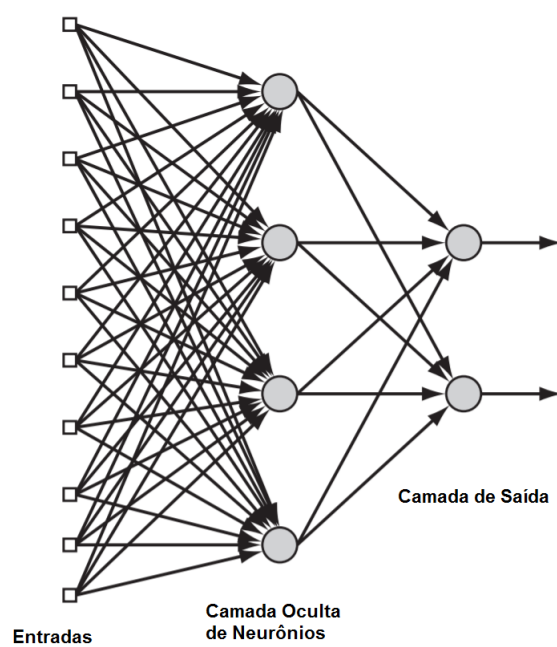
A saída depende da função de transferência específica escolhida, uma determinada função de transferência é escolhida para satisfazer alguma especificação do problema que o neurônio está tentando resolver, e pode ser definida pela Equação 2.8. Alguns tipos de função de ativação são: degrau, linear, sigmoide logarítmica, tangente hiperbólica e gaussiana (HAGAN et al., 1996).

$$S_j = f(net_j) \quad (2.8)$$

A maneira como os neurônios de uma rede neural são estruturados está intimamente ligada ao algoritmo de aprendizado usado para treinar a rede. Uma dessas estruturas é uma rede neural com *feedforward* (quando o fluxo de dados ocorre em apenas um sentido) que distingue pela presença de uma ou mais camadas ocultas, cujos nós de computação são correspondentemente chamados de neurônios ocultos ou unidades ocultas. O termo “oculto” refere-se ao fato de que esta parte da rede neural não é vista diretamente da entrada ou saída da rede. A função dos neurônios ocultos é intervir entre a entrada externa e a saída da rede de alguma maneira útil. Ao adicionar uma ou mais camadas ocultas, a rede pode ser usada para extrair estatísticas de ordem superior de sua entrada.

Os neurônios na camada de entrada da rede fornecem os respectivos elementos do padrão de ativação, que constituem os sinais de entrada aplicados aos neurônios na primeira camada oculta. Os sinais da camada oculta são usados como entradas para a terceira camada e assim por diante para o resto da rede. Normalmente, os neurônios em cada camada da rede têm como entradas apenas os sinais de saída da camada anterior. O conjunto de sinais de saída dos neurônios na camada de saída da rede constitui a resposta geral da rede ao padrão de ativação fornecido pelos neurônios da camada de entrada (HAYKIN, 2007). Uma visão geral dessa estrutura pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 – Modelo de RNA com múltiplas camadas



Fonte: Adaptado de Haykin (2007)

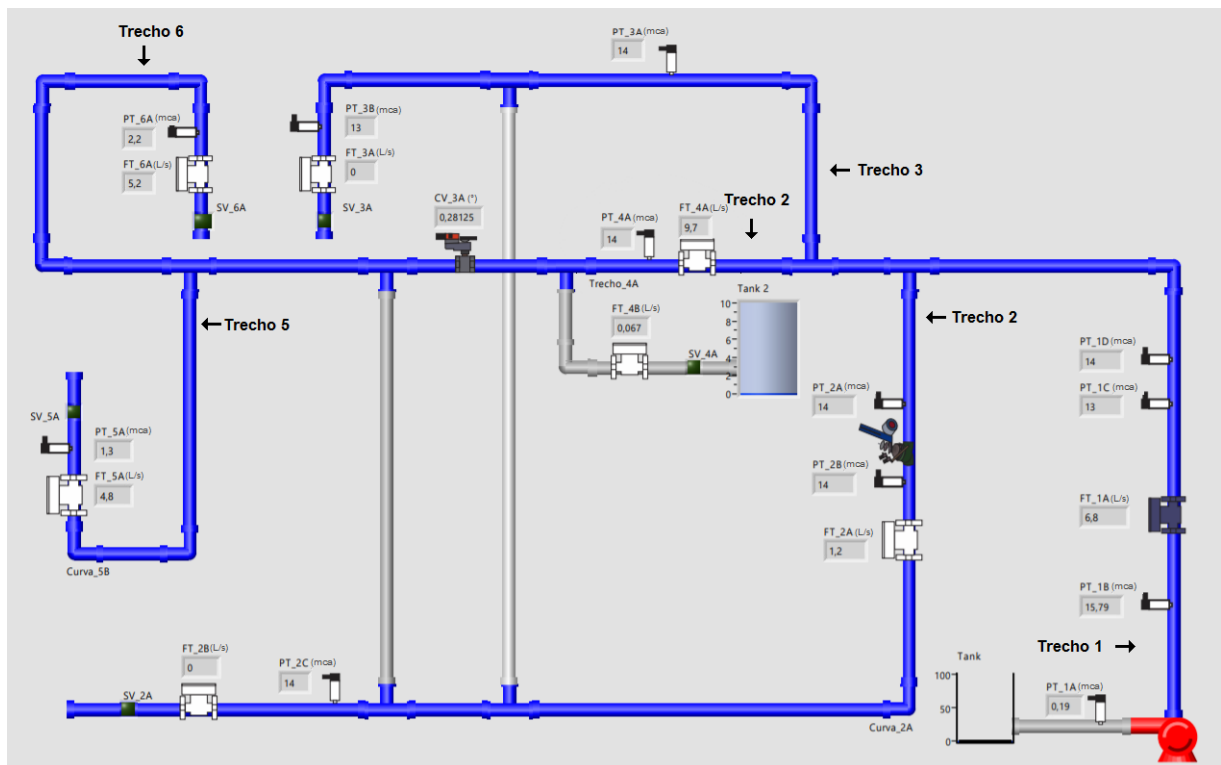
3 Atividades

Neste capítulo serão apresentadas de forma detalhada as principais atividades realizadas durante o período de estágio, bem como uma breve descrição do sistema e componentes utilizados para realização dessas atividades.

3.1 Descrição do Sistema

O sistema supervisor da planta foi implementado no *software* LabView anteriormente no laboratório, como se ilustra na Figura 9, onde são monitoradas e rastreadas informações da rede de distribuição. Essas informações são coletadas por sensores e/ou equipamentos e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. No programa, foram concentradas, para efeito de monitoramento do sistema, as seguintes informações coletadas pelos componentes, em tempo real: pressão, vazão, corrente elétrica do motor, tensão elétrica e potência.

Figura 9 – Sistema de Distribuição no Supervisor



Fonte: Autora

A rede de distribuição emula um sistema real de abastecimento de água com 155

metros de comprimento, a qual está distribuída da seguinte forma: tubulações de PVC DN 50 mm — 140 m, DN 100 mm — 5 m e de ferro dúctil DN 100 mm — 10 m. A planta possui quatro saídas de água que são controladas por registros (manuais) e/ou através de válvulas solenoides, mas para as atividades aqui descritas apenas a saída do trecho 5 permaneceu aberta para saída da água.

O sistema de bombeamento em questão é composto de um conjunto motor-bomba com as seguintes características: potência de 5 cv, motor de alto rendimento, $\eta = 88\%$, fabricado pela WEG, a rotação é 1720 rpm, tem o fator de serviço 1,15, a sua corrente nominal é 8 ampères.

O CPL presente no LENHS é do modelo MPC 4004 da ATOS, compatível com os instrumentos de medição e controle monitorados e/ou controlados, possui três entradas digitais, cinco entradas analógicas e uma saída analógica e também um módulo de comunicação Modbus. O CLP foi interconectado com o supervisor via comunicação Modbus.

Os sensores de pressão presentes na planta de abastecimento de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento são o PTX 7217 e o TP-ST18, a Tabela 1 e a Figura 10 mostram as características referentes ao PTX 7217 e a Tabela 2 é para o sensor TP-ST18.

Tabela 1 – Características do transdutor de pressão PTX 7217

Fabricante	DRUCK
Modelo	PTX 7217
Tipo de Sensor	Piezo-resistivo
Faixa de Operação	0 a 5 PSI
Saída	4 - 20 mA
Tempo de Resposta	1 ms
Exatidão	0,2%
Tensão de Alimentação	9 - 28 Vcc

Fonte: DRUCK INC.

Figura 10 – Sensor de pressão: PTX 7217



Fonte: DRUCK INC.

Tabela 2 – Características do transdutor de pressão TP-ST18

Fabricante	ACROS
Modelo	TP-ST18
Tipo de Sensor	Piezoresistivo
Faixa de Operação	100 mBAR - 1600 BAR
Saída	4 - 20 mA
Tempo de Resposta	1 ms
Exatidão	0,25%
Tensão de Alimentação	9 - 28 Vcc

Fonte: ACROS - AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA.

O transdutor de vazão utilizado para tubulação do LEHNS é do tipo eletromagnético da empresa Incontrol, modelo VMS 038. Um resumo das suas características pode ser visto na Tabela 4 e uma imagem do transdutor é mostrada na Figura 11

Tabela 3 – Características do transdutor de vazão VMS 038

Fabricante	Incontrol
Modelo	VMS 038
Tipo de Sensor	Eletromagnético
Faixa de Velocidade	0,3 - 10 m/s
Saída	4 - 20 mA ou um pulso
Tensão de Alimentação	24 Vcc

Fonte: Incontrol S/A (2009)

Figura 11 – Sensor de vazão: VMS 038



Fonte: Incontrol S/A (2009)

A válvula proporcional presente no LENHS é do modelo LRB24-SR, ela possui quatro fios, dois de alimentação, um para leitura do valor atual do fechamento da válvula e o outro para envio do valor desejado de fechamento pelo barramento. As características

do controlador para válvula proporcional presentes na planta de abastecimento de água emulada pelo (LENHS) são mostradas na Tabela e a Figura 12 ilustra o componente.

Tabela 4 – Características da válvula proporcional LRB24-SR

Fabricante	Belimo
Modelo	LRB24-SR
Tipo de Sensor	Eletromagnético
Ângulo de Rotação	90°, ajustável manualmente
Tensão de Alimentação	24 Vac
Retorno da Saída	2 - 10 Vcc

Fonte: Belimo Aircontrols Inc. (2018)

Figura 12 – Válvula proporcional: LRB24-SR



Fonte: Belimo Aircontrols Inc. (2018)

3.2 Medições de Pressão e Vazão

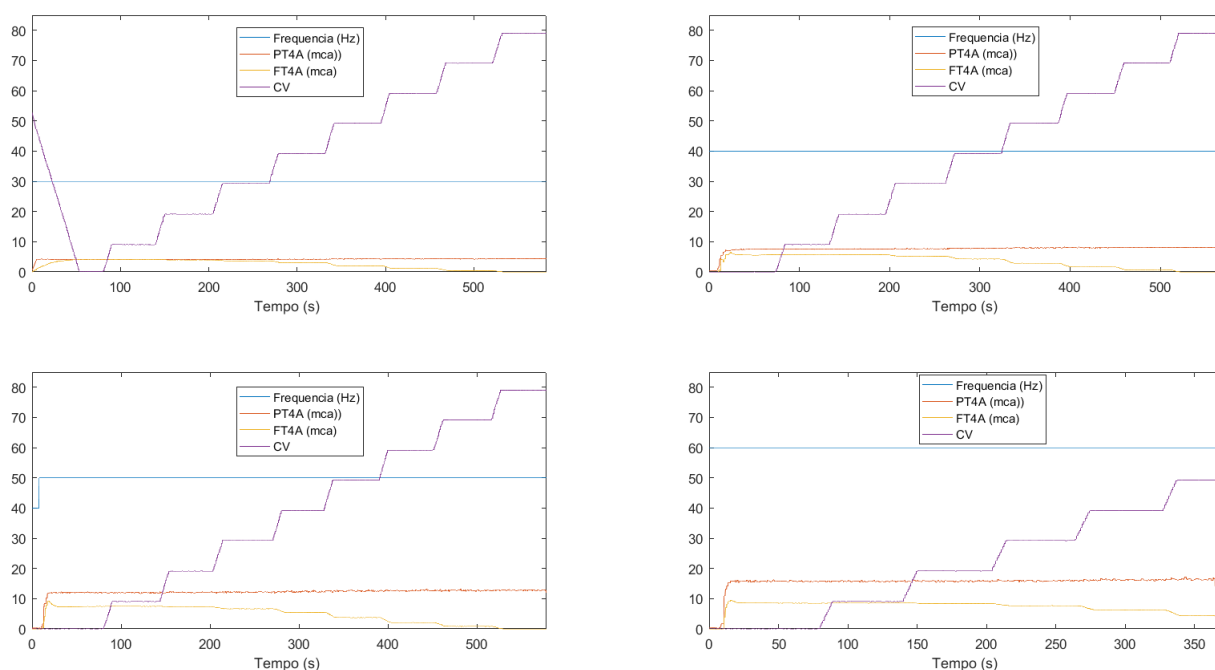
As medições de vazão e pressão foi realizada no trecho 4, nos transdutores de vazão e pressão imediatamente anteriores à válvula redutora de vazão, FT_4A e PT_4A, de forma a simular a vazão de saída da concessionária para uma rede de distribuição.

Os primeiros conjuntos de aquisições realizadas no trecho 4 são mostrados na Figura 13, a frequência do inversor foi mantida constante para cada conjunto de aquisição, enquanto o fechamento da válvula ficou dentro do intervalo de 0° a 80°, variando 10° a cada 1 minuto. A variação da frequência do inversor entre cada conjunto de aquisição foi de 10 Hz, variando de 30 a 60 Hz.

É possível observar pela Figura 13 que o sistema seguiu seu comportamento esperado, isto é, a vazão apresentou um comportamento decrescente enquanto a válvula estava sendo fechada e a pressão apresentou um discreto comportamento crescente para a mesma situação. Isso era esperado pois ao fechar a válvula, por não ter por onde circular, a água atinge um comportamento estacionário, como a vazão para ser medida depende do líquido estar em movimento, ao fechar a válvula o líquido não se movimenta e a vazão

observada se aproxima de zero quando a válvula está quase completamente fechada, em 80° . A pressão aumenta com o fechamento da válvula, pois a frequência é mantida constante, ou seja, a água continua sendo bombeada para o sistema, mas não tem por onde sair, aumentando a pressão nos canos, visto que a quantidade de água só aumenta. É também possível observar que quanto maior a frequência, maior será a vazão inicial do sistema e mais devagar será o decaimento da vazão. Diferentemente do comportamento para as demais frequências, quando o sistema está operando a 60 Hz, a vazão não chega a $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Com o conjunto motor-bomba funcionando a 60 Hz, o ângulo de fechamento da válvula foi variado apenas até 50° por precaução, pois para ângulos maiores o sistema estaria com todas as suas saídas fechadas e com o bombeamento de água na frequência máxima de operação, causando um aumento significativo de pressão, o que poderia ocasionar danos à rede de distribuição.

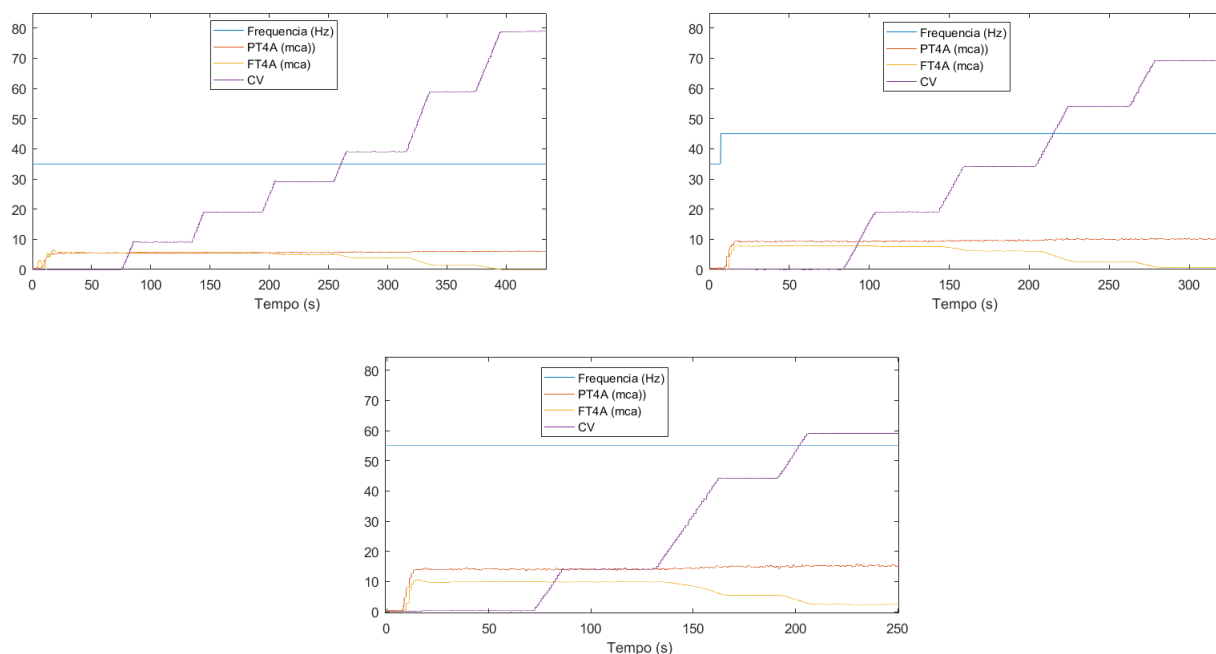
Figura 13 – Aquisições para frequência constante e ângulo variando.



Fonte: Autora

Os conjuntos de aquisições seguintes foram feitos para frequências de valor intermediário, variando de 35 - 55 Hz, novamente em um intervalo de 10 Hz. O ângulo de fechamento da válvula foi variado sem um valor de intervalo fixo. As aquisições são mostradas na Figura 14. Esse conjunto de aquisições seguiu o mesmo padrão do conjunto anterior, com a vazão decrescente e a pressão crescente com o aumento do ângulo de fechamento da válvula.

Figura 14 – Aquisições para frequência constante e ângulo variando.



Fonte: Autora

3.3 Identificação do Sistema Baseado em Redes Neurais Artificiais

A identificação de sistemas por RNA funciona como uma caixa-preta, onde as entradas e as saídas desejadas do sistema a ser identificado são os parâmetros para a RNA. A Rede é treinada a partir desses dados e seu treinamento é armazenado na forma dos pesos e do *bias*, esses valores são salvos para serem incorporado ao *software* supervisor do sistema.

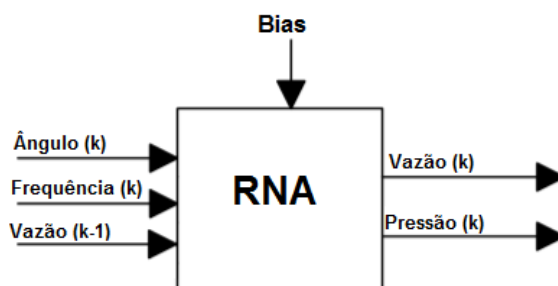
A validação do sistema identificado pela RNA, é feito através de um novo conjunto de dados apresentado como entrada para a Rede, com valores diferentes daqueles utilizados para seu treinamento, e sua saída é comparada com a saída associada ao conjunto de dados utilizado.

Esse sistema possui duas entradas e uma saída: a frequência do conjunto motor-bomba e o ângulo de fechamento da válvula proporcional como entradas e a vazão no trecho anterior à válvula como saída. Dois conjuntos de medição foram realizados, o primeiro com o propósito de treinar a RNA e o segundo para validação da mesma.

Duas configurações foram feitas para treinamento da RNA, a primeira tendo como saídas e pressão e a vazão, a segunda tinha apenas a vazão como saída. Apesar de o sistema possuir apenas duas entradas, para o treinamento e validação da Rede Neural foram utilizadas três entradas, sendo a terceira o valor da vazão no momento anterior, de

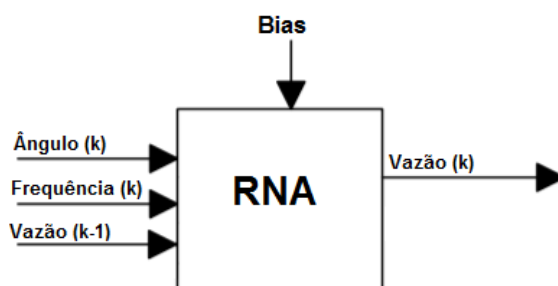
forma que a identificação do sistema fosse feita de forma recursiva, as duas configurações estão ilustrada nas Figuras 15 e 16. Através de experimentos foi observado que não era necessário utilizar a pressão como entrada.

Figura 15 – Entradas e saída da RNA.



Fonte: Autora

Figura 16 – Entradas e saída da RNA.



Fonte: Autora

4 Resultados

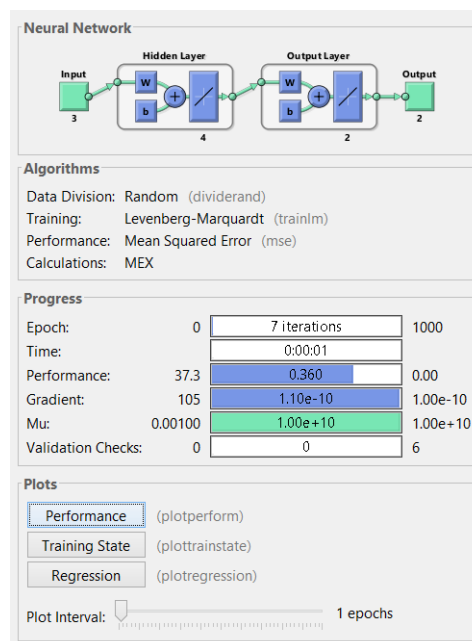
Nesse capítulo serão apresentados os resultados e discussões para cada uma das atividades desenvolvidas no sistema apresentado na Figura 9.

4.1 Treinamento da RNA

A RNA foi treinada com apenas uma camada oculta de 8 neurônios, a função de ativação foi a sigmoide linear e o método de treinamento foi Levenberg–Marquardt. A Rede atingiu o gradiente mínimo estabelecido como parâmetro ótimo de treinamento em quatro interações.

A primeira RNA treinada tinha como saída a pressão e a vazão, configuração ilustrada na Figura 15. Experimentos com diferentes configurações mostraram que não havia necessidade de utilizar a pressão como entrada, o resultado encontrado foi o mesmo para a pressão como entrada com 2 atrasos, 1 atraso ou sem a pressão como entrada. Uma visão geral do treinamento é mostrada na Figura 17. Também foram feitos novos treinamentos alterando o número de neurônios ou camadas e o tipo de treinamento, nenhuma mudança significativa foi observada.

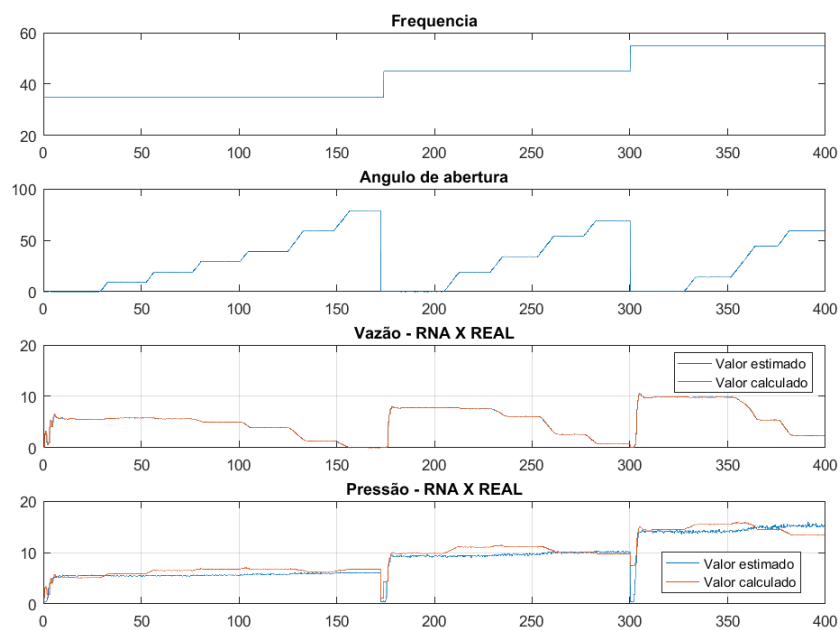
Figura 17 – Treinamento da Rede Neural.



Fonte: Autora

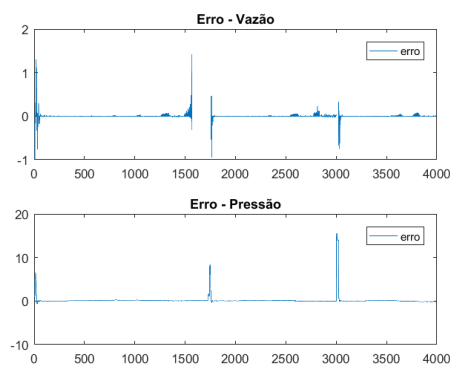
Em seguida, o conjunto de dados de validação foram introduzidos na rede e os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 18. É possível observar que a rede obteve um ótimo resultado prevendo o comportamento da vazão, com os dois sinais sobrepostos no gráfico, porém o resultado para a pressão não foi tão satisfatório, apesar de apresentar um comportamento aproximado, é possível observar que a RNA não foi capaz de calcular corretamente os valores da pressão. Essa diferença pode ser vista no gráfico do erro, apresentado na Figura 19, o erro para a pressão apresenta valores 10 vezes maiores que o erro referente ao cálculo da vazão.

Figura 18 – Validação da Rede Neural



Fonte: Autora

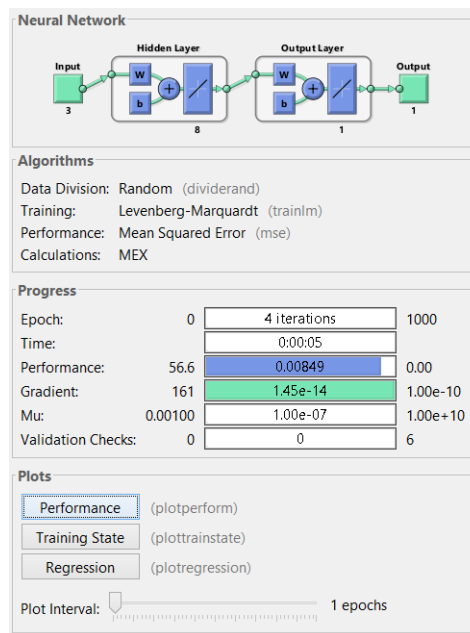
Figura 19 – Erro da Rede Neural



Fonte: Autora

Visto que a RNA não apresenta um resultado satisfatório para a pressão como saída, foi escolhido manter a rede apenas com a vazão como saída, cuja configuração foi ilustrada na Figura 16. O treinamento foi feito com os mesmos parâmetros anteriores e apresentou um resultado mais rápido, como mostrado na Figura 20.

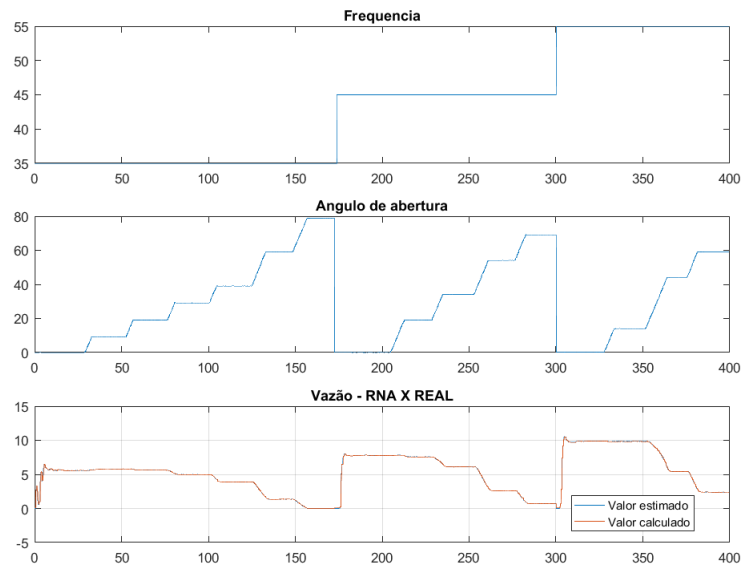
Figura 20 – Treinamento da Rede Neural



Fonte: Autora

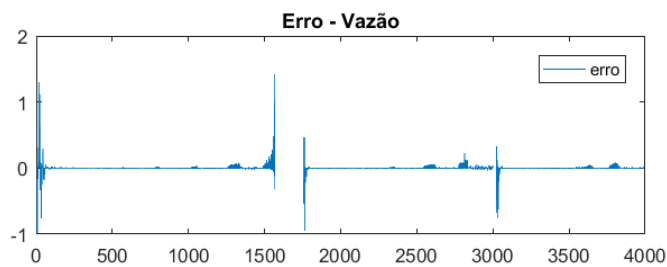
A saída calcula pela rede neural para essa configuração e seu erro associado podem ser vistos nas Figuras 21 e 22, respectivamente. É possível observar que a saída calculada pela rede continua satisfatório se comparado com o resultado da configuração anterior, a saída calcula e a saída real estão sobrepostas no gráfico. Isso é confirmado pelo cálculo do erro que apresentou valor zero em quase sua totalidade, um erro maior foi observado em poucos pontos.

Figura 21 – Validação da Rede Neural



Fonte: Autora

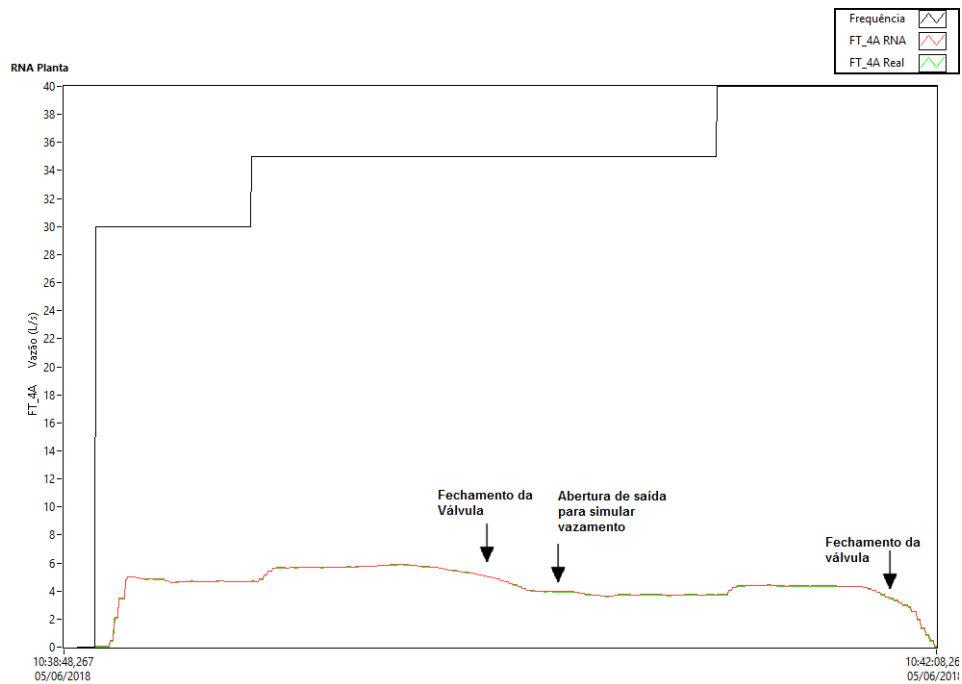
Figura 22 – Erro da Rede Neural



Fonte: Autora

4.2 Rede Neural no Supervisório

A rede neural foi implementada diretamente no supervisório para testar sua eficiência com a rede de distribuição de água em funcionamento, via *script* do *LabView* para *Matlab*. Com o objetivo de testar a rede em várias condições, foi simulado um vazamento no sistema com a abertura do trecho 2, de forma a simular uma perda no sistema antes de água seguir para ser distribuída. É possível observar pela Figura 23 que a RNA foi capaz de seguir o comportamento da vazão do sistema.

Figura 23 – Rede neural implementada no *LabView*

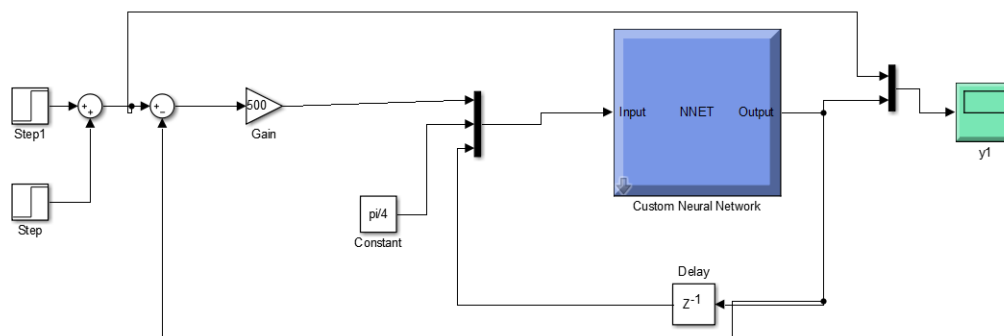
Fonte: Autora

4.3 Controle do Sistema

Após análise do sistema, foi observado que o mesmo apresenta comportamento de sistema de primeira ordem, tornando possível o controle da planta com o uso de um ganho proporcional.

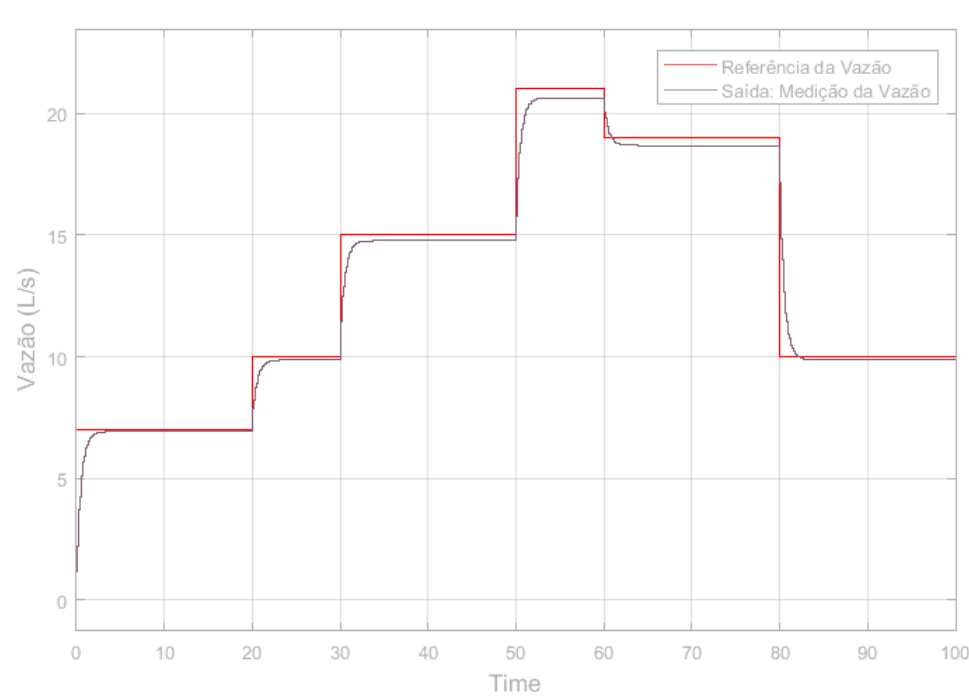
A RNA treinada da Figura 20 foi utilizada para implementação do controle na ferramenta *Simulink* do *Matlab*, com a rede como modelo do sistema real, como mostrado na Figura 24. O ângulo foi mantido constante e a frequência foi a variável manipulada com um ganho proporcional. O valor encontrado para o ganho, através do método de tentativa e erro, foi de 500, visto que quanto maior o valor do ganho proporcional, melhor será o controle. Foram aplicados uma série de degraus com diferentes valores em diferentes intervalos de tempo como sinal de referência da vazão para o sistema e a rede seguiu o sinal de referência em todas as situações e seu comportamento foi considerado satisfatório, como é possível observar na Figura 25.

Figura 24 – Controle da planta implementado no *Matlab*



Fonte: Autora

Figura 25 – Saída da planta após aplicação do controle.



Fonte: Autora

5 Conclusão

Neste relatório foram apresentadas as principais atividades desenvolvidas no estágio realizado no Laboratório Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento. Também foi apresentado o embasamento teórico necessário para a realização das atividades desempenhadas, que proporcionaram uma visão mais aprofundada na forma como resolver problemas reais em áreas da engenharia elétrica. Neste contexto, além da contribuição profissional houve também uma colaboração para o local do estágio, principalmente devido a utilidade dos resultados obtidos com as atividades realizadas.

Como proposta para trabalhos futuros no laboratório fica o melhoramento da identificação do sistema tendo a pressão como saída e a implementação do controle real da planta fazendo uso do supervisor, de forma que a rede de distribuição de água possa operar em funcionamento ótimo com pressão e vazão desejadas de operação.

Referências

- ACROS - AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL LTDA. *Transmissor de Pressão*. [S.l.]. Citado na página 27.
- ÅSTRÖM, K. J.; EYKHOFF, P. System identification—a survey. *Automatica*, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 123–162, 1971. Citado na página 20.
- BELIMO AIRCONTROLS INC. *LRB24-SR*. EUA, 2018. Citado na página 28.
- BOLTON, W. *Programmable logic controllers*. [S.l.]: Newnes, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- BRUSAMARELLO, V. J.; BALBINOT, A. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 17 e 18.
- CHINARRO, D. System identification techniques. In: *System Engineering Applied to Fuenmayor Karst Aquifer (San Julián de Banzo, Huesca) and Collins Glacier (King George Island, Antarctica)*. [S.l.]: Springer, 2014. p. 11–51. Citado na página 21.
- DRUCK INC. *Industrial Pressure Transmitters: PTX 7200 Series*. [S.l.]. Citado na página 26.
- FRANÇA, F. A. Instrumentação e medidas: grandezas mecânicas. *UNICAMP. Campinas*, 2007. Citado na página 15.
- GOMES, H. P. *Atividades Desenvolvidas*. 2007. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wpcontent/uploads/arquivos/acoes_lenhs_ne.pdf>. Acesso em: 22 mai 2018. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- GOMES, H. P. Sistemas de bombeamento. *João Pessoa, Editora Universitária UFPB*, 2009. Citado na página 15.
- GONÇALVES, M. G. Monitoramento e controle de processos. *Rio de Janeiro: Petrobras*, 2003. Citado na página 15.
- GUERRA, G. *Controlador Lógico Programável*. 2012. Disponível em: <<http://www.crkautomacao.com.br/pt-br/artigos/controlador-logico-programavel>>. Acesso em: 22 mai 2018. Citado na página 19.
- HAGAN, M. T. et al. *Neural network design*. [S.l.]: Pws Pub. Boston, 1996. v. 20. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. [S.l.]: Bookman Editora, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- HORVATH, G. Neural networks in system identification. *Nato Science Series Sub Series III Computer And Systems Sciences*, IOS PRESS, v. 185, p. 43–78, 2003. Citado na página 21.
- INCONTROL S/A. *Manual de Operação e Instalação: Série VMS*. São Paulo, 2009. Citado na página 27.

- Jagadeesha T. *PROPORTIONAL CONTROL VALVES*. 2013. Disponível em: <<http://nptel.ac.in/courses/112106175/Module%203/Lecture%2022.pdf>>. Acesso em: 22 mai 2018. Citado na página 19.
- KRIESEL, D. A brief introduction on neural networks. Citeseer, 2007. Citado na página 22.
- MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, Springer, v. 5, n. 4, p. 115–133, 1943. Citado na página 22.
- OMEGA Engineering Inc. *What is piezoelectric pressure sensor?* 2012. Disponível em: <<https://www.omega.co.uk/literature/transactions/volume3/pressure2.html>>. Acesso em: 22 mai 2018. Citado na página 17.
- PAIOLA, C. E. G. O papel do supervisor no atual contexto tecnológico. *InTech*, Aquarius Software, v. 132, p. 7–18, 2011. Citado na página 20.
- VILLANUEVA, J. M. M. Notas de Aula, *Redes Neurais Artificiais (RNA) – Parte I*. 2018. Citado na página 22.