

**Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Energias Alternativas e Renováveis  
Departamento de Engenharia Elétrica**

**Thommas Kevin Sales Flores**

**SISTEMA FUZZY PARA CONTROLE DE PRESSÃO  
APLICADO A SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SÉRIE-  
PARALELO VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**João Pessoa – PB  
2018**

**THOMMAS KEVIN SALES FLORES**

**SISTEMA FUZZY PARA CONTROLE DE PRESSÃO APLICADO A  
SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SÉRIE-PARALELO VISANDO A  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação de Engenharia  
Elétrica como um dos pré-requisitos para a  
obtenção do título em Bacharel em  
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.  
Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva.**

**João Pessoa – PB**

**2018**

F634s Flores, Thommas Kevin Sales.

Sistema *fuzzy* para controle de pressão aplicado a sistemas de bombeamento série-paralelo visando a eficiência energética. / Thommas Kevin Sales Flores. – João Pessoa, 2018.

43 f.: il.

Orientador: Dr. Juan Moises Maurício Villanueva.

Monografia (Graduação) – UFPB/CEAR.

1. Controle. 2. Sistemas de bombeamento. 3. Lógica Fuzzy  
4. Eficiência energética. I. Villanueva, Juan.

UFPB/BC

**Thommas Kevin Sales Flores**

**Sistema Fuzzy para Controle de Pressão Aplicado a Sistemas de  
Bombeamento Série-Paralelo visando a Eficiência Energética**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido à Coordenação de  
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

**Data de Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**Nota: \_\_\_\_\_**

**Aprovado por:**

---

**Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva (Orientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto de Souza Filho (Membro)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes (Membro)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

---

**Prof. Dr. Simplício Arnaud da Silva (Membro)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa – PB**  
**2018**

## AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado força, saúde e sabedoria para cumprir minha missão na Terra.

A minha mãe por todo amor, carinho e de não poupar esforços para me dar uma boa educação. A senhora é um grande exemplo para mim.

Aos meus avós por todo abrigo e segurança aos longos desses anos, em especial a minha avó Walda Helena que já não se faz presente entre nós, mas tenho certeza da sua imensa felicidade ao ver seu neto se formar.

Ao meu pai e a todos os meus familiares que de alguma forma contribuíram na minha formação pessoal.

A todos os meus amigos pelas inúmeras ajudas e orações.

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

A Polyana Collaço pelas inúmeras ajudas e paciência nesta etapa tão importante da minha vida.

Ao professor Juan Villanueva, pela orientação, paciência e conselhos ao longo do desenvolvimento desse projeto.

Ao professor Heber Pimentel Gomes pelos conhecimentos transmitidos acerca da parte hidráulica desenvolvida neste projeto

A Pedro (técnico do laboratório de Automação e Controle) por todo o auxílio e conhecimento transmitido.

A todos os professores do Curso de Engenharia elétrica da UFPB por todo o conhecimento transmitido.

E a todos os familiares, amigos e colegas que tiveram a compreensão necessária quando precisei me ausentar para a conclusão desse curso e que colaboraram direta ou indiretamente.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador inteligente baseado em lógica *fuzzy* para redes de distribuição de água que operam com bombas associadas em série e em paralelo visando à eficiência energética. Além disso, fazer uma análise comparativa com o sistema em malha aberta e com controlador proporcional clássico. O sistema tem como objetivo a automação do processo hidráulico e da variação da rotação dos motores elétricos, visando o controle da pressão e conseqüentemente o aumento da eficiência energética. O sistema desenvolvido baseia-se no estudo do sistema em malha aberta para determinar os conjuntos e as regras nebulosas com base na especificação do especialista. Os experimentos foram realizados em uma bancada experimental totalmente instrumentalizada, capaz de emular um sistema real de abastecimento de água. Os resultados mostraram que o desempenho baseado em lógica nebulosa foi satisfatório, eliminando quase que totalmente o erro em regime permanente e diminuindo o tempo de subida e assentamento, quando comparado com o controlador clássico. Portanto, apresentando a viabilidade da aplicação deste tipo de controle em sistemas similares de operação.

**Palavras-Chaves:** *Fuzzy*, Controle, Sistemas de bombeamento, Série paralelo, Eficiência energética.

## ABSTRACT

The objective of this work is to develop an intelligent controller based on fuzzy logic for water distribution networks that operate with series and parallel associated pumps for arriving energy efficiency. In addition, make a comparative analysis with the system in open mesh and with classic proportional controller. The system aims to automate the hydraulic process and the rotation variation of the electric motors, aiming at the control of the pressure and consequently the increase of energy efficiency. The developed system is based on the study of the open-loop system to determine the sets and the nebulous rules based on the specialist's specification. The experiments were carried out in a fully instrumented experimental workbench capable of emulating a real water supply system. The results showed that the performance based on nebulous logic was satisfactory, eliminating almost totally the error in permanent regime and decreasing the time of rise and settlement, when compared with the classic controller. Therefore, presenting the feasibility of applying this type of control in similar operating systems.

**Palavras-Chaves:** Fuzzy, Control, Pumping Systems, Parallel Series, Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Partes de um sistema de abastecimento. ....                                 | 17 |
| Figura 2.2 – Instalações típicas de bombeamento. ....                                    | 18 |
| Figura 2.3 – Esquema hidráulico de um sistema de bombeamento com bomba afogada. ....     | 20 |
| Figura 2.4 – Esquema hidráulico de duas bombas ligadas em série.....                     | 22 |
| Figura 2.5 – Curva característica resultante da associação de duas bombas em série. .... | 22 |
| Figura 2.6 – Esquema hidráulico de duas bombas ligadas em paralelo. ....                 | 23 |
| Figura 2.7 – Curva característica resultante da associação de duas bombas em série. .... | 23 |
| Figura 2.8 – Diagrama de blocos de um controlador proporcional. ....                     | 26 |
| Figura 2.9 – Resposta de um sistema de primeira ordem.....                               | 27 |
| Figura 2.10 – Resposta de um sistema de Segunda ordem.....                               | 28 |
| Figura 2.11 – Representação gráfica das operações com os conjuntos <i>fuzzy</i> .....    | 31 |
| Figura 2.12 – <i>Core, support</i> e <i>boundary</i> dos conjuntos difusos.....          | 32 |
| Figura 2.13 – Curva de pertinência para a variável temperatura. ....                     | 33 |
| Figura 2.14 – Variável nebulosa, pressão na descarga e seus conjuntos.....               | 34 |
| Figura 2.15 – Estrutura do controlador <i>fuzzy</i> .....                                | 36 |
| Figura 3.1 – Bancada Experimental .....  | 38 |
| Figura 3.2 – Fluxo da água para ligação série ou paralelo. ....                          | 38 |
| Figura 3.3 – Conjunto motobomba modelo CAM-W10 (WEG).....                                | 39 |
| Figura 3.4 – Curva característica da bomba CAM-W10.....                                  | 40 |
| Figura 3.5 – Inversor de frequência CFW-11 (WEG).....                                    | 40 |
| Figura 3.6 – Inversor de frequência Altivar 31(Schneider Eletric).....                   | 41 |
| Figura 3.7 – Válvula de controle ARB24-SR (BELIMO).....                                  | 42 |
| Figura 3.8 – Transdutor de pressão DRUCK PTX 7217.....                                   | 42 |
| Figura 3.9 – Transdutor de vazão eletromagnético VMS Pro. ....                           | 43 |
| Figura 3.10 – Placa de aquisição de dados NI USB 6229 .....                              | 44 |
| Figura 3.11 – Curva característica do conjunto motobomba 1 (MB 1).....                   | 46 |
| Figura 3.12 – Curva característica do conjunto motobomba 2 (MB 2).....                   | 47 |
| Figura 3.13 – Curva do rendimento do conjunto motobomba 1 (MB 1).....                    | 48 |
| Figura 3.14 – Curva do rendimento do conjunto motobomba 2 (MB 2).....                    | 49 |
| Figura 3.15 – Curva do sistema das motobombas individualmente .....                      | 49 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.16 – Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta (MB 1) .....                              | 50 |
| Figura 3.17 – Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta (MB 2) .....                              | 50 |
| Figura 3.18 – Diagrama de blocos do controlador proporcional .....  | 51 |
| Figura 3.19 – Resposta do Controle proporcional em malha fechada para $K_p = 0,5$ (MB 1) ..               | 52 |
| Figura 3.20 – Resposta do Controle proporcional em malha fechada para $K_p = 0,5$ (MB 2)                  | 52 |
| Figura 3.21 – Diagrama de blocos do controlador <i>Fuzzy</i> .....  | 54 |
| Figura 3.22 – Curva do comportamento desejado do sistema.....   | 55 |
| Figura 3.23 – Variáveis de entrada do controle de pressão .....   | 56 |
| Figura 3.24 – Variáveis de saída do controle de pressão.....  | 57 |
| Figura 3.25 – Superfície das relações entre as entradas e saída .....                                     | 58 |
| Figura 4.1 – Curva em malha aberta para degraus de frequência (MB 1).....                                 | 60 |
| Figura 4.2 – Curva do rendimento médio em função da frequência de giro da motobomba 1 (MB 1) .....        | 61 |
| Figura 4.3 – Resposta do sistema com o controlador proporcional com perturbações (MB 1)                   | 64 |
| Figura 4.4 – Resposta do sistema com o controlador <i>fuzzy</i> (MB 1) .....                              | 65 |
| Figura 4.5 – Resposta do sistema com o controlador <i>fuzzy</i> com perturbações (MB 1).....              | 67 |
| Figura 4.6 – Curva característica comparativa das bombas operando em 30 Hz.....                           | 68 |
| Figura 4.7 – Curva característica comparativa das bombas operando em 40 Hz.....                           | 69 |
| Figura 4.8 – Curva característica comparativa das bombas operando em 50 Hz.....                           | 69 |
| Figura 4.9 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 30 Hz. ....          | 70 |
| Figura 4.10 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 40 Hz. ....         | 71 |
| Figura 4.11 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 50 Hz. ....         | 71 |
| Figura 4.12 – Resposta do sistema para bombas conectadas em série com o controlador <i>fuzzy</i> .....    | 72 |
| Figura 4.13 – Resposta do sistema para bombas conectadas em série com à presença de ruído .....           | 73 |
| Figura 4.14 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com o controlador <i>fuzzy</i> ..... | 75 |
| Figura 4.15 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com à presença de ruído.....         | 76 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Característica da motobomba .....  | 39 |
| Tabela 3.2 – Característica do transdutor de pressão DRUCK PTX 7217 .....                                   | 43 |
| Tabela 3.3 – Características dos transdutores de vazão eletromagnético VMS 038 .....                        | 44 |
| Tabela 3.4 – Especificações técnicas das interfaces de aquisição de dados .....                             | 45 |
| Tabela 3.5 – Características do controlador proporcional MB 1 .....   | 53 |
| Tabela 3.6 – Características do controlador proporcional MB 2 .....   | 53 |
| Tabela 3.7 – Regras <i>Fuzzy</i> .....  | 56 |
| Tabela 4.1 – Característica do sistema em malha para degraus de frequência .....                            | 60 |
| Tabela 4.2 – Rendimento médio em função da frequência de giro da motobomba 1 (MB 1) .                       | 61 |
| Tabela 4.3 – Rendimento do sistema com controle proporcional (MB 1) .....                                   | 63 |
| Tabela 4.4 – Característica do sistema com controle fuzzy (MB 1) .....                                      | 65 |
| Tabela 4.5 – Rendimento do sistema com controle <i>fuzzy</i> (MB 1) .....                                   | 66 |
| Tabela 4.6 – Característica do sistema para bombas conectadas em série com o controlador <i>fuzzy</i> ..... | 73 |
| Tabela 4.7 – Característica do sistema para bombas conectadas em série com à presença de ruído .....        | 74 |
| Tabela 4.8 – Rendimento do conjunto motobomba operando em série com controle <i>fuzzy</i> ....              | 74 |
| Tabela 4.9 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com o controlador fuzzy. ....           | 75 |
| Tabela 4.10 – Característica do sistema para bombas conectadas em paralelo com à presença de ruído .....    | 76 |
| Tabela 4.11 – Rendimento do conjunto motobomba operando em paralelo com controle <i>fuzzy</i> .....         | 77 |
| Tabela 4.12 – Tabela comparativa dos rendimentos para diferentes configurações de operação .....            | 77 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>13</b> |
| 1.1. Considerações Preliminares.....                             | 13        |
| 1.2. Metodologia Adotada .....                                   | 14        |
| 1.3. Objetivos.....  | 15        |
| 1.3.1. Objetivo Geral .....                                      | 15        |
| 1.3.2. Objetivos Específicos .....                               | 15        |
| 1.4. Organização do Documento .....                              | 15        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                             | <b>17</b> |
| 2.1. Sistema de abastecimento de água.....                       | 17        |
| 2.1.1. Curva características das bombas .....                    | 21        |
| 2.1.2. Curva Característica do sistema elevatório .....          | 21        |
| 2.1.3. Operação de bombas em série .....                         | 22        |
| 2.1.4. Operação de bombas em paralelo.....                       | 23        |
| 2.2. Potência e rendimento .....                                 | 24        |
| 2.3. Sistemas de controle .....                                  | 25        |
| 2.3.1. Controle proporcional.....                                | 26        |
| 2.3.2. Controle inteligente baseado em lógica <i>fuzzy</i> ..... | 29        |
| 2.3.2.1. Conjuntos <i>fuzzy</i> .....                            | 30        |
| 2.3.2.2. Funções de pertinência .....                            | 31        |
| 2.3.2.3. Variáveis linguísticas.....                             | 32        |
| 2.3.2.4. Fuzzyficação.....                                       | 33        |
| 2.3.2.5. Regras <i>fuzzy</i> .....                               | 34        |
| 2.3.2.6. Defuzificação.....                                      | 35        |
| 2.3.2.7. Estrutura básica de um controlador <i>fuzzy</i> .....   | 35        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                              | <b>37</b> |
| 3.1. Bancada experimental.....                                   | 37        |
| 3.2. Caracterização do sistema a ser controlado .....            | 45        |
| 3.2.1. Curva característica dos conjuntos motobomba .....        | 46        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2.2. Curva do sistema .....   | 48        |
| 3.3. Estratégias de controle proporcional .....                           | 49        |
| 3.4. Estratégia de controle Fuzzy .....                                   | 54        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                   | <b>59</b> |
| 4.1. Experimento I .....  | 60        |
| 4.2. Experimento II .....   | 62        |
| 4.2.1. Ensaio 1 do Experimento II .....                                   | 62        |
| 4.2.2. Ensaio 2 do Experimento II .....                                   | 62        |
| 4.2.3. Ensaio 3 do Experimento II .....                                   | 63        |
| 4.3. Experimento III .....  | 64        |
| 4.3.1. Ensaio 1 do Experimento III .....                                  | 64        |
| 4.3.2. Ensaio 2 do Experimento III .....                                  | 65        |
| 4.3.3. Ensaio 3 do Experimento III .....                                  | 66        |
| 4.4. Experimento IV .....   | 67        |
| 4.4.1. Controle <i>fuzzy</i> para as motobombas conectadas em série ..... | 72        |
| 4.4.2. Controle <i>fuzzy</i> para sistema em paralelo .....               | 74        |
| <b>5. CONCLUSÕES .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                | <b>80</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>   | <b>84</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações Preliminares

Os sistemas de distribuição de água têm como objetivo atender as demandas do consumo de água para uma determinada região. Estes sistemas podem estar constituídos por conjunto motobomba, *booster*, tubulações, estações elevatórias, válvulas de controle, elementos de medição (micromedição e macromedição) (SOUSA, 2014).

O aumento populacional e/ou das áreas de plantio estão diretamente ligados com a necessidade da melhoria e da ampliação dos sistemas de abastecimento de água, os quais devem garantir o fornecimento deste subsídio conforme a NBR 12218 (ABNT,1994).

Dessa forma, é imprescindível a eficácia destes sistemas, pois, em todo o processo, desde a captação até o consumidor, é inevitável as inúmeras perdas hidráulicas. Essas perdas podem ser reais ou aparentes: reais quando consideramos os vazamentos, e aparentes quando se dão por problemas de gestão, comerciais, fraudes e erros de medição (KUSTERKO, 2015).

Por outro lado, as perdas eletromecânicas são provenientes do envelhecimento gradual dos sistemas, falta de manutenção preventiva (SNIS, 2016) e métodos de controle antigos e/ou inapropriados.

A otimização destes fatores é importante, pois segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2016) aponta que a energia elétrica consumida no ano de 2016 pelos prestadores de serviço de abastecimento de água brasileiros chega a 10,6 TWh, isto corresponde à 2,3% da energia elétrica consumida no Brasil no ano de 2016, que é de 460,8 TWh segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 (DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017). Sendo 90% dos gastos energéticos dos serviços de abastecimento destinado aos sistemas de bombeamento (GOMES, 2009).

Em (SILVA, 2015) foi reportado que o setor de saneamento consome até 3% da energia total do Brasil. Desta maneira, pode se estabelecer uma interdependência entre a gestão dos recursos hídricos e energéticos. O aumento no consumo de água e de energia, deve-se principalmente ao crescimento da população nas regiões urbanas, que por sua vez utiliza um maior número de elementos para o bombeamento de água, como os conjuntos motobomba e os *booster*. Complementarmente, o consumo da energia pode ser decorrente dos vazamentos e perdas reais de água (SOUSA, 2014).

Com o aumento da energia elétrica consumida nos sistemas de distribuição de água, diversos trabalhos têm proposto soluções de otimização visando a minimização do consumo de energia por meio de planos estratégicos do agendamento do ligar e desligar das bombas ao longo do dia e de acordo com o perfil de consumo (SOUSA, 2014). Outras abordagens utilizam configurações de bombeamento de água por meio de bombas associadas em paralelo com a finalidade de realizar o controle da pressão, reduzindo-se o consumo de energia elétrica (BARROS, 2016). Assim também, estão sendo intensificadas as aplicações das técnicas de Inteligência Artificial (Redes Neurais Artificiais e Lógica Fuzzy) para o controle inteligente da pressão e vazão nas redes de distribuição visando a redução dos custos energéticos e do desperdício de água de sistemas de abastecimento de água (SALVINO, 2018).

Neste panorama, esse trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar a análise da eficiência energética de uma bancada de ensaios que representa um sistema de bombeamento de água instalada no Laboratório de Eficiência Energética, Hidráulica e Saneamento (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba. A Referida análise contempla as configurações de bombeamento de água utilizando um conjunto motobomba sem controle (laço aberto), com controle proporcional e controle inteligente baseado em lógica *fuzzy*, como também as configurações serie e paralelo de dois motobombas. Desse modo, pretende-se realizar comparações das diversas configurações com relação à eficiência energética e rendimento dos conjuntos motobomba.

## **1.2. Metodologia Adotada**

A revisão bibliográfica foi realizada a partir dos materiais já publicados como livros, artigos científicos defesas de trabalho de conclusões de cursos e defesas de teses de mestrado.

Afim de garantir a coerência dos resultados obtidos nos experimentos realizados, foram realizados as calibrações dos transdutores de pressão e os ajustes dos transdutores de vazão presentes na bancada experimental utilizada neste trabalho.

Elaborou-se um software supervisor através do uso de instrumento virtual usando o programa LabVIEW<sup>TM</sup>, este teve a finalidade de permitir o monitoramento e controle dos elementos presentes na bancada experimental.

### 1.3. Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso estão divididos em objetivo geral e específicos conforme se descreve a seguir.

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolvimento de controle inteligentes com a finalidade de otimizar as pressões em redes de distribuição de água visando a eficiência energética nos sistemas de bombeamento de água com bomba série-paralelo. Para isso, será utilizado técnicas de controle *fuzzy*.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho de controladores clássicos (proporcional) com relação ao projeto de controladores baseados em lógica *fuzzy*;
- Análise comparativo dos controladores *fuzzy* para os sistemas de bombeamento de água que utilizam bombas série-paralelo;
- Análise energética das configurações de bombeamento: única bomba, bombas em série e bombas em paralela usando o algoritmo de controle desenvolvido.

### 1.4. Organização do Documento

O documento é organizado da seguinte forma:

É apresentado no capítulo 1, a introdução com os principais objetivos e a para a realização desse trabalho.

É apresentado no capítulo 2, fundamentação teórica, na qual é abordado os diversos aspectos teóricos necessários para a compreensão do sistema estudado.

É apresentado no capítulo 3, as etapas metodológicas utilizadas, além de expor a base de regras implementada no LabVIEW™. Ademais, é apresentada uma descrição detalhada da bancada experimental.

É apresentado no capítulo 4, aos resultados e uma análise acerca dos dados obtidos após a aplicação do controlador.

É apresentado no capítulo 5, as conclusões e as considerações finais quanto aos resultados obtidos no capítulo anterior.

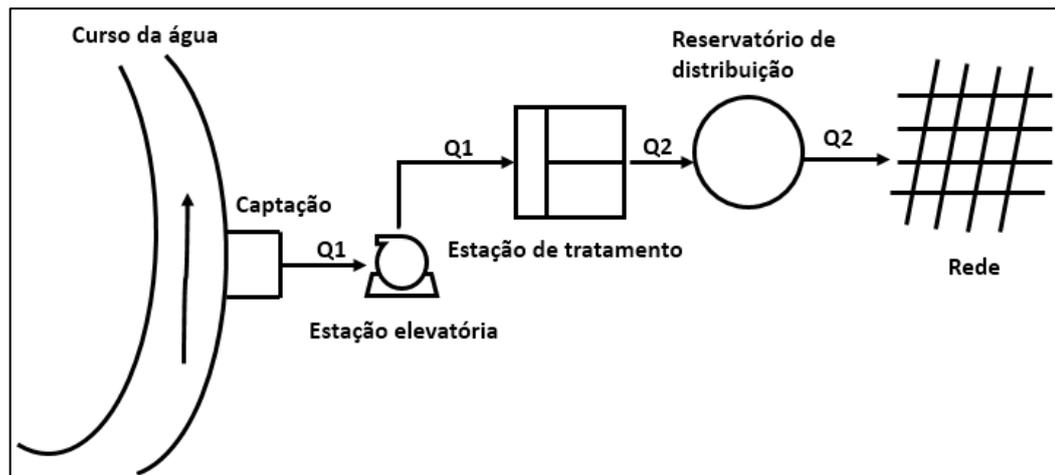
É apresentado no capítulo 6, os referenciais teóricos utilizados no presente trabalho.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Sistema de abastecimento de água

Os sistemas de abastecimento de água são compostos, basicamente por um ponto de captação da água bruta do meio ambiente, em seguida há um tratamento adequado para torná-la potável e, por fim, distribuí-se até os consumidores em quantidade satisfatória para atender a demanda de consumo (HELLER, 2006). O diagrama deste tipo de sistema está ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Partes de um sistema de abastecimento.



Fonte: Adaptado de Tsutiya (2004)

Dessa forma, segundo o Heller (2006) define-se:

- **Captação:** etapa onde se retira a água da fonte que alimenta o sistema de abastecimento de água, onde esta fonte é o manancial;
- **Adução:** estágio de transporte da água de uma unidade do sistema a outro;
- **Estação elevatória:** estas são usadas quando a água precisa atingir pontos mais altos;
- **Estação de tratamento:** consiste em uma série de processos de filtragens e químicos para que a água bruta se torne potável;

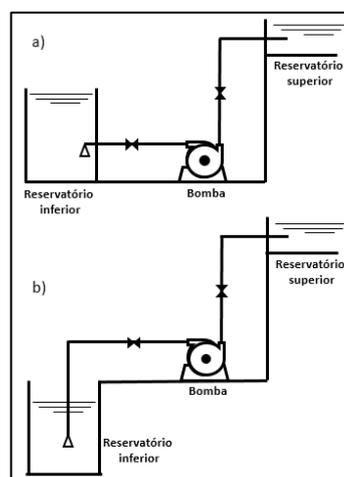
- **Rede:** trata-se do conjunto de peças especiais destinadas a conduzir a água até os pontos de tomada das instalações prediais, ou os pontos de consumo público, sempre de forma contínua e segura.

Cada elemento do sistema de abastecimento de água deve estar de acordo com a NBR 12211/1992, a qual determina a metodologia para a elaboração dos estudos de concepção destes sistemas. A observância aos pontos desta normal é crucial para o correto funcionamento do sistema, ou seja, evitando sobredimensionamento e com isso acarretando prejuízo financeiro. Ademais, há o risco do subdimensionamento, o qual acarreta dano na prestação de serviço aos consumidores.

A instalação de bombas em estações elevatórias de água pode assumir duas configurações distintas: não afogadas e afogadas (v. Figura 2.2b e Figura 2.2a) (TSUTIYA, 2004). O primeiro tipo de instalação, a bomba encontra-se no plano superior ao nível da água. Já a segunda configuração, a bomba entra-se no plano inferior ao nível da água. Para Gomes (2009), a última configuração citada apresenta as seguintes vantagens:

- A bomba está totalmente preenchida com o fluido (escorvada), evitando a presença de bolhas de ar, que causa a cavitação;
- Ausência de vácuo na tubulação da aspiração, consequência das pressões positivas neste trecho;
- Dispensa o uso de válvula de pé, que consiste em um dispositivo que só permite o escoamento em uma direção.

Figura 2.2 – Instalações típicas de bombeamento.



Fonte: Autor

Para o entendimento da dinâmica dos sistemas de bombeamentos, faz-se necessário o entendimento dos diversos parâmetros, TSUTIYA (2004) os define como sendo:

- **Vazão de bombeamento:** trata-se do volume de líquido bombeado por unidade de tempo, comumente adota-se as unidades em m<sup>3</sup>/h, m<sup>3</sup>/s ou L/s.
- **Altura geométrica de sucção (H<sub>g,s</sub>):** é a diferença de nível geométrico entre o nível da água no poço de sucção e a linha de centro da bomba. Esta pode ser positiva (se o nível do líquido estiver acima da linha de centro da bomba) ou negativa (se o nível do líquido estiver abaixo da linha de centro da bomba).
- **Altura geométrica de recalque (H<sub>g,r</sub>):** é a diferença de nível geométrico entre a linha que passa pelo centro da bomba e o nível do líquido onde a tubulação de recalque.
- **Carga cinética:** trata-se da energia cinética contida no líquido bombeado. Esta energia é dada por  $(Vr)^2/2g$ , onde V é a velocidade do líquido (m/s); g é a aceleração gravitacional (m<sup>2</sup>/s).
- **Altura manométrica total:** é o carregamento que deve ser superado pela bomba, quando o líquido está sendo bombeado. Para determinar este valor deve-se considerar as alturas geométricas de sucção e recalque, as perdas de cargas e as cargas cinéticas. Onde a sua expressão é dada por:

$$H = Hg + \Sigma\Delta Hs + \Sigma\Delta Hr + \frac{(Vr)^2}{2g} \quad (2.1)$$

Em que:

*H*: altura manométrica total (m);

*Hg*: Altura geométrica (m);

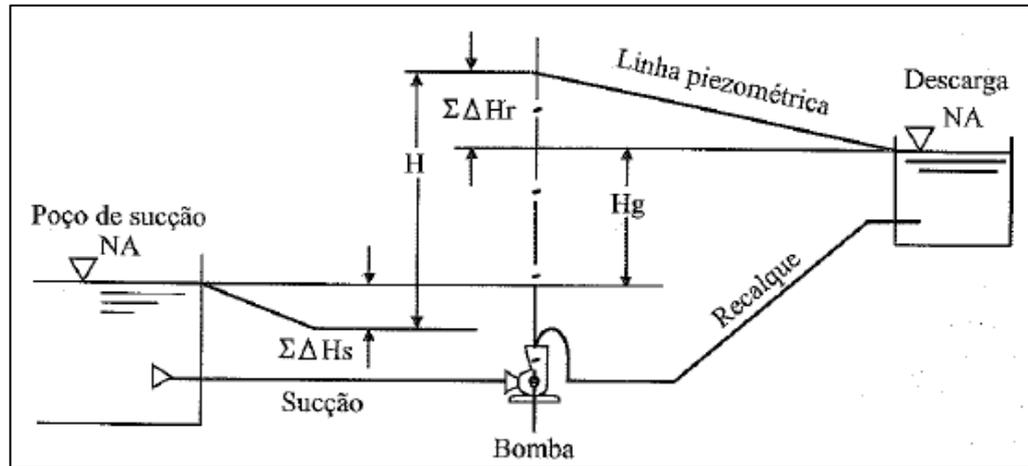
$\Sigma\Delta Hs$ : Somatório das perdas de cargas distribuídas e localizadas, na tubulação de sucção (m);

$\Sigma\Delta Hr$ : Somatório das perdas de cargas distribuídas e localizadas, na tubulação de recalque (m);

$\frac{(Vr)^2}{2g}$ : Carga cinética no recalque (m).

Na Figura 2.3 está ilustrado um esquema hidráulico de um sistema de bombeamento, onde a bomba está afogada, nela contém todos os parâmetros citados anteriormente, além de apresentar a linha piezométrica, que é definida como a parcela estática da carga.

Figura 2.3 – Esquema hidráulico de um sistema de bombeamento com bomba afogada.



Autor: (TSUTIYA, 2004)

Outro ponto importante, trata-se das relações de semelhanças, as quais são usadas para determinar o efeito da rotação na vazão, altura manométrica e potência de uma bomba. Porém, estas relações só são válidas para um mesmo rotor, girando a velocidades diferentes (GOMES, 2009). Estas relações estão descritas nas equações de 2.2 a 2.4.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.2)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1^3}{N_2^3} \quad (2.4)$$

Em que:

$N_1$  e  $N_2$ : velocidade de rotação da bomba;

$Q_1$  e  $Q_2$ : vazão de bombeamento relativa a  $N_1$  e  $N_2$ ;

$P_1$  e  $P_2$ : Potência consumida pela bomba relativa a  $N_1$  e  $N_2$ .

### 2.1.1. Curva características das bombas

O conhecimento das curvas características das bombas centrífugas é fundamental, devido ao fato que estes dispositivos são máquinas que podem trabalhar à mesma velocidade de rotação, sob diferentes condições de vazão e de altura manométrica. Um fato que deve ser levado em consideração é a interdependência entre esses valores, onde normalmente são obtidos através de ensaios. Estas curvas de vazão ( $m^3/s$ ) com altura manométrica total ( $m$ ), a potência consumida ( $kW$  ou  $HP$ ), a eficiência da bomba é comumente fornecida pelo fabricante (GOMES, 2009).

Em termos práticos, ao conhecer a curva característica da bomba, pode-se determinar se o dispositivo escolhido é adequado para a aplicação desejada, pois, cada bomba é projetada, basicamente, para elevar uma determinada vazão ( $Q$ ) a uma altura manométrica total ( $H$ ) em condições de máximo rendimento.

### 2.1.2. Curva Característica do sistema elevatório

Esta curva relaciona a altura manométrica total do sistema de elevação com a vazão de bombeamento. Onde no eixo das abscissas está a altura manométrica ( $H$ ) e no da ordenada está a vazão ( $Q$ ).

Dessa forma, para obter o ponto de funcionamento da bomba, ou seja, a altura manométrica e a vazão do sistema elevatório, usa-se a interseção da curva da bomba com a curva do sistema (TSUTIYA, 2004).

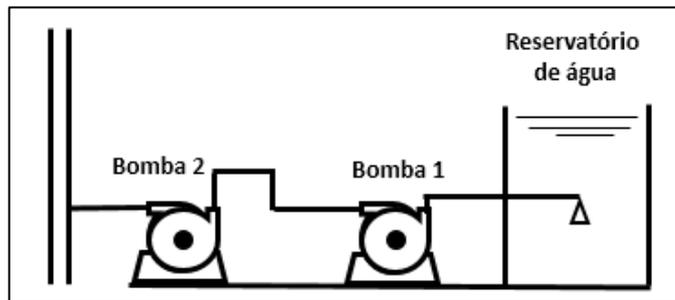
Outro ponto importante, é saber que a curva do sistema é variante com o tempo, pois mudanças no sistema, seja por envelhecimento da tubulação, troca de trecho ou até mesmo o acúmulo de sujeira, alteram a rugosidade e conseqüentemente a característica do sistema a ser bombeado.

Por outro lado, quando o projetista deseja atender características específicas do sistema de bombeamento, ou seja, o aumento da vazão e/ou da altura manométrica, busca-se associar certo número de bombas em paralelo e/ou em série (GOMES, 2009). Estas configurações serão elucidadas nos tópicos seguintes.

### 2.1.3. Operação de bombas em série

A associação de duas ou mais bombas em série, faz com o que elas possuam o mesmo fluxo, ou seja, a descarga da primeira bomba está diretamente ligada a sucção da segunda por meio de um ducto, como mostrado na Figura 2.4. Nesse caso, cada uma das bombas contribui com uma parcela da altura manométrica total fornecida ao sistema elevatório (TSUTIYA, 2004).

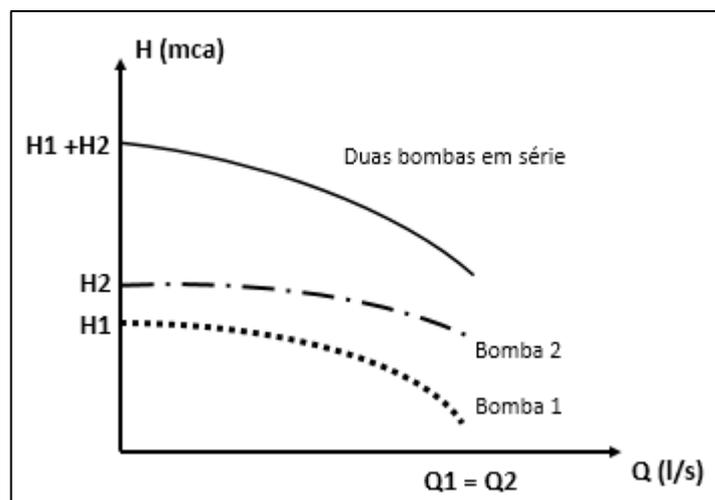
Figura 2.4 – Esquema hidráulico de duas bombas ligadas em série.



Fonte: Autor

A curva gerada a partir desta combinação está ilustrada Figura 2.5, onde  $H_1$  e  $H_2$  correspondem a altura manométrica referente a motobomba 1 e 2, respectivamente. Já  $(H_1+H_2)$ , refere-se a altura manométrica total decorrente desta combinação.

Figura 2.5 – Curva característica resultante da associação de duas bombas em série.

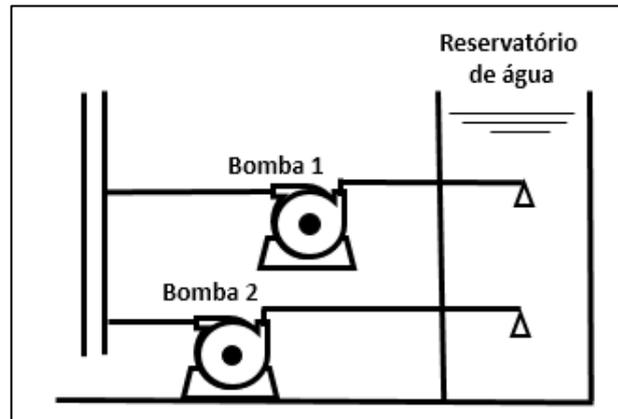


Fonte: Autor

### 2.1.4. Operação de bombas em paralelo

Este tipo de associação faz com que duas ou mais bombas operem em conjunto descarregando água numa mesma linha de recalque (GOMES, 2009), como mostrado na Figura 2.6.

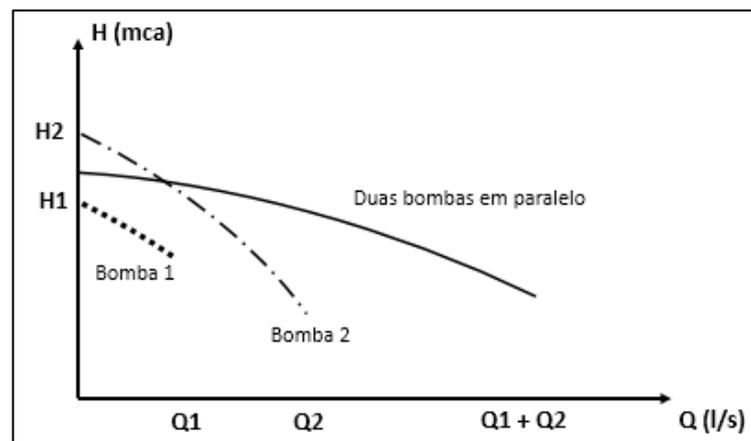
Figura 2.6 – Esquema hidráulico de duas bombas ligadas em paralelo.



Fonte: Autor

A curva decorrente desta associação é obtida pela soma de suas respectivas vazões. Já a altura manométrica, é dada pela média das alturas manométricas fornecidas individualmente por cada motobomba (TSUTIYA, 2004), como pode-se observar na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Curva característica resultante da associação de duas bombas em série.



Fonte: Autor

## 2.2. Potência e rendimento

Motores elétricos são máquinas destinadas a transformar a energia elétrica em energia mecânica. Define-se a potência de um motor elétrico como sendo a potência motriz no eixo do motor, a qual depende do torque e conseqüentemente da sua velocidade de rotação.

Dessa forma, pode-se definir a potência ativa de um motor trifásico como sendo (GOMES, 2009):

$$P_e = \sqrt{3}VICos(\varphi) \quad (2.5)$$

Em que:

$P_e$ : Potência elétrica (ativa), em Watts (W).

V: tensão medida entre as fases;

I: Corrente em cada fase;

$Cos(\varphi)$ : fator de potência, que representa a defasagem entre a tensão e a corrente.

De posse da equação 2.5, pode-se distinguir a potência mecânica do motor, de sua potência elétrica ativa absorvida da rede elétrica. A constante que relaciona estas duas grandezas é chamada de rendimento, ou seja, é o quanto da energia elétrica da rede é convertida em energia motriz no eixo do motor, isto está expresso na equação 2.6.

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_e} \quad (2.6)$$

Por outro lado, como mostrado no capítulo anterior, a energia entregue ao fluido pela bomba é a altura manométrica ( $H$ ), esta energia possui unidade de energia por unidade de peso. Dessa forma, para chegar a expressão que corresponde a potência utilizada para o escoamento do fluido hidráulica, basta multiplicar a equação 2.1 pela vazão gravimétrica ( $\gamma Q$ ), então chega-se a equação 2.7.

$$P_{hid} = \gamma QH \quad (2.7)$$

Em que:

$P_{hid}$ : Potência hidráulica útil (energia/tempo);

$\gamma$ : Peso específico do líquido (peso/volume);

$Q$ : Vazão (volume/tempo)

$H$ : Altura manométrica (comprimento).

Portanto, pode-se expressar o rendimento de qualquer máquina pelo quociente da energia por ela produzida, pela a energia a ela fornecida. No caso das bombas centrifugas, o rendimento ( $\eta_b$ ) é dado por:  $P_{hid} / P_m$ . Em vista disto, o rendimento global do conjunto motobomba ( $\eta$ ) e  $P$  é a potência elétrica ativa (kW), pode ser dado pela:

$$\eta = \frac{\gamma Q H}{P} \quad (2.8)$$

A equação 2.8 pode também ser usada para calcular o rendimento das bombas conectadas em série ou em paralelo. Porém, deve-se salientar dois aspectos principais destas configurações ao usar esta formula.

O primeiro aspecto, refere-se à configuração em série, pois a altura manométrica  $H$  aplicada a expressão 2.8 é igual a alturas manométricas medida na descarga da última bomba ligada a rede hidráulica, isto equivale a soma das alturas manométricas das bombas operando individualmente e a vazão ( $Q$ ) é a mesma para as duas.

Já a segunda característica, trata-se da associação em paralelo. Nesta, a vazão ( $Q$ ) é igual a soma das vazões fornecidas individualmente por cada bomba e a altura manométrica ( $H$ ) usada é a média das alturas manométricas individuais.

Por fim, a potência  $P$  aplicada a expressão 2.8 nas configurações série ou paralelo é igual a soma das potências elétricas ativas individuais fornecidos ao motobomba.

### 2.3. Sistemas de controle

A união de subsistemas e processos (ou plantas) construídos com a finalidade de se obter uma saída com desempenho desejado, dada uma entrada especifica, caracteriza um sistema de controle (NISE, 2002).

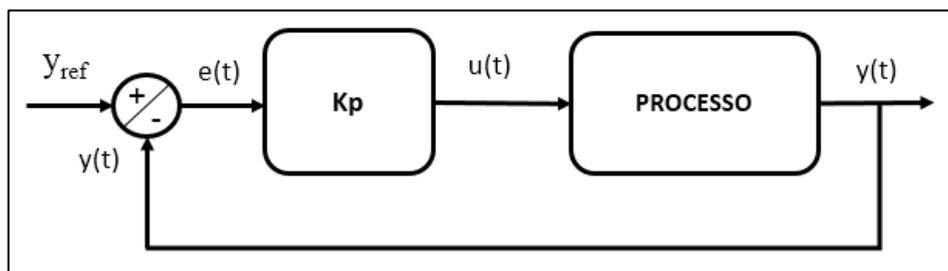
Nise (2002) aponta quatro razões principais para o desenvolvimento de sistemas de controle, são elas: amplificação de potência, controle remoto, conveniência da forma da entrada e compensação de perturbações.

Em vista disto, nos dois tópicos seguintes, serão abordadas dois modelos de controlador que serão aplicados ao sistema de bombeamento estudado neste trabalho. O primeiro, trata-se de um controlador proporcional clássico. Já o segundo, consiste em um controlador inteligente baseado em lógica *fuzzy*.

### 2.3.1. Controle proporcional

O diagrama em blocos do controle proporcional em malha fechada é apresentado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Diagrama de blocos de um controlador proporcional.



Fonte: (Autor)

No diagrama de blocos apresentado na Figura 2.8, o termo  $Y_{ref}$  expressa o valor desejado para do sistema, enquanto que a saída ( $y(t)$ ) equivale ao valor medido da variável que deseja-se controlar. O controlador produz um sinal de atuação na planta de modo a levar o erro (diferença entre o valor desejado e o valor medido) a zero.

A ação de controle gerada pelo controlador proporcional é diretamente proporcional a sua entrada, ou seja, trata-se da amplificação do sinal do erro em função do tempo, como mostrado na equação 2.9.

$$u(t) = K_p(y_{ref} - y(t)) \quad (2.9)$$

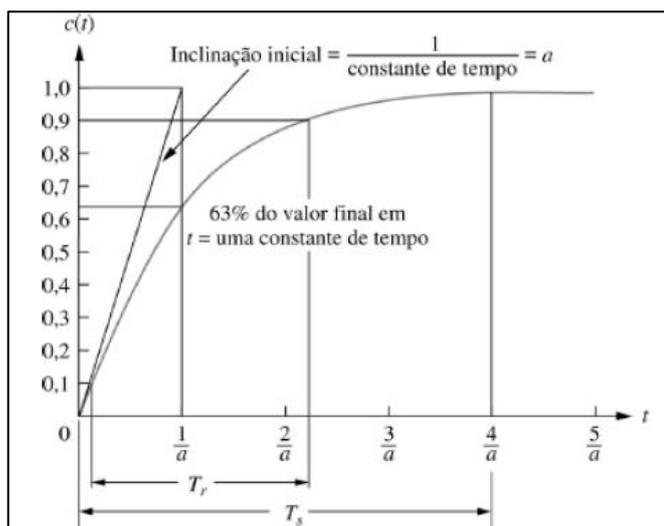
Sendo assim, este tipo de controlador é um amplificador de ganho constante, ou seja, quanto maior o erro, maior a ação de controle gerada. Nise (2002) aponta como a principal desvantagem deste tipo de controlador é o de erro em regime permanente diferente de 0. Este erro é inversamente proporcional ao aumento do ganho proporcional  $K_P$ , porém ao aumentar em demasia este ganho, torna o sistema instável.

A fim de determinar as características do comportamento do sistema, tanto para o regime transitório, quanto no regime permanente, pode-se aplicar um degrau unitário na entrada e observar a saída. Serão abordadas a seguir as respostas de primeira e segunda ordem.

Uma resposta típica de primeira ordem está ilustrada na Figura 2.9. Onde Nise (2002) define os seguintes parâmetros:

- **Tempo de Subida ( $T_r$ ):** é o tempo necessário que a forma de onda da resposta vá de 10% a 90% do seu valor final;
- **Tempo de Acomodação ( $T_s$ ):** é o tempo em que a resposta alcance e fique operando na faixa de 2% do seu valor final;
- **Constante de Tempo ( $t$ ):** é o tempo necessário para que a resposta alcance 63% do valor do seu valor final.

Figura 2.9 – Resposta de um sistema de primeira ordem

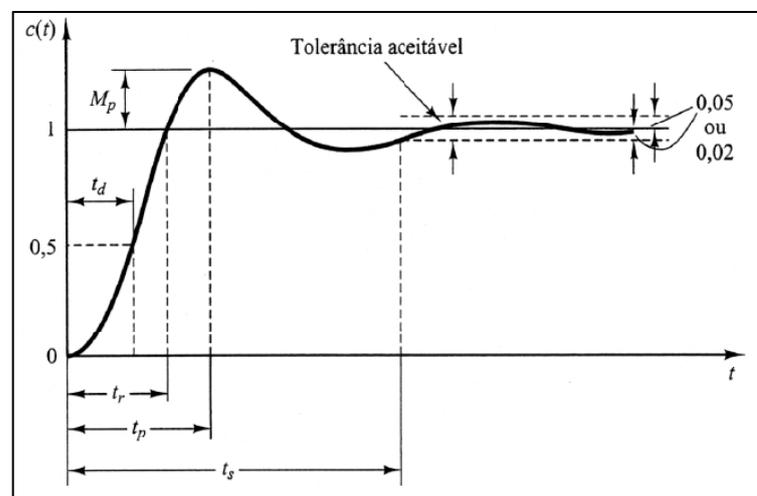


Fonte: (Nise, 2002)

Por outro lado, a resposta de segunda ordem do sistema, ilustrada na Figura 2.10, segunda Ogata (2002) apresenta as seguintes características:

- **Tempo de Atraso ( $T_d$ ):** é o tempo necessário para a resposta alcançar pela primeira vez a metade do valor final;
- **Tempo de Subida ( $T_r$ ):** é o tempo necessário que a forma de onda da resposta vá de 10% a 90% do seu valor final;
- **Instante de pico ( $T_p$ ):** é o tempo necessário para a resposta alcançar o primeiro pico;
- **Ultrapassagem Percentual ( $M_p$ ):** O valor pelo qual a forma de onda ultrapassa o valor em estado estacionário, no instante de pico, este valor é expresso em percentagem do valor em regime permanente;
- **Tempo de Acomodação ( $T_s$ ):** é o tempo em que a resposta alcance e fique operando na faixa de 2% do seu valor final;

Figura 2.10 – Resposta de um sistema de Segunda ordem



Fonte: (OGATA, 2002)

### 2.3.2. Controle inteligente baseado em lógica *fuzzy*

A lógica *fuzzy* baseia-se na capacidade de raciocínio aproximado, tornando-se muito mais efetivo para uma grande variedade de problemas para os quais as obtenções das informações são difíceis (NOGUEIRA, 2013).

No ano de 1965, o engenheiro eletrônico Lotfi A. Zadeh publicou o primeiro trabalho sobre a teoria dos conjuntos *fuzzy* ou também conhecido como conjuntos nebulosos, com a finalidade de tratar as incertezas não probabilísticas, esta recebeu o nome de *Fuzzy Sets*. A aplicação desta teoria supera a ideia tradicional de um elemento pertencer ou não a um determinado conjunto, pois introduz a ideia que o elemento pertença a um dado conjunto com certo grau de pertinência.

Sendo assim, Nogueira (2013) elucida dois tipos de sistemas onde é convencional a aplicação da lógica *fuzzy*: sistemas complexos com comportamentos de difícil compreensão e sistemas que resultados aproximados são aceitáveis. Podendo ser aplicado em diversas áreas, como: controle de velocidade (MARQUES, 2016), avaliação do índice de qualidade da água bruta (OLIVEIRA, 2014), manutenção preditiva (GAYER, 2018), entre outros.

Todas essas aplicações citadas no parágrafo anterior só são possíveis devido à similaridade do mecanismo *fuzzy* com o raciocínio humano, devido ao uso de termos linguísticos; modelamento do senso comum, ou seja, conhecimento ambíguo e/ou impreciso, porém racional; robustez e tolerância a falhas. Por outro lado, este sistema se limita nas gerações de regras *fuzzy* e na definição de funções de pertinência adequada para a aplicação escolhida, pois depende do amplo conhecimento do especialista sobre o sistema o qual será aplicado está técnica.

Dessa forma, a aplicação da lógica nebulosa no desenvolvimento de sistemas de controle torna-se menos restritivos, pois considera as informações fornecidas por seres humanos (SHAW, 2007), ou seja, da experiência do especialista, conseqüentemente não fazendo mais uso de modelos matemáticos, que dependendo da aplicação torna-se muito complexo.

Portanto, para aplicar a teoria da lógica nebulosa, necessita-se definir os seguintes conceitos: conjuntos *fuzzy*, funções de pertinência, as variáveis linguísticas, *fuzzy*ificação e os modelos de inferência.

### 2.3.2.1. Conjuntos *fuzzy*

Na teoria clássica dos conjuntos, a transição de um elemento entre os conjuntos contidos em um universo é abrupta e bem definida (MARRO, 2010). Sendo assim, dado um conjunto  $A$  em um universo  $X$ , os elementos deste universo pertencem ou não àquele conjunto, expresso pela função característica  $f_A$ :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (2.10)$$

Já para um elemento em um universo que contém conjuntos fuzzy, essa transição pode ser gradual (ROSS, 2005). Dessa forma, Zadeh (1965) generalizou a função característica de modo que ela pudesse assumir infinitos valores no intervalo  $[0,1]$ . Então, dado um conjunto fuzzy  $A$  em um universo  $X$  é possível definir uma função de pertinência  $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ , e representado por um conjunto de pares ordenados

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in X \quad (2.11)$$

em que  $\mu_A(x)$  designa o quão  $x$  é compatível com o conjunto  $A$ . Em vista disto, o grau de pertinência possibilita que um elemento pertença a mais de um conjunto nebuloso.

Zadeh (1965) propõe três operações básicas entre conjuntos *fuzzy*, estão são: união, complemento e interseção. Dessa forma, sejam definidos três conjuntos nebulosos  $A$ ,  $B$  e  $C$  contidos no universo  $X$ . Para um elemento  $x$  deste universo, têm-se as seguintes operações:

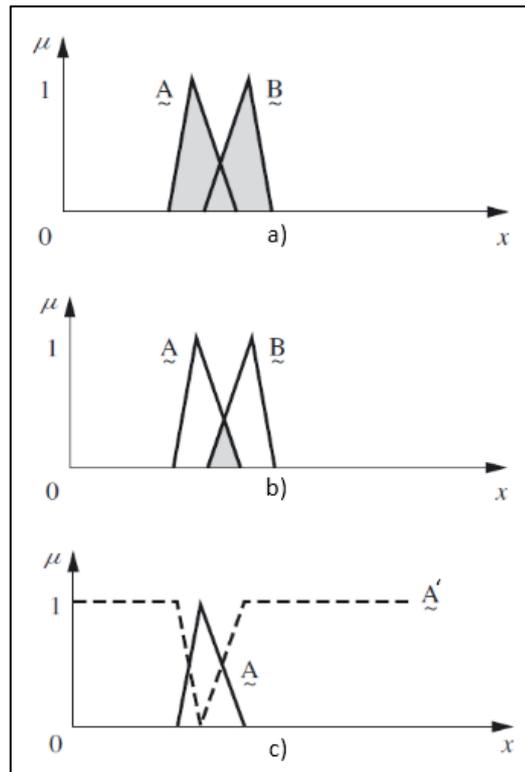
- **União:**  $\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x)$  (2.12)

- **Complemento:**  $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$  (2.13)

- **Interseção:**  $\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x)$  (2.14)

As operações de união, complemento e interseção estão ilustradas nas Figura 2.11a, Figura 2.11b e Figura 2.11c, respectivamente, onde o eixo  $x$  é o valor assumido pela variável e o eixo  $y$  o grau de pertinência dela.

Figura 2.11 – Representação gráfica das operações com os conjuntos *fuzzy*



Fonte: adaptada de Roos (2005)

Além disso, os conjuntos nebulosos apresentam propriedades algébricas, como: comutatividade, associatividade, distributividade, entre outras.

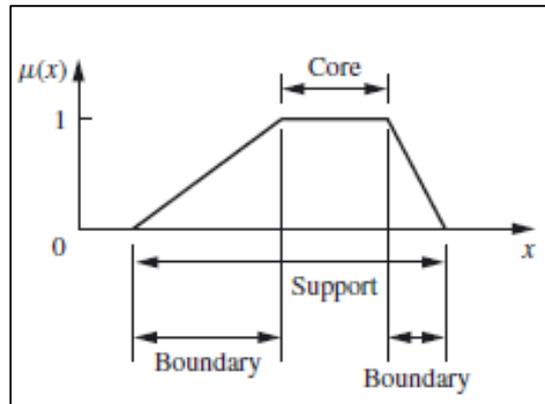
### 2.3.2.2. Funções de pertinência

Todas as informações contidas em um conjunto *fuzzy* estão descritas em sua função de pertinência (ROOS, 2005). Dessa forma, é necessário conhecer os termos presentes nestas funções. Para fins de estudo, a função ilustrada na Figura 2.12 é contínua, porém os termos se aplicam igualmente para conjuntos difusos contínuos e discretos. Ross (2005) define esses termos como sendo:

- **Core:** da função de pertinência de um certo conjunto *fuzzy*  $A$  é definido como aquela região do universo que é caracterizada pela associação completa no conjunto  $A$ , ou seja,  $\mu_A(x) = 1$ .
- **Support:** é definido como a região do universo que é caracterizado pela pertinência não nula do conjunto  $A$ . Isto é, o *support* é aqueles elementos  $x$  do universo tais que  $\mu_A(x) > 0$ .

- **Boundary:** é a região do universo que é caracterizado pela função de pertinência no intervalo entre 0 e 1 do conjunto  $A$ , ou seja,  $0 < \mu_A(x) < 1$ .

Figura 2.12 – Core, support e boundary dos conjuntos difusos.



Fonte: (ROOS, 2005)

Além da forma trapezoidal apresentada na Figura 2.12, as funções de pertinências podem assumir o formato: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, spline cúbico, dentre outros (MENDONÇA, 2016). No presente trabalho será utilizado o formato triangular e trapezoidal.

### 2.3.2.3. Variáveis linguísticas

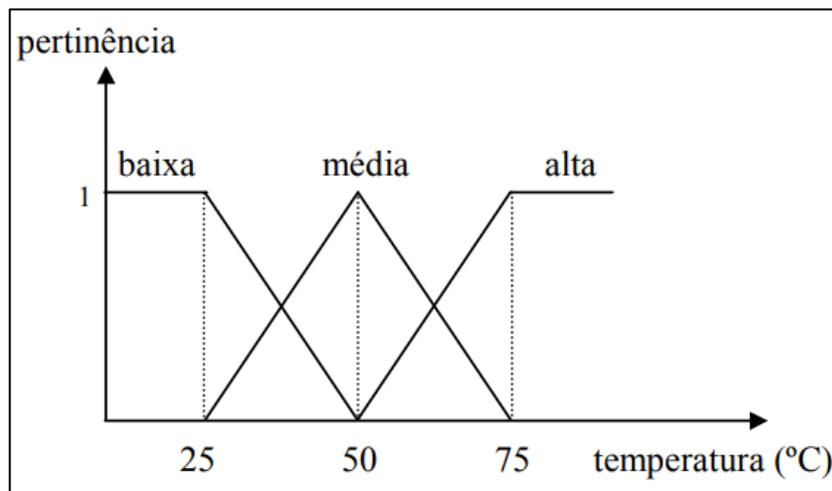
A formação do conhecimento do sistema *fuzzy* é a consequência da união da base de conhecimento com a base de dados. Os conjuntos nebulosos de termos retratam a abstração dos valores numéricos da variável, em outras palavras, trata-se de uma parcela *fuzzy* dos seus possíveis valores em termos linguísticos (ROOS, 2005).

Este conceito de variável linguista pode ser generalizado como:

“Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero, por exemplo), de conectivos lógicos (negação não, conectivos e e ou), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (como parênteses)” (TANSCHKEIT, 2005).

A representação gráfica para um sistema de controle de temperatura está ilustrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Curva de pertinência para a variável temperatura.



Fonte: (TANSCHKEIT, 2005).

Em vista disto, TANSCHKEIT (2005) caracteriza formalmente uma variável linguística através de uma quintupla (N, T(N), X, G e M), são elas:

- **N:** nome da variável;
- **T(N):** conjunto de nomes dos valores linguísticos de N;
- **X:** universo;
- **G:** conectivos lógicos, modificadores e delimitadores;
- **M:** regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* X.

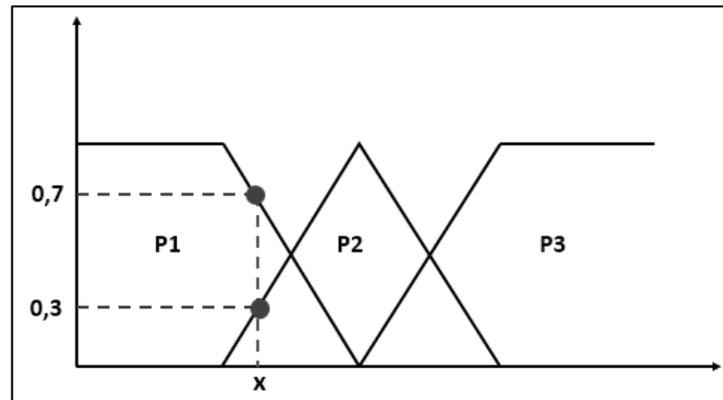
Para o caso da variável temperatura da Figura 2.13, tem-se:

- **N:** temperatura
- **T(N):** {baixa, média, alta};
- **X:** 0 a 100 °C;
- **G:** temperatura não baixa e não muito alta;
- **M:** associar o valor acima a um conjunto nebuloso cuja função de pertinência exprime seu significado físico.

#### 2.3.2.4. Fuzzyficação

Esta etapa consiste na codificação das entradas em graus de pertinência  $\mu$ , para cada conjunto *fuzzy* (NOGUEIRA, 2013). Esta codificação baseia-se na experiência do especialista. Para ilustrar isto, toma-se o exemplo da Figura 2.14 onde a variável nebulosa é a pressão na descarga de um conjunto motobomba, essas variáveis foram denominadas de: P1=baixa, P2=média e P3=alta. Destas, tem-se  $\mu(x = P1) = 0,7$ ,  $\mu(x = P2) = 0,3$  e  $\mu(x = P3) = 0$ .

Figura 2.14 – Variável nebulosa, pressão na descarga e seus conjuntos



Fonte: Autor

### 2.3.2.5. Regras *fuzzy*

A expertise dos sistemas de inferência *fuzzy* é descrita de forma qualitativa em forma de regras nebulosas, estas são compostas pelos termos antecedente e o consequente, **SE** <antecedentes> **ENTÃO** <consequentes> e também das operações entre eles (NOGUEIRA, 2013).

Dessa forma, os antecedentes descrevem as premissas do sistema, ao passo que os consequentes constituem uma conclusão uma ação que pode ser gerado a partir da verificação destas premissas. Logo, a construção dos conjuntos antecedentes é de modo geral um trabalho de classificação, enquanto a dos consequentes necessita um conhecimento, ainda que empírico, sobre a dinâmica do sistema (ORTEGA, 2001).

Após construir o conjunto de regras nebulosas, necessita-se de um mecanismo de inferência, capaz de deduzir a partir do conjunto de regras uma resposta final. A literatura apresenta vários métodos de inferência possíveis, porém a escolha de um deles depende da aplicação. Portanto, Ortega (2001) aponta que o método de inferência mais comum e vastamente utilizado no controle de sistema é o Método de Mamdani. Este método foi escolhido para o presente trabalho.

Os controladores do tipo Mamdani são concebidos dos trabalhos de Mamdani em 1973. A característica destes controladores é a conversão de valores quantitativos em valores qualitativos (*fuzzy*) e em seguida, através de um mecanismo de inferência em outros valores qualitativos e para obter os valores quantitativos novamente, usa-se um defuzificador.

### 2.3.2.6. Defuzificação

A defuzificação é um método de conversão que nos permite entender a distribuição de possibilidades da saída de um modelo linguístico nebuloso de forma quantitativa (ORTEGA, 2001). Os métodos de defuzificação mais comuns são: Média dos Máximos, Centro de Área e Método das alturas.

- **Média dos Máximos:** este método calcula a média de todos os valores de saída que possuam o maior grau de pertinência. A limitação fundamental deste tipo de método é que ele não considera a totalidade da forma do conjunto *fuzzy* de saída, ou seja, dois conjuntos com formas diferentes, mas com iguais graus de pertinência máximo, tem-se resposta da defuzificação iguais.
- **Centro de Área:** este método considera todas as possíveis saídas do modelo. O procedimento consiste em calcular a partir da média ponderada, onde a pertinência ( $\mu_A(x)$ ) é o peso do valor  $x$ .
- **Método das alturas:** pode-se considerar este método como sendo a aproximação do método citado anteriormente. Este consiste em converter os consequentes das regras em um valor clássico através do cálculo do centroide. Depois disto, obtém-se o valor da defuzificação a partir da média ponderada, onde o grau de ativação da regra é o peso para cada cálculo de centroide obtido.

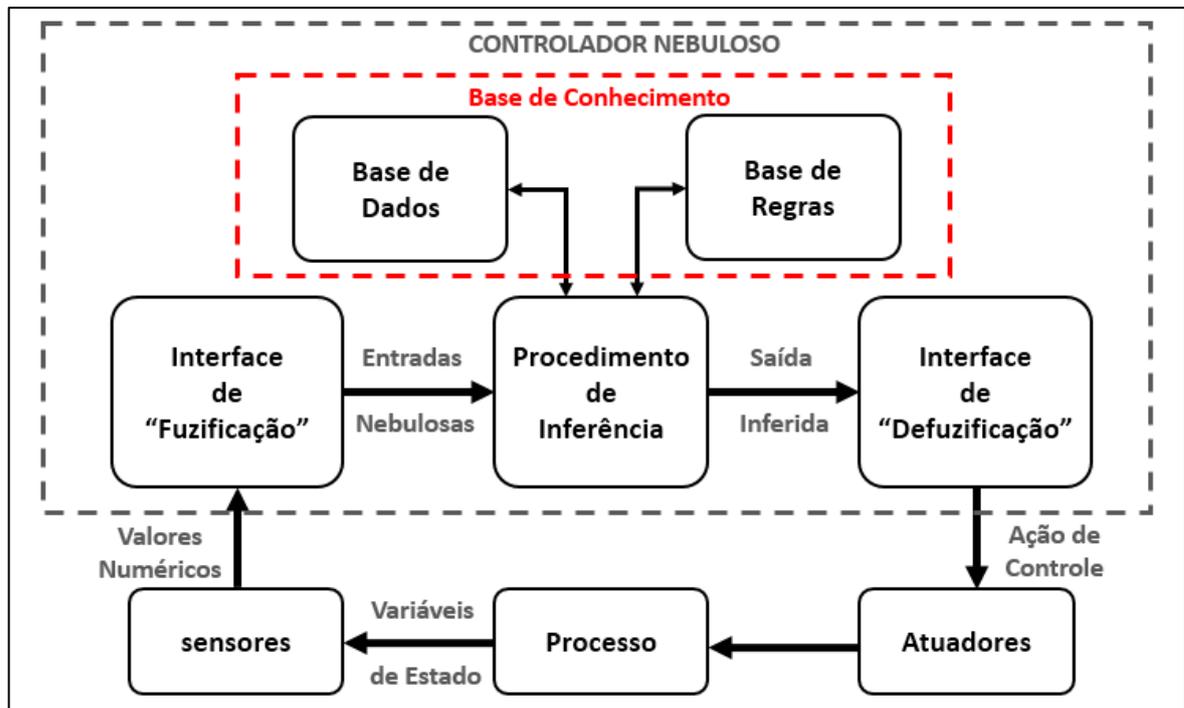
### 2.3.2.7. Estrutura básica de um controlador *fuzzy*

O controlador baseado em lógica fuzzy, contrata-se com os controladores clássicos, pois o segundo o algoritmo de controle é descrito através de equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemática. Já controlador *fuzzy*, utiliza-se da linguagem natural, fruto da experiência humana, com a finalidade de controlar um processo (ZADEH, 1965).

A estrutura básica para um controlador nebuloso está representada pelo diagrama de bloco da Figura 2.15. Nota-se, que os valores obtidos pelos sensores são transformados em variáveis linguísticas através da fuzificação. Em seguida, estas variáveis fuzificadas passam pelo processo de inferência, isto é, onde através das bases de dados e de regras o sistema toma a decisão, ainda em variáveis linguísticas.

Em seguida, por se tratar de um sistema de inferência do tipo Mamdani, necessita-se de uma interface de defuzificação, a qual transforma a variável linguista obtida no sistema de inferência em um valor numérico, que, por conseguinte é aplicado ao atuador do processo.

Figura 2.15 – Estrutura do controlador *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de Sandri (1999)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, propõe-se uma análise comparativa do controlador proporcional e um controlador que usa a lógica *fuzzy* para controle de pressão em redes de distribuição de água, objetivando o aumento da eficiência energética de um sistema de bombeamento de água.

Além disso, buscou-se avaliar a operação com diferentes cenários de associações de bombas, seja elas em série, paralelas ou única bomba. Com o objetivo de validar o sistema de controle desenvolvido, foi utilizada uma bancada experimental de distribuição de água totalmente instrumentalizada, exceto o reservatório de água, o qual não há sensoriamento, apta a emular diversos cenários.

Além disso, a presença de um sistema de aquisição de dado, permite o monitoramento dos parâmetros hidráulicos (pressão e vazão), como também os elétricos advindos dos conversores e motores (tensão e corrente elétrica).

#### 3.1. Bancada experimental

O sistema o qual foi realizado o experimento, ilustrado na Figura 3.1 – é constituído por dois conjuntos motobomba (BOMBA), cinco transdutores de pressão (PT), dois transdutores de vazão (FT), dois inversores de frequência, uma válvula de controle (CV), cinco registros manuais (REG) e por fim um reservatório circular de volume igual a 7,64 m<sup>3</sup>.

Ademais, há instalação elétrica, uma placa de condicionamento dos sinais provenientes dos sensores, instalação hidráulicas através de tubos e conexões de PVC e para processar os dados, foi usado um computador portátil uma interface de aquisição de dados.

Figura 3.1 – Bancada Experimental

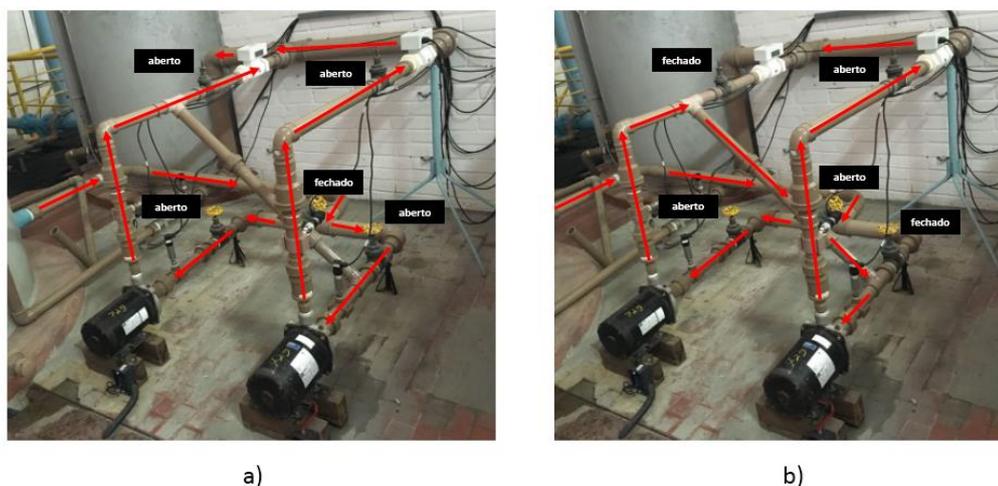


Fonte: (Autor)

Sendo assim, o fluxo advindo do reservatório circular é sugado pelas duas motobombas, que em seguida retorna para o mesmo reservatório, tudo isto através de canos. Além disso, a presença de registros no sistema experimental, permite a configuração em série ou em paralelo das motobombas, possibilitando a criação de diferentes topologias de sistemas hidráulicos.

Na Figura 3.2 está representado o fluxo da água quando sistema está ligado em série (a) e em paralelo (b).

Figura 3.2 – Fluxo da água para ligação série ou paralelo.



a)

b)

Fonte: (Autor)

Os conjuntos motobombas usados são monoblocos composto por um motor de indução trifásico acoplado a uma bomba Dancor, modelo CAM-W10. Estas foram instaladas abaixo do nível de água do reservatório (“afogada”). Este modelo apresenta as seguintes características: são centrífugas, mono estágio, diâmetro do rotor de 162 mm altura manométrica máxima de 44 mca, vazão máxima de 14,5 m<sup>3</sup>/h. Na Tabela 3.1, apresentam-se as principais características do modelo das motobombas usadas neste trabalho. Já na Figura 3.3, está ilustrado o modelo deste mesmo dispositivo.

Tabela 3.1 – Característica da motobomba

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| Fabricante                    | WEG       |
| Potência                      | 3 CV      |
| Tensão de alimentação         | 230/380 V |
| Frequência de alimentação     | 60 Hz     |
| Índice de proteção            | IP 21     |
| Velocidade de rotação nominal | 3450 rpm  |

Fonte: Catálogo do fabricante

Figura 3.3 – Conjunto motobomba modelo CAM-W10 (WEG).



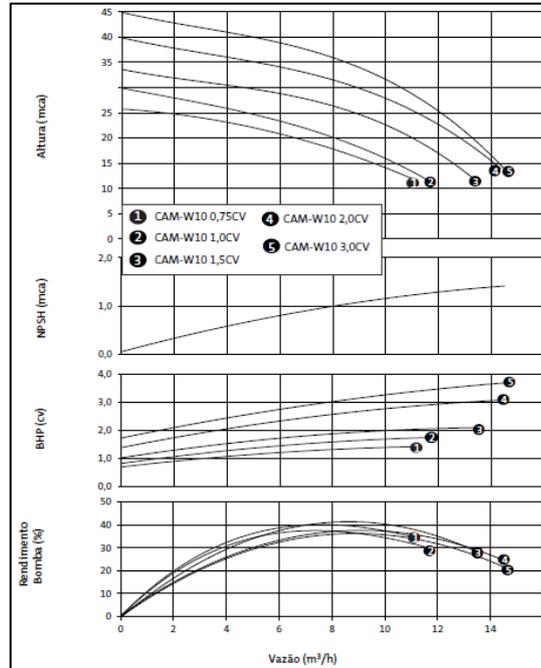
Fonte: <https://www.americanas.com.br>

O desempenho da bomba centrífuga citada anteriormente, é demonstrado por um conjunto de curvas características, indicadas na Figura 3.4. Nelas estão contidas as informações acerca da variação da altura manométrica, potência e rendimento em função da vazão.

Em termos práticos, a pressão recebe a unidade de metros de coluna de água (mca), ou seja, é a altura em que um fluido consegue atingir escoando em uma tubulação, operando em uma vazão desejada. Com isso, o projetista a partir das curvas característica da bomba pode

escolher o melhor dispositivo que se encaixe em seu projeto, como também analisar a eficiência para o ponto de operação escolhido.

Figura 3.4 – Curva característica da bomba CAM-W10



Fonte: Catálogo do fabricante

Os conversores de frequência são dispositivos usados para o controle da velocidade de giro dos motores, fazendo com que o ponto de operação das bombas seja modificado. Foram adotados dois modelos diferentes para controlar cada um dos conjuntos motobomba. O primeiro modelo, trata-se de um CFW-11, fabricado pela empresa WEG, possui a opção de escolha do tipo de relação tensão/ frequência linear e vetorial, tensão de alimentação trifásica 380/480 Vca, frequência da tensão de alimentação 50/60 Hz, corrente nominal de saída de 10 A e frequência de saída de até 300 Hz. Este conversor está ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Inversor de frequência CFW-11 (WEG)



Fonte: Catálogo do fabricante

Por outro lado, o segundo modelo, trata-se de um Altivar 31, fabricado pela Schneider Eletric, possui a opção de escolha do tipo de relação tensão/ frequência linear e vetorial, tensão de alimentação trifásica 380/480 Vca, frequência da tensão de alimentação 50/60 Hz, corrente nominal de saída de 14,3 A e frequência de saída de até 500 Hz. Este conversor está ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Inversor de frequência Altivar 31(Schneider Eletric)



Fonte: Catálogo do fabricante

A presença de saídas e de entradas, sejam elas analógicas ou digitais, dos inversores de frequência permite o monitoramento e controle das grandezas elétricas enviadas ao conjunto motobomba e os advindos da rede elétrica. Neste trabalho, utilizou-se a saída analógica do inversor de frequência para monitor a potência elétrica ativa injetada ao conjunto motobomba, como também foi usado a entrada a analógica do mesmo dispositivo para regular o valor de referência da velocidade de giro do motobomba.

Para emular a demanda de um sistema de distribuição de água, usou-se uma válvula de controle proporcional, isto é, alterando a vazão de saída do sistema. Esta válvula é do tipo esfera, acionada por um motor elétrico de controle, cujo o ângulo de abertura é regulado. O modelo utilizado no experimento foi o ARN24-SR, do fabricante BELIMO (v. Figura 3.6). Este dispositivo é alimentado por uma tensão de 24 Vca  $\pm$  20% ou 24 Vca  $\pm$  10% e torque de 20 Nm.

Desse modo, o ângulo de fechamento varia de 0° a 90°, podendo ser ajustado manualmente, e a pressão máxima de operação de 140,62 mca. Este dispositivo possui um sinal de comando (que determina a posição em graus) e retorno (que adquire a posição onde ela se encontra) a 2 fios, estes sinais são de tensão variam de 2 a 10 V.

Figura 3.7 – Válvula de controle ARB24-SR (BELIMO)



Fonte: <http://galpaodoar.com.br>

O papel da válvula no sistema experimental, consiste em inserir a rede hidráulica perda de carga. Esta perda é inversamente proporcional a vazão fornecida ao sistema e diretamente proporcional à altura manométrica das bombas.

Neste trabalho, usou-se cinco transdutores de pressão do tipo apresentado na Figura 3.8, sendo três que operam até 42,21 mca (tipo 1) e dois que operam até 10,54 mca (tipo 2) . Os quatro primeiros transdutores de pressão foram instalados a montante e a jusante dos conjuntos motobomba, de forma a obter a pressão na sucção e na descarga deste dispositivo, estes são usados para calcular a altura manométrica de cada bomba. Para descrever a pressão de serviço atuante no sistema de distribuição de água, foi instalado um transdutor de pressão a montante da válvula de controle.

Figura 3.8 – Transdutor de pressão DRUCK PTX 7217



Fonte: Catálogo do fabricante

A característica construtiva dos transdutores de pressão é do tipo piezoresistivo de silício, cujas características estão especificadas nas Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Característica do transdutor de pressão DRUCK PTX 7217

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Fabricante            | DRUCK  |
| Modelo                | PTX 7217   |
| Faixa de medição      | 0 a 42,21 mca (tipo 1)<br>0 a 10,54 mca (tipo 2) |
| Sinal de saída        | 2 fios (4 a 20mA)                                |
| Tempo de resposta     | 1 ms   |
| Precisão              | ± 0,2%   |
| Tensão de alimentação | 24 V   |

Fonte: Catálogo do fabricante

Para adquirir o valor da vazão do sistema, foram instalados dois transdutores de vazão eletromagnéticos (v. Figura 3.9) a jusante de cada conjunto motobomba do sistema, deve-se salientar que estes devem respeitar as recomendações exigidas pelo fabricante, ou seja, obedecendo o comprimento mínimo de trecho reto, sem que haja singularidades, a montante e a jusante do medidor. Na Tabela 3.3 estão as principais características deste dispositivo.

Figura 3.9 – Transdutor de vazão eletromagnético VMS Pro.



Fonte: Catálogo do fabricante

Tabela 3.3 – Características dos transdutores de vazão eletromagnético VMS 038

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| Fabricante            | Incontrol                     |
| Modelo                | VMS 038                       |
| Faixa de medição      | 1,24 a 40,8 m <sup>3</sup> /h |
| Sinal de saída        | 2 fios (4 a 20 mA)            |
| Tempo de resposta     | 1 ms                          |
| Precisão              | ± 0,2 %                       |
| Tensão de alimentação | 24 V                          |

Fonte: Catálogo do fabricante

Observa-se que os sinais advindos dos diversos sensores distribuídos no sistema são de 4 a 20 mA, porém o sistema de aquisição de dados utilizado, suporta apenas leitura de valores de tensão, com faixa de operação de -10 a 10V. Levando em consideração este aspecto, foi necessário elaborar um circuito de condicionamento destes sinais, o qual transforma o sinal em corrente para tensão.

A *interface* de aquisição de dados usada no experimento é a NI USB 6229 (v. Figura 3.10), a qual é responsável pela comunicação entre os componentes eletrônicos e o computador. Este dispositivo é responsável por enviar sinais de excitação para os inversores e a válvula proporcional, além de receber os sinais advindos dos transdutores de pressão e vazão. As especificações técnicas deste elemento estão ilustradas na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Placa de aquisição de dados NI USB 6229



Fonte: Catálogo do fabricante

Tabela 3.4 – Especificações técnicas das interfaces de aquisição de dados

|  |                      |
|--|----------------------|
| Fabricante                               | National Instruments |
| Modelo                                   | NI USB-6229          |
| Tensão de alimentação                    | 220 Vac              |
| Número de saídas analógicas              | 4                    |
| Número de entradas analógicas            | 32                   |
| Número de entradas digitais              | 32                   |
| Taxa máxima de amostragem                | 250 kS/s             |
| Resolução do conversor analógico/digital | 16 bits              |
| Faixa de tensão de entrada               | $\pm 10V$            |

Fonte: Catálogo do fabricante

Para gerenciar o sistema, usou-se *software* computacional LabVIEW™ - *Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*, originária da National Instruments. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados.

Os programas desenvolvidos no LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais (IVs). Sua composição consiste em um painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o diagrama de blocos do programa. Esta linguagem é processada por um compilador, e sua performance é de alto nível, recebendo o nome de “linguagem G”.

A linguagem G foi escolhida devida sua compatibilidade com o sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho, além de oferecer diversas ferramentas, como: sinóticos, gráficos, blocos de lógicas de controle, armazenamento, processamento e análise dos dados, os quais foram fundamentais para sua escolha.

### 3.2. Caracterização do sistema a ser controlado

A fim de avaliar o comportamento das pressões, vazões e rendimento do sistema a ser controlado, realizou-se os seguintes ensaios:

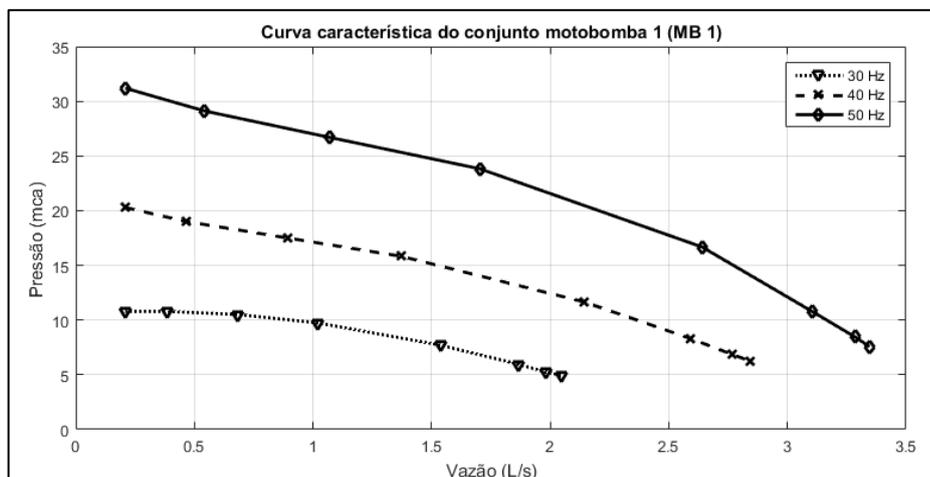
### 3.2.1. Curva característica dos conjuntos motobomba

Para realização deste ensaio, aplicou-se as seguintes frequências de rotação ao conjunto motobomba: 30 Hz, 40 Hz e 50 Hz e para cada uma destas frequências variou-se a válvula proporcional, desde totalmente fechada (90°) até totalmente aberta (0°), com a finalidade do aumento gradativo da vazão.

Desta forma, para cada uma das bombas mediu-se a vazão a jusante da motobomba e as pressões a montante e a jusante do mesmo dispositivo, afim de escrever as curvas da Figura 3.11 e Figura 3.12, para o conjunto motobomba 1 e 2, respectivamente. Observa-se nas curvas características das bombas, que as pressões máximas são obtidas nas vazões mínimas e as pressões mínimas são obtidas nas vazões máximas. Este comportamento se dá devido à energia hidráulica fornecida pela motobomba ser constante, ou seja, a frequência de rotação constata. Dessa forma, ao variar o ângulo de abertura da válvula proporcional, muda-se a área de aplicação da força fornecida pelo conjunto motobomba, aumentando a pressão e diminuindo a vazão. Nestas figuras, observa-se também que mantendo o sistema a uma vazão constante, tem-se uma maior pressão nos pontos de referência quando se tem o aumento da frequência de rotação do motor.

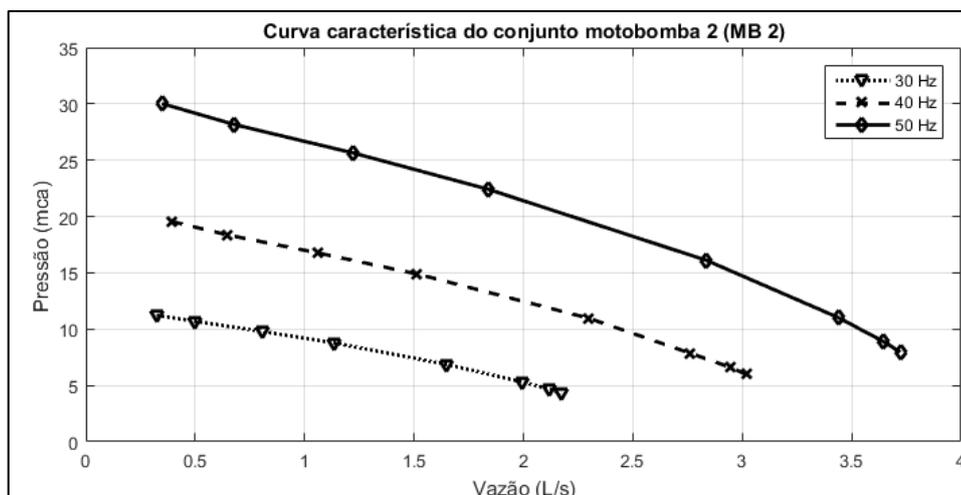
Estes ensaios foram realizados a fim de caracterizar os conjuntos motobombas, isto é, conhecer o comportamento do rendimento e pressão com a variação da vazão (curva característica da bomba), como também o comportamento da curva da vazão em função da frequência de rotação (curva do sistema).

Figura 3.11 – Curva característica do conjunto motobomba 1 (MB 1)



Fonte: (Autor)

Figura 3.12 – Curva característica do conjunto motobomba 2 (MB 2)



Fonte: (Autor)

Por outro lado, para obter as informações do rendimento do conjunto motobomba, usou-se o mesmo método citado no parágrafo anterior, porém, além dos dados coletados anteriormente, usou-se a potência fornecida pelo inversor de frequência ao conjunto motobomba.

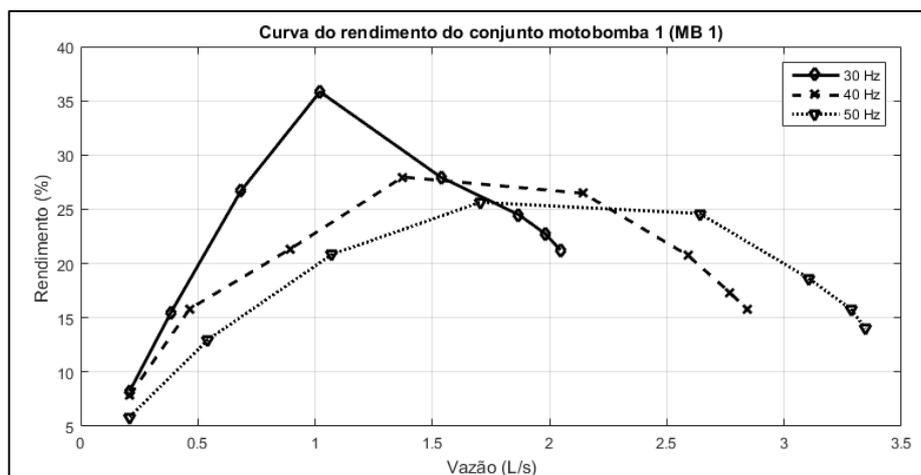
A equação 2.8 descreve o rendimento do conjunto motobomba, trata-se da razão da potência hidráulica, em termos da vazão, pressão e característica do fluido, e a potência elétrica. Então quando a válvula proporcional está em seu valor mínimo, tem-se valor mínimo de rendimento.

Por outro lado, ao passo que a vazão aumenta, consequentemente o valor do rendimento aumenta, até chegar ao ponto máximo, posteriormente diminui. Este perfil de curva dar-se devido a área de seção transversal regulável, que diminui gradual a concentração do fluido na descarga da bomba, a qual gera um excesso de carga e consequentemente um maior custo energético.

De modo análogo, a diminuição do rendimento após atingir o máximo, significa que o impacto da energia elétrica fornecida para produzir energia hidráulica está diminuindo gradualmente, pois o aumento da área transversal, causa o aumento da vazão e diminuição da pressão, como a rotação é constante, tem-se a diminuição do rendimento.

Portanto, os resultados apresentados nas Figura 3.13 e Figura 3.14 condizem aos conjuntos motobomba 1 e 2, respectivamente.

Figura 3.13 – Curva do rendimento do conjunto motobomba 1 (MB 1)



Fonte: (Autor)

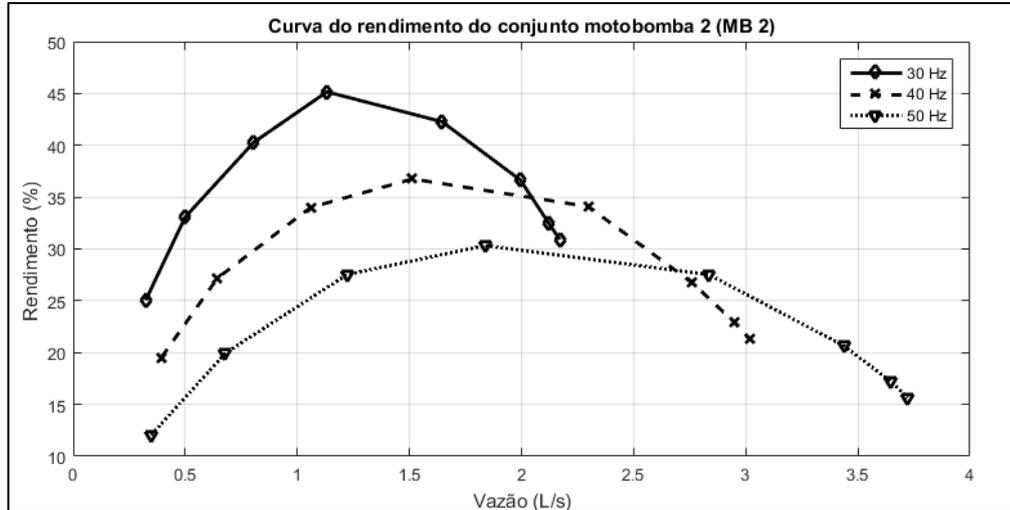
### 3.2.2. Curva do sistema

A curva do sistema consiste na representação da altura manométrica em função da vazão, para isso, abriu-se totalmente a válvula proporcional da bancada experimental, máxima demanda, e aplicou-se ao conjunto motobomba, através do inversor de frequência, incrementos de frequência de 5 Hz, sendo a frequência mínima 30 Hz e a máxima 50 Hz.

Dessa forma, obteve-se as informações dos transdutores de pressão PT 2 e PT 3, como também os dos transdutores de vazão FT 1 e FT 2 para obtenção das curvas ilustradas na Figura 3.15. Nota-se que o rendimento do conjunto motobomba cresce a medida com que a vazão e a frequência de rotação do motor cresce, ao chegar ao ponto máximo, o rendimento decresce.

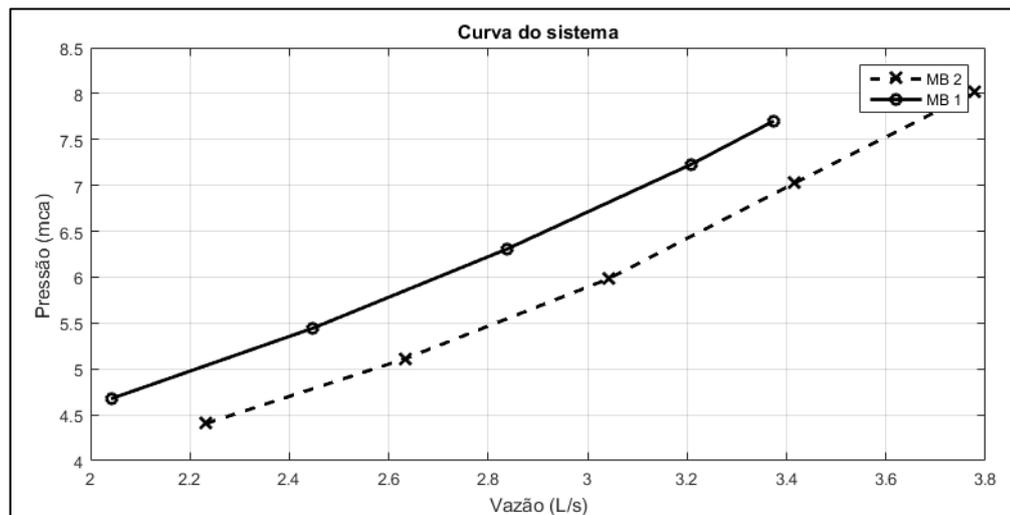
Este fato decorre que a energia hidráulica em termos de vazão e pressão produzida pela energia elétrica aplicada ao conjunto motobomba diminuem devido as características físicas do sistema, isto é, necessita-se de mais energia elétrica para produzir um pequeno aumento na energia hidráulica, conseqüentemente diminuindo o rendimento do conjunto motobomba.

Figura 3.14 – Curva do rendimento do conjunto motobomba 2 (MB 2)



Fonte: (Autor)

Figura 3.15 – Curva do sistema das motobombas individualmente



Fonte: (Autor)

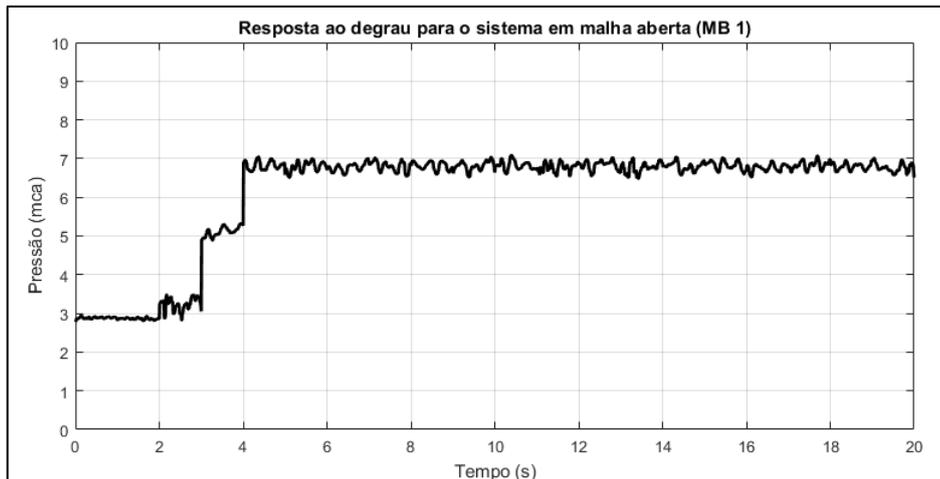
### 3.3. Estratégias de controle proporcional

Para o projeto do controlador, requer-se o conhecimento prévio do comportamento do sistema. Dessa forma, a fim de conhecer esta dinâmica, analisou-se a resposta ao degrau da bancada experimental estudada.

A variável que deseja ser controlada é a pressão na descarga do sistema, esta pressão é obtida a partir do transdutor de pressão PT 5. Dessa forma, aplicou-se um degrau de 30 Hz

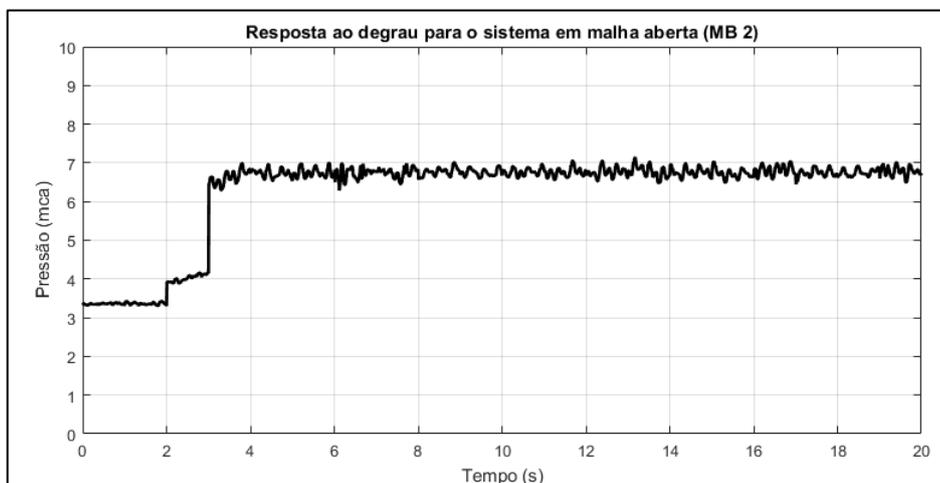
ao conjunto motobomba pelo inversor de frequência, que é a variável manipulada. Os resultados deste procedimento estão ilustrados na Figura 3.16 e Figura 3.17. Nota-se nestas figuras, a presença de degraus na pressão entre 2 e 4 s, este fato decorre da inércia do rotor do conjunto motobomba.

Figura 3.16 – Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta (MB 1)



Fonte: (Autor)

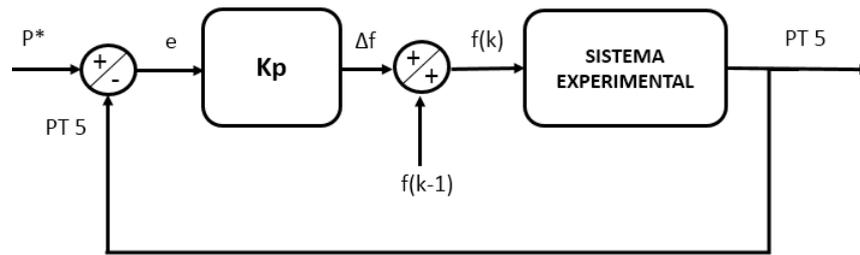
Figura 3.17 – Resposta ao degrau para o sistema em malha aberta (MB 2)



Fonte: (Autor)

Analisando o comportamento dinâmico no tempo das curvas apresentadas anteriormente, observou-se que a resposta do sistema é de primeira ordem, com isso elaborou-se a seguinte malha de controle proporcional em malha fechada ilustrada na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Diagrama de blocos do controlador proporcional



Fonte: (Autor)

Em que:

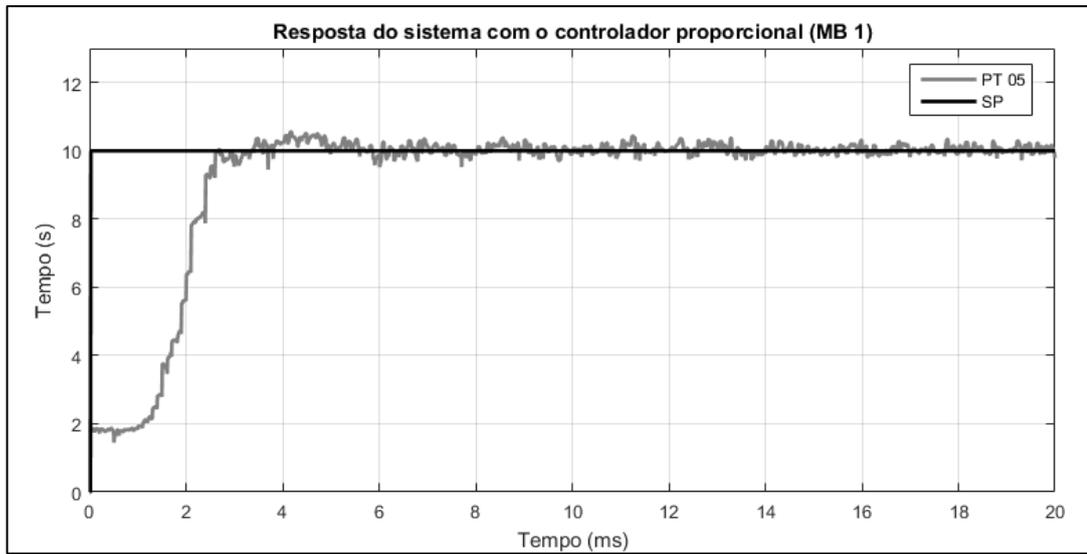
 $P^*$ : Pressão desejada; $PT\ 5$ : Pressão adquirida do transdutor de pressão  $PT\ 5$ ; $e$ : Erro; $\Delta f$ : Incremento da frequência; $f(k-1)$ : Frequência aplicada ao motor anteriormente; $f(k)$ : Frequência atual aplicada ao motor; $K_p$ : Ganho proporcional.

O controlador projetado tem como entrada o erro decorrente da diferença da pressão desejada e a adquirida do transdutor de pressão  $PT\ 5$ . Dessa forma, o controlador fará um incremento na frequência aplicada ao conjunto motobomba. Esta topologia foi adotada devido as características lentas do sistema estudado, como também evitar grandes oscilações na frequência imposta ao motor pelo conversor.

A fim de avaliar o desempenho do controlador, escolheu-se a pressão de referência igual a 10 mca, ajustou-se o ângulo da válvula proporcional para  $35^\circ$  (devido a limitação do sistema em operar neste valor de pressão na vazão máxima) e usou-se os seguintes valores para o ganho proporcional ( $K_p$ ): 0,5, 1, 1,5, 3 e 10, estes valores de ganhos foram adquiridos de forma empírica.

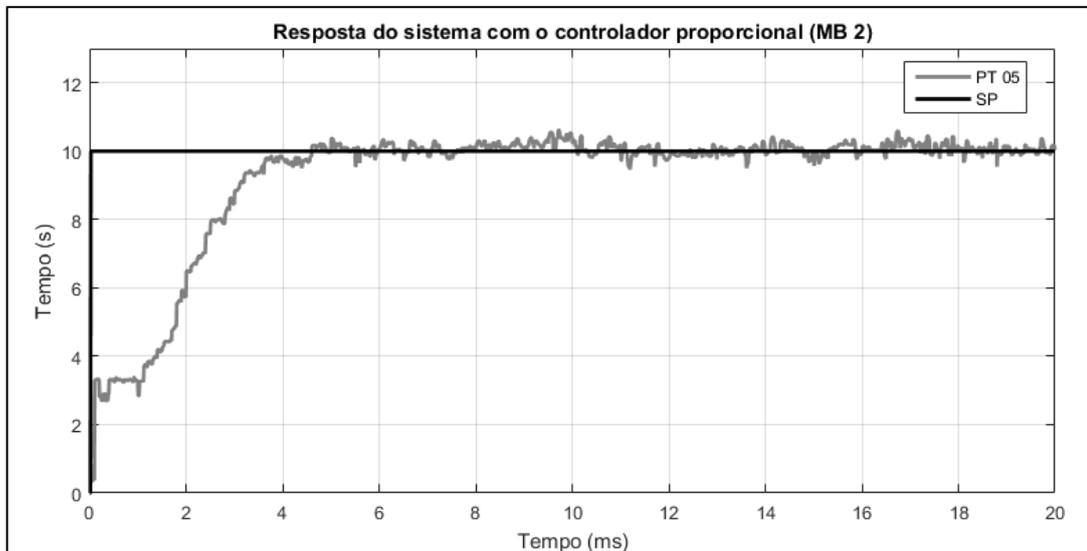
Nas Figura 3.19 e Figura 3.20 estão ilustradas as curvas do controlador proporcional para a constante proporcional igual a 0,5 e o *Set Point* (SP) de 10 mca. Definiu-se esse valor de ganho, pois dos valores de  $K_p$  apresentados no parágrafo anterior, foi o que obteve melhor resultado (tempo de acomodação e erro de regime permanente) e com características de primeira ordem.

Figura 3.19 – Resposta do Controle proporcional em malha fechada para  $K_p = 0,5$  (MB 1)



Fonte: (Autor)

Figura 3.20 – Resposta do Controle proporcional em malha fechada para  $K_p = 0,5$  (MB 2)



Fonte: (Autor)

Em vista das curvas do controlador proporcional em malha fechada apresentadas anteriormente, chegou-se as conclusões presentes na Tabela 3.5 e Tabela 3.6. É possível observar que nas curvas apresentadas anteriormente, o comportamento da variável controlada apresenta erro em regime permanente em torno de 4%.

Tabela 3.5 – Características do controlador proporcional MB 1

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Tempo de subida           | 4 s   |
| Tempo de acomodação       | 6 s   |
| Erro em regime permanente | 4,59% |

Fonte: Autor

Tabela 3.6 – Características do controlador proporcional MB 2

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| Tempo de subida           | 5 s   |
| Tempo de acomodação       | 6 s   |
| Erro em regime permanente | 4,24% |

Fonte: Autor

Em vista disto, para garantir o erro em regime estacionário nulo e uma resposta mais rápida seria necessário a implementação de um controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID), pois a característica integral permite a inserção de um polo na origem garante erro em regime estacionário nulo, mas aumenta o tempo de acomodação e piora a estabilidade relativa. Já a característica derivativa, diminui o tempo de acomodação, mas resulta num controlador sensível.

Sendo assim, a sintonia do controlador PID pode ser feita através de métodos com: Sensibilidade Limite, Curva de Reação (LOURENÇO, 1997) e o método de Ziegler e Nichols (BRAGA, 2016). Estes métodos são aplicados para sistemas lineares e invariantes no tempo.

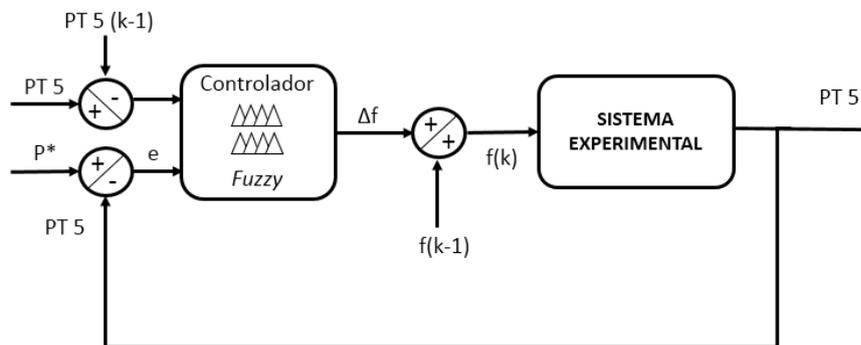
Porém a planta usada neste estudo, tratar-se de um sistema não linear e variante no tempo, pois pode apresentar vazamento em uma das tubulações, abertura ou fechamento de um registro, desgastes dos equipamentos, densidade do fluido e temperatura. Logo este tipo de abordagem foge do escopo do estudo aqui abordado.

Portanto, como uma alternativa de suprir as necessidades do projetista de erro estacionário nulo e melhoria no tempo de subida e acomodação, viu-se a possibilidade da implantação de um controle inteligente baseado em lógica *fuzzy*, o qual será discutido com mais detalhe no item 3.4 deste capítulo. Complementarmente, os controladores *fuzzy* podem ser projetados para operação do sistema com perturbações ou possíveis variações dos parâmetros da planta devido ao desgaste dos subsistemas da planta.

### 3.4. Estratégia de controle Fuzzy

É proposto neste trabalho um sistema de controle de pressão baseado em lógica fuzzy, do tipo MISO (*Multiple Input and Single Output*). O erro é calculado por meio do *software*, isto é, fazendo a diferença entre a pressão desejada e o valor registrado pelo sensor PT 5; e a derivada da pressão, isto é, a diferença entre dois pontos de pressão consecutivos. Já a saída é definida como o incremento da frequência aplicada ao conjunto motor bomba (CMB) pelo inversor de frequência. A malha de controle utilizada está ilustrada na Figura 3.20.

Figura 3.21 – Diagrama de blocos do controlador *Fuzzy*



Fonte: Autor

Em que:

$P^*$ : Pressão desejada;

PT 5: Pressão adquirida do transdutor de pressão PT 5;

PT 5 (k-1): Pressão adquirida do transdutor de pressão PT 5 anteriormente;

e: Erro;

$\Delta f$ : Incremento da frequência;

$f(k-1)$ : Frequência aplicada ao motor anteriormente;

$f(k)$ : Frequência atual aplicada ao motor;

Primeiramente, fez-se um estudo de como as variáveis de entrada estão relacionadas na tomada de decisão do controlador de pressão, ou seja, analisou-se o comportamento do sistema em malha aberta, onde foi possível determinar a faixa de operação do sistema estudado.

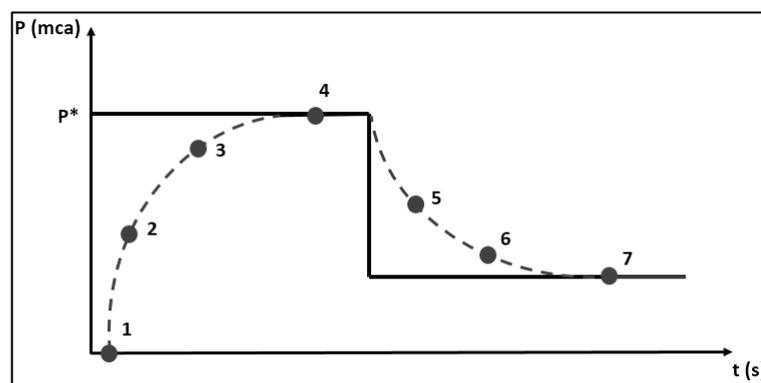
A partir deste estudo, elaborou-se a curva teórica ilustrada na Figura 3.22. Afim de explicar a metodologia aplicada para a elaboração das regras e dos conjuntos *fuzzy* enumerou-se os pontos de 1 a 7, onde a curva tracejada é a resposta do sistema para um dado referencial  $P^*$ .

Observa-se que no ponto 1 o erro é “grande” e positivo, pois este ponto é o mais distante do referencial e está abaixo do mesmo, além disso, a derivada da pressão é nula, pois não há ponto anterior a ele. Este fato justifica um “incremento grande” na frequência de giro do conjunto moto bomba (CMB).

Complementarmente, analisando o ponto 3, tem-se que o erro continua positivo, porém menor que o erro do ponto 2 e 1. Por conseguinte, a derivada da pressão é positiva, ou seja, a curva da pressão está em ascensão, logo aplica-se um incremento pequeno da frequência, pois a curva da pressão já está convergindo para o valor desejado. Já o ponto 4 está sobre o valor desejado, ou seja, apresenta erro e derivada da pressão nulos, então o controlador não deve aplicar nenhuma alteração no valor já existente da pressão atuante.

Por outro lado, ao diminuir o valor desejado, nota-se o declínio da curva da pressão do sistema, ao observar o ponto 5 e o comparar ao valor desejado, tem-se um erro “negativo médio”. Além disso, ao comparar o ponto 5 ao ponto 4, fica evidente que a derivada do erro é “negativo grande”, então justifica-se o controlador atuar no sistema experimental aplicando ao conjunto MB um “zero” da frequência.

Figura 3.22 – Curva do comportamento desejado do sistema



Fonte: Autor

Portanto, a metodologia abordada nos parágrafos anteriores para a determinação das regras, foram aplicadas aos demais pontos, isto resultou na Tabela 3.7, a qual está ilustrada às regras atribuídas ao sistema de inferência *Fuzzy do tipo Mamdani*, onde a resposta dada pelo

controlador surge da interseção entre o erro (linhas) e a derivada do erro (colunas). Ademais, no anexo A encontram-se estas regras expressas de forma linguista.

Tabela 3.7 – Regras *Fuzzy*

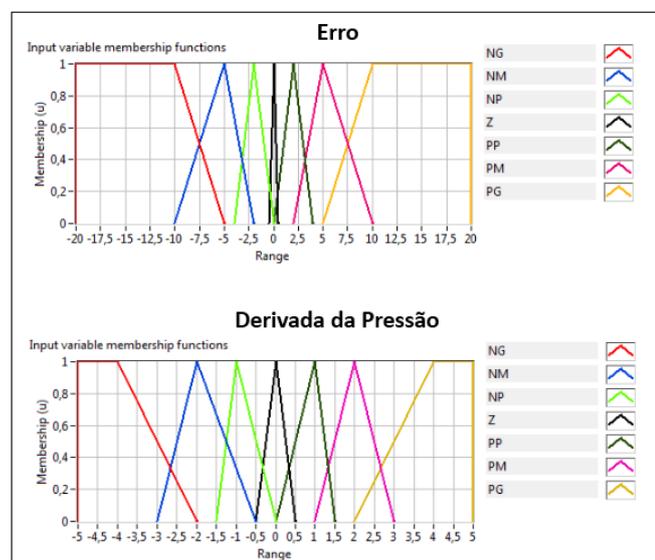
|                  |    | Derivada do Erro |    |    |    |    |    |    |
|------------------|----|------------------|----|----|----|----|----|----|
|                  |    | NG               | NM | NP | Z  | PP | PM | PG |
| E<br>R<br>R<br>O | NG | DP               | DP | DP | DM | DM | DG | DG |
|                  | NM | Z                | DP | DM | DM | DM | DG | DG |
|                  | NP | Z                | Z  | DP | DP | DP | DP | DM |
|                  | Z  | IP               | Z  | Z  | Z  | Z  | Z  | DP |
|                  | PP | IP               | IP | IP | Z  | IP | Z  | Z  |
|                  | PM | IG               | IG | IM | IM | IM | IM | IP |
|                  | PG | IP               | IG | IG | IG | IM | IM | IM |

Fonte: (Autor)

Para implementação das regras nebulosas, usou-se o auxílio da ferramenta computacional LabVIEW™ em que foi realizada a criação do conjunto de regras para o projeto do controle. A Figura 3.23 ilustra os conjuntos nebulosos associados às variáveis de entrada, enquanto a Figura 3.24 ilustra o conjunto *fuzzy* da variável de saída do controle.

Dessa forma, a faixa de operação destas variáveis, tanto a de entrada como a de saída, foram determinadas após observar qual seria a maior que o sistema operando com uma única bomba alcançaria. Além disso, notou-se também que a maior derivada do erro (dErro) não ultrapassaria do valor de 5, devido a característica lenta do sistema.

Figura 3.23 – Variáveis de entrada do controle de pressão



Fonte: (Autor)

Em que as variáveis linguísticas para o erro e derivada da pressão são:

NG: Negativo Grande

NM: Negativo Médio

NP: Negativo Pequeno

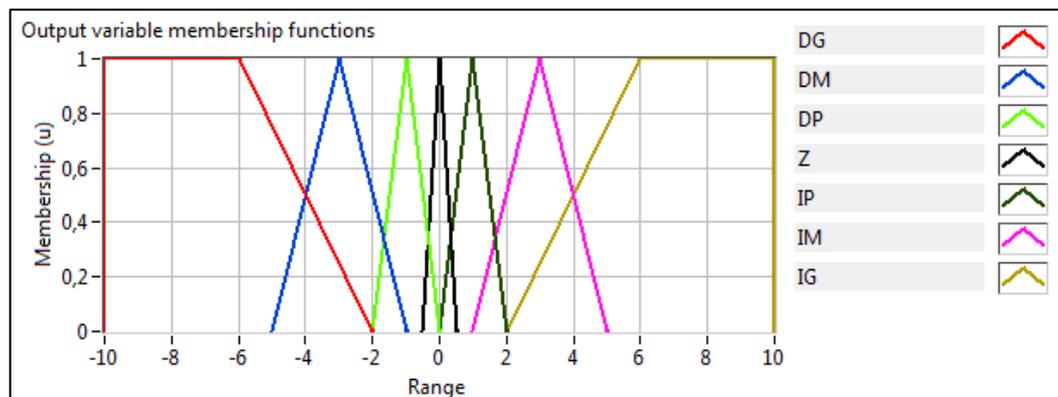
Z: Zero

PP: Positivo Pequeno

PM: Positivo Médio

PG: Positivo Grande

Figura 3.24 – Variáveis de saída do controle de pressão



Fonte: (Autor)

Em que as variáveis linguísticas foram definidas como:

PG: Decremento Grande

PM: Decremento Médio

PP: Decremento Pequeno

Z: Zero

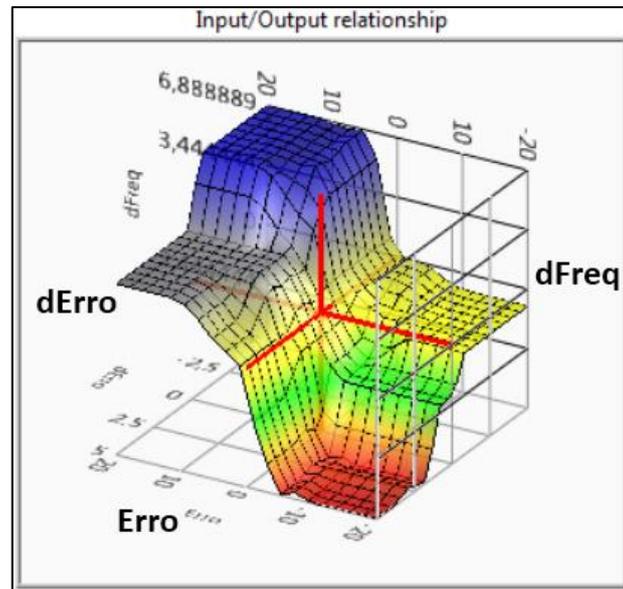
IP: Incremento Pequeno

IM: Incremento Médio

IG: Incremento Grande

Outro ponto importante, é descrever de forma gráfica as interações entre as entradas e a saída do sistema para as regras criadas. Sendo assim, desenvolveu-se a superfície da Figura 3.25, onde o eixo  $x$  foi atribuído à variável de erro (Erro),  $y$  a derivada do erro (dErro) e o eixo  $z$  à variação da frequência (dFreq).

Figura 3.25 – Superfície das relações entre as entradas e saída



Fonte: (Autor)

Analisando a superfície apresentada anteriormente, nota-se as seguintes características: suavidade nas transições das regras e convergência das variáveis ao erro. Em vista destas características, o comportamento o controle do sistema mostra-se estável e não havendo a possibilidade de mudanças abruptas, que podem ocasionar a danificação do sistema experimental estudado. Observa-se também, que quando o erro e a variação do erro forem zero, o resultado do sistema de inferência *fuzzy* fornece como resultado uma variação da frequência igual a zero, isto é, foi atingido o estado em regime permanente.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados, a fim de validar o sistema de controle proposto e sua relação com o rendimento dos conjuntos motobombas. São eles:

- **Experimento I:** Ensaio em malha aberta com entrada do tipo grau de frequência aplicada ao inversor de frequência para o sistema experimental em operação com a válvula de controle (CV) em 35°.
- **Experimento II:** Ensaio em malha fechada para o controle proporcional aplicado a um único conjunto motobomba, onde avaliou-se as características da resposta devido a variação do valor desejado e inserção de perturbação.
- **Experimento III:** Ensaio em malha fechada para o controle baseado em lógica *fuzzy* aplicado a um único conjunto motobomba, onde avaliou-se as características da resposta devido a variação do valor desejado e inserção de perturbação.
- **Experimento IV:** Ensaio em malha fechada para o controle baseado em lógica *fuzzy* aplicado a dois conjuntos motobomba conectados tanto em série como em paralelo, onde avaliou-se as características da resposta devido a variação do valor desejado e inserção de perturbação.

Para alcançar os resultados apresentados a seguir, foram feitos vários testes e constatou-se que eles seguiam o mesmo padrão.

## 4.1. Experimento I

O experimento I demonstra o funcionamento do sistema operando em malha aberta com a válvula (CV) do sistema experimental (v. Figura 3.1) posicionada em 35°.

Os ensaios foram realizados com o conjunto motobomba partindo do repouso (frequência igual a zero), então aplicou-se degraus de frequência de 30, 35, 45, 50 Hz ao conjunto motobomba por meio do conversor e verificou-se a pressão de saída do sistema (PT 5).

O resultado da pressão em função do tempo para cada valor de frequência é ilustrado na Figura 4.1. Observe que conforme se aumenta a frequência aplicada ao conjunto motor bomba, aumenta também a pressão na saída do sistema. Os detalhes referentes ao tempo de subida e pressão média em regime permanente estão elucidados na Tabela 4.1.

Figura 4.1 – Curva em malha aberta para degraus de frequência (MB 1)

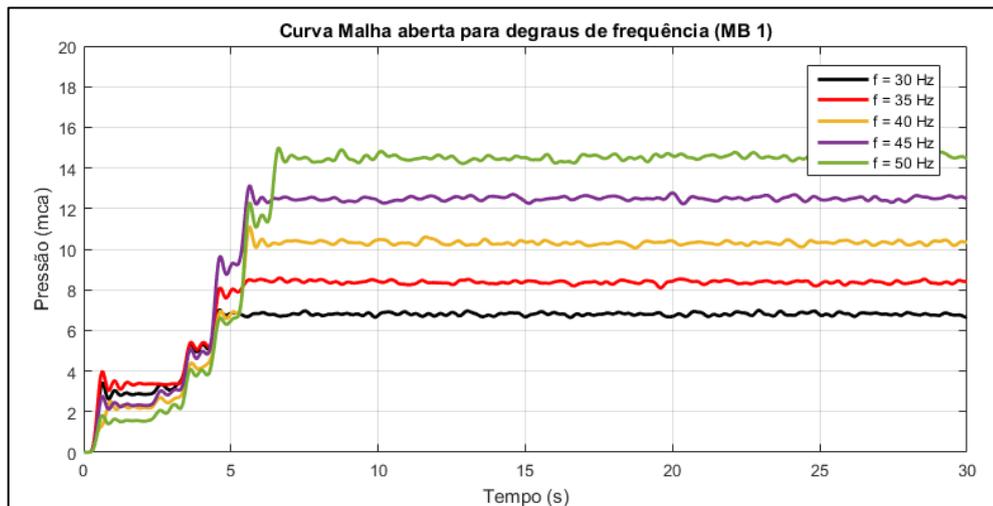


Tabela 4.1 – Característica do sistema em malha para degraus de frequência.

| Frequência (Hz) | Tempo de subida | Tempo de assentamento | Pressão média em regime permanente |
|-----------------|-----------------|-----------------------|------------------------------------|
| 30              | 4,05 s          | 5,54 s                | 6,8 mca                            |
| 35              | 4,15 s          | 5,85 s                | 8,37 mca                           |
| 40              | 4,96 s          | 6,6 s                 | 10,3 mca                           |
| 45              | 5,01 s          | 7,26 s                | 12,5 mca                           |
| 50              | 5,52 s          | 7,81 s                | 14,52 mca                          |

Além disso, buscou-se verificar o rendimento médio do sistema em regime permanente em malha aberta para cada valor de frequência aplicado. Para isso, aplicou-se o mesmo método exposto no tópico 3.2.1. Este resultado está presente na Figura 4.2 e na Tabela 4.2. Nota-se que o rendimento aumenta até atingir o ponto máximo de 30,72%, após isto cai até atingir 23,91%.

Portanto, analisando as curvas das Figura 4.1 e Figura 4.2, constata-se que o rendimento do conjunto motor bomba é menor quando se deseja atingir uma maior pressão, este fato se dar devido a relação não linear entre a potência hidráulica e a potência elétrica, como mostrado no tópico 3.2.1.

Figura 4.2 – Curva do rendimento médio em função da frequência de giro da motobomba 1 (MB 1)

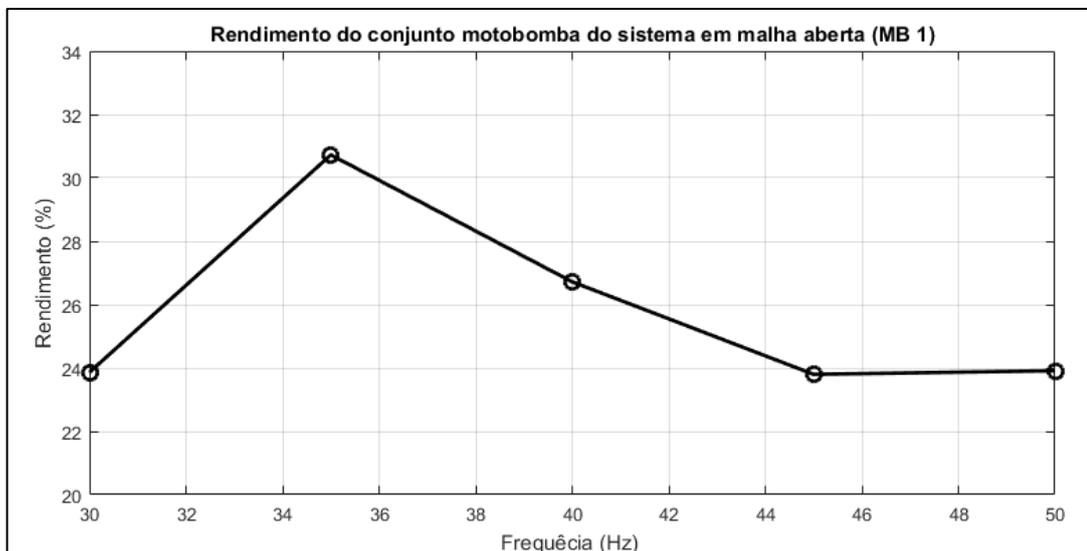


Tabela 4.2 – Rendimento médio em função da frequência de giro da motobomba 1 (MB 1)

| <b>Frequência (Hz)</b> | <b>Rendimento médio (%)</b> |
|------------------------|-----------------------------|
| <b>30</b>              | 23,86                       |
| <b>35</b>              | 30,72                       |
| <b>40</b>              | 26,71                       |
| <b>45</b>              | 23,79                       |
| <b>50</b>              | 23,91                       |

## 4.2. Experimento II

O experimento II demonstra a atuação do controle proporcional. Com o objetivo de verificar o funcionamento do controlador desenvolvido e o rendimento do sistema para cada ponto de operação, foram realizados neste Experimento 3 ensaios, sendo eles:

### 4.2.1. Ensaio 1 do Experimento II

O primeiro ensaio foi realizado com o conjunto motobomba 1 (MB 1) partindo do repouso, ou seja, à frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a  $35^\circ$ , este valor corresponde à demanda mínima. Aplicou-se o valor desejado (*set point*) igual a 10 mca.

Neste procedimento, buscou-se avaliar o sistema de controle nos seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente. Estas características foram apresentadas no capítulo 3, na Tabela 3.5 e a Figura 3.19 está o comportamento da variável controlada (PT 5).

### 4.2.2. Ensaio 2 do Experimento II

O segundo ensaio visou o cálculo da eficiência energética do conjunto motobomba para diferentes valores de *set point*. Para isto, foi usado a expressão 3.8 do capítulo 3, onde o sistema estava inicialmente em repouso, ou seja, a frequência aplicada ao conjunto motobomba é igual a zero e o ângulo da válvula de controle (CV) igual a  $35^\circ$ .

Sendo assim, definiu-se o valor desejado inicial igual a 8 mca, após isto incrementou-se este valor ao passo de 2 mca até chegar a 14 mca, em seguida o decrementou com o mesmo passo, até chegar novamente a 8 mca. Estes resultados estão ilustrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Rendimento do sistema com controle proporcional (MB 1)

| <b>Valor desejado (SP)</b> | <b>Rendimento do conjunto<br/>motobomba 1</b> |
|----------------------------|---|
| 8 mca                      | 30,13%,                                       |
| 10 mca                     | 25,95%  |
| 12 mca                     | 23,17%,                                       |
| 14 mca                     | 23,52%,                                       |
| 12 mca                     | 29,38%,                                       |
| 10 mca                     | 23,17%,                                       |
| 8 mca                      | 29,38%,                                       |

### 4.2.3. Ensaio 3 do Experimento II

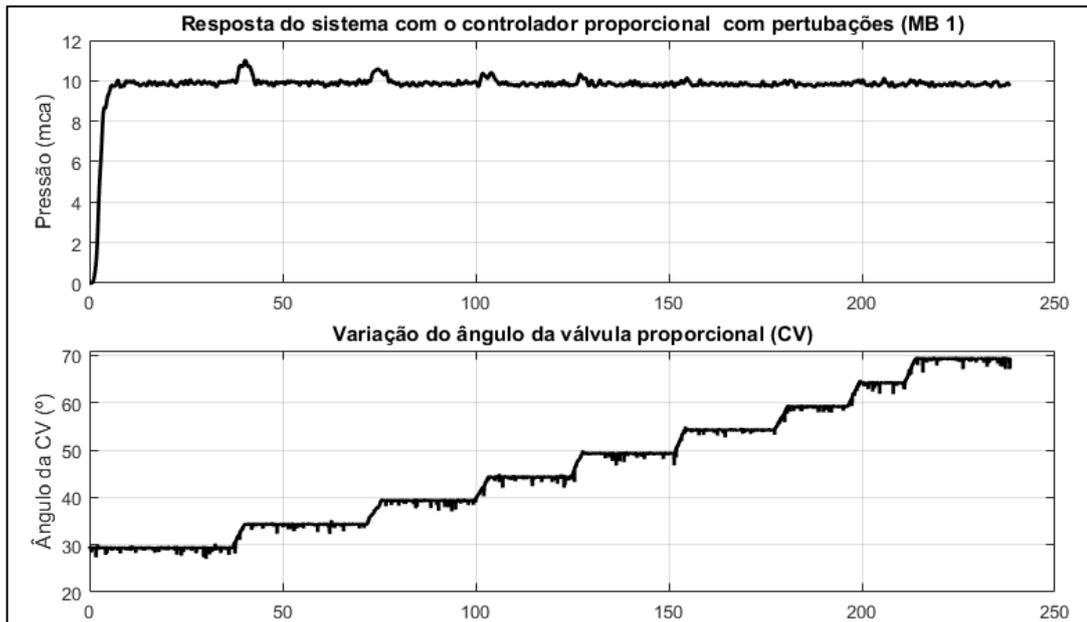
O terceiro ensaio foi realizado com o conjunto motobomba 1 (MB 1) partindo do repouso, ou seja, à frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 30°. Sendo assim, foi desenvolvido no LabVIEW™ um instrumento virtual para emular a demanda de água ao longo do tempo através da operação remota da válvula proporcional (CV).

Este ensaio tem o objetivo de avaliar o sistema de controle com a presença de ruído, representado pela variação da válvula proporcional ao longo do tempo. Dessa forma, analisou-se os seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente, este resultado está ilustrado na Figura 4.3.

Observe que a resposta do controlador apresenta 4 picos de pressão devido a variação do ângulo da válvula proporcional. Estes estão localizados nos instantes de tempo igual a: 40,5, 74 s, 104 s e 127 s com valores de pressão de 11 mca, 10,57 mca, 10,4 mca e 10,32 mca, respectivamente. Além disso, notou-se também que o erro médio em regime permanente foi de 8,32%.

Ademais, a resposta do controlador proporcional quando submetido a perturbações, demora cerca de 6,7 s, 5,7 s, 5,3 s e 3,7 s para retornar a faixa de  $\pm 2\%$  do valor desejado, para os 4 primeiros picos apresentados na curva da Figura 4.3, respectivamente.

Figura 4.3 – Resposta do sistema com o controlador proporcional com perturbações (MB 1)



Portanto, apesar do controlador proporcional apresentar resultados satisfatório com relação ao tempo de subida e tempo de acomodação. Por outro lado, este apresenta erro de regime estacionário de 3,64 % a 7,02 %.

### 4.3. Experimento III

O experimento III demonstra a atuação do controle baseado em lógica *fuzzy*. Com o objetivo de verificar o funcionamento do controlador *fuzzy* desenvolvido e o rendimento do sistema para cada ponto de operação, foram realizados neste Experimento 3 ensaios, sendo eles:

#### 4.3.1. Ensaio 1 do Experimento III

O primeiro ensaio foi realizado com o conjunto motobomba 1 (MB 1) partindo do repouso, ou seja, à frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°, este valor corresponde à demanda mínima. Aplicou-se o valor desejado (*set point*) igual a 10 mca.

Neste procedimento, buscou-se avaliar o sistema de controle nos seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente. A resposta deste controlador está apresentada na Figura 4.4 e as características citadas estão presentes na Tabela 4.4.

Figura 4.4 – Resposta do sistema com o controlador *fuzzy* (MB 1)

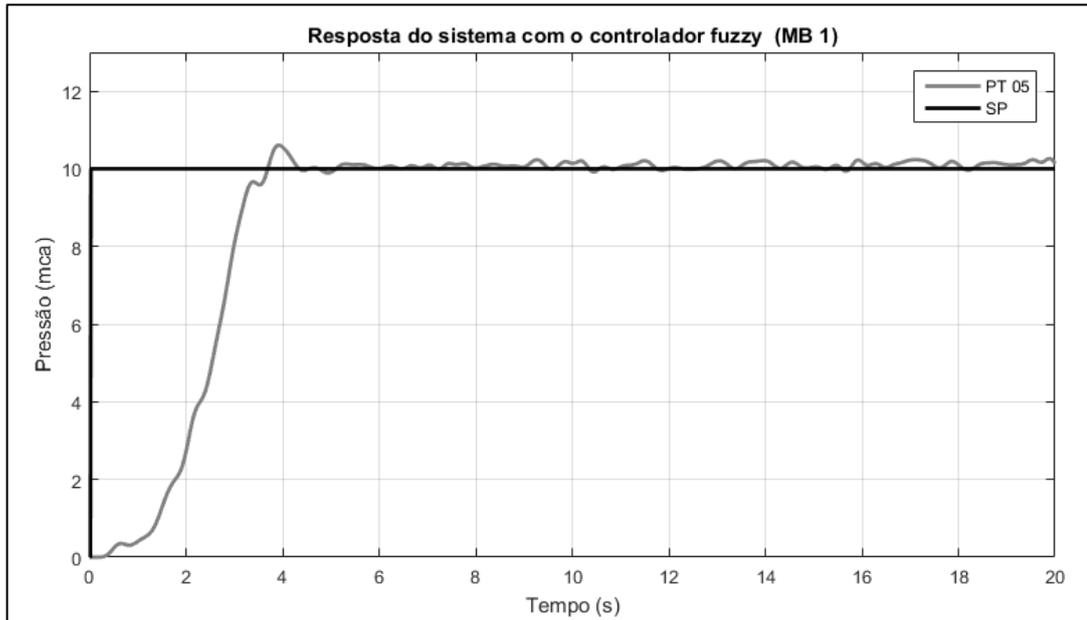


Tabela 4.4 – Característica do sistema com controle fuzzy (MB 1)

| Valor desejado (SP) | Tempo de subida/ descida | Tempo de assentamento | Ultrapassagem percentual | Erro em regime permanente |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 10 mca              | 1,76 s                   | 4,35 s                | 5,66 %                   | 0,79 %                    |

### 4.3.2. Ensaio 2 do Experimento III

O segundo ensaio visou o cálculo da eficiência energética do conjunto motobomba para diferentes valores de *set point*. Para isto, foi usado a expressão (2.8) do capítulo 2, onde o sistema estava inicialmente em repouso, ou seja, a frequência aplicada ao conjunto motobomba é igual a zero e o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°.

Sendo assim, definiu-se o valor desejado inicial igual a 8 mca, após isto incrementou-se este valor ao passo de 2 mca até chegar a 14 mca, em seguida o decrementou com o mesmo passo, até chegar novamente a 8 mca. Estes resultados estão ilustrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Rendimento do sistema com controle *fuzzy* (MB 1)

| Valor desejado (SP) | Rendimento do conjunto motobomba 1 |
|---------------------|------------------------------------|
| 8 mca               | 30,11%,                            |
| 10 mca              | 26,08%                             |
| 12 mca              | 23,74%,                            |
| 14 mca              | 23,20%,                            |
| 12 mca              | 23,42%,                            |
| 10 mca              | 25,61%,                            |
| 8 mca               | 29,28%,                            |

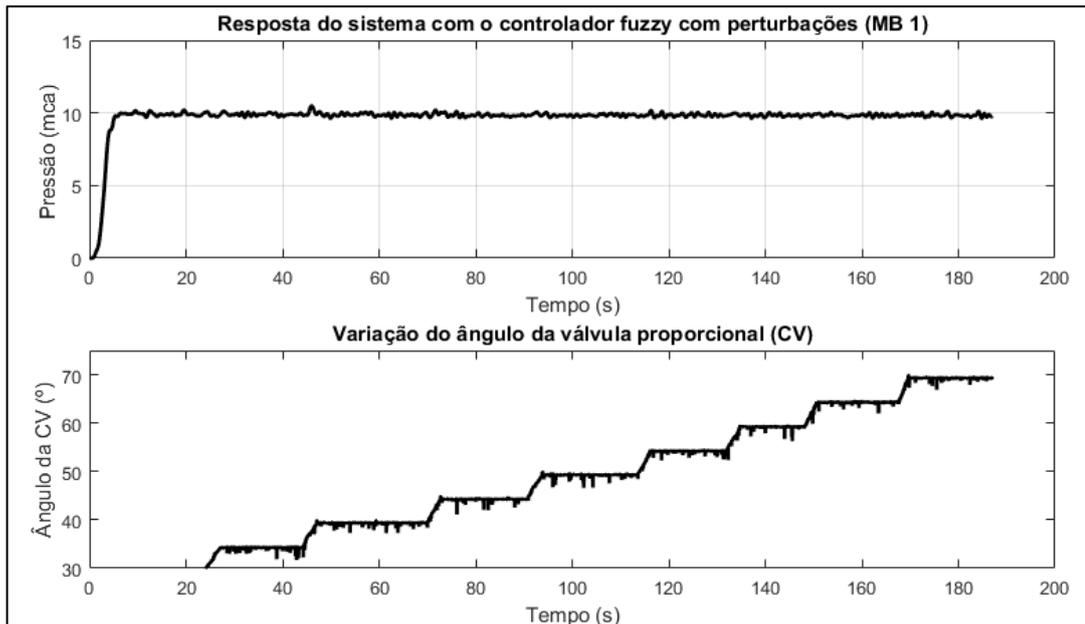
### 4.3.3. Ensaio 3 do Experimento III

O terceiro ensaio foi realizado com o conjunto motobomba 1 (MB 1) partindo do repouso, ou seja, à frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 30°. Sendo assim, foi desenvolvido no LabVIEW™ um instrumento virtual para emular a demanda de água ao longo do tempo através da operação remota da válvula proporcional (CV).

Observe que a resposta do controlador se mantém constante durante todo o ensaio, exceto no instante  $t = 46$  s, onde o valor da pressão correspondeu 10,48 mca, isto corresponde um acréscimo de 4,58% do valor desejado (10 mca). Para determinar o erro em regime permanente, fez-se a média de todos os valores no intervalo de tempo de 10 a 180 segundos e subtraiu do valor desejado, obtendo o valor de 0,47%.

Conclui-se que o sistema com o controlador *fuzzy* é bastante robusto à presença de perturbações na rede hidráulica.

Figura 4.5 – Resposta do sistema com o controlador *fuzzy* com perturbações (MB 1)



#### 4.4. Experimento IV

Este experimento tem como objetivo avaliar a aplicação de controle inteligente baseado em lógica *fuzzy* para configurações de motobombas em série e em paralela em um sistema de abastecimento de água visando a eficiência energética.

Porém, antes da aplicação do controlador inteligente, foram feitas análises comparativa das curvas característica das bombas, com o método abordado no capítulo 2 nos tópicos 2.1.1 a 2.1.4. Onde buscou-se comparar a faixa de operação e o rendimento dos conjuntos motobomba para as seguintes situações: uma única bomba operando, duas bombas conectadas em série e duas bombas conectadas em paralelo.

As configurações série e paralela foram obtidas a partir do fechamento manual dos registros presentes na bancada experimental. Inicialmente considerou o sistema em repouso, ou seja, frequência igual a zero e a válvula de controle igual a 90°.

Após isto, aplicou-se às frequências 30, 40 e 50 Hz, e para cada uma destas frequências à válvula foi posicionada nos seguintes valores de ângulos: 90°, 60°, 50°, 40°, 30°, 20°, 10° e 0°, emulando o decaimento da altura manométrica na descarga do sistema.

Estes resultados estão ilustrados nas Figura 4.6 a Figura 4.8 em que MB 1 e MB 2 corresponde ao conjunto motobomba 1 e 2, respectivamente, como também, paralelo e série correspondem as configurações paralelo e série do sistema de bombeamento estudado. Sabendo disto, as curvas ilustradas a seguir constataam a teoria abordada no capítulo 2, onde a conexão em série das bombas fornece a soma das alturas manométricas individuais, com a vazão aproximada de apenas uma bomba operando. Já a conexão em paralelo fornece a média das pressões individuais e a aproximadamente a soma das vazões.

Figura 4.6 – Curva característica comparativa das bombas operando em 30 Hz.

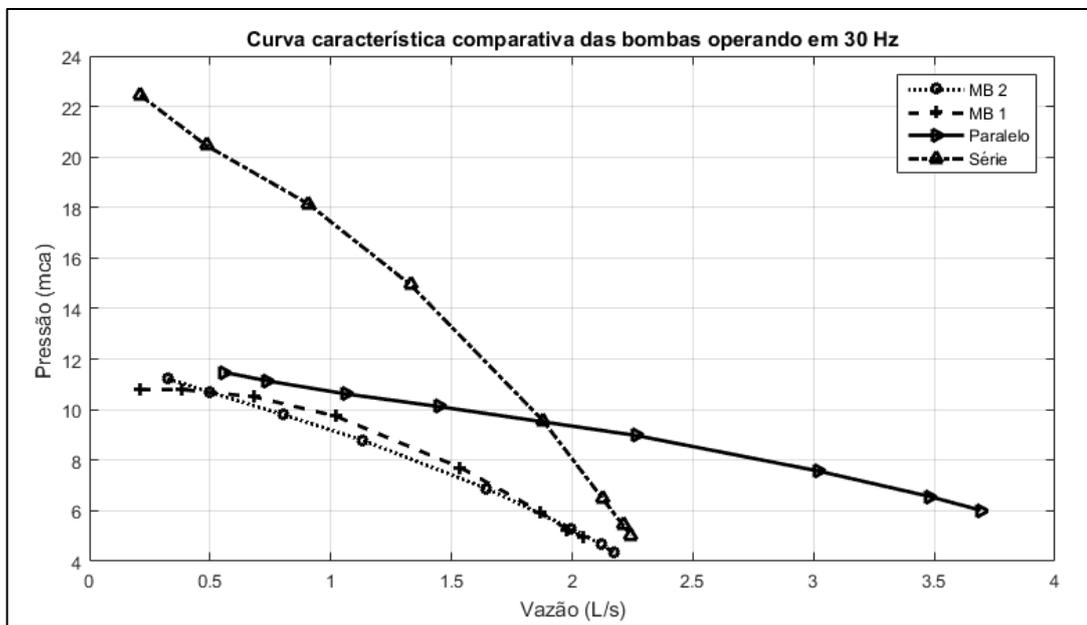


Figura 4.7 – Curva característica comparativa das bombas operando em 40 Hz.

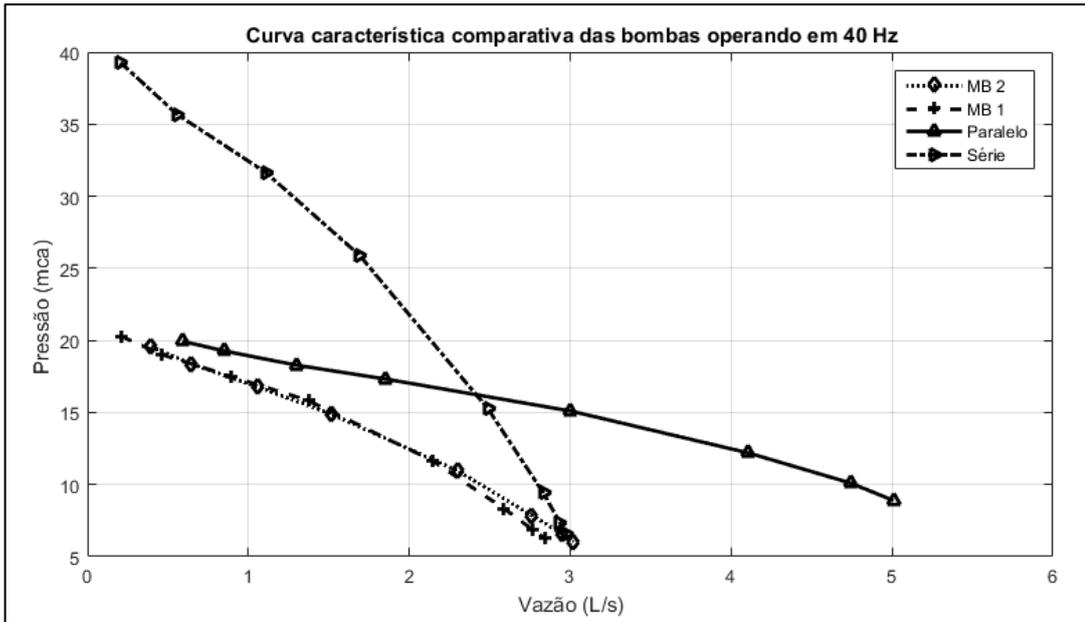
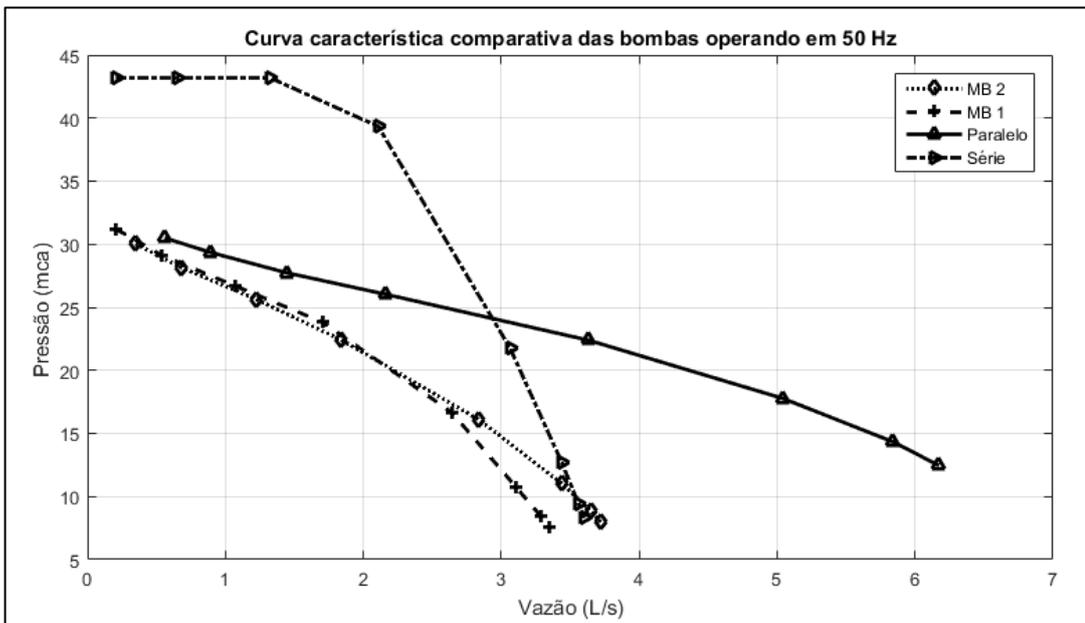


Figura 4.8 – Curva característica comparativa das bombas operando em 50 Hz.



De forma semelhante ao procedimento aplicado anteriormente, foi possível realizar o levantamento da curva do rendimento do conjunto motobomba para as configurações série e paralelo. Este procedimento tem como objetivo comparar o gasto energético do conjunto motobomba em diversos pontos de operação, mostrando assim em quais momentos se mostra

mais viável a operação em série ou paralelo ao invés de usar apenas uma bomba. Os resultados estão mostrados nas Figura 4.9 a Figura 4.11.

Sendo assim, para ilustrar o procedimento de escolha da configuração com o maior rendimento para um dado ponto de operação do sistema, utilizou-se as curvas da Figura 4.6 e Figura 4.9, onde tomou-se a pressão de 10 mca como o valor desejado, assim traçasse uma reta paralela ao eixo  $x$  na curva da Figura 4.6, esta reta intercepta as 4 curvas característica da bomba, onde as vazões são: 1 L/s (MB 1), 0,9 L/s (MB 2), 1,5 L/s (paralelo) e 1,8 L/s (série).

Usando os valores das vazões citados no parágrafo anterior na curva da Figura 4.9, pode-se determinar o rendimento correspondente, são eles: 35% (MB 1), 42,5% (MB 2), 23% (paralelo) e 30,5% (série). Nota-se que o rendimento do conjunto motor bomba 2 é o maior, logo o sistema operará usando apenas este dispositivo.

Figura 4.9 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 30 Hz.

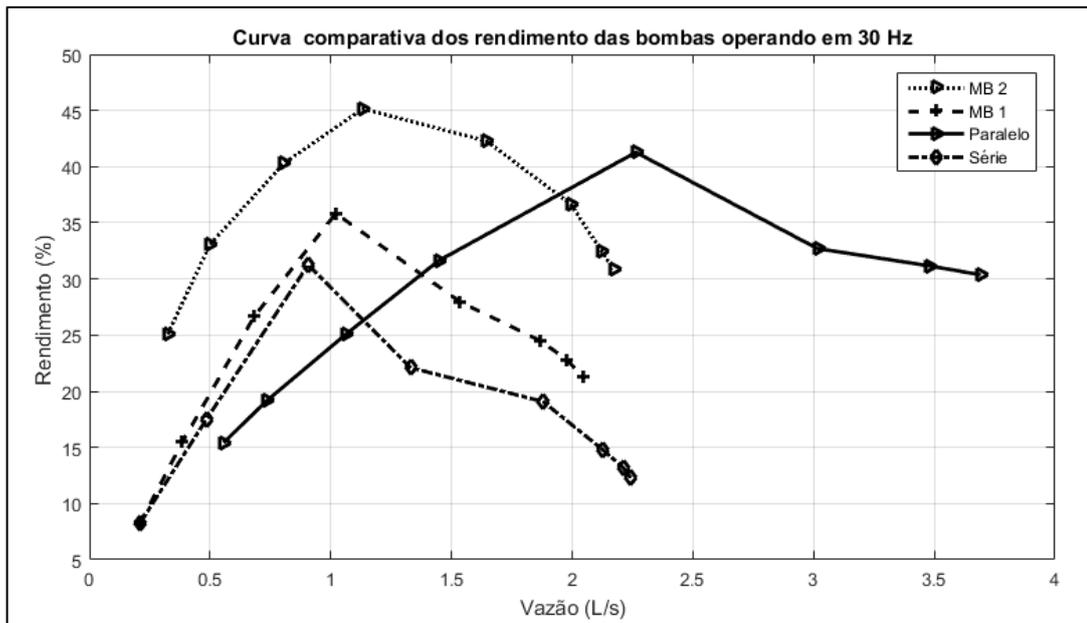


Figura 4.10 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 40 Hz.

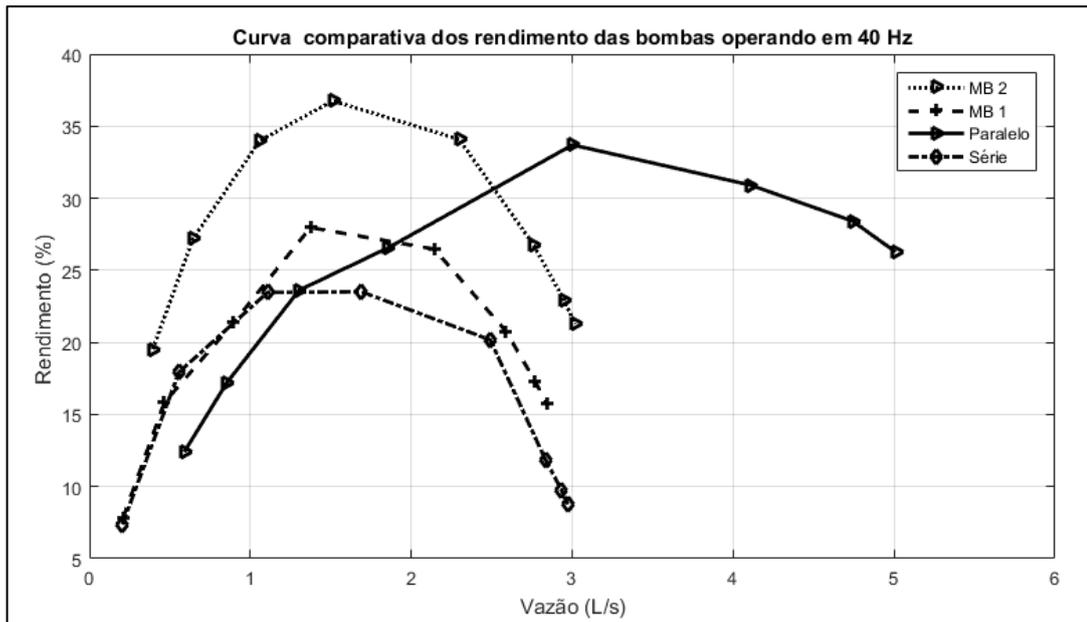
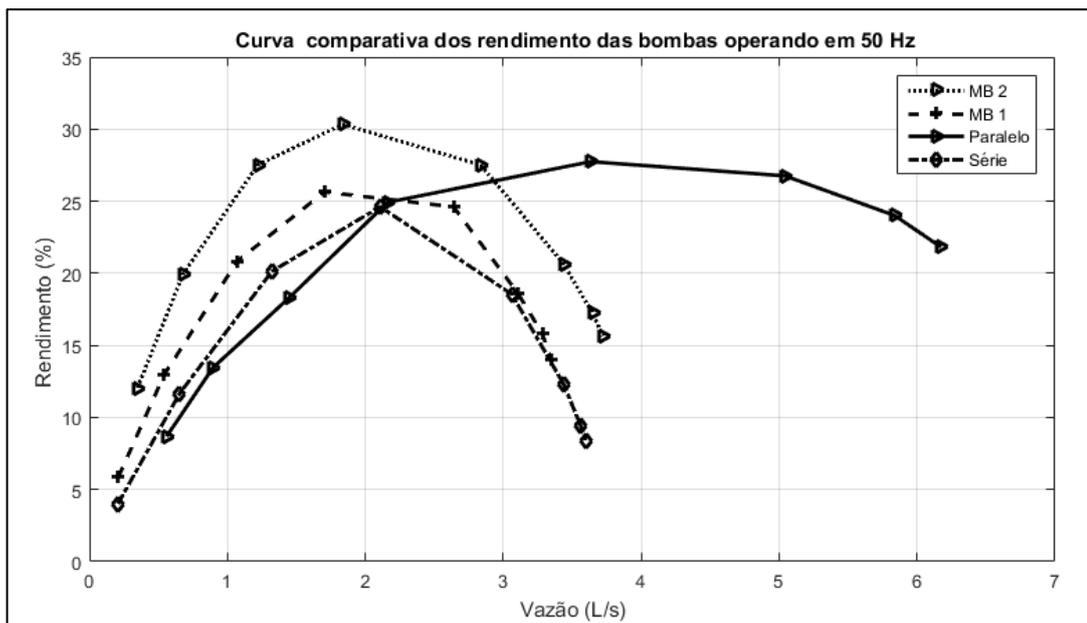


Figura 4.11 – Curva característica comparativa dos rendimentos das bombas operando em 50 Hz.



Os tópicos a seguir retratam os ensaios feitos para a operação em série e em paralelo para duas bombas, para isto utilizou-se o mesmo controlador projetado para uma única bomba. Porém, para que isto fosse possível, na configuração em série cada malha de controle responsável por uma bomba recebe metade do valor desejado.

Por outro lado, para o controle em paralelo, a malha de controle recebe o inteiro do valor desejado. Estas divisões se dão devido às características de pressão das conexões em série e em paralelo.

#### 4.4.1. Controle *fuzzy* para as motobombas conectadas em série

Este ensaio foi realizado com os conjuntos motobomba 1 e 2 conectados em série, partindo do repouso, ou seja, a frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°. Aplicou-se o valor desejado (*set point*) igual a 10 mca.

Neste procedimento, buscou-se avaliar o sistema de controle nos seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente. Estas características estão presentes na Tabela 4.6 e a curva da variável controlada (PT 5) está ilustrada Figura 4.12.

Figura 4.12 – Resposta do sistema para bombas conectadas em série com o controlador *fuzzy*

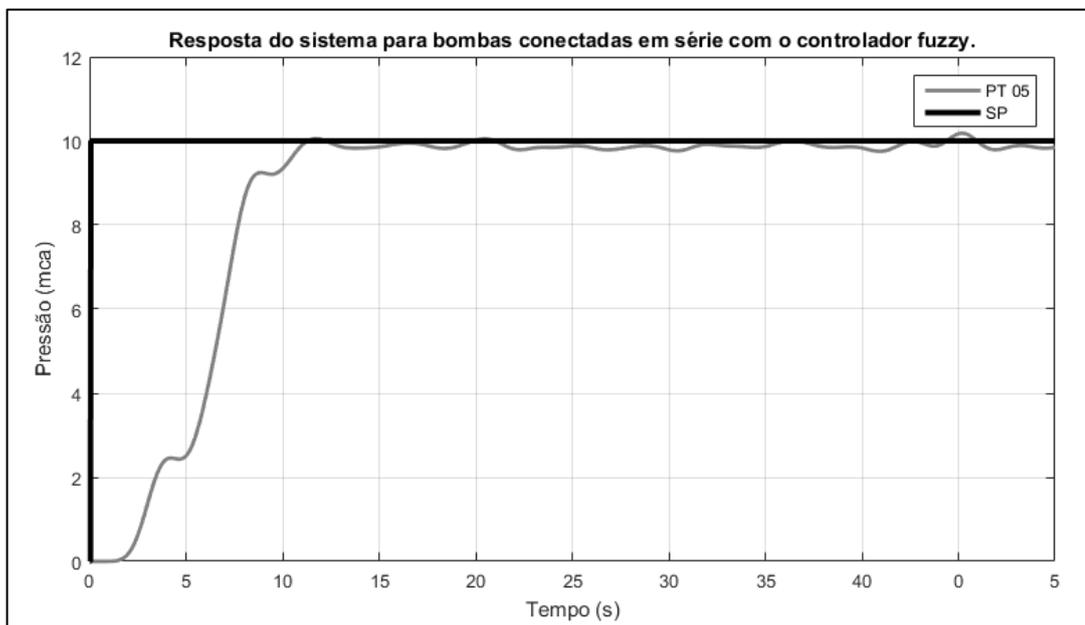


Tabela 4.6 – Característica do sistema para bombas conectadas em série com o controlador *fuzzy*

| Valor desejado (SP) | Tempo de subida/ descida | Tempo de assentamento | Ultrapassagem percentual | Erro em regime permanente |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 10 mca              | 2,21 s                   | 4,54 s                | ---                      | 0,49%                     |

Afim de verificar a robustez do sistema de controle desenvolvido, aplicou-se ruído representado pela variação da válvula proporcional acionada remotamente ao longo do tempo, esta válvula estava inicialmente em 30° e este ângulo foi incrementado até atingir 60°. Dessa forma, analisou-se os seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente, este resultado está ilustrado na Figura 4.13 e na Tabela 4.7.

Ao observar a Figura 4.13, o controle não apresenta variação devido a presença do ruído, além de apresentar erro em regime permanente próximo de zero e tempo de subida.

Figura 4.13 – Resposta do sistema para bombas conectadas em série com à presença de ruído

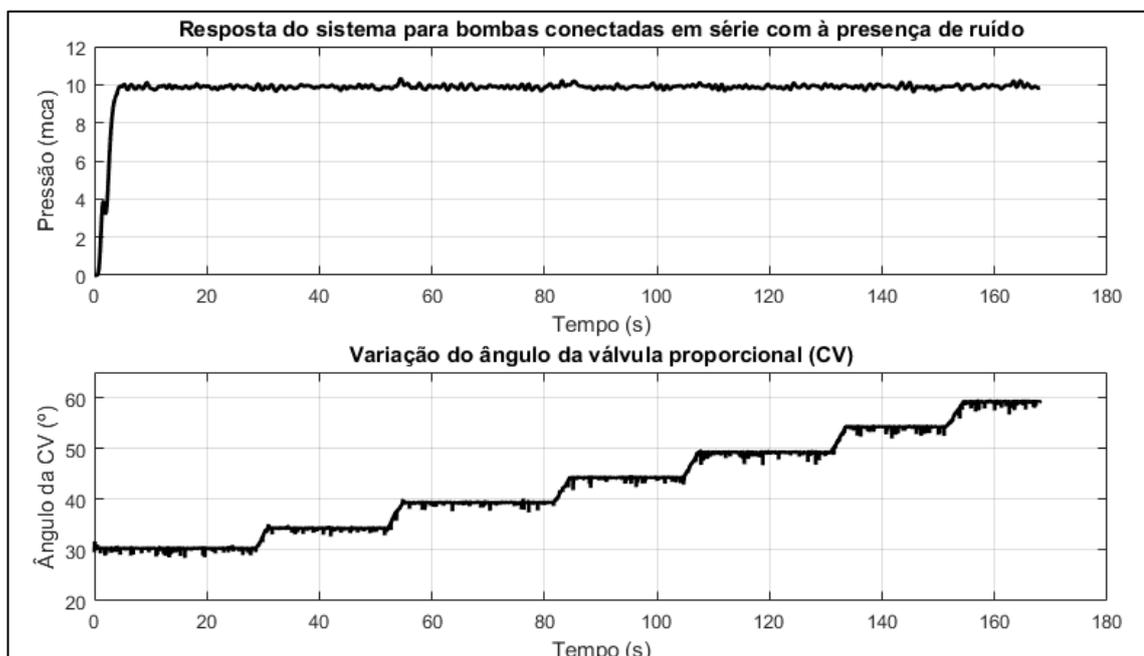


Tabela 4.7 – Característica do sistema para bombas conectadas em série com à presença de ruído

| Valor desejado (SP) | Tempo de subida/ descida | Tempo de assentamento | Ultrapassagem percentual | Erro em regime permanente |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 10 mca              | 2,48 s                   | 5,26 s                | ---                      | 0,51%                     |

A fim de avaliar a eficiência energética do conjunto motobomba operando em série para diferentes valores de *set point* foi usado a expressão (2.8) do capítulo 2, onde o sistema estava inicialmente em repouso, ou seja, a frequência aplicada ao conjunto motobomba é igual a zero e o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°.

Sendo assim, definiu-se o valor desejado inicial igual a 8 mca, após isto incrementou-se este valor ao passo de 2 mca até chegar a 14 mca, em seguida o decrementou com o mesmo passo, até chegar novamente a 8 mca. Estes resultados estão ilustrados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Rendimento do conjunto motobomba operando em série com controle *fuzzy*

| Valor desejado (SP) | Rendimento do conjunto em série |
|---------------------|---------------------------------|
| 8 mca               | 21,94%,                         |
| 10 mca              | 23,30%                          |
| 12 mca              | 19,89%,                         |
| 14 mca              | 19,69%,                         |
| 12 mca              | 20,16%,                         |
| 10 mca              | 23,51%,                         |
| 8 mca               | 22,15%,                         |

#### 4.4.2. Controle *fuzzy* para sistema em paralelo

Este ensaio foi realizado com os conjuntos motobomba 1 e 2 conectados em paralelo, partindo do repouso, ou seja, à frequência igual a zero e com o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°. Aplicou-se o valor desejado (*set point*) igual a 10 mca. A resposta obtida está ilustrada na Figura 4.11. Na Tabela 4.9 estão os aspectos da resposta da variável

controlada, como: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente.

Figura 4.14 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com o controlador *fuzzy*.

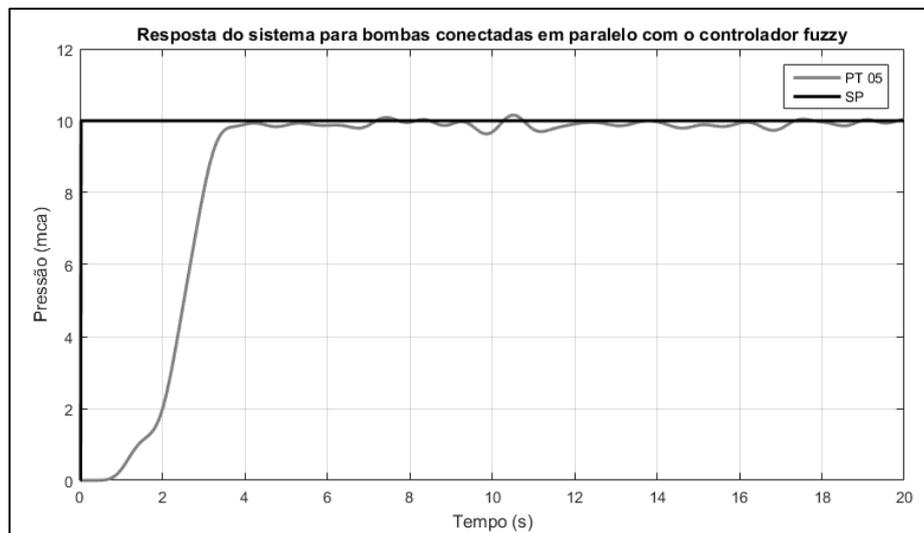


Tabela 4.9 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com o controlador *fuzzy*.

| <b>Valor desejado (SP)</b> | <b>Tempo de subida/ descida</b> | <b>Tempo de assentamento</b> | <b>Ultrapassagem percentual</b> | <b>Erro em regime permanente</b> |
|----------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 10 mca                     | 1,78 s                          | 4 s                          | -                               | 0,56%                            |

Com a finalidade de verificar a robustez do sistema de controle desenvolvido, aplicou-se perturbações representadas pela variação da válvula de controle acionada remotamente ao longo do tempo. Esta válvula estava inicialmente em  $30^\circ$  e este ângulo foi incrementado até atingir  $70^\circ$ .

Dessa forma, analisou-se os seguintes aspectos: tempo de subida, tempo de assentamento, ultrapassagem percentual e erro em regime permanente, este resultado está ilustrado na Figura 4.15 e na Tabela 4.10.

Figura 4.15 – Resposta do sistema para bombas conectadas em paralelo com à presença de ruído

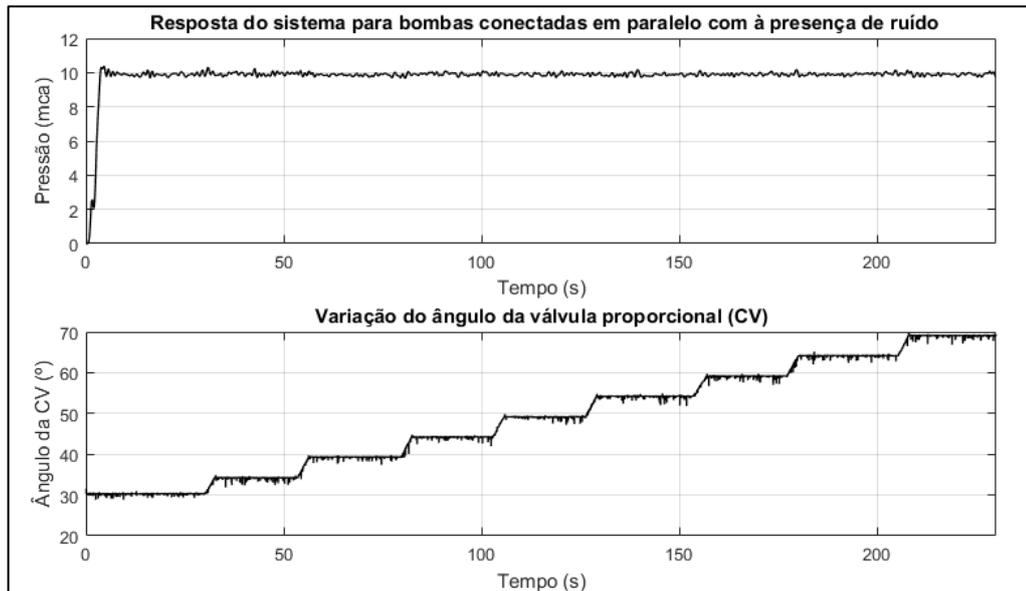


Tabela 4.10 – Característica do sistema para bombas conectadas em paralelo com à presença de ruído

| Valor desejado (SP) | Tempo de subida/ descida | Tempo de assentamento | Ultrapassagem percentual | Erro em regime permanente |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 10 mca              | 2,34 s                   | 6 s                   | 3,47%                    | 0,45%                     |

A fim de avaliar a eficiência energética do conjunto motobomba operando em paralelo para diferentes valores de *set point* foi usado a expressão (2.8) do capítulo 2, onde o sistema estava inicialmente em repouso, ou seja, a frequência aplicada ao conjunto motobomba é igual a zero e o ângulo da válvula de controle (CV) igual a 35°.

Sendo assim, definiu-se o valor desejado inicial igual a 8 mca, após isto incrementou-se este valor ao passo de 2 mca até chegar a 14 mca, em seguida o decrementou com o mesmo passo, até chegar novamente a 8 mca. Estes resultados estão ilustrados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Rendimento do conjunto motobomba operando em paralelo com controle *fuzzy*

| <b>Valor desejado (SP)</b> | <b>Rendimento do conjunto em paralelo</b> |
|----------------------------|---|
| 8 mca                      | 39,20%,                                   |
| 10 mca                     | 33,18%                                    |
| 12 mca                     | 33,74%,                                   |
| 14 mca                     | 29,92%,                                   |
| 12 mca                     | 34,56%,                                   |
| 10 mca                     | 32,77%,                                   |
| 8 mca                      | 34.86%,                                   |

A Tabela 4.12 apresenta uma análise comparativa dos rendimentos obtidos para os 3 tipos de configurações estudadas. Para isto, usou-se média dos rendimentos do valor desejado apresentados na Tabela 4.5, Tabela 4.8 e Tabela 4.11.

Tabela 4.12 – Tabela comparativa dos rendimentos para diferentes configurações de operação

| <b>Configuração de operação</b>   | <b>Rendimento do conjunto motobomba</b> |
|-----------------------------------|---|
| única motobomba                   | 25,84%                                  |
| 2 motobombas operando em paralelo | 33,74%                                  |
| 2 motobombas operando em série    | 23,4%                                   |

Tomando o valor da operação com uma única bomba como referência, tem-se que a operação do sistema com bombas em paralelo apresenta um aumento de 23,41% no rendimento oferecido por uma única motobomba. Por outro lado, quando se deseja operar em série, há um decréscimo em termos percentuais de 10,42% no valor do rendimento de operação de uma única motobomba.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho de conclusão de curso, pode ser colocada as seguintes conclusões:

- Com relação a comparação entre os controladores proporcional e *fuzzy*, foi observado que o controlador nebuloso tem um menor erro em regime estacionário, diminuindo em 82,78% com relação ao erro do controlador proporcional. Foi observado a diminuição do tempo de subida em 56% com relação ao tempo de subida do controlador proporcional, este fato se dá devido as regras implementadas, que visavam melhor esta característica do sistema. Então, podemos concluir que a introdução de estratégias de controle *fuzzy* modificam a dinâmica do sistema com um melhor desempenho quando comparado com estratégias de controle clássico.
- O sistema de controle nebuloso para a pressão (PT 5) foi submetido a perturbações emulando a demanda por meio da variação da válvula de controle (CV), observando-se que o controlador não divergiu do valor desejado (*set point*), isto é, o controlador teve um desempenho adequado mesmo com perturbações no sistema. Por outro lado, foi observado que o controlado proporcional apresentou sobressinal na resposta quando submetido as variações da válvula de controle, como ilustrado na Figura 4.3.
- Com relação as configurações das motobombas em série e paralelo, foi observado que a configuração em paralelo teve resultados com maior eficiência, isto é, um maior rendimento, quando comparado ao sistema operando com uma configuração em série.
- As configurações das motobombas em paralelo permitem que o sistema opere com maiores vazões e com alto rendimento quando comparado com as motobombas operando de maneira individual, isto devido a que as vazões são somadas nos dutos.
- Em contrapartida, as configurações das motobombas em série permitem que o sistema opere com maiores pressões, e circulando a mesma vazão por cada motobomba.
- Finalmente, o controlador *fuzzy* desenvolvido foi embarcado no supervisor da banca de ensaios do LENHS, para o controle das motobombas, por meio da construção de 49 regras definidas a partir do conhecimento da dinâmica do sistema e de acordo ao tipo de controle especificado.

Para sugestão de trabalhos futuros para complementar essa pesquisa podem ser instaladas ao sistema válvulas capazes de mudar a configuração automaticamente, colocando em operação a configuração que apresentasse maior rendimento. Além disso, a inserção de regras para proteger o sistema de possíveis falhas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Abastecimento de água - Conceito. Disponível em < <http://www.adasa.df.gov.br/> >: Acesso em: Out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12211** Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR12218**: Projeto de Rede de Distribuição de Água para Abastecimento Público. Rio de Janeiro, 1994.

BARROS, E.G. “**Sistema Inteligente para o Controle de Pressão de Redes de Distribuição de Água Abastecidas por Bombas Associadas em Paralelo**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, 2016.

BRAGA, Eduardo Ramos. SINTONIA DO CONTROLADOR PELO MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS, PARA ESPECIFICAÇÃO DO PRODUTO DE TOPO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 2, n. 3, p. 047-060, 2016.

DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE–Empresa. **Anuário estatístico de energia elétrica 2017**. Rio de Janeiro, 2017.

DE OLIVEIRA, Mariângela Dutra et al. Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. **Eng Sanit Ambient**, v. 19, n. 4, p. 361-372, 2014.

HELLER, Léo; DE PÁDUA, Valter Lúcio. **Abastecimento de água para consumo humano**. Editora UFMG, 2006.

GAYER, Fernanda AM; DE OLIVEIRA, Renata Zotin Gomes. Lógica Fuzzy para modelagem de manutenção preditiva de uma bomba industrial com desenvolvimento de software. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 6, n. 1, 2018.

GOMES, Heber P. **Sistemas de bombeamento**. João Pessoa, Editora Universitária UFPB, 2009.

KUSTERKO, Sheila Karoline et al. **Avaliação de desempenho para apoiar a gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água fundamentada na metodologia multicritério de apoio à decisão construtivista**. 2015.

LOURENÇO, João. **Sintonia de controladores PID**. Escola superior de tecnologia, 1997.

MARQUES, João Erivando Soares. Aplicação da Lógica Fuzzy no controle da velocidade de um protótipo móvel. **Ciência & Desenvolvimento-Revista Eletrônica da FAINOR**, v. 9, n. 1, 2016.

MARRO, Alessandro Assi et al. Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. **Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)**, 2010.

MENDONÇA, Kamilla Pimentel et al. **Sistema de controle fuzzy na operação otimizada de redes setorizadas com bombeamento direto**. 2016.

NISE, Norman S.; DA SILVA, Fernando Ribeiro. **Engenharia de sistemas de controle**. LTC, 2002.

NOGUEIRA, Maycon Mariano. **Aplicando lógica fuzzy no controle de robôs móveis usando dispositivos lógicos programáveis e a linguagem VHDL**, 2013.

OGATA, Katsuhiko; YANG, Yanjuan. **Modern control engineering**. Índia: Prentice hall, 2002.

ORTEGA, Neli Regina Siqueira. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a problemas da Biomedicina**. São Paulo (SP): Instituto de Física/USP, 2001.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy logic with engineering applications**. John Wiley & Sons, 2005.

SANDRI, Sandra; CORREA, Cláudio. **Lógica nebulosa**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica–ITA, V Escola de Redes Neurais, pp. C073-c090, São José dos Campos, 1999.

SALVINO, L.R. “**Eficiência Energética em Sistemas Pressurizados de Distribuição de Água com o uso de Redes Neurais Artificiais**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, 2018.

SILVA M.J.G.; Araújo C.S.; Bezerra S.T.M.; Arnaud S.; Souto C.R.; Gomes H.P.; (2015) “**Sistema de Controle Adaptativo Aplicado a um Sistema de Distribuição de Água com Ênfase na Eficiência Energética**”, Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 20(3), pp.405-413.

SIMOES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. Blucher: FAPESP, São Paulo, BRA, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO. **Municípios. Agrupamento dinâmico de indicadores e informações por ano de referência. Agrupamento dinâmico de indicadores e informações por ano de referência**. Disponível em: <<http://app3.cidades.gov.br/serieHistorica/%23#>>. Acesso em 20 de out. 2018.

SOUSA, A.C.; SOARES, A.K. (2014), “**Modelo para otimização da operação de sistemas de distribuição de água utilizando o algoritmo genético multiobjetivo SPEA**” Revista Exacta, Vol.12(3), p.313(12).

TANSCHKEIT, Ricardo. **Sistemas fuzzy**. Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

ZADEH, Lotfi A. et al. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

## APÊNDICE A

Nesta seção é apresentado o conjunto de regras para a implementação do controlador *fuzzy* desenvolvido neste trabalho.

| Nº | REGRAS   |
|----|--|
| 1  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “DP” |
| 2  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “DP” |
| 3  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “DP” |
| 4  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “DM”  |
| 5  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “DM” |
| 6  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “DG” |
| 7  | Se “Erro” é “NG” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “DG” |
| 8  | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “Z”  |
| 9  | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “DP” |
| 10 | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “DM” |
| 11 | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “DM”  |
| 12 | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “DM” |
| 13 | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “DG” |
| 14 | Se “Erro” é “NM” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “DG” |
| 15 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “Z”  |
| 16 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “Z”  |
| 17 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “DP” |
| 18 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “DP”  |
| 19 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “DP” |
| 20 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “DP” |
| 21 | Se “Erro” é “NP” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “DM” |
| 22 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “IP”  |
| 23 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “Z”   |
| 24 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “Z”   |
| 25 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “Z”    |
| 26 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “Z”   |

|    |  |
|----|--|
| 27 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “Z”   |
| 28 | Se “Erro” é “Z” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “DP”  |
| 29 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “IP” |
| 30 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “IP” |
| 31 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “IP” |
| 32 | Se “Erro” é “PP e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “Z”    |
| 33 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “IP” |
| 34 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “Z”  |
| 35 | Se “Erro” é “PP” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “Z”  |
| 36 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “IG” |
| 37 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “IG” |
| 38 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “IM” |
| 39 | Se “Erro” é “PM e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “IM”   |
| 40 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “IM” |
| 41 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “IM” |
| 42 | Se “Erro” é “PM” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “IP” |
| 43 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “NG” então “dFreq” é “IG” |
| 44 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “NM” então “dFreq” é “IG” |
| 45 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “NP” então “dFreq” é “IG” |
| 46 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “Z” então “dFreq” é “IM”  |
| 47 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “PP” então “dFreq” é “IM” |
| 48 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “PM” então “dFreq” é “IM” |
| 49 | Se “Erro” é “PG” e “dErro” é “PG” então “dFreq” é “IM” |