



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Mestrado

**SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE REDES
SETORIZADAS COM BOMBEAMENTO DIRETO**

por

Kamilla Henrique Mendonça

Sistema de Controle Fuzzy na Operação Otimizada de Redes Setorizadas com
Bombeamento Direto

João Pessoa – Paraíba

Outubro, 2016

KAMILLA HENRIQUE MENDONÇA

**SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE REDES
SETORIZADAS COM BOMBEAMENTO DIRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção
do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes

João Pessoa – Paraíba

Outubro, 2016.

M539s Mendonça, Kamilla Henrique.
 Sistema de controle *fuzzy* na operação otimizada de redes
 setorizadas com bombeamento direto / Kamilla Henrique
 Mendonça.- João Pessoa, 2016.
 136f. : il.
 Orientador: Heber Pimentel Gomes
 Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
 1. Engenharia mecânica. 2. Lógica *fuzzy*. 3. Sistemas de
 abastecimento de água. 4. Controlador.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE REDES SETORIZADAS COM BOMBEAMENTO DIRETO

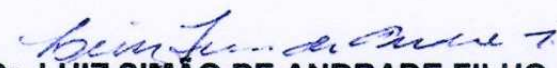
por

KAMILLA HENRIQUE MENDONÇA

Dissertação aprovada em 31 de outubro de 2016



Prof. Dr. HEBER PIMENTEL GOMES
Orientador – UFPB



Prof. Dr. LUIZ SIMÃO DE ANDRADE FILHO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. TARCISO CABRAL DA SILVA
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e ao meu marido, meus apoiadores incondicionais.
Dedico também a todos que me ajudaram, de maneira direta ou indireta na realização deste trabalho.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus que orquestrou cada um dos meus passos que me levaram a este presente momento.

Ao meu orientador professor Dr. Heber Pimentel Gomes, pelas orientações e incentivos a pesquisa ao longo dos últimos três anos.

A Laís e Moisés Salvino pelo apoio, ensinamentos, orientações, conselhos e amizade.

Agradeço a Anne, Arthur, Kléber, Kenny e Renato pelo apoio e inúmeros auxílios prestados ao longo desses dois anos de pesquisa.

Agradeço aos meus professores da graduação em Engenharia Civil e da Pós – Graduação em Engenharia Mecânica, pela excelente formação.

Agradeço aos meus pais e irmãs pelos incentivos e palavras de apoio em todos os momentos de minha vida.

Agradeço ao meu companheiro de sempre Edilandro Porfírio, pelo imenso amor, carinho, dedicação, apoio e incentivo.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso.

A todos os demais que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE REDES SETORIZADAS COM BOMBEAMENTO DIRETO

RESUMO

Garantir o abastecimento da população concomitante ao uso consciente dos recursos hidráulicos e energéticos. Esse é o presente desafio dos gestores e das companhias de abastecimento de água. Em uma sociedade cada vez mais consciente e preocupada com o andamento do consumo desenfreado, a possibilidade de utilização eficiente de recursos indispensáveis ao desenvolvimento humano surge como incentivo ao desenvolvimento de novas tecnologias e pesquisas. Esse trabalho propõe a utilização da lógica *fuzzy* como sistema de controle robusto, que foi aplicada em uma bancada experimental que simula o abastecimento de uma rede com duas zonas de pressão com topográficas diferenciadas. Os controladores são ferramentas importantes na operação de processos automatizados que visam à realização de determinada operação de maneira a aproveitar ao máximo as ferramentas e equipamentos que compõe um sistema. Nessa pesquisa foram desenvolvidos dois controladores, um aplicável em um sistema descentralizado e outro aplicável a um sistema centralizado. O objetivo do controlador é garantir as pressões de serviço nas duas zonas topográficas, a partir do controle da frequência do sistema de impulsão, formado por um conjunto motor bomba; e da angulação de uma válvula redutora de pressão situada a montante da zona baixa. Os resultados apresentados mostraram-se promissores, visto que para os dois diferentes sistemas, o controlador conseguiu atuar, levando as pressões aos seus valores de referência, reduzindo o consumo energético, quando comparadas ao sistema sem controlador.

Palavras-chave: Lógica *Fuzzy*, Sistemas de Abastecimento de Água, Controlador

SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA OPERAÇÃO OTIMIZADA DE REDES SETORIZADAS COM BOMBEAMENTO DIRETO

ABSTRACT

To ensure the supply of the population with the conscious use of hydraulic and electrical resources. This is the present challenge of managers and water supply companies. In a society increasingly aware and concerned about the increase of unbridled consumption, the possibility of efficient use of indispensable resources for human development comes as an incentive to fostering new technologies and research. This paper proposes the use of fuzzy logic as robust control system, which was applied on a test rig that simulates the supply of a network with two different topographical pressure zones. Controllers are important tools in the operation of automated processes aimed at carrying out an operation, in order to make the most of the tools and equipment that make up a system. In this research, we developed two controllers, one applicable in a decentralized system and the other to a centralized system. The controller objective is to ensure the operating pressures in two topographical zones through the control of the drive system's frequency, formed by a motor pump assembly; and through the angulation of a pressure reducing valve located before the lower zone. The reported results were promising since, for the two different systems, the controller could perform, taking the pressure at their reference values, reducing the energy consumption when compared to a system with no controller.

Keywords: *fuzzy* logic, supply system water, controller

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivos Gerais	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	3
1.4 CONCLUSÕES	4
CAPÍTULO 2	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.3 CONCLUSÕES	15
CAPÍTULO 3	16
3.1 INTRODUÇÃO	16
3.2 SISTEMAS DE CONTROLE	16
3.3 LÓGICA <i>FUZZY</i>	21
3.3.1 Conjuntos <i>fuzzy</i>	21
3.3.2 Variáveis Linguísticas	25
3.3.3 Funções de Pertinência	26
3.3.4 Implicação Lógica e Regras de Inferência	27
3.3.5 Métodos de Inferência de Mamdani	28
3.3.6 Fuzzyficação e Defuzzyficação	30
3.3.7 Regras <i>Fuzzy</i>	32
3.4 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	32
3.4.1 Bombas	36
3.4.2 Válvulas Redutoras de Pressão	38
3.5 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA AUTOMATIZADOS	40

3.6	CONCLUSÕES	42
	CAPÍTULO 4	43
4.1	INTRODUÇÃO	43
4.2	DESCRIÇÃO DA BANCADA	43
4.3	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.3.1	Estudo da Perda de Carga da VRP (CV-1)	52
4.3.2	Estudo do CMB	55
4.4	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE <i>FUZZY</i>	60
4.4.1	Controle <i>fuzzy</i> em um Sistema Descentralizado	61
4.4.2	Controle <i>fuzzy</i> em um Sistema Centralizado	68
4.5	CONCLUSÕES	73
	CAPÍTULO 5	74
5.1	INTRODUÇÃO	74
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.2.1	Controle <i>fuzzy</i> em um Sistema Descentralizado	75
5.2.2	Controle <i>Fuzzy</i> Aplicado em Sistema Centralizado	93
5.3	CONCLUSÕES	101
	CAPÍTULO 6	102
6.1	INTRODUÇÃO	102
6.2	CONCLUSÕES FINAIS	102
6.3	COMENTÁRIOS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE A	113
8.1	A.1 – INTRODUÇÃO	113

Lista de Figuras

Figura 2.1- Diagrama de blocos lógica <i>fuzzy</i>	7
Figura 3.1 - Sistema de controle em malha aberta	17
Figura 3.2 - Sistema de controle em malha fechada.....	17
Figura 3.3 - Nível de água em um reservatório	17
Figura 3.4 - Componentes de um sistema de controle.....	18
Figura 3.5- Funções de pertinência triangulares e trapezoidal	27
Figura 3.6 - Esquema simplificado de um sistema <i>fuzzy</i>	30
Figura 3.7 - Método de defuzzyficação pelo centro de gravidade.....	31
Figura 3.8 - Índice de perdas na distribuição das prestadoras de serviços regionais	34
Figura 3.9 - Esquema de um sistema convencional de abastecimento de água.....	35
Figura 3.10 - CMB afogado.....	37
Figura 4.1 - Rede experimental SADA	44
Figura 4.2 - Conjunto Motor Bomba	45
Figura 4.3 - Sistema de Elevação booster	46
Figura 4.4 - Transdutores de pressão.....	48
Figura 4.5 - Medidores de vazão	49
Figura 4.6 - Válvula Redutora de Pressão	50
Figura 4.7 - Apresentação da bancada no LabVIEW ®	52
Figura 4.8 - Variáveis de entrada do controle descentralizado para a ZA.....	62
Figura 4.9 - Variável de saída – delta de frequência do CMB	63
Figura 4.10 - Variáveis de entrada	66
Figura 4.11 - Variável de saída.....	67
Figura 4.12 - Variáveis de entrada do sistema centralizado	69
Figura 4.13 - Variáveis de saída do sistema centralizado	70
Figura 5.1- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, sem a aplicação do controlador na máxima demanda.....	76

Figura 5.2 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, sem a aplicação do controlador na mínima demanda	78
Figura 5.3- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema descentralizado na máxima demanda.....	80
Figura 5.4 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema descentralizado na mínima demanda.....	83
Figura 5.5- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas na CV-1, na máxima demanda.....	86
Figura 5.6 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas na CV-1, na mínima demanda	88
Figura 5.7 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas no CMB, na máxima demanda	90
Figura 5.8- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas no CMB, na mínima demanda	92
Figura 5.9 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema centralizado, na máxima demanda.....	95
Figura 5.10 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema centralizado, na mínima demanda	98
Figura A.8.1 – Interface de acionamento da bancada.....	114
Figura A.8.2 – Esquematização das zonas de pressão em planta	114
Figura A.8.3 – Acionamento dos controladores <i>fuzzy</i>	115
Figura A.8.4 – Programação LabVIEW® - Parte I	115
Figura A.8.5 - Programação LabVIEW® - Parte II.....	116
Figura A.8.6 - Programação LabVIEW® - Parte III	116
Figura A.8.7 - Programação LabVIEW® - Parte IV	117
Figura A.8.8 - Programação LabVIEW® - Parte V	117
Figura A.8.9 - Programação LabVIEW® - Parte VI.....	118
Figura A.8.10 - Programação LabVIEW® - Parte VII.....	118

Lista de Gráficos

Gráfico 4.1- Relação do ângulo de abertura da CV-1 com a vazão das duas zonas de pressão	54
Gráfico 4.2 - Relação entre o ângulo de abertura da CV-1 com perda de carga (h_f)	55
Gráfico 4.3 - Relação entre o ângulo de abertura da CV-1 com o coeficiente de perda de carga (k).....	55
Gráfico 4.4 - Curva do CMB.....	57
Gráfico 4.5 - Curva do Sistema da Zona Baixa.....	58
Gráfico 4.6 - Curva do Sistema da Zona Alta	59
Gráfico 4.7- Comportamento da vazão do sistema a partir da variação da angulação da CV-2 e CV-3	60
Gráfico 4.8 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle para a ZA.....	65
Gráfico 4.9 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle para a ZB	68
Gráfico 4.10 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle.....	72

Lista de Quadros

Quadro 4.1 - Especificações técnicas do <i>booster</i> e do CMB.....	46
Quadro 4.2 - Especificações técnicas do inversor de frequência	47
Quadro 4.3 - Especificações técnicas dos transdutores de pressão	48
Quadro 4.4- Especificações técnicas dos medidores de vazão	49
Quadro 4.5 - Especificações técnicas das válvulas redutoras de pressão	51

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades dos conjuntos fuzzy	23
Tabela 4.1 - Análise do coeficiente de perdas – K	54
Tabela 4.2 - Dados referentes ao traçado da curva da bomba	56
Tabela 4.3 - Dados do sistema para a zona baixa	58
Tabela 4.4 - Dados para modelagem a curva do sistema da Zona Alta	59
Tabela 4.5 - Regras <i>fuzzy</i> para controlar a pressão da ZA	64
Tabela 4.6 - Regras <i>fuzzy</i> para controlar a pressão da ZB	67
Tabela 4.7 - Regras <i>fuzzy</i> para controlar a pressão da ZB e da ZA	71
Tabela 4.8 – Relação de experimentos	72
Tabela 5.1 - Parâmetros da planta sem aplicação do controlador.....	77
Tabela 5.2 - Parâmetros da planta sem aplicação do controlador.....	79
Tabela 5.3 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda.....	81
Tabela 5.4 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador	82
Tabela 5.5 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda	84
Tabela 5.6 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador no sistema descentralizado	85
Tabela 5.7 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda.....	87
Tabela 5.8 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda	89
Tabela 5.9 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda.....	91
Tabela 5.10 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda	93
Tabela 5.11 - Resposta do sistema centralizado para a situação de máxima demanda	96
Tabela 5.12 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador no sistema centralizado	97
Tabela 5.13 - Resposta do sistema centralizado para a situação de mínima demanda.....	99
Tabela 5.14 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador	100

Lista de Símbolos

$\mu_A(x)$	Grau de Pertinência
U	Conjunto Universo
$\neq$	Diferente
$\emptyset$	Vazio
$\subseteq$	Está Contido
$\in$	Pertence
$\mu_{A \cap B}$	Vetor de Pertinência da Intersecção
$\mu_{A \cup B}$	Vetor de Pertinência União
$\cap$	Intersecção
$\cup$	União
$D^{(k)}$	Coeficiente de Disparo
$\mu_{B'_1}(y)$	Vetor de Saída
$\widehat{y}_2$	Valor Escalar da Saída

Lista de Abreviações

SAA	Sistema de Abastecimento de Água
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
SAAEJ	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Jaboticabal
ETA	Estação de Tratamento de Água
CE	Consumo Específico de Energia Elétrica
GMV	Variância Mínima Generalizada
MQR	Método dos Mínimos Quadrados Recursivos
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
PID	
ETA	Estação de Tratamento de Água
NBR	Normas Brasileiras
LENHS	Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento
VRP	Válvula Redutora de Pressão
CMB	Conjunto Motor Bomba
BST	<i>Booster</i>
PME	Ponto de Máxima Eficiência
CV	Válvula de Controle
PT	Transdutor de Pressão
FT	Medidor de Vazão
SADA	Sistema Automatizado de Distribuição de Água
RNF	Reservatório de Nível Fixo
RD	Ramal de Descarga
ZB	Zona Baixa

ZA	Zona Alta
PVC	Policloreto de Vinila
GEN	Grande Erro Negativo
EN	Erro Negativo
N	Erro Normal
EP	Erro Positivo
GEP	Grande Erro Positivo
GDN	Grande Derivada Negativa
DN	Derivada Negativa
N	Derivada Normal
DP	Derivada Positiva
GDP	Grande Derivada Positiva
GDFN	Grande Delta de Frequência Negativo
DFN	Delta de Frequência Negativo
N	Delta de Frequência Normal
DFP	Delta de Frequência Positivo
GDFP	Grande Delta de Frequência Positivo
GGN	Grande Grau Negativo
GN	Grau Negativo
GP	Grau Positivo
GGP	Grande Grau Positivo
GDN	Grande diferença negativa
DN	Diferença negativa
N	Normal
DP	Diferença positiva
GDP	Grande diferença positiva
EGN	Erro grande negativo
EN	Erro negativo
EP	Erro positivo
GEP	Grande erro positivo
GGN	Grande grau negativo
GN	Grau negativo
GP	Grau positivo

GG	Grande grau positivo
GDN	Grande delta negativo
DN	Delta negativo
DP	Delta positivo
GDP	Grande delta positivo
MCA	Metro de Coluna de Água

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A cada dia, novas tecnologias são desenvolvidas em diversas áreas, com o intuito de tornar as atividades mais eficientes e precisas, além de melhorar a qualidade de vida de uma população. Quão mais essenciais essas atividades, mais importantes se tornam essas descobertas. O setor de abastecimento de água é de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer região, seja ela de pequeno, médio ou grande porte. Os Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) trabalham com dois insumos básicos e estratégicos, água e energia, logo, sua utilização deve ser operacionalizada de maneira eficiente e econômica, reduzindo ao máximo os desperdícios ao longo da sua operação.

Um importante indicador de eficiência em um SAA é o índice de perdas de água, no Brasil este índice varia em torno de 38%, no entanto, em alguns estados alcança valores de 75%. É possível afirmar que um dos grandes desafios enfrentados pelas operadoras desses sistemas no Brasil é conseguir efetuar uma redução em seu índice de perdas de água em cada uma das etapas do seu processo de fornecimento (ABES, 2013).

Para Bezerra e Cheung (2013), as perdas reais, conceitualmente definidas como a parcela de água que não chega aos consumidores, em decorrência de vazamentos ou extravasamentos no sistema público de abastecimento; são decorrentes de vazamentos inerentes, não visíveis e visíveis.

As perdas de água registradas em um SAA são inerentes ao seu processo de funcionamento, no entanto, é possível reduzir esses valores a porcentagens mínimas. Para tanto, faz-se necessário um aperfeiçoamento na fase de monitoramento do sistema, com o intuito de registrar os pontos de operações mais deficientes, ou mesmo com valores acima dos propostos na fase de projeto.

O monitoramento dos SAA também é necessário, visto que o mesmo não é operado de maneira linear, ou mesmo previsível. A demanda hídrica de uma determinada região não é uniforme ao longo de todo um ano, ou mesmo ao longo de todo o dia. Há horários ou períodos em que uma maior vazão é solicitada, em meses ou dias mais quente, por exemplo. Neste sentido, a utilização de sistemas automatizados que monitorem de forma segura a pressão na rede, pode ser visto como uma excelente ferramenta para a operação de setores de abastecimento.

Segundo Tsutiya (2006), a automação no abastecimento pode ser aplicada nas operações de captação e distribuição, por exemplo. Enquanto que, equipamentos de medição e transdutores, possibilitam a realização da supervisão e os controles necessários para manter o sistema operando de forma mais eficiente.

Os sistemas de abastecimento automatizados permitem a utilização de ferramentas mais sofisticadas, que irão intervir de maneira direta na operação da rede. Esses controles, proporcionados por algoritmos robustos implantados no sistema, podem realizar manobras sem a intervenção do operador, conforme a necessidade de demanda hídrica. A utilização de controladores irá garantir não apenas a permanência dos serviços de abastecimento nos horários de maior consumo, como também permitirá uma redução nas perdas, oriundas da redução do excesso de pressão ao longo de toda a rede.

Em SAA, onde as perdas ao longo da rede se mostram significativas, a aplicação de um controlador que regule parâmetros tais como vazão e pressão, favorece a economia através da redução da pressão, principalmente, nos momentos de menor consumo. Tendo em vista a redução da vazão nos horários de menor demanda, ou mesmo os vazamentos ao longo da rede de distribuição. Ainda segundo Bezerra e Cheung (2013), uma diminuição de 10% na pressão resulta em uma redução aproximada de 12% no volume perdido por vazamentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho de dissertação tem por objetivo desenvolver um sistema de controle inteligente, sob a ação da lógica *fuzzy*, para a efficientização da operação de sistemas de abastecimento, com vistas a redução de perdas de água.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Especificar e caracterizar a bancada experimental a ser utilizada no desenvolvimento desta pesquisa, assim como a calibração dos equipamentos instalados;
- Desenvolvimento do layout e programação do sistema supervisor dos instrumentos da bancada, por intermédio do programa computacional LabVIEW ®;
- Elaboração da base de regras do controlador *fuzzy* e posterior implementação do controlador na bancada;
- Avaliar os parâmetros hidráulicos do sistema a partir de um comparativo entre a rede controlada e o sistema atuando sem controle; Além de operar de forma centralizada e descentralizada os elementos de controle;

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho foi organizado em seis capítulos.

O capítulo 1 aborda de maneira geral a problemática dos sistemas de abastecimento de água e a importância de se investir em ferramentas que tornem a operação de tais sistemas mais eficientes e otimizadas.

O capítulo 2 apresenta um estudo teórico com diversos trabalhos realizados na área de controle e SAA. Dando ênfase aos sistemas automatizados e controlados por Lógica *fuzzy*.

O capítulo 3 traz um consistente resumo acerca da lógica difusa e os principais entendimentos acerca de suas definições e aplicações.

No capítulo 4 são descritas as etapas metodológicas utilizadas, além da apresentação da base de regras utilizadas no LabVIEW®. Além disso, é apresentada uma detalhada descrição da bancada experimental.

O capítulo 5 apresenta os resultados e uma análise dos dados obtidos após a aplicação do controlador.

E por fim, no capítulo 6 são feitas as análises e considerações finais acerca dos resultados apresentados no capítulo anterior.

1.4 CONCLUSÕES

A realização de pesquisas e trabalhos que visem ao aproveitamento e utilização cada vez mais conscientes dos recursos naturais é de inegável importância no desenvolvimento e crescimento de qualquer região. Neste primeiro capítulo, foi realizada uma rápida introdução acerca dos assuntos que serão abordados com mais ênfase, no decorrer deste trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Abastecimento de Água são geridos a partir da junção de diversas etapas que envolvem variados níveis de complexidade. Em cada uma dessas fases, um SAA é suscetível à apresentação de falhas e desperdícios, conforme a metodologia de operação empregada. Um dos maiores desafios dos gestores de companhias de abastecimento é conciliar as necessidades de operação com os valores de projeto, de forma a garantir o suprimento de vazão e pressão a cada ponto de consumo. Aliado a essa necessidade, também se encontra a redução indispensável das perdas geradas ao longo de seus pontos de funcionamento.

Com a utilização da automação, os SAA podem ser monitorados de forma mais precisa, ficando a cargo dos administradores a verificação em tempo real dos principais pontos de falhas. Surge, a partir daí uma ferramenta indispensável à operação eficiente de um sistema de abastecimento, visto que o monitoramento, em tempo real, possibilita uma intervenção pontual e com reduzida possibilidade de falhas. No entanto, apenas a automação não pode ser vista como técnica de efficientização de um SAA é necessário a aplicação de outras ferramentas que utilizem os dados advindos dos equipamentos instalados na fase de automação. O controle da pressão, por exemplo, é uma medida tomada, a partir de um sistema automatizado, capaz de reduzir ou controlar as perdas registradas ao longo de sua operação.

Os controladores são escolhidos de acordo com as características do sistema, ou da planta, e com os objetivos que se deseja alcançar. Existem diversos tipos de controladores, tais como o controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo), os controles baseado em Redes Neurais e Artificiais, em Algoritmos Genéticos, e o aplicado no desenvolvimento deste trabalho, controladores baseados na lógica *fuzzy*.

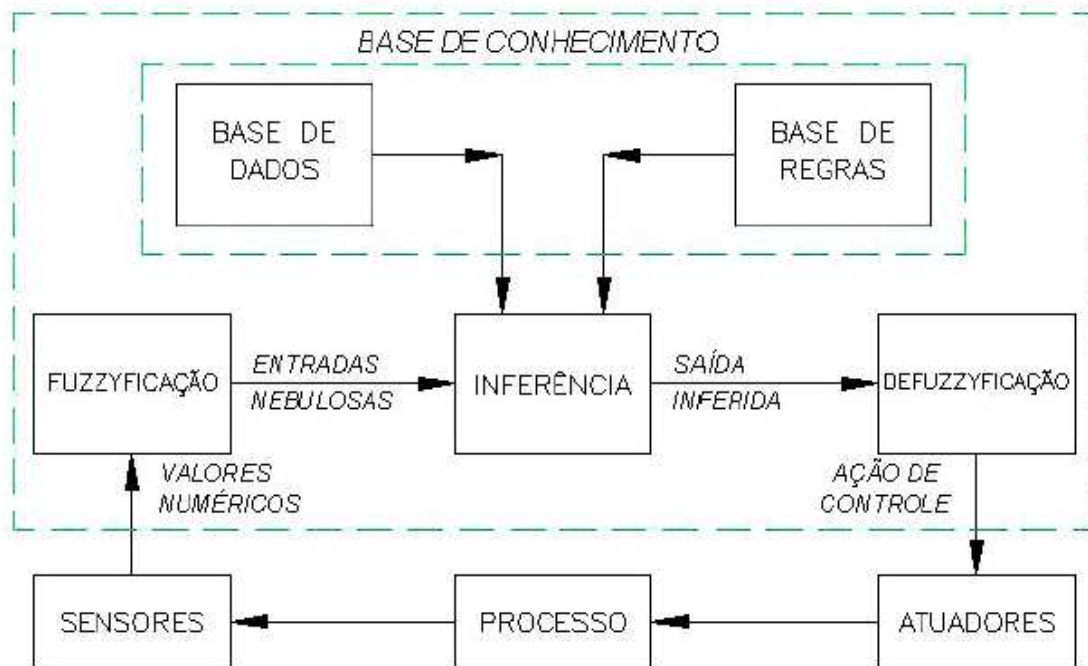
A lógica *fuzzy*, também conhecida como lógica difusa ou nebulosa, surgiu a partir da necessidade de se modelar sistemas imprecisos e alimentados, muitas vezes, com dados subjetivos. Além disso, seu conjunto de regras são mais simples de serem compreendidos e podem trabalhar mesmo com a ausência de certas informações.

Zadeh (1973) formulou o seguinte princípio, intitulado como princípio da incompatibilidade:

À medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade para fazer afirmações precisas e que sejam significativas acerca deste sistema diminui, até que um limiar é atingido além do qual precisão e significância (ou relevância) torna-se quase que características mutuamente exclusivas.

O funcionamento da lógica *fuzzy* segue a ordem: os dados de entrada passam por um processo denominado fuzzyficação, onde estes dados são convertidos em informações numéricas, para então ocorrer a formulação e execução de uma estratégia de controle. Segue-se, então, a elaboração de um conjunto de regras para se obter os valores dos termos das variáveis de saída. Por fim, aplica-se a defuzzyficação, processo no qual há a conversão dos dados nebulosos obtidos em valores exatos e de simples visualização. Os sistemas *fuzzy* - seguem o diagrama mostrado na Figura - 2.1.

Figura 2.1- Diagrama de blocos lógica *fuzzy*.



Fonte: Adaptado de Lopes *et al*, 2005

Para a automação de um determinado sistema, utilizam-se diversos tipos de controladores, neste trabalho, será dado enfoque ao tipo de controlador regido pela linguagem da lógica *fuzzy*.

A lógica *fuzzy* trabalha com problemas cujas fronteiras não são bem definidas. Os sistemas que utilizam esta lógica necessitam de valores mais suaves do que os extremos apresentados pela lógica binária. Para Camboim *et al* (2014), os sistemas de abastecimento de água envolvem diversos parâmetros com consideráveis níveis de imprecisão, por tanto, *fuzzy* apresenta-se como uma linguagem apropriada para sua aplicação em tais sistemas.

As redes de abastecimento de água formam um conjunto complexo de equipamentos hidráulicos e elétricos movido por diversos tipos de energia. Ao longo de toda sua extensão, estes sistemas são compostos por tubulações, conexões, conjuntos de bombeamento, inversores de frequência, válvulas, medidores de vazão e transdutores de pressão, e outros.

Este conjunto, operado por homens e máquinas está suscetível a uma série de erros e imprecisões, inerentes a qualquer sistema de tamanha complexidade. Com o intuito de minimizar estes erros, surgem os controladores associados a algumas etapas de

funcionamento da rede. Estes controladores são regidos por algoritmos desenvolvidos a partir de alguma linguagem específica.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da leitura de livros, artigos em revistas e trabalhos acadêmicos foi possível elaborar um apanhado a cerca de uma parte significativa dos trabalhos desenvolvidos na área da Lógica *fuzzy*.

Foram consultados trabalhos que utilizaram a lógica *fuzzy* no desenvolvimento de controles em sistemas de abastecimento de água. Além de pesquisas diversas, que relacionavam a aplicação de controle com a lógica nebulosa.

Foi Jan Lukasiewicz quem, em 1930, introduziu o conceito de *Lógica fuzzy*. Ao analisar variáveis do tipo: quente, frio, alto ou baixo. Ele propôs a utilização de um intervalo de valores entre 0 e 1, indicando a possibilidade de uma determinada sentença ser verdadeira ou falsa (MARRO, *et al*, 2009).

Lotfi A. Zadeh (1965), professor de engenharia elétrica e ciências da computação da Universidade de Berkeley na Califórnia nos EUA, apresentou um trabalho inovador. Na época o professor Zadeh trabalhava com Inteligência Artificial, e considerava a teoria clássica dos conjuntos extremamente rígida, visto que só havia duas possibilidades para certo elemento: ou pertencia ou não pertencia a um dado conjunto. Zadeh trabalhava em *softwares* interativos, capazes de tomar algumas decisões baseadas na lógica dos conjuntos, no entanto, isso reduziria as inúmeras possibilidades de respostas desses *softwares* interativos. Com a implementação da lógica *fuzzy*, foi possível criar valores de pertinência incluindo uma gama de possibilidades entre 1 (valor totalmente pertinente) e 0 (valor completamente fora de pertinência).

A partir daí foram surgindo técnicas e diversidade de implementação da lógica difusa. Marinos (1969) apresentou uma técnica para análise e síntese de funções baseadas em lógica *fuzzy*, implementadas em termos de portas lógicas. Segundo Marinos, a lógica difusa apresenta uma infinidade de valores entre 0 e 1, seu trabalho propôs reduzir o universo dessas possibilidades apresentando técnicas de simplificação das funções *fuzzy*. As aplicações são diversas, tanto no campo analógico: controle de qualidade, processos industriais e testes de componentes. Como no campo digital: reconhecimento e

classificação de padrões. O trabalho é considerado inovador visto que foi o pioneiro em aplicar funções difusas.

Zadeh (1973) em seu trabalho, compila de forma mais sólida algumas definições que norteiam a base da lógica *fuzzy*. Bem como a compreensão das variáveis difusa, visto que nem todos os problemas apresentam valores bivalentes, tais como SIM ou NÃO, CERTO ou ERRADO. Ou seja, nem sempre as variáveis podem ser classificadas pela lógica booleana, sendo necessário definir fronteiras mais maleáveis, cujas mudanças sejam mais sensíveis.

Mamdani (1977), inspirado pelas pesquisas de Zadeh, elaborou um método de aplicação da lógica *fuzzy* no projeto de controles para instalações industriais. O método foi aplicado em uma planta piloto que simulava uma situação real. O controlador de Mamdani foi baseado na seguinte estrutura: “Se A então B”, na qual tanto a proposição antecedente quando a consequente são variáveis linguísticas de dois diferentes conjuntos *fuzzy*. Sugeno (1983), em contrapartida a proposta de Mamdani (1975), sugeriu uma metodologia simplificada na tomada de decisão onde apenas o antecedente das regras é formado por variáveis *fuzzy*. Onde o resultado de cada regra é um valor numérico, e não um conjunto *fuzzy*.

Segundo Zimmermann (1985), recorre-se a lógica difusa sempre que o sistema em questão não apresenta resposta satisfatória à lógica bivalente. Ou ainda, quando se deseja operar um mecanismo de maneira computacional, utilizando, para isso, implicações do próprio operador humano.

Lee (1990) corrobora as explicações de Zimmermann, validando a aplicação da lógica difusa em processos industriais, com ênfase em problemas cujo comportamento não se mostre linear, ou facilmente adaptável à modelagem matemática. Para Lee, o controlador de lógica *fuzzy* fornece um meio de conversão de uma estratégia de controle linguística com base no conhecimento de especialistas, para uma estratégia de controle automático.

Abordando a temática de controle em sistemas de abastecimento de água Lindeil (1994) elaborou um trabalho onde trazia algumas metodologias de dimensionamento de redes de abastecimento, previsão de demanda de água e os principais controles de otimização de rede. O autor destaca a importância em se utilizar controle nos sistemas de abastecimento, sendo as características da rede fundamentais para eleger o tipo de controle. Para redes mais simples com apenas um reservatório, a metodologia aplicada é aquela onde

se controla o nível de água do reservatório. Enquanto que, para sistemas que comportam mais de um conjunto motor-bomba, o mais indicado é o uso de controles que regulam a rotação do motor. Lindeil destaca que a complexidade do sistema de abastecimento varia conforme o número de elementos de controle comportados pela rede.

Dando prosseguimento ao desenvolvimento de técnicas e novos métodos baseados na recente lógica nebulosa, Yu e Fowler (1994) propuseram um novo método de regras baseada na inferência *fuzzy* da lógica polivalente ou multivalorada. Segundo apresentado pelos próprios autores, o trabalho desenvolvido mostrou-se superior aos de sua época por apresentar um método de regras baseado apenas na lógica polivalente ou multivalorada. Segundo Yu e Fowler, o trabalho desenvolvido fornece uma base sólida para o desenvolvimento de futuros trabalhos baseado na aplicação de controladores *fuzzy*.

Com o intuito de tornar a lógica *fuzzy* cada vez mais difundida nos meios acadêmicos e comerciais, Katbab (1995) publicou um trabalho onde trazia uma série de caso de controladores e programadores cuja base era a lógica difusa. Além disso, o autor expôs algumas definições teóricas, tais como as variáveis *fuzzy* de controle, as funções de máximo e mínimo, dentre outras operações de conjuntos. Ainda segundo Katbab, um típico exemplo de regra baseado na lógica *fuzzy* pode ser assim descrita: “SE x é A e y é B, ENTÃO z é C.”.

A partir de então, com os conceitos de lógica *fuzzy* mais solidificados e sua comprovada eficiência na aplicação de controles de processos, foram desenvolvidos inúmeros trabalhos e pesquisas na área. Bilobrevec, Marçal e Kovaleski (2004) programaram um sistema especialista desenvolvido para modelagem computacional da previsão do comportamento de um motor elétrico em função da tensão aplicada. Pela análise dos seus resultados, Bilobrevec *et al* (2004) concluiu que o controlador baseado na lógica *fuzzy* pode ser facilmente aplicado a sistemas que não possuem uma modelagem matemática bem definida. Além disso, a simplicidade do processo permite um baixo custo de implantação.

Ainda no mesmo ano, Italliano *et al* (2004) publicaram um trabalho referente a automação de reservatórios operados pela Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Jaboticabal – SP (SAAEJ). A SAAEJ, no ano de 2003 realizou a construção e automação de um reservatório de 2.500 m³ de água além de outro reservatório de capacidade de 500 m³, na mesma região. O projeto de automação consistiu em operar os dois reservatórios, em todas as suas necessidades e com o maior número possível de informações do Centro

de Operação, que fica na ETA - Estação de Tratamento de Água, a uma distância de 10 km. Após a implantação do sistema automatizado, a SAAEJ comprovou a necessidade de se investir em sistemas e operadores que busquem uma otimização na operação de redes de abastecimento por meio da automação.

No entanto, para Marodin *et al* (2005), é preciso considerar os impactos gerados ao se automatizar um sistema de abastecimento de água. Em suas pesquisas, Marodin destacou que é preciso adotar uma abordagem sistêmica na implantação de projetos de automação em SAA, não considerando apenas aspectos de custos e melhoria no controle operacional, mas também os impactos desta tecnologia nas competências requeridas e no binômio estruturas/processos requerido para sua plena utilização.

Segundo Rignel *et al* (2011), a lógica *fuzzy* surgiu a partir da necessidade de analisar fenômenos que fugiam do enquadramento da lógica booleana. Ao se estudar dados não conclusivos, cujos resultados produzidos não condiziam com valores extremos, tais como: certo ou errado, bom ou ruim, um ou zero, a lógica *fuzzy*, ou difusa, se mostra mais eficiente. Isto porque a lógica difusa trabalha com parâmetros intermediários, valores que não se encaixam em resultados extremos. Sua aceitação deve-se ao fato de ser uma linguagem já embutida no dia a dia do ser humano, além de apresentar uma tabulação matemática simplificada. Tal comportamento se assemelha ao funcionamento não linear de um sistema de abastecimento de água, o que corrobora o uso de controladores baseado na lógica difusa no controle de alguns processos ou parâmetros.

Rabelo *et al* (2011), propuseram uma metodologia baseada em sistemas de inferência *fuzzy* paramétricos para obtenção de uma política de operação energética que otimize os sistemas hidrotérmicos de geração, bem como uma aplicação na simulação da operação energética de sistemas hidroelétricos. A partir dos testes realizados e da comparação entre os sistemas com e sem o *fuzzy*, observou-se a eficiência da política proposta. Além disso, os autores evidenciaram a importância da experiência dos operadores, visto que essas informações foram usadas diretamente para se obter os parâmetros necessários a criação do *fuzzy*.

Abordando a temática da automação, em 2011, Malheiro *et al* afirmou que empresas de abastecimento de água devem investir em equipamentos e tecnologias que não apenas reduzam as perdas nas redes de abastecimento, bem como em técnicas de medição que auxiliem em um controle mais efetivo, permitindo um conhecimento real do sistema. No entanto, anterior ao investimento no controle das perdas, é preciso saber qual

porcentagem de água fornecida se perde, e, dessa quantidade, qual parcela é considerada como perda real e/ou aparente. Para tanto, Malheiro propôs a utilização de um equipamento de telecontagem. Este equipamento permite a realização de um monitoramento em tempo real do consumo de cada cliente. Além do estado de consumo, a telecontagem emite alerta de irregularidades nos contadores, permitindo um eficaz combate das perdas aparentes através da localização precisa das respectivas causas. Seu estudo comprovou a eficácia da utilização de equipamento de medição no controle das perdas, principalmente as aparentes que não são faturadas e causam prejuízos às companhias de abastecimento.

Outro trabalho, aplicando *fuzzy* diretamente em SAA foi proposto por Jiang (2011). O autor desenvolveu uma pesquisa aplicando lógica *fuzzy* no controle de válvulas, alterando seu grau de abertura e fechamento, com o intuito de manter constante o nível de caixa d'água. Pela análise dos seus resultados, o autor constatou a eficiência da teoria dos conjuntos difusos aplicado no controle de nível de água. Garantindo um abastecimento intermitente e econômico, reduzindo os desperdícios de uma operação não controlada.

Tahavori, Kallesøe e Wisniewski (2012) apresentaram um trabalho acerca da importância da modelagem de sistemas de abastecimento de água com o intuito de controlar as perdas ao longo do sistema. Os autores apresentaram uma modelagem matemática não-linear para identificar a queda de pressão em cada elemento da rede, tais como tubos, bombas, válvulas e caixa d'água. O objetivo foi desenvolver uma estratégia de controle otimizada, de forma a reduzir o consumo energético dos conjuntos motor-bomba, mantendo as pressões nos valores desejados.

Na mesma época, Sharma *et al*(2012), desenvolveram uma pesquisa com o intuito de avaliar dois importantes padrões em sistemas de abastecimento de água: a demanda per capita e a qualidade de consumo da água potável. A proposta do seu trabalho foi aplicar a lógica *fuzzy* para projetar as necessidades futuras de água, além de fornecer índices linguísticos para avaliar a qualidade de consumo da água. Em análise aos seus resultados, os autores puderam constatar a importância em utilizar a lógica difusa aplicada em ferramentas computacionais para se avaliar parâmetros qualitativos e não apenas quantitativos.

Com o intuito de demonstrar a eficiência de utilizar controles baseados na lógica *fuzzy* em sistemas de abastecimento de água, Bezerra, Silva e Gomes (2012) desenvolveram um controlador *fuzzy* aplicado a uma bancada experimental. Nesse

trabalho, os autores tinham por objetivo controlar a pressão em um ponto da rede, por meio do uso de válvulas e variação da rotação do conjunto motor-bomba. Os autores não estabeleceram limites de pontos a serem controlados, além de garantir que seria possível chegar a qualquer valor de referência da pressão. Os resultados mostraram que a redução das perdas em sistemas sem controle de pressão e com fugas poderiam chegar a mais de 56%.

Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 2013) divulgou um relatório onde destaca as principais causas de perdas de água em sistemas de abastecimento por todo o Brasil. Além disso, destaca a importância em se investir em mecanismos e ferramentas tecnológicas para reduzir as perdas de água geradas ao longo das redes de abastecimento. Foi constatado que a média brasileira de perdas do SAA é de aproximadamente 40%, incluindo perdas reais e aparentes. Ainda no relatório, a ABES destaca a importância em se investir em operadores capacitados e em reformas estruturais e estruturantes, garantindo uma rede mais eficiente.

Camboim *et al* (2014) desenvolveram um controle fundamentado nas técnicas *fuzzy*, cujo objetivo era controlar um sistema de abastecimento de água. O produto criado visava manter a pressão constante, através da variação da velocidade da rotação do conjunto motor-bomba, além de buscar sempre os maiores rendimentos das bombas e o menor consumo energético. A partir da análise dos resultados, os autores obtiveram as seguintes conclusões: O sistema de controle manteve a pressão constante mesmo com perturbações bruscas; o consumo energético e o indicador hidráulico CE tiveram uma redução de 17,32% e 15,5% se comparado com o sistema sem o controlador; a redução na vazão foi mínima (2,11%), comparando os sistemas com e sem o controlador *fuzzy*, o que confirma a manutenção da qualidade no abastecimento; dentro de uma mesma condição imposta pelo sistema, o controlador conseguiu controlar a pressão e buscar uma condição de menor consumo.

A utilização da lógica difusa para aprimoramento e otimização de tarefas e atividades se destacam em diversas áreas, tais como citam Singhala *et al* (2014). Seu trabalho divulga a aplicação da lógica *fuzzy* com o intuito de controlar a temperatura, a partir de três regras com os seguintes valores lógicos: IF, AND e THEN. As regras possuem uma condição e uma conclusão além de cinco variáveis difusas. O controlador foi implementado em um micro-controlador sem a necessidade de software, alcançando os resultados desejados sem a necessidade de um número elevado de regras. Os autores

destacam a facilidade da implementação do controlador, além da versatilidade em se resolver diversos tipos de problemas com difícil modelagem matemática.

Tian *et al* (2015) demonstraram mais uma vez a capacidade de implementação de um controle *fuzzy*. O controlador foi aplicado na rede secundária no sistema de aquecimento central. O objetivo foi controlar e monitorar a temperatura da água de alimentação dessa rede. Os autores utilizaram um controlador composto formado pela ligação em série de controlador *fuzzy* convencional e controlador PID *fuzzy*. O intuito era obter e rastrear o valor dado à temperatura da água de alimentação de forma dinâmica. Os resultados da simulação, bem como seu efeito prático mostram que o controlador *fuzzy* cascata tem uma boa performance dinâmica e grande robustez. Os autores destacam que o controlador *fuzzy* cascata melhorou o desempenho do sistema de monitoramento e controle, corroborando seu alto valor para aplicação na engenharia.

Ainda no mesmo ano, Silva *et al* (2015), apresentou um trabalho cujo objetivo era, a partir da modelagem de um controle adaptativo, controlar a pressão de um sistema de distribuição de água. Os autores desenvolveram um sistema de controle adaptativo para o modelamento e controle, em tempo real, de um sistema que simula uma rede de distribuição de água, em uma bancada experimental. O sistema utilizado foi o de Variância Mínima Generalizado (GMV) autoajustável, cujos parâmetros foram estimados pelo método dos mínimos quadrados recursivo (MQR). A partir da análise dos resultados apresentados, os autores concluíram que o controlador adaptativo GMV autoajustável projetado é estável e robusto. Além disso, apresentou bom desempenho no controle da pressão (com um erro máximo no controle de pressão de 2,12% - 0,42 mc) e redução satisfatória no consumo de energia elétrica na operação da bancada experimental (19,2% no consumo de energia elétrica para o sistema atuando na condição mais desfavorável). Os autores ainda ressaltam a aplicabilidade do controle em sistemas reais e suas vantagens no controle da pressão e uma diminuição significativa no volume de água perdido em vazamentos.

Dando prosseguimento as pesquisas desenvolvidas com base na lógica nebulosa e suas aplicações Malinowska *et al* (2016) apresentaram um trabalho acerca dos fatores que levam a degradação de redes de abastecimento de água, submetidas a terrenos de mineração. Os autores subdividiram a pesquisa em duas etapas: primeiramente foi feito um levantamento dos parâmetros que afetam e geram danos em redes de abastecimento de água. Posteriormente, optou-se por escolher um modelo linguístico capaz de analisar os

parâmetros e classificar as redes de água-esgoto, conforme o nível de degradação. Após a realização das duas etapas, os autores elaboraram um modelo de avaliação de risco acerca dos danos causados nas redes de abastecimento. Com a análise dos resultados, pode-se concluir que o modelo baseado no método de Mamdani apresentou as melhores respostas, destacando como principais fatores que têm uma influência decisiva sobre os danos em uma rede de abastecimento água, o diâmetro da tubulação e o material de que foi feita.

2.3 CONCLUSÕES

Desde 1920, a lógica *fuzzy* vem sendo desenvolvida e aprimorada com o intuito de se criar controles e sistemas inteligentes que operem de maneira eficiente. As técnicas desenvolvidas apontam para sistemas robustos que operam de forma similar ao comportamento de técnicos e operadores humanos. Além disso, a lógica *fuzzy* facilita a interpretação e solução de problemas cujas variáveis não apresentam delimitações claras. A utilização da lógica nebulosa em SAA, cujos parâmetros variam sob diversos aspectos, aponta de maneira satisfatória para a criação de metodologias mais eficientes que garantam um abastecimento contínuo e com consideráveis reduções do desperdício de água e energia.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS DE CONTROLE, SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E LÓGICA *FUZZY*

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo aborda de forma mais aprofundada os temas que norteiam a base teórica desta pesquisa. Foi realizado um levantamento não apenas dos trabalhos desenvolvidos na área, que utilizam como ferramenta os controladores *fuzzy*, mas também um estudo com o intuito de caracterizar os principais temas em suas teorias e conceitos.

3.2 SISTEMAS DE CONTROLE

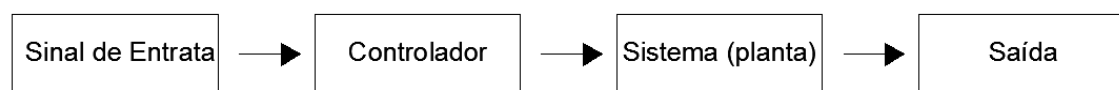
Um significado bastante simplificado de sistema o caracteriza como um conjunto de partes relacionadas entre si de modo a formarem um todo. Hubka e Eder (1988) traz uma definição acerca do termo sistema: “Sistema é um conjunto finito de elementos reunidos para formar um todo sob certas regras bem definidas, por meio das quais existem determinadas relações precisas definidas entre os elementos e para com seu ambiente”.

Um sistema de controle é um conjunto formado por uma planta e um controlador, capaz de realizar mudanças com o intuito de se alcançar um determinado objetivo. Por planta, entende-se um equipamento ou uma instalação, seja ela mecânica, elétrica, hidráulica ou industrial, capaz de realizar alguma atividade (Araújo, 2007). Eles

apresentam uma saída ou resposta para uma dada entrada ou estímulo. A entrada representa a resposta desejada, a saída é a resposta real.

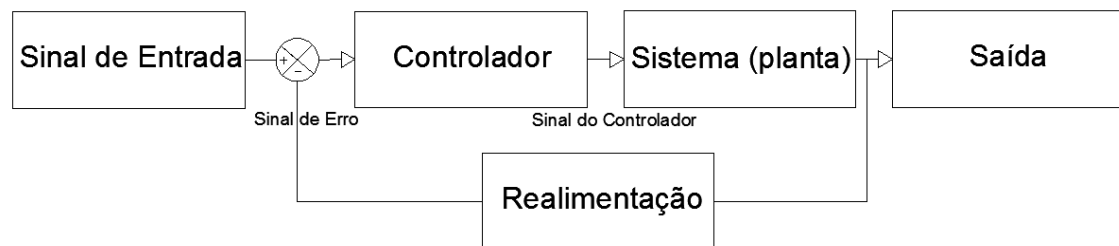
Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou malha fechada. Um sistema em malha aberta utiliza um controlador conectado em série com o processo a ser controlado, de maneira que a resposta ou saída real não apresenta qualquer interferência no sinal de entrada. A Figura 3.1 apresenta um esquema de um sistema de controle em malha aberta.

Figura 3.1 - Sistema de controle em malha aberta



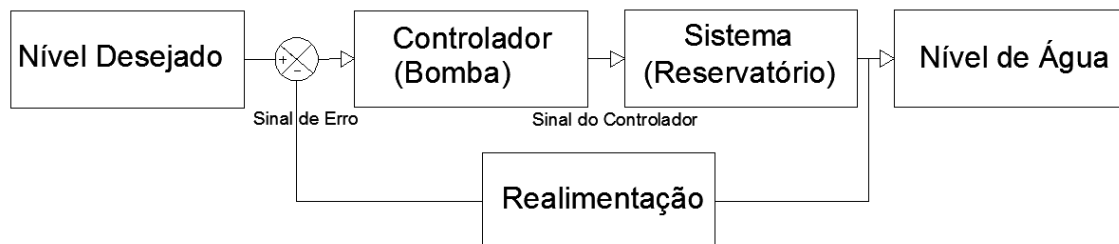
Em detrimento ao sistema de controle em malha aberta, apresenta o sistema em malha fechada, onde a resposta ou saída real influencia na entrada do sistema. A Figura 3.2 apresenta um esquema em malha fechada.

Figura 3.2 - Sistema de controle em malha fechada



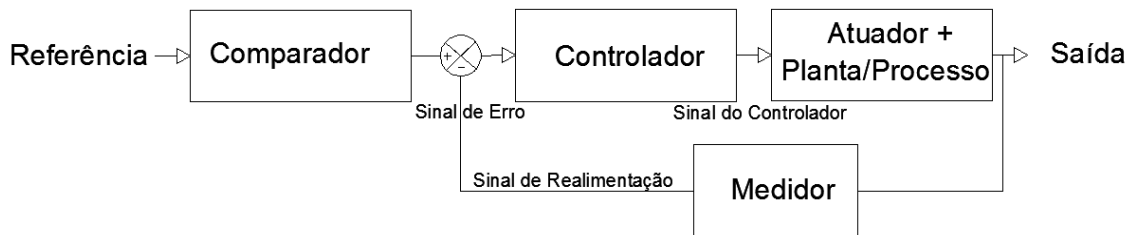
Uma exemplificação bastante prática de um sistema de controle em malha fechada é a regulação do nível de água em um reservatório (ver Figura 3.3).

Figura 3.3 - Nível de água em um reservatório



Para que se possa realizar uma avaliação acerca da eficiência ou mesmo funcionamento adequado de um sistema de controle, é preciso que se analisem os seus principais componentes. A Figura 3.4 traz um esquema desses componentes e seus pontos de atuação.

Figura 3.4 - Componentes de um sistema de controle



- Referência: Valor desejado da variável (s) a ser controlada;
- Comparador: calcula o sinal do erro entre o valor desejado e o obtido;
- Controlador: atua no sinal do erro, criando um sinal de controle que será aplicado no sistema, com o intuito de corrigir a variável que será controlada;
- Atuador: recebe o sinal de controle, gerando um sinal com potência suficiente para atuar sobre o sistema;
- Planta: dispositivo que se deseja controlar;
- Medidor: transdutor responsável pela medição e conversão da variável (s) a ser controlada, com o objetivo de se realizar uma comparação e obter o erro de saída.

A escolha de um sistema em detrimento a outro varia de acordo com a necessidade do operador, ou mesmo as características de sua planta. Os sistemas em malha aberta são comandados apenas pelo sinal de entrada, o que não torna possível a correção de possíveis perturbações que ocorram à planta. As vantagens de um sistema em malha aberta estão em sua simplicidade de operação e no custo reduzido de sua implantação, no entanto, apresenta sensibilidade a ruídos não gerando respostas confiáveis em sistemas mais complexos.

Enquanto que no sistema em malha fechada, há uma comparação entre a saída real e a saída estimada, o que torna possível o cálculo do erro, aplicando correções ao sistema, de acordo com a saída alcançada, facilitando a compensação de perturbações. Essa compensação ocorre através da realimentação com sua saída. Além disso, possui menor

sensibilidade à mudança de parâmetros, melhor rejeição a perturbações, melhor atenuação de ruídos, e é capaz de gerar uma redução de erro em estado permanente e um controle e ajuste no regime transitório. Suas desvantagens estão no alto custo e complexidade elevada de implantação, e os atrasos de tempo podem gerar oscilações na saída e instabilidade (OGATA, 2010).

As características de um controlador também podem variar com relação ao seu número de entrada e seu número de saída. Um sistema de controle pode apresentar mais de uma entrada, bem como mais de um sinal como resposta de saída. Ou seja:

- SISO (*Single Input – Single Output*): nesse tipo de controlador, existe uma variável de entrada e apenas uma variável de saída;
- SIMO (*Single Input – Multiple Output*): o controlador SIMO apresenta uma única variável como sinal de entrada e múltiplas variáveis na saída;
- MISO (*Multiple Input – Single Output*): nessa situação encontra-se um controle com múltiplas entradas e apenas uma saída;
- MIMO: (*Multiple Input – Multiple Output*): múltiplas variáveis como entradas e também mais de uma resposta em sua saída.

Anterior ao processo de determinação do tipo de controlador, segundo seu número de variáveis, é preciso a verificação de alguns critérios de projeto, tais como:

- Estabelecer os objetivos do controle;
- Identificar as variáveis que se deseja controlar;
- Descrever as especificações das variáveis;
- Estabelecer a configuração do sistema e identificar o atuador;
- Obter um modelo do processo a controlar, do atuador e do sensor;
- Descrever um controlador e selecionar os parâmetros a serem ajustados;
- Otimizar os parâmetros e analisar o desempenho.

Como estratégia de controle, os sistemas em malha aberta podem operar com os seguintes comandos: *on-off* (liga-desliga), ações temporizadas e sequências de chaveamento temporizados. Enquanto que os sistemas em malha fechada operam no sistema: *on-off* (liga-desliga), ou ainda a partir da aplicação de um controlador, tais como: proporcional, integral, derivativo, PID (junção dos três anteriores), ou como será feito nesse trabalho, um controlador cuja base de regras é a lógica *fuzzy*.

A partir da aplicação do controlador na planta é necessário realizar a análise de alguns parâmetros, com o intuito de caracterizar o controlador e sua eficiência (Nise, 2002).

- Tempo de atraso (T_d): tempo necessário para o sinal alcançar, pela primeira vez, metade do valor final;
- Tempo de subida (T_r): tempo necessário para o sinal ir de 10% a 90% de seu valor final;
- Instante de pico (T_p): Tempo necessário para a resposta atingir seu valor máximo pela primeira vez;
- Máxima ultrapassagem percentual: valor em porcentagem que representa o quanto o pico alcança em relação ao valor de referência;
- Tempo de assentamento ou tempo de acomodação (T_s): tempo necessário para que a resposta permaneça no interior de uma faixa de $\pm 2\%$ em torno de seu valor de referência.

Os sistemas de controle utilizam diversas ferramentas com o intuito de manobrar uma determinada planta para se chegar a um dado resultado. Os controladores variam de acordo com a necessidade da planta ou processo a ser controlado. Para modelos físicos cuja modelagem matemática seja mais complexa, tais como as redes de abastecimento de água, existem alternativas na aplicação de um controlador.

Os sistemas de controle baseados na lógica *fuzzy* apresentam uma metodologia mais simplificada, quando comparado a outros controles. No entanto, sua implantação exige um conhecimento detalhado da planta ou processo a ser trabalhado. Isto porque sua base de regras e suas funções de pertinência devem ser baseadas no conhecimento dos controladores e técnicos que operam a planta real.

Conforme interação entre as variáveis de controle e as variáveis de estado, o sistema pode-se mostrar centralizado ou descentralizado. Em um sistema centralizado, as regras de controle baseadas na lógica *fuzzy* interagem de maneira contínua, de forma a contribuírem no mesmo instante de tempo para a obtenção do resultado desejado. Em um sistema descentralizado é elaborado um grupo de regras para cada variável de controle, ou seja, cada ponto será controlado de forma independente (PINTO, MOTA ALMEITA, 2010).

3.3 LÓGICA FUZZY

A filosofia da lógica *fuzzy* é bastante simples. O intuito é utilizar variáveis linguísticas para a criação de uma base de regras aplicada à solução de um determinado sistema. Ao se perguntar, por exemplo, qual a temperatura de uma sala, não se espera obter um valor exato, do tipo: são 19°. A resposta mais intuitiva seria: está frio ou está muito quente. Mas como traduzir, de forma numérica, expressões linguísticas? A lógica *fuzzy* traz métodos que traduzem números em expressões, e expressões em números.

Os sistemas de controle que utilizam a lógica *fuzzy* se tornam mais eficientes. Para Shaw (2007), as principais vantagens são: as estratégias de controle são resultados da experiência, e não de modelos matemáticos; envolvem um elevado número de entradas.

Para um entendimento mais aprofundado da lógica difusa, é preciso que se tenha, de forma bastante esclarecida, uma compreensão a respeito dos princípios básicos que a regem, tais como: conjuntos *fuzzy*, números *fuzzy*, variáveis linguísticas, funções de pertinência, implicação lógica e regras de inferência, fuzzyficação e defuzzyficação.

A lógica *fuzzy* utiliza as variáveis denominadas linguísticas, estas variáveis convertem as incertezas dos dados linguísticos em um modelamento matemático, sendo a função de transferência um mapeamento de cada possível valor numérico da correspondente variável linguística. Todo o sistema *fuzzy* é baseado em três operações: fuzificação, inferência *fuzzy* e desfuzificação. A fuzificação é o processo no qual há a transformação dos dados de entrada iniciais em variáveis linguísticas, é nesta etapa onde todas as informações referentes às incertezas devem ser consideradas. A inferência *fuzzy* tem como objetivo estabelecer uma relação entre todas as possíveis variáveis entre si, através de regras pré-estabelecidas. A desfuzificação corresponde ao processo de conversão do resultado linguístico do processo de inferência de *fuzzy* em um valor numérico. Segundo Von Altrock (1996) *apud* Jané (2004), há vários processos de desfuzificação, como exemplo cita-se o método de Centro de Máximo, criado pelo autor, este processo é caracterizado pelo valor linguístico e seu correspondente valor real.

3.3.1 Conjuntos *fuzzy*

Para Gomide *et al* (1995) a *lógica fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy* (A), que, por sua vez, são definidos por **funções de pertinência**. De maneira simplificada, é possível dizer que um conjunto *fuzzy* faz a conexão entre uma variável linguística e seu equivalente numérico, através da atribuição de um grau de pertinência $\mu_A(x)$, entre 0 e 1 para cada elemento de x no universo (U). Ou seja:

A teoria dos conjuntos *fuzzy* é baseada na teoria clássica dos conjuntos, onde o conceito de pertinência de um elemento a um determinado conjunto é bastante definida. Onde, dado um elemento de um conjunto (C) em certo universo U , os elementos deste universo pertencem ou não pertence aquele conjunto. Ou seja:

$$f_c(u) = \begin{cases} 1, & \text{se somente se } u \in C \\ 0, & \text{se somente se } u \notin C \end{cases}$$

Em 1965, Zadeh propôs uma caracterização mais ampla a respeito do conceito de pertinência de um dado elemento a um conjunto. Em seus estudos, ele pode concluir que um dado elemento pode pertencer mais a um conjunto do que a outro. Ou seja, os valores iguais a 0 indicam uma total exclusão, enquanto que os valores iguais a 1 indicariam uma total pertinência. Ainda segundo a definição de Zadeh (1965), seja U um universo de discurso (contínuo ou discreto) formado por um conjunto de elementos (u), um conjunto *fuzzy* A , no universo U , pode ser definido por uma função de pertinência que assume valores em um intervalo de $[0,1]$. Ou seja:

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

Sendo o conjunto *fuzzy* A no universo de discurso U , um conjunto de pares ordenados, do tipo:

$$A = \{\mu_A(u), u\}, u \in U$$

Assim como para os conjuntos clássicos, os conjuntos *fuzzy* possuem propriedades e podem se relacionar a partir de operações, tais como interseção, união e complemento.

Bilobrovek (2005) traz a definição desta lógica da seguinte forma: “Seja $V \neq \emptyset$. Um conjunto *fuzzy* A é uma função $f_A: V \rightarrow [0,1]$, onde o conjunto V é chamado o universo

de A , com $A \subseteq V \times [0,1]$, $[0,1]$ é o intervalo de n números reais e f_A é denominado o conjunto verdade de A . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto *fuzzy* A com a função f_A , ou seja, $A \equiv f_A$. Um conjunto *fuzzy* é definido por sua função de pertinência, que reflete a relação de intensidade de um determinado parâmetro ou objeto pertencente a um conjunto *fuzzy*.

Shaw (2007) traz a seguinte definição para a intersecção e união, respectivamente, de conjuntos nebulosos: “Seja U o universo de discurso e $x \in U$ e sejam os conjuntos $A \subset U$ e $B \subset U$. A intersecção é a parte comum dos conjuntos A e B , e é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais A e B ”. Sendo o vetor de pertinência calculado por:

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

A união pode ser compreendida como o menor subconjunto no universo de discurso que inclui ambos os conjuntos, A e B , ao mesmo tempo. Como a união é o contorno de ambos os conjuntos, a união é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais, A ou B . E seu vetor de pertinência é calculado como:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

E, por fim, a definição de complemento de um conjunto *fuzzy*. Seja U o universo de discurso, onde $A \subset U$, o complemento de A , dado por A' , são todos os elementos de U que não pertencem a A . Seu vetor de pertinência é calculado por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Dado um universo de discurso U , e três conjuntos *fuzzy* A , B e C , com $A \subset U$, $B \subset U$ e $C \subset U$, é possível numerar as seguintes propriedades, dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades dos conjuntos fuzzy

Propriedade	Representação
Comutativa	$A \cap B = B \cap A$
	$A \cup B = B \cup A$

Associativa	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$
Idempotência	$A \cap A = A$ $A \cup A = A$
Distributividade (intersecção)	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Distributividade (união)	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
Conjunto <i>fuzzy</i> e seu complemento	$A \cap A' \neq \emptyset$ $A \cup A' \neq U$
Conjunto <i>fuzzy</i> e conjunto vazio	$A \cap \emptyset = \emptyset$ $A \cup \emptyset = A$
Conjunto <i>fuzzy</i> e conjunto universo	$A \cap U = A$ $A \cup U = U$
Involução	$(A')' = A$
Teorema de Morgan	$(A \cap B)' = A' \cup B'$ $(A \cup B)' = A' \cap B'$

Uma observação importante feita a partir de diversos estudos indica que nem sempre as operações de máx. e mín. são empregadas. Em determinadas aplicações, a utilização de outros operadores podem apresentar melhores resultados, Garcia (2009) *apud* Gupta & QI, (1991). Dias (2010), apresenta definições dos operadores de união e intersecção, chamados de *t-norma* e *t-conorma* (ou *s-norma*).

- Uma *t-norma*, ou *norma* triangular, é uma operação binária utilizada para representar o operador lógico de intersecção entre conjuntos. O operador mín é uma *t-norma*;
- A *conorma* triangular (*s-norma*) é utilizada em conjuntos *fuzzy* para representar o operador clássico de união. O operador máx. é uma *t-conorma*.

Em algumas situações, o sistema necessita de operações entre conjuntos em universos de discurso diferentes. Esta operação possibilita a construção de uma base de conhecimentos de um sistema, a partir de um mapeamento entre sinais de entrada e saída. Segundo Garcia (2009), a partir do uso das funções de pertinência, e regras do tipo SE-ENTÃO, é possível realizar uma inferência do tipo: SE x E y ENTÃO z. Onde x e y são

variáveis de entrada e z é uma variável de saída. Os conectivos SE, E e ENTÃO compõem as regras de inferência. Para a intersecção entre universos de discursos diferentes, é feito um produto cartesiano entre os conjuntos.

3.3.2 Variáveis Linguísticas

São aquelas variáveis cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Esses valores são descritos por meio de conjuntos difusos e representado a partir de suas funções de pertinência. Com cada valor sendo um número *fuzzy* definido em um universo de discurso. Esses números podem ser compreendidos como um conjunto *fuzzy*, definido em um intervalo *fuzzy* nos números reais ($\mathbb{R}$), para um número cujo valor não é conhecido com precisão.

Bellucci (2009) traz uma definição bastante simplificada:

Uma variável linguística é aquela cujo valor é expresso por termos linguísticos, de natureza subjetiva, e expressos por funções de pertinência. Por exemplo, a temperatura está alta. Temos temperatura como sendo a variável linguística e alta como sendo o valor (atributo), que pode ser associado a uma função de pertinência.

Os valores de uma variável linguística podem ser construídos a partir de sentenças, conectivos lógicos ou determinadores.

Segundo Tanscheit (1995), as variáveis linguísticas possuem a seguinte caracterização (N , $T(N)$, X , G , N), onde:

N : nome da variável;

$T(N)$: conjunto de termos de N ;

X : universo de discurso;

G : regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de $T(N)$, ou seja, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores.

M : regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* em X .

Como exemplo, podemos ter os valores de pressão, variando de 0 a 20 mca:

N : pressão

T(N): {baixa, média, alta}

X: 0 a 15 mca

G: pressão não baixa e não muito alta

M: associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

Para Zadeh (1973), em uma linguagem qualquer, cada palavra x pode ser entendida como uma descrição de um subconjunto $M(x)$, em um universo de discurso U , no qual $M(x)$ representa o significado de x .

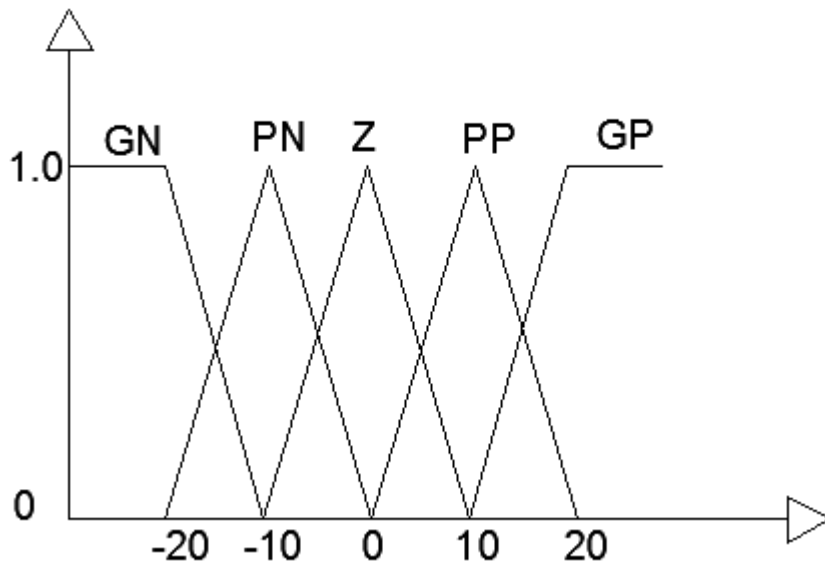
Para Rheingantz (2002), “ao se considerar sala como um subconjunto *fuzzy* (M), e o adjetivo cinza como outro subconjunto *fuzzy* (M). A expressão sala cinza é compreendida como a intersecção entre os dois subconjuntos *fuzzy* supracitados”. Ainda segundo Rheingantz as variáveis linguísticas podem apresentar termos atômicos, como as descrições das cores, por exemplo, ou sentenças em uma dada linguagem. Ou seja, a variável linguística *fuzzy* frio, pode apresentar os seguintes valores: muito frio, pouco frio, mais ou menos frio, e tantas outras.

3.3.3 Funções de Pertinência

Para Shaw (2007), as funções de pertinência representam as ações teóricas e práticas do sistema *fuzzy*. Elas são representadas por uma função numérica gráfica, que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos. Elas representam a relação de intensidade no qual dada variável pertença a um conjunto *fuzzy*.

As funções de pertinência podem ser representadas em diversos formatos, tais como triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, spline cúbico, dentre outros. Neste trabalho será utilizado os formatos triangular e trapezoidal. A Figura 3.5 traz um exemplo de uma função de pertinência representada em formatos triangular e trapezoidal.

Figura 3.5- Funções de pertinência triangulares e trapezoidal



3.3.4 Implicação Lógica e Regras de Inferência

A implicação lógica é o resultado de uma avaliação a partir das causas e efeitos em uma determinada situação. As regras de inferência são resultados de avaliações de problemas corriqueiros, onde se estabelece uma lógica em seu efeito a partir das causas. Ou seja, *SE* a temperatura da sala está elevada, *ENTÃO* liga o ar-condicionado para que a temperatura abaixe.

As sentenças lógicas utilizam os mesmos conectivos utilizados na lógica clássica, ou seja: “e”, “ou”, “se...então” e “se somente se”. A palavra “não” é utilizada para realizar a negação de uma sentença, assim como o “e” (conjunção) tem como objetivo reunir elementos comuns de determinadas sentenças. A disjunção (“ou”) é utilizada para realizar a união de conjuntos. Assim como o “se...então” cria sentenças condicionais e “se somente se” é utilizado quando se deseja operar com equivalência lógica entre duas ou mais sentenças.

Como já dito anteriormente a disjunção é semelhante à operação de união, e pode ser representada pela função de pertinência:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

Enquanto que a conjunção representa a função de pertinência da intersecção, ou seja:

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

3.3.5 Métodos de Inferência de Mamdani

Existe uma série de modelos de inferência, conforme a necessidade do programador e da planta a ser controlada. Nesse trabalho será tratado o detalhamento do método de Mamdani, a ser aplicado no decorrer desta dissertação.

O método de Mamdani segue a estrutura: **IF** (SE) demanda **IS** (ESTÁ) aumentando muito **AND** (E) pressão está baixa, THEN (ENTÃO) aumentar a rotação do conjunto motor-bomba.

Em um típico sistema baseado na lógica *fuzzy*, a máquina de inferência recebe, a partir do fuzzyficador, os valores *fuzzy*, que anteriormente passaram por uma conversão de escalares para os números *fuzzy*. Na etapa seguinte, a partir das funções de pertinência, os valores convertidos serão mapeados no intervalo [0,1]. Logo a seguir, a máquina de inferência executa as regras dispostas no banco de regras, garantindo assim um conjunto *fuzzy* de saída. Finalmente, o conjunto difuso gerado será enviado para o defuzzyficador responsável pela conversão em valores escalares.

Pelo modelo de Mamdani, a regra semântica utilizada para o processamento de inferência é o método Máx-Mín, ou seja, máximo-mínimo, através das operações de união e intersecção entre os conjuntos.

Segundo Ross (2010), o método de inferência Máx-Mín, proposto por Mamdani, pode ser generalizado conforme a Equação (3.1):

$$\text{if } x_1 = A_i \text{ and } x_2 = A_j \text{ and ... and } x_p = A_j \text{ then } y_1 = B_i \text{ and } y_2 = B_m$$

(3.1)

onde,

x_1 são as entradas do sistema;

$A_i ... A_j$ são os conjuntos *fuzzy* de entrada;

y_1 e y_2 são as variáveis de saída;

B_i e B_m são os conjuntos *fuzzy* de saída.

Na etapa de conversão dos valores escalares em valores *fuzzy*, os antecedentes de cada regra são processados a partir da intersecção *fuzzy* entre os graus de pertinência das entradas atuais nos seus termos primários, definidos em cada uma de suas entradas. Este processo gera um grau de pertinência de disparo para cada regra definida na base de regras. Ou seja, é calculado para a k -ésima regra um coeficiente de disparo $D(k)$, conforme a equação 3.2.

$$D^{(k)} = T [\mu A_1^k (x_1), \mu A_2^k (x_2), \dots, \mu A_p^k (x_p)] = \min [\mu A_1^k (x_1), \mu A_2^k (x_2), \dots, \mu A_p^k (x_p)] \quad (3.2)$$

Onde o índice k nos conjuntos *fuzzy* representa os termos primários que compõem a regra k no banco de regras. Este processo transforma informações quantitativas em informações qualitativas, sendo, portando, conhecido como um processo de fuzzyficação. Com a Eq. (3.2) são calculados os coeficientes de disparo. Sempre que esse valor for maior do que zero, para cada regra calculada, elas serão classificadas como regras que disparam para as entradas atuais. Ou seja, irão contribuir no cálculo da saída correspondente no sistema de inferência (ALMEIDA E EVSUKOFF, 2003).

Em seguida, para cada grupo de regras, cujo consequente se mostra associado a um dado conjunto do universo de discurso da variável de saída, será selecionado o D^k de maior valor (BRAZ e VIANA, 2015).

Depois de calculado todos os coeficientes de disparo, uma operação global de união, irá criar um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída, com as informações sobre todas as regras disparadas. A Eq. (3.3) mostra a composição do conjunto para a saída y_2 . Esse processo transforma uma informação qualitativa em outra informação também qualitativa. Dessa forma, o conjunto gerado poderá ser utilizado em uma avaliação na tomada de decisão, ou será convertido em uma escalar para atuar em um sistema de controle.

$$\mu_{B'_1}(y) = S_{K=1..n} [T(D^{(k)}, \mu_{B_1}(y))] = \max_{k=1..n} [\min(D^{(k)}, \mu_{B_1}(y))], \forall y \in U_{y_2} \quad (3.3)$$

A partir da Eq. (3.1), parte-se de um conjunto *fuzzy* de saída $(\mu_{B'_1}(y))$, chegando a um valor $\widehat{y}_2$, correspondente (ALMEIDA E EVSUKOFF, 2003).

O processo inverso, onde variáveis *fuzzy* serão convertidas em variáveis escalares, ou seja, informações qualitativas serão transformadas em informações quantitativas é chamado de defuzzyficação. Um dos métodos mais utilizados, e o escolhido para este trabalho, é o de centro de massa. Esse método calcula, para cada conjunto *fuzzy* de saída, a abscissa do ponto de centro de massa, utilizando-a como valor escalar de saída, conforme Eq. (3.4).

$$\widehat{y}_2 = \frac{\sum_{y \in U_{y2}} y \cdot \mu_{B_1'}(y)}{\sum_{y \in U_{y2}} \mu_{B_1'}(y)} \quad (3.4)$$

3.3.6 Fuzzyficação e Defuzzyficação

A fuzzyficação é o processo de associar um valor numérico real a um conjunto *fuzzy*. A partir de um mapeamento do domínio de valores discretos para o domínio dos números *fuzzy*. Segundo Shaw (2007), é uma espécie de pré-processamento dos sinais de entrada, reduzindo, desta forma, a quantidade de valores a serem processados.

A defuzzyficação é o processo realizado após a obtenção do conjunto *fuzzy* por meio da inferência, onde é feita uma interpretação das informações obtidas e uma posterior conversão dos dados recebidos em resultados precisos. Ou seja, o valor da variável linguística recebido será inferido pelas regras difusas e convertido a um valor discreto. A Figura 3.6 esquematiza o funcionamento de um sistema baseado em lógica *fuzzy*.

Figura 3.6 - Esquema simplificado de um sistema *fuzzy*.



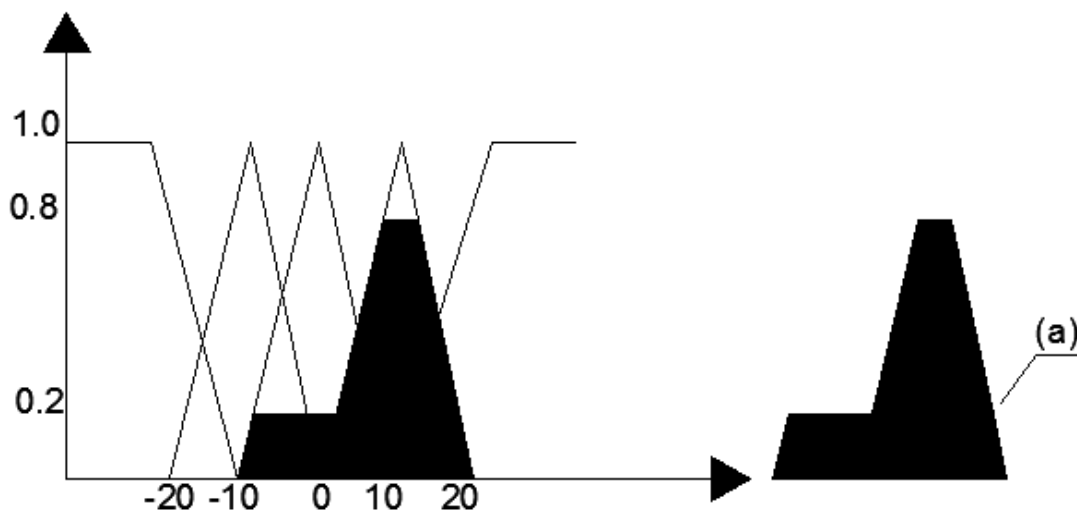
Fonte: Modificado de Bauchspiess, 2008.

Os métodos mais utilizados para a defuzzyficação são o centro de área, centro do máximo e média do máximo.

- **Centro de área:** também chamado de método de defuzzyficação de centro de gravidade, calcula o centroide da área representada pelo termo de saída *fuzzy*. Esse termo é formado pela união de todas as contribuições de regras.
- **Centro de máximo:** neste método de cálculo, apenas os picos das funções de pertinência (representados por meio de setas), no universo de discurso da variável de saída são utilizados, sendo as áreas delimitadas pelas funções de pertinência, desprezadas.
- **Média do máximo:** neste método de defuzzyficação, seria realizada uma média de todos os máximos valores de pertinência obtidos.

Este trabalho irá utilizar, como método de defuzzyficação, o centro de gravidade. Esse método fornece a média das áreas das figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto *fuzzy*. A Figura 3.7 representa o cálculo de defuzzyficação pelo método de centro de gravidade. É feito o cálculo do centro de área da região hachurada (a), o valor obtido apresenta um resultado compreendido entre -10 e 20.

Figura 3.7 - Método de defuzzyficação pelo centro de gravidade



3.3.7 Regras Fuzzy

Uma base de regras *fuzzy* é formada por proposições difusas, onde as variáveis linguísticas são modeladas por conjuntos *fuzzy*. A partir do módulo de inferência, é fornecida a saída adotada, correspondente a cada entrada proposta. Os métodos de inferência mais utilizados são os que utilizam as t-norma e t-conorma, para fazer a correspondência matemática das sentenças das bases de regras Bellucci (2009).

Este trabalho utilizou o método Mamdani de inferência. A metodologia realizada adotou o seguinte procedimento:

- Na base de regras *fuzzy*, a condicional é modelada pela aplicação da intersecção (valor mínimo);
- Adotou-se a t-norma para o conectivo lógico “e” e t-conorma para o conectivo lógico “ou”.

3.4 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água é o conjunto de obras civis que tem por objetivo realizar a captação de água de um manancial, tratá-la de forma a torná-la própria para uso humano e realizar o fornecimento a uma determinada rede. Os sistemas de abastecimentos presentes no Brasil se caracterizam, basicamente, por possuírem as seguintes estruturas funcionais: captação, estação de tratamento de água (ETA), reservatório, estação elevatória, adutora e a própria rede de distribuição.

Cada um dos dispositivos mencionados acima deve ser devidamente dimensionado, obedecendo a padrões estabelecidos em normas regulamentadoras. A obediência às normas é imprescindível para que o sistema não seja superdimensionado, gerando gastos desnecessários, ou subdimensionado, gerando gastos não previstos, além de transtorno a toda população a qual estava destinado. A NBR 12211/1992 determina os procedimentos para a elaboração dos estudos de concepção destes sistemas.

Ainda segundo Melo (2011), a importância dos sistemas de abastecimento de água podem ser elencadas em duas sub-divisões:

- Para a saúde pública: Controla e previne a instalação de doenças de veiculação hídrica, proporciona o desenvolvimento de hábitos higiênicos na população, facilita

a limpeza pública e manutenção de praças e jardins, permite as práticas desportivas e recreativas, contribui para o conforto e a segurança da comunidade;

- Para o desenvolvimento econômico: aumenta a vida média e a vida eficiente da população, facilita a implantação de indústrias, contribui para o desenvolvimento das atividades de turismo e lazer.

Para a elaboração de um projeto de abastecimento de água, faz necessário, primeiramente, conhecer ou determinar os parâmetros iniciais para o cálculo da vazão, ou seja, a determinação do consumo exigido pela população a ser atendida. Segundo Gomes (2009), para a determinação da vazão de projeto, torna-se imprescindível o estudo dos seguintes aspectos: o alcance de projeto, previsões de população, estimativa dos consumos, estimativa das perdas e variações de consumo.

O alcance de projeto ou período de projeto é definido como o universo temporal necessário para se atingir a capacidade máxima de funcionamento de uma determinada rede. No Brasil os projetos de sistemas de abastecimento estão sendo concebidos para um alcance que varia de 10 a 30 anos. Sendo importante destacar alguns dos fatores a serem levados em consideração para a determinação deste parâmetro, tais como: tendência de crescimento da população, vida útil dos equipamentos, facilidade de ampliação do sistema, disponibilidade financeira, dentre outros (GOMES, 2009).

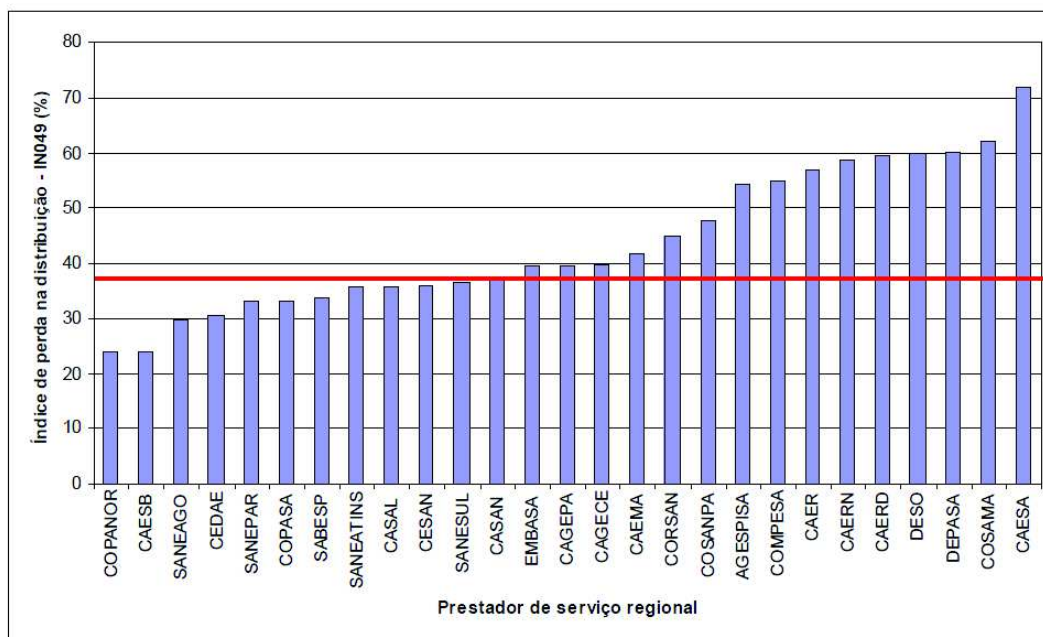
As previsões de populações podem ser feitas por meio de extrapolação de tendências de crescimento, definidas por dados estatísticos suficientes para construir uma série histórica e aplicando-se modelos matemáticos que apresente a melhor curva no gráfico de dispersão.

Estimativa dos consumos é um fator bastante variável, dependendo muito de elementos como o clima, padrão de vida, hábitos da população, custo da água, pressão na rede de abastecimento, perdas no sistema, dentre outros, variando conforme cada região.

Segundo Gomes (2005), ao se quantificar o volume de água necessário para abastecer uma cidade, é de suma importância contabilizar as perdas reais e aparentes que ocorrem em todo sistema, e que contribuem para aumentar a demanda de água bruta. Um importante indicador de eficiência em um SAA é o índice de perdas, no Brasil este índice varia em torno de 38%, no entanto, em alguns estados alcança 75%. É possível afirmar que um dos grandes desafios enfrentados pelas operadoras de SAA no Brasil é conseguir efetuar uma redução em seu índice de perdas em cada uma das etapas do seu processo de fornecimento (ABES, 2013). A Figura 3.8 apresenta um gráfico comparativo do índice de

perdas na distribuição registrados por companhias, estaduais e municipais, responsáveis pelo abastecimento de água no país. Este índice compara o volume de água disponibilizado para distribuição e o volume consumido.

Figura 3.8 - Índice de perdas na distribuição das prestadoras de serviços regionais



Fonte: SNIS (2012)

Em um sistema de abastecimento podem ocorrer perdas de águas ao longo de toda sua extensão. Estas perdas podem ser classificadas como reais ou aparentes. Segundo ABES (2013) as perdas reais ou físicas ocorre quando o volume de água disponibilizado no sistema de distribuição pelas operadoras de água não é utilizado pelos clientes, sendo desperdiçado antes de chegar às unidades de consumo. Já as perdas comerciais ou aparentes ocorrem quando o volume utilizado não é devidamente computado nas unidades de consumo, sendo cobrado de forma inadequada.

Após a etapa de quantificação da vazão, o passo seguinte é realizar o dimensionamento do sistema de abastecimento de água e, posteriormente, a rede. Segundo Bezerra e Cheung (2013) os componentes do SAA são compostos pelas seguintes unidades: captação, estação elevatória, estação de tratamento, adução de água, reservação e setor de distribuição. A captação de água, já definida na introdução, possui dispositivos tais como: barragens de nível, grade, comportas e caixas de areia, que auxiliam na retenção de sólidos grosseiros advindos do manancial. A estação elevatória fornece energia para

transportar água quando não é possível realizar o transporte por gravidade. A estação elevatória é composta por um conjunto de bombeamento, tubulações de sucção e recalque. A estação de tratamento de água é um conjunto de unidades com funções específicas, cujo objetivo é tornar própria para o uso humano a água retirada dos mananciais e pontos de captação. As adutoras, tubulações que transportam a água de um nível a outro, podem ser classificadas de acordo com a energia a ser utilizada pelo escoamento, de acordo com o modo de escoamento (conduto livre ou conduto forçado) ou, ainda, com a natureza da água a ser transportada. Levando, posteriormente, a água até os reservatórios apoiados ou elevados, com o intuito de manter a regularidade do abastecimento, para que, finalmente, a água seja conduzida até os pontos de consumo, nas redes de abastecimento. A Figura 3.9 ilustra, de maneira esquemática o transporte da água em suas principais etapas.

Figura 3.9 - Esquema de um sistema convencional de abastecimento de água



Fonte: Tsutiya, 2006.

Segundo Pereira e Condurú (2014), geralmente os reservatórios ficam localizados em pontos estratégicos de uma determinada área de consumo, tais como cotas elevadas ou áreas planas, com o intuito de se melhorar as condições hidráulicas para distribuição de água.

Com a água já tratada no reservatório, a partir de cálculos de vazão e pressão, o último passo é o dimensionamento da rede de distribuição, obtendo-se os valores para os diâmetros e vazões em cada trecho, e as pressões e consumos requeridos em cada nó. Para o dimensionamento da rede, é possível a utilização de métodos tradicionais tais como: Hardy-Cross e o seccionamento, ou ainda o uso de programas, mais precisos e ágeis, como o LENHSNET, método incluso no programa EPANET, em sua versão traduzida para o português. Segundo Gomes (2009, p.17) “O EPANET é um programa de computador que

permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água em redes de distribuição pressurizada.”.

Em seu relatório sobre o controle de redução de perdas a ABES (2015) apresentou algumas definições importantes acerca de diversos elementos de um SAA, dentre eles, podem-se citar:

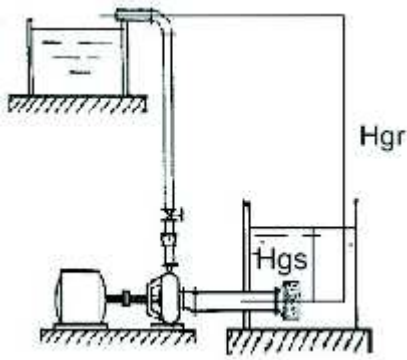
- *Booster*: Equipamento eletromecânico inserido nas adutoras ou nas redes de distribuição de água para elevar a pressão;
- Demanda de Água: Necessidade de aporte de água tratada em uma área abastecida ou passível de suprimento, resultante da soma de todos os usos conhecidos e estimados, bem como das perdas reais no sistema de abastecimento de água;
- VRP - Válvula Redutora de Pressão: Equipamento automático inserido na rede de distribuição para reduzir as pressões de operação em determinada área;
- Zoneamento Piezométrico: Compartimentação da rede de distribuição de água em zonas de pressão, a partir das variações altimétricas do terreno, de maneira a que as pressões operacionais fiquem dentro dos limites máximo e mínimo definidos em Norma.

Além dos elementos acima citados, outro importante equipamento a ser tratado em SAA são os conjuntos motor-bomba. A partir da variação da frequência de rotação do motor, é possível variar o volume de água bombeado, alterando a pressão, conforme a necessidade do sistema. Os conjuntos motor-bomba (CMB), *booster* (BST) e as válvulas redutoras de pressão (VRP), serão os principais elementos de um sistema hidráulico abordados neste trabalho, para tanto, faz-se necessário um conhecimento mais detalhado acerca desses equipamentos.

3.4.1 Bombas

As bombas são equipamentos capazes de converter trabalho mecânico em diversos tipos de energia (pressão, cinética e potencial). Elas podem ser divididas em quatro classes: centrífugas (foco desse trabalho), rotativas, de êmbolo e de poço profundo (AZEVEDO NETO, 1998). Os sistemas de bombeamento são compostos, em sua maioria, por um CMB, tubulação de recalque e tubulação de sucção. A Figura 3.10 ilustra um sistema de bombeamento, com o CMB trabalhando afogado.

Figura 3.10 - CMB afogado



Nessa configuração o CMB é instalado em um plano abaixo do nível da água do reservatório inferior. Sendo a H_{gr} a altura geométrica de recalque e H_{gs} , a altura geométrica de sucção. A energia que a bomba fornece a água para conseguir elevar sua altura de um ponto a outro, é chamada de altura manométrica. A altura manométrica H pode ser compreendida como a soma das alturas geométricas de recalque e sucção, bem como a soma das perdas de carga que ocorrem em seu transporte. A Equação 3.5 traz o cálculo de H .

$$H = H_{gr} + H_{gs} + H_{fr} + H_{fs} + \frac{v^2}{2g} \quad (3.5)$$

Segundo Andrade Filho (2012), a parcela referente à energia cinética ($v^2/2g$), raramente é levado em consideração em redes e tubulações de médias e longas extensões. Dessa forma, esse trabalho também não irá considerar tal termo.

Ainda segundo Andrade e Filho (2012), a configuração ilustrada na Figura 3.15 apresentada deve ser primordialmente empregada, sempre que o sistema assim o permita. Quando o CMB trabalha afogado, algumas vantagens podem ser observadas, tais como:

- A bomba se encontra sempre escorvada, o que dificulta a presença de bolhas de ar;
- As pressões na tubulação de sucção são sempre positivas, visto que a ausência de vácuo impede a entrada de ar na aspiração;
- Não há a necessidade da instalação de válvulas que permitem apenas um sentido de escoamento.

A escolha do CMB varia de acordo com as características do sistema. Os principais valores que concernem na sua escolha estão na sua altura manométrica e

correspondente vazão. Ao se relacionar a altura manométrica com a vazão, é possível traçar a curva característica da bomba, no entanto essa informação já é fornecida pelo próprio fabricante. Para o traçado da curva característica da bomba, a altura manométrica pode ser calculada a partir da Equação 3.6, a equação de Bernoulli.

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \quad (3.6)$$

Desta forma é possível determinar o Ponto de Máxima Eficiência (PME), ou seja, o ponto onde a bomba irá apresentar o seu melhor desempenho.

Além da curva característica da bomba, fornecida pelo fabricante, o projetista deve traçar as curvas do sistema, encontrando assim o ponto de trabalho. Para o traçado dessa curva, basta fixar o diâmetro e material ad tubulações de sucção e recalque. A partir daí mede-se algumas vazões e a altura manométrica para cada uma dessas vazões. Jogando então em um gráfico que relaciona em seu eixo das abscissas as vazões e nas ordenadas, as perdas de cargas somadas às alturas geométricas. A ligação dos pontos formados da origem a curva do sistema.

A curva característica do sistema relaciona a vazão e altura manométrica conforme a capacidade de transporte das tubulações. Enquanto que a curva da bomba relaciona a vazão e altura manométrica conforme a capacidade da bomba. O ponto de trabalho é gerado ao se sobrepor as duas curvas. Prioriza-se a escolha da bomba em que seu PME coincida com seu ponto de trabalho.

Quando esses dois pontos não coincidem, é razoável a mudança de alguns parâmetros para que o sistema possa atuar de maneira eficiente. Um dos métodos mais utilizados é a variação da velocidade de rotação da bomba. Visto que, para cada velocidade de operação, obtém-se uma diferente curva característica da bomba, adequando, assim seu PME ao ponto de trabalho do sistema. Para se variar a rotação de um CMB, utilizam-se os conversores ou inversores de frequência (GOMES, 2012).

3.4.2 Válvulas Redutoras de Pressão

Segundo Alencar (2012), as válvulas são importantes dispositivos instalados em sistemas de bombeamento de fluidos. São utilizadas com o intuito de proteger ou isolar

bomba ou trechos da rede, no controle de pressões, no direcionamento do escoamento, etc. No entanto, ressalta-se que não é viável a instalação desordenada desse equipamento, visto seu alto custo, além da considerável perda de carga que introduz no sistema.

As válvulas podem ser classificadas segundo seu princípio de acionamento (SENAI, 1999):

- Manual: operação de abertura e fechamento é realizada por um operador da rede;
- Auto – Reguladora: abertura e fechamento são realizados utilizando a energia contida no fluido;
- Controle: o acionamento, fechamento ou abertura, para qualquer grau de variação, é realizado através de sinais provenientes dos controladores.

Conforme a necessidade e os parâmetros de operação de um sistema de abastecimento existem uma série de válvulas disponíveis no mercado, tais com:

- a) Válvulas de bloqueio: são destinadas a interrupção ou manutenção do fluxo, isto é, trabalham totalmente aberta ou totalmente fechada. Como exemplo, podem-se citar: válvulas de gaveta, macho, esfera e comporta;
- b) Válvulas de regulação: são destinadas para o controle do escoamento e pode trabalhar em qualquer ângulo de abertura. São elas: válvulas tipo globo, agulha, controle, borboleta e diafragma;
- c) Válvulas que regulam o fluxo em apenas um sentido: válvulas de retenção, retenção e fechamento, e válvulas de pé;
- d) Válvulas que controlam a pressão a montante: válvula de segurança e de alívio, contrapressão em excesso de pressão;
- e) Válvulas que controlam a pressão a jusante: válvulas redutoras e reguladoras de pressão e quebra-vácuo.

Ainda segundo Alencar (2012) as válvulas redutoras de pressão (VRP) são as mais utilizadas em sistemas de abastecimento e distribuição de águas. Elas funcionam no controle da pressão a jusante, diminuindo o aumento de pressão em períodos de menores demanda. É importante salientar que as VRP introduzem uma perda de carga considerável no sistema, e seu uso deve ser realizado de modo a garantir a máxima eficiência de operação da rede. O autor ainda faz um levantamento sobre os principais tipos de VRP utilizadas nos SAA.

- VRP com pressão de saída fixa, sem controlador eletrônico: recomendada para sistemas que não apresentam variação significativa da demanda e reduzida perda de carga;
- VRP com pressão proporcional sem controlador eletrônico: a pressão de jusante é proporcional à pressão de montante;
- VRP com modulação por tempo: utilizada em sistemas com demanda regular, porém elevada perda de carga;
- VRP com modulação por vazão: utilizada em sistemas que apresentam grande perda de carga e alta variação na demanda.

A bancada utilizada nesse trabalho apresenta três válvulas de controle, no entanto apenas a CV-1 é utilizada como VRP.

3.5 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA AUTOMATIZADOS

As redes de abastecimento de água podem ser supridas por reservatórios apoiados, elevados ou uma combinação dos dois, conforme a demanda e configuração piezométrica da rede. Em muitas locais, é difícil encontrar uma região, abastecida por um conjunto de reservação, onde seu terreno seja plano ou mesmo obedeça a um padrão em relação a sua elevação. Por isso se faz necessária a utilização de reservatórios apoiados e elevados para garantir pressão suficiente ao longo de toda a rede. Um sistema automatizado, que comporte uma zona de alta e baixa pressão, possui mais estabilidade de abastecimento, garantindo uma pressão necessária ao longo de todos os seus pontos de consumo.

A demanda de uma determinada região não é uniforme ao longo de todo um ano, ou mesmo ao longo de todo o dia. Há horários ou períodos em que uma maior vazão é solicitada, em meses ou dias mais quente, por exemplo. Neste sentido, a utilização de sistemas automatizados que controlem de forma segura a pressão na rede pode ser visto como uma excelente ferramenta para a manutenção e operação das redes de abastecimento.

A utilização de controles irá garantir não apenas a permanência dos serviços de abastecimento nos horários de maior consumo, como também irá permitir uma redução nas perdas, oriundas de excesso de pressão ao longo de toda a rede.

Em sistemas de abastecimento, onde as perdas ao longo da rede se mostram significativas, a aplicação de controle que regule parâmetros tais como vazão e pressão, favorece a econômica através da redução da pressão nos momentos de menor consumo.

Esta economia ocorre através da diminuição das perdas ao longo da rede, com a diminuição da pressão e, consequentemente, da vazão nos horários onde o consumo é reduzido.

Segundo Trojan (2006), a automação em sistemas de abastecimento de água ainda é bastante pontual, não por falta de comprovação técnico-científica, que garante a redução dos gastos e das perdas, mas por escassez de investimentos na área. Ele ainda destaca as principais vantagens em se investir na automação desses sistemas: “melhoria do tratamento de água através do monitoramento e controle em tempo real, redução de custos operacionais, através do gerenciamento de energia elétrica consumida e controle de perdas físicas no sistema”.

A implantação e operação de sistemas automatizados de abastecimento de água exigem a verificação de alguns requisitos, tais como cita Tsutiya (2006):

- Funcionais: funções de supervisão e controle do sistema, quais os elementos a serem controlados, quais as entradas do sistema, qual o tratamento realizado e quais saídas devem produzir, quais os estados internos do sistema;
- Não funcionais ou tratamento de falhas: comportamento do sistema nos casos de falhas de seus elementos;
- Temporais: restrições temporais, funções determinísticas no tempo, tempo de validade de dados;
- Segurança: funções para evitar riscos de danos à planta, aos operadores, aos consumidores devido a falhas do sistema ou erros de operação;
- Interface com equipamentos: características de sinais e comandos, especificação de entrada e saída;
- Operação: interface com a operação e manutenção, disponibilidade e formas de apresentação de informações do processo e do sistema de automação, percepção do estado do processo, telas gráficas e navegação.

Ainda segundo Tsutiya (2006), o processo de automação em SAA pode se dar por três maneiras distintas:

- Automação *top-down*: automação realizada em uma única fase, para todo o sistema, instalando apenas um controle, interligando toda a rede automatizada. Recomenda-se para construção de novas instalações;
- Automação *bottom-up*: automação realizada em etapas, onde cada setor do sistema terá um controle de operação;

- Abordagem mista: o projeto desenvolvido é para um único sistema, no entanto, a implantação necessita ser realizada em etapas, de acordo com a disponibilidade financeira dos responsáveis.

A automação surge como uma ferramenta importante para auxiliar na redução do controle de perdas, garantindo o abastecimento em todos os pontos de consumo. A partir de um sistema automatizado é possível monitorar a operação, em tempo real de todos os elementos que compõem a rede.

Quando o SAA já se encontra automatizado, torna-se possível a utilização de controladores com o intuito de reduzir, de maneira eficiente e otimizada o consumo de água e energia elétrica. Os controladores podem ser aplicados em pontos estratégicos para o monitoramento e controle da pressão, visto que este é um parâmetro imprescindível para a garantia de abastecimento em todos os pontos.

Em sistemas cujas zonas de pressões são diferenciadas por suas cotas topográficas, são utilizadas válvulas redutoras de pressões, *booster* e bombas. A aplicação de controladores nesses pontos irá garantir um sistema operacionalizado de maneira eficiente, visto que será possível o controle da pressão, conforme a variação e necessidade de demanda de água da rede (FONSECA, 2011).

3.6 CONCLUSÕES

A automação representa não apenas um avanço, como uma necessidade para os sistemas, principalmente os de grande porte, que apresentam um grande volume de produção. Aliar ao sistema de monitoramento, um sistema de controle capaz de realizar manobras operacionalizadas com o intuito de reduzir as perdas de água e o consumo de energia elétrica torna-se imprescindível nos dias de hoje.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido a partir do seguimento de uma série de etapas que culminaram na obtenção dos resultados necessários para a validação da pesquisa. A seguir serão explicitados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento dos testes.

4.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA

Como já citado anteriormente, esta pesquisa foi desenvolvida em uma bancada experimental do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS/UFPB.

O Sistema Automatizado de Distribuição de Água (SADA) é uma bancada experimental pressurizada que simula um sistema de abastecimento de água, conforme Figura 4.1.

Figura 4.1 - Rede experimental SADA



O SADA simula um sistema de distribuição de água setorizado, composto por duas zonas de pressão, cujos ramais de descarga possuem cotas topográficas diferenciadas. A zona baixa possui cota de 1,50 m e a zona alta uma cota de 6,50 m. Entende-se por zona baixa todo o trecho percorrido continuamente (sem ramificações) desde o reservatório de alimentação (RNF) até o ramal de descarga RD-1. A zona alta é representada pelo trecho percorrido do reservatório até o ramal de descarga RD-2.

A estação elevatória desse sistema é composta por um conjunto motor bomba (CMB), com motor de indução trifásico, 220/380 V de 3 cv. O acionamento do CMB é realizado através de um conversor/inversor de frequência. Quando associado a um sistema de controle automático o conversor permite manter as pressões de serviço em níveis constantes pré-estabelecidos, adequando, assim, o funcionamento da elevatória às frequentes variações de demanda ocasionalmente ocorridas. Desta forma, evitam-se sobrepressões e gastos energéticos dispensáveis.

Além do CMB (ver Figura 4.2), o sistema também apresenta um *booster* (ver Figura 4.3), instalado no abastecimento da zona alta, seu funcionamento varia, conforme as

variações das demandas. O acionamento do *booster* também é realizado através de um conversor/inversor de frequência. As informações técnicas a respeito do *booster* e do CMB estão enunciadas no Quadro 4.1. Com respeito aos inversores de frequência (ver Figura 4.4), associados a cada um dos equipamentos supracitados, as informações são apresentadas no Quadro 4.2.

Figura 4.2 - Conjunto Motor Bomba



Figura 4.3 - Sistema de Elevação booster



Quadro 4.1 - Especificações técnicas do *booster* e do CMB

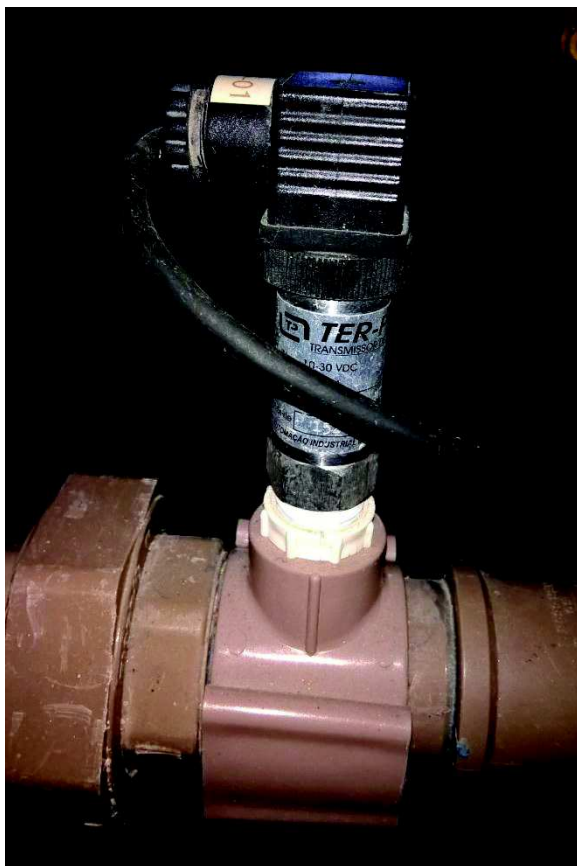
Especificações	Booster	Especificações	CMB
Fabricante	KSB	Fabricante	Schneider
Modelo	Megaline	Modelo	BC- 21R
DN de Operação	DN 32 até 150	DN de Recalque	1 1/2"
Vazão	Até 18 m³/h	DN de Sucção	2"
Elevações	até 130 m	Vazão máxima	41,5 m³/h
Temperatura Ambiente	Até 40°C	Vazão mínima	17,5 m³/h
Pressão de sucção máxima	5 bar ou 50,985 mca	Altura mínima	2 mca
Pressão de descarga máxima	10 bar ou 101,97 mca	Altura máxima	23 mca
Rotações	Até 3500 rpm	Rotações	Até 3450 rpm
Potência do motor	3CV	Potência do motor	3 CV
Frequência	Até 60 Hz	Frequência	Até 60 Hz
Diâmetro nominal do rotor	DN 32	Temperatura Ambiente	Até 40°C

Quadro 4.2 - Especificações técnicas do inversor de frequência

Especificações	Inversor de Frequência
Fabricante	WEG - Equipamentos Elétricos S.A.
Modelo	CFW-08
Tensão de alimentação	200-240 V ou 380-480 V
Faixa de frequência	3 Hz - 66 Hz
Corrente nominal	1,6 A - 33,0 A
Temperatura ambiente	0°C - 40°C
Umidade relativa do ar	5% - 90%
Altitude máxima	1000 m

Ao longo da rede estão dispostos cinco transdutores de pressão (PT-1, PT-2, PT-3, PT-4 e PT-5), responsáveis pelo monitoramento das pressões em seus pontos de instalação, conforme ilustrado na Figura 4.4. Além de dois medidores de vazão (FT-1 e FT-2), ilustrados na Figura 4.5, que tem por objetivo monitorar a vazão de serviço. Os Quadros 4.3 e 4.4 apresentam as informações técnicas acerca dos transdutores de pressão e vazão, nesta ordem. Neste trabalho, a pressão dinâmica no ponto de atuação do transdutor PT-3 foi escolhida como referência de monitoramento e controle para a zona de baixa pressão, assim como o FT-1 para monitoramento da vazão. Para a zona de alta pressão, foi utilizado o transdutor PT-5 e FT-2 para o monitoramento e análise de pressões e vazões, respectivamente.

Figura 4.4 - Transdutores de pressão



Quadro 4.3 - Especificações técnicas dos transdutores de pressão

Especificações	Transdutor de Pressão
Fabricante	ACROS
Modelo	TP-ST18
Corrente de alimentação	4 mA – 20 mA
Voltagem	0V - 10V
Temperatura ambiente	40 °C
Frequência	0 Hz - 60 Hz
Pressão	0 mca - 40 mca

Figura 4.5 - Medidores de vazão



Quadro 4.4- Especificações técnicas dos medidores de vazão

Especificações	Medidor de Vazão
Fabricante	INCONTROL
Modelo	VMS038BU22040
Série	VV16897
Sinal de Saída	Pulso 4 A – 20 mA
Alimentação	24 V em CC
Faixa de Velocidade	0,3 a 10,0 m/s
Diâmetros Nominais	1/2” a 4”
Temperatura Normal de Operação	50°C
Tipo	Eletromagnéticos de fluxo

Para atuar sobre a rede, provocando as interferências necessárias nos parâmetros hidráulicos, existem duas válvulas proporcionais. A válvula CV-2, localizada nas proximidades do ramal de descarga da zona baixa, tem por objetivo emular a variação da vazão demandada através da mudança do seu grau de fechamento. A válvula CV-1,

localizada à entrada da zona de consumo, foi utilizada de maneira a aumentar sua perda de carga, conforme se realize o fechamento ou abertura de sua angulação. A CV-3 representa a simulação de consumo da zona de alta pressão. A Figura 4.6 mostra as válvulas presentes na bancada. A alimentação e a descarga desta bancada experimental são realizadas por meio de reservatórios de fibra de vidro com capacidade de 310 L interligados entre si. O Quadro 4.5 apresenta as especificações técnicas das válvulas redutoras de pressão.

Figura 4.6 - Válvula Redutora de Pressão

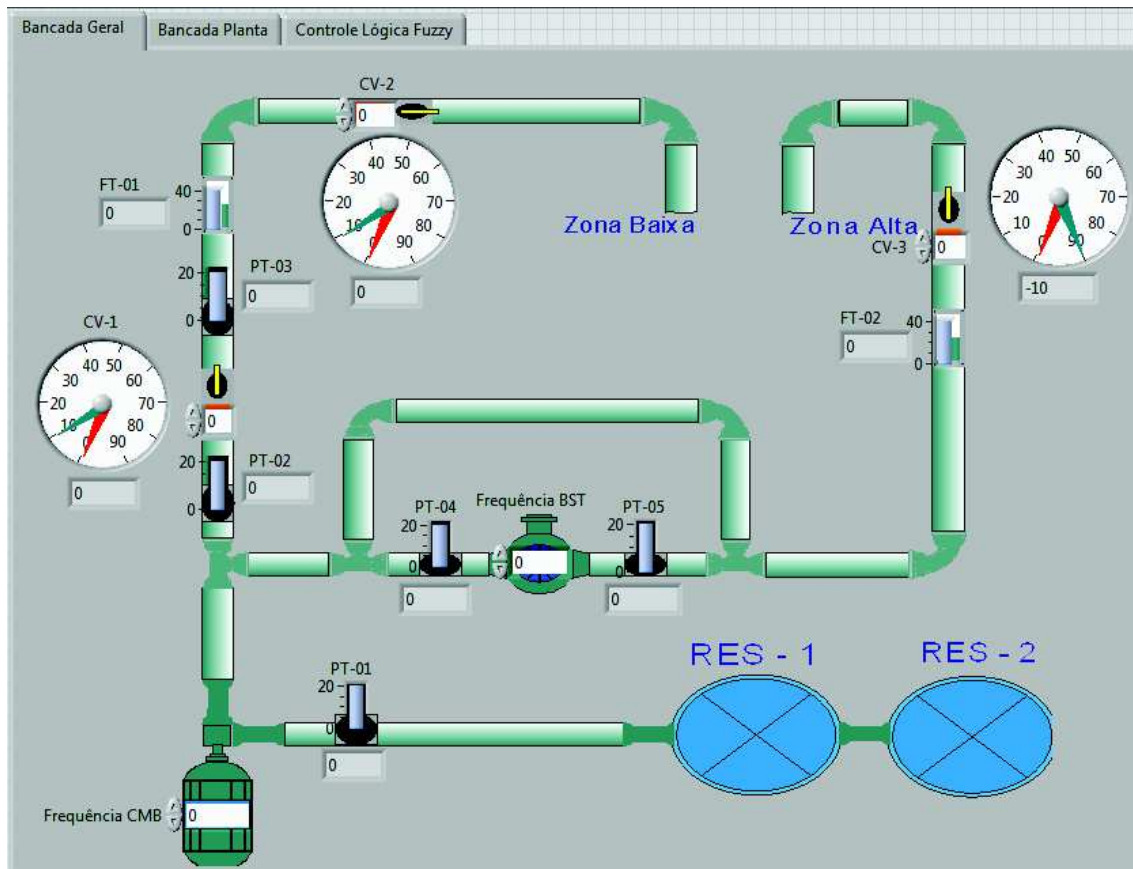


Quadro 4.5 - Especificações técnicas das válvulas redutoras de pressão

Especificações	Válvula Redutora de Pressão
Fabricante	BELIMO
Modelo	ARX24-SR(-T)
Corrente de alimentação	4mA - 20mA
Tensão de alimentação	24V
Temperatura ambiente	-30°C - 40 °C
Frequência	50/60 Hz
Grau de abertura	90°
Grau de fechamento	0°
Tipo	

A leitura dos parâmetros hidráulicos fornecidos pelos sensores e atuadores é realizada a partir da comunicação estabelecida entre a placa de aquisição de dados da *National Instruments* e o software supervisor LabVIEW®. Bem como a execução de ações de comando sobre as válvulas proporcionais e os conversores de frequência. A Figura 4.7 apresenta o *layout* da tela de controle no LabVIEW®.

Figura 4.7 - Apresentação da bancada no LabVIEW ®



4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa para realização desse trabalho foi a caracterização da planta na qual o sistema de controle *fuzzy* foi aplicado. Para tanto, foi necessário um estudo acerca dos dois principais elementos de controle: o conjunto motor bomba (CMB) e a válvula redutora de pressão (VRP-1).

4.3.1 Estudo da Perda de Carga da VRP (CV-1)

Foi realizado um estudo para analisar a perda de carga da VRP, ou CV-1, variando seu ângulo de fechamento, salientando que em 0° a válvula se encontra aberta e em 90° a válvula se encontra fechada. Quanto mais próximo a 90° for seu ângulo de fechamento, maior a perda de carga introduzida no sistema. Para cada variação de angulação foi feita a leitura das pressões nos pontos PT-2 e PT-3, a perda de carga (hf) é

dada pela diferença entre esses dois pontos. Depois de calculada a perda de carga (h_f), utiliza-se a Equação (4.1), equação do cálculo de perdas localizadas, para a determinação do coeficiente de perdas K .

$$H_f = \frac{K \times v^2}{2 \times g} \quad (4.1)$$

O objetivo é a criação de três gráficos:

- Gráfico 4.1: relaciona o ângulo de fechamento da válvula com as vazões em cada zona (ZB e ZA);
- Gráfico 4.2: relaciona o ângulo de fechamento da válvula com a perda de carga (h_f);
- Gráfico 4.3: relaciona o ângulo de fechamento da válvula com o coeficiente de perda de carga (k).

A velocidade, dada por v , é calculada relacionando a vazão com a área da tubulação, pela Equação da continuidade (4.2).

$$Q = V \times A \quad (4.2)$$

A área calculada é referente à tubulação de PVC com diâmetro interno de 38 mm. Os dados obtidos a partir da medição dos parâmetros e do cálculo de K estão relacionados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Análise do coeficiente de perdas – K

Ângulo da Válvula	Área (m²)	FT-1 (m³/h)	FT-2 (m³/h)	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)	PT-2 (mca)	PT-3 (mca)	hf (mca)	K
0	0,00113411	9,80	3,20	13,00	0,0130	11,463	7,70	7,20	0,50	0,0747
10	0,00113411	9,50	3,50	13,00	0,0130	11,463	7,80	7,10	0,70	0,1045
20	0,00113411	8,10	5,10	13,20	0,0132	11,639	8,30	6,10	2,20	0,3186
30	0,00113411	6,60	6,80	13,40	0,0134	11,815	9,40	4,90	4,50	0,6324
40	0,00113411	3,80	9,40	13,20	0,0132	11,639	11,40	3,80	7,60	1,1007
50	0,00113411	2,90	11,80	14,70	0,0147	12,962	13,80	2,90	10,90	1,2729
60	0,00113411	2,20	13,10	15,30	0,0153	13,491	15,10	2,90	12,20	1,3152
70	0,00113411	0,90	14,20	15,10	0,0151	13,314	17,10	3,50	13,60	1,5052
80	0,00113411	0,30	14,60	14,90	0,0149	13,138	17,10	3,50	13,60	1,5459
90	0,00113411	0,00	14,80	14,80	0,0148	13,050	17,40	3,50	13,90	1,6014

Gráfico 4.1- Relação do ângulo de abertura da CV-1 com a vazão das duas zonas de pressão

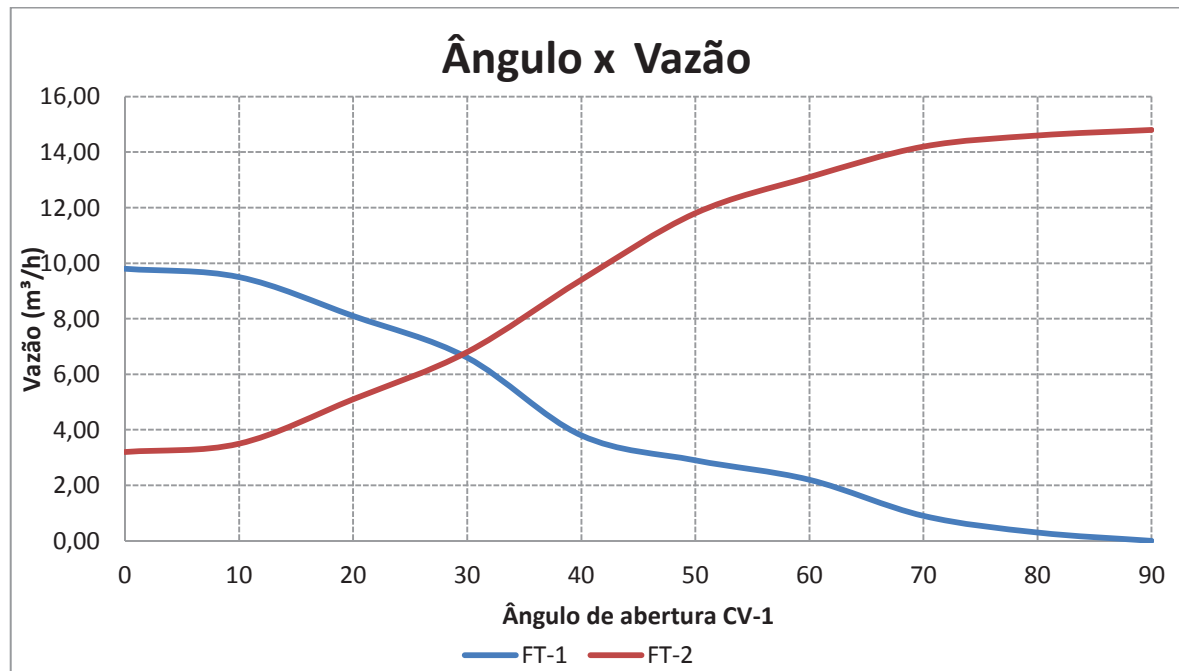


Gráfico 4.2 - Relação entre o ângulo de abertura da CV-1 com perda de carga (h_f)

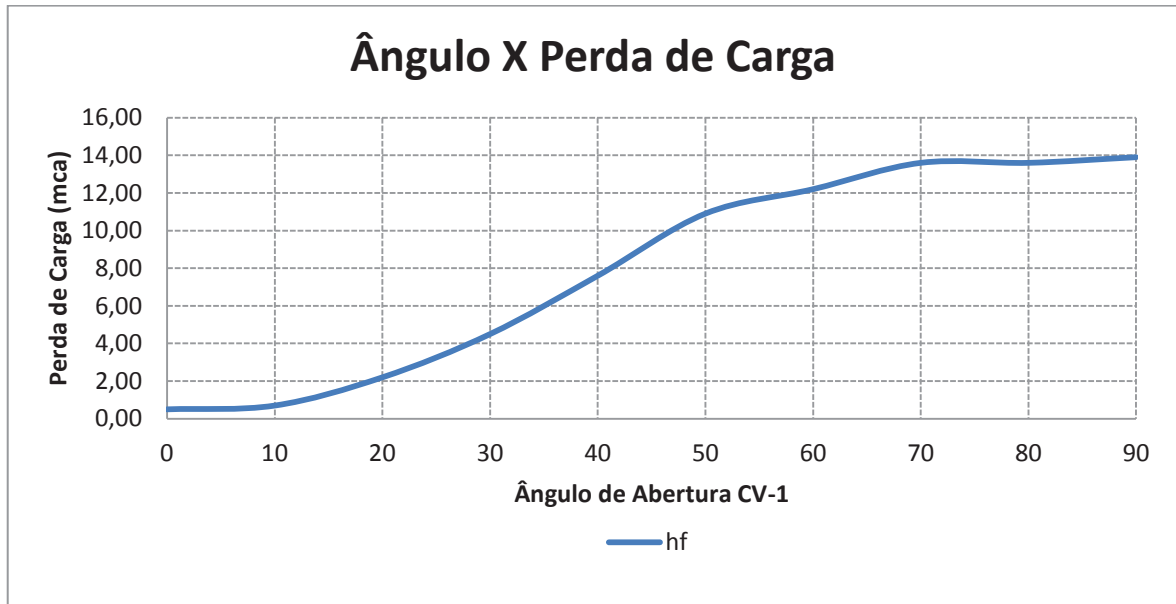
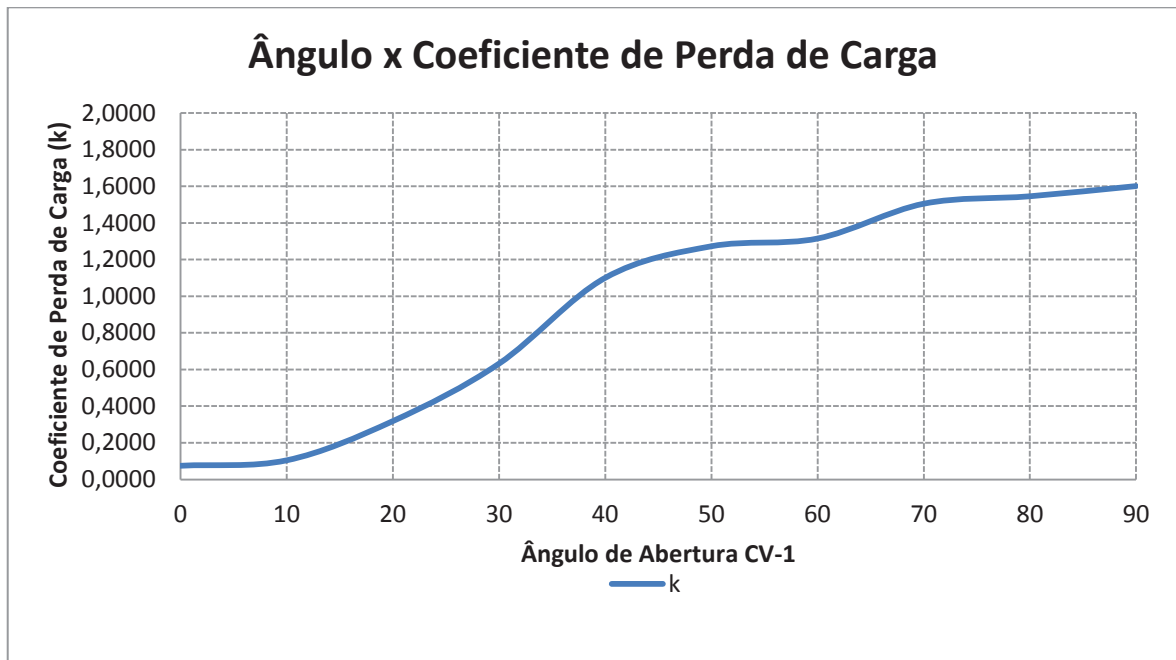


Gráfico 4.3 - Relação entre o ângulo de abertura da CV-1 com o coeficiente de perda de carga (k)



4.3.2 Estudo do CMB

A análise do sistema de bombeamento da bancada é realizada a partir do traçado das curvas do sistema e da curva da bomba. Inicialmente foram feitos os testes para o

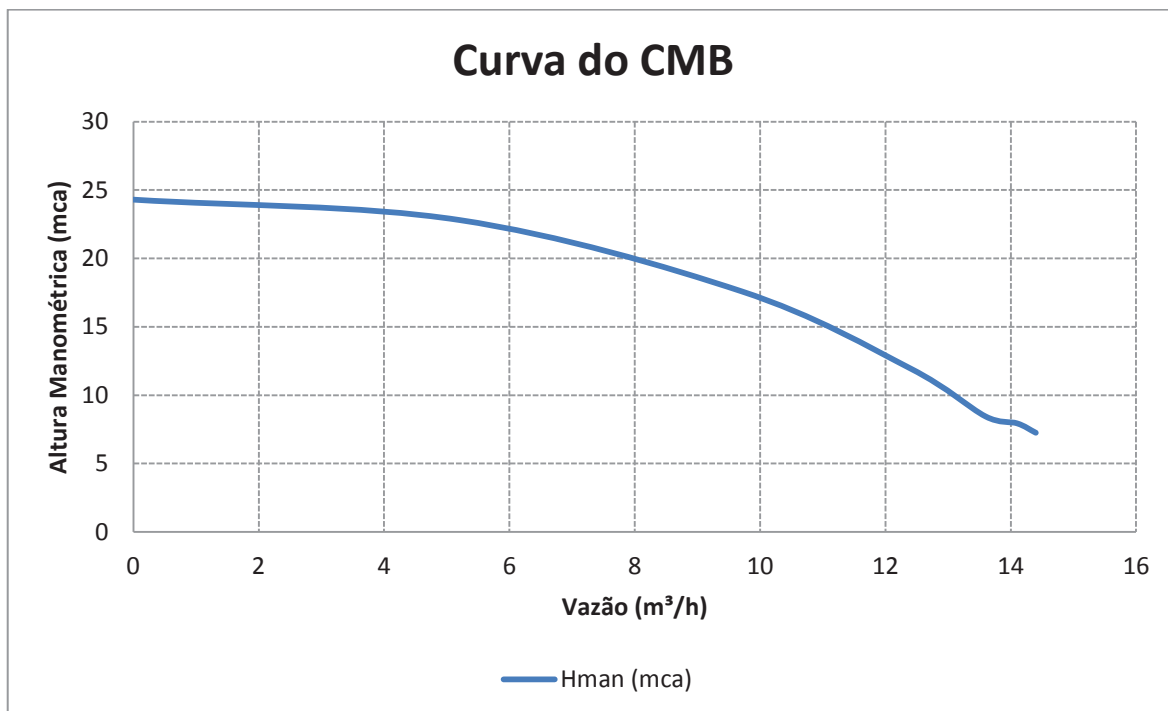
traçado da curva da bomba. Para tanto, faz-se necessário relacionar a altura manométrica, dada diretamente pela diferença entre PT-2 e PT-1, com a vazão medida nas duas zonas de pressão. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Dados referentes ao traçado da curva da bomba

Ponto	FT-1 (m³/h)	FT-1 (l/s)	FT-2 (m³/h)	FT-2 (l/s)	Vazão Total (m³/h)	PT-1 (mca)	PT-2 (mca)	Hman (mca)
1	11,30	0,011	3,10	0,0031	14,40	0,45	7,70	7,25
2	9,80	0,010	4,30	0,0043	14,10	0,46	8,40	7,94
3	8,10	0,008	5,50	0,0055	13,60	0,46	8,90	8,44
4	5,50	0,006	6,90	0,0069	12,40	0,45	12,40	11,95
5	4,80	0,005	4,90	0,0049	9,70	0,60	18,20	17,60
6	2,30	0,002	2,90	0,0029	5,20	1,20	24,01	22,81
7	0,00	0,000	0,00	0,0000	0,00	2,50	26,80	24,30

Foram determinados 7 pontos de variação de consumo, para cada ponto houve diferentes registros de vazão e pressão, conforme mostrado no Gráfico 4.4. A variação da demanda é feita inicialmente com todas as válvulas e registros abertos, sendo posteriormente fechados de maneira regulada, para cada consumo diferenciado induzido.

Gráfico 4.4 - Curva do CMB

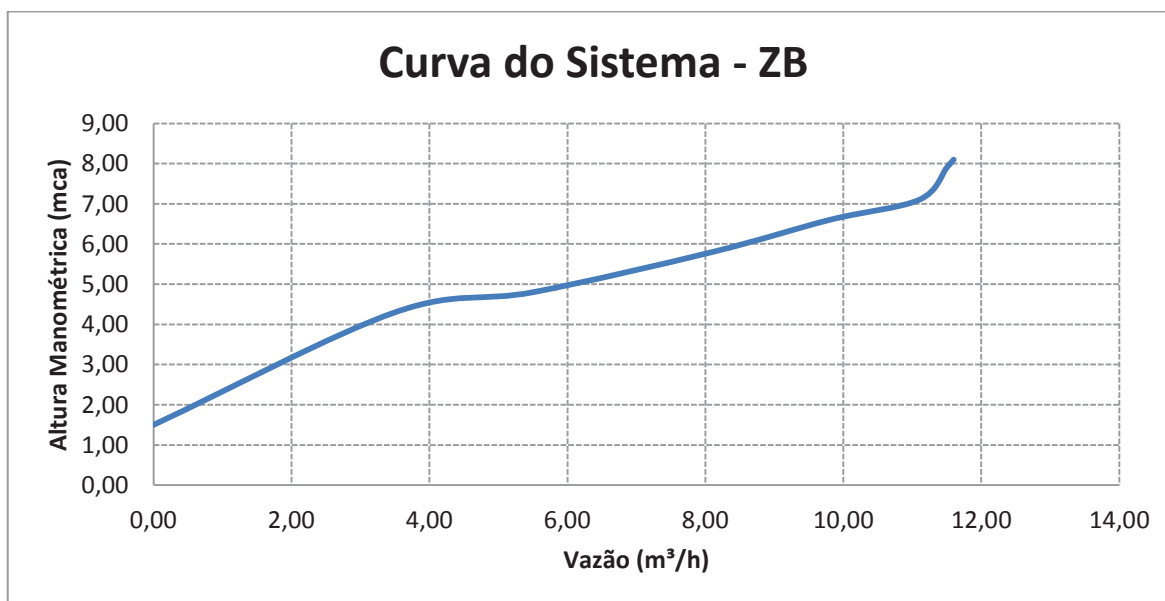


Além da curva da bomba, é imprescindível o traçado da curva do sistema. Nessa etapa, foram feitas duas curvas, uma para a Zona Alta e outra para Zona Baixa. Foi realizado o estudo da altura manométrica pela vazão para diferentes valores de frequência, em cada uma das zonas de pressão. Para a Zona Baixa, é preciso lembrar que em um dos pontos de operação, a bomba trabalha com vazão zero, ou seja, a pressão registrada será a do PT-1, em seu ponto de *shutt-off*. Nos demais pontos, a relação dada pela altura manométrica foi diretamente medida pela pressão no PT-3. A Tabela 4.3 apresenta o estudo da curva do sistema para a Zona Baixa, bem como o Gráfico 4.5.

Tabela 4.3 - Dados do sistema para a zona baixa

ZONA BAIXA				
Frequência	FT-1 (m³/h)	FT-1 (l/s)	PT-3 (mca)	Hman (mca)
30 Hz	0,00	0,000	1,50	1,50
30 Hz	3,50	0,004	4,30	4,30
35 Hz	5,50	0,006	4,80	4,80
40 Hz	8,10	0,008	5,80	5,80
45 Hz	9,80	0,010	6,60	6,60
50 Hz	11,10	0,011	7,10	7,10
55 Hz	11,50	0,012	7,90	7,90
60 Hz	11,60	0,012	8,10	8,10

Gráfico 4.5 - Curva do Sistema da Zona Baixa



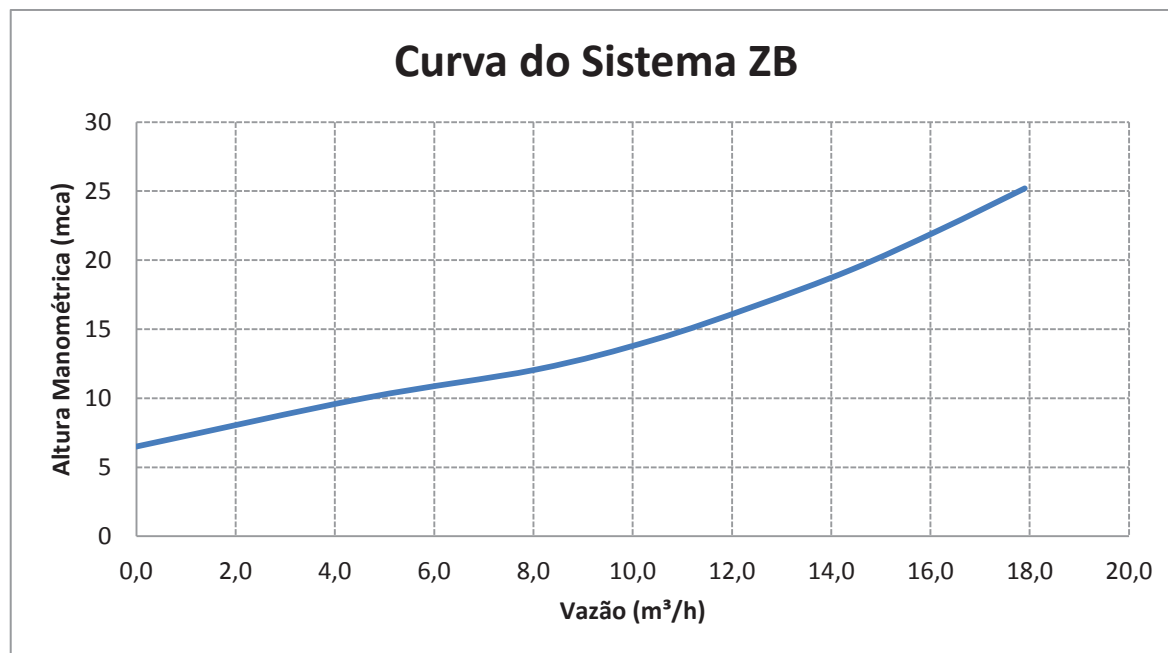
Na Tabela 4.4 encontram-se os dados referentes ao estudo da Zona Alta, para cada um dos cinco pontos de operação. A altura manométrica foi dada pela soma da altura geométrica (6,5 m) adicionada a pressão medida no PT-5.

Tabela 4.4 - Dados para modelagem a curva do sistema da Zona Alta

ZONA ALTA				
Frequência	FT-2 (m³/h)	FT-2 (l/s)	PT-5 (mca)	Hman = PT-5+Hg (mca)
30 Hz	0,00	0,0000	6,50	6,50
30 Hz	4,60	0,0046	10,01	16,31
35 Hz	8,06	0,0081	12,08	18,38
40 Hz	10,40	0,0104	14,20	20,50
45 Hz	12,40	0,0124	16,60	22,90
50 Hz	14,40	0,0144	19,30	25,60
55 Hz	16,19	0,0162	22,20	28,50
60 Hz	17,90	0,0179	25,20	31,50

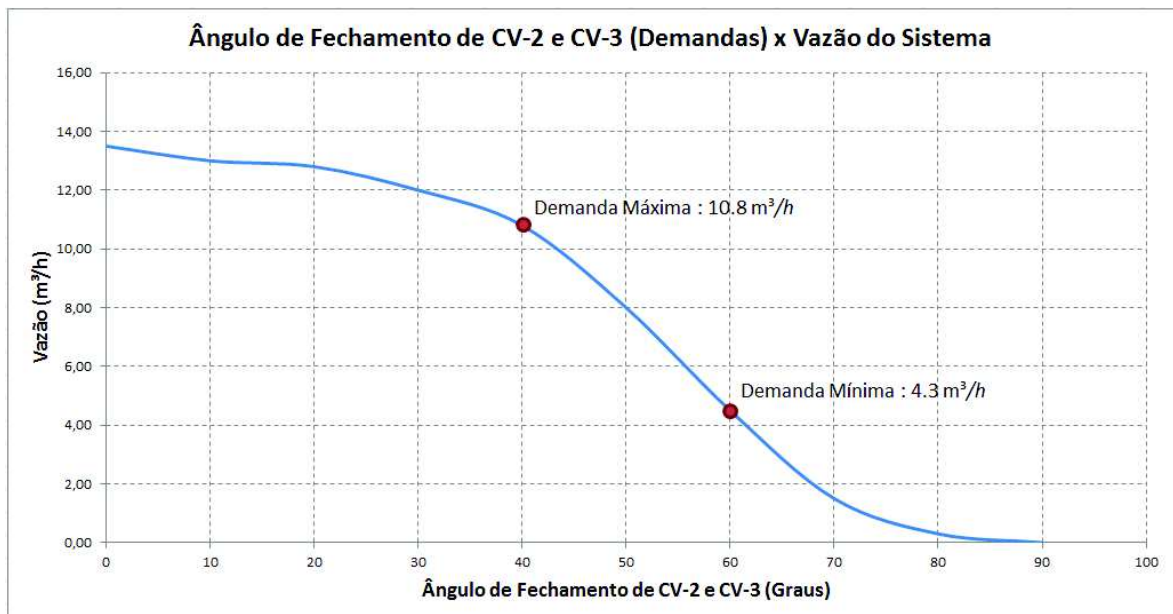
O Gráfico 4.6 apresenta os cinco cenários idealizados para a Zona Alta.

Gráfico 4.6 - Curva do Sistema da Zona Alta



Além dos testes acima, foi realizado um estudo acerca da demanda nas duas zonas de pressão. Essa variação ocorre a partir da modificação da angulação das válvulas CV-2 e CV-3, para a zona baixa e zona alta, respectivamente. O experimento proposto foi desenvolvido a partir da seguinte configuração: acionou-se o CMB a uma frequência máxima de 60 Hz, a CV-1 permaneceu totalmente aberta, ou seja, a 0°, e as CV-2 e CV-3 tiveram seus ângulos alterados em 2° e 2°. O gráfico 4.7 representa a variação da demanda na CV-2 conforme a realização do fechamento de angulação da válvula.

Gráfico 4.7- Comportamento da vazão do sistema a partir da variação da angulação da CV-2 e CV-3



A partir da análise do Gráfico 4.7 é possível observar que as variações mais bruscas de vazões ocorrem entre 40° e 60°. Desta forma, optou-se por estabelecer como limite de máxima demanda, as CV-2 e CV-3 em 40°, e como mínima demanda, CV-2 e CV-3 em 60°.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE *FUZZY*

Como exigência para implantação da lógica *fuzzy* em um controlador, o conhecimento do comportamento do sistema em diversas situações de operação é de fundamental importância para elaboração precisa das regras *fuzzy*. Na etapa seguinte, com

o auxílio da ferramenta LabView® foi realizada a criação do conjunto de regras para desenvolvimento do controle.

Para fins de comparação, foram idealizados dois controladores: o primeiro irá trabalhar com o sistema descentralizado, controlando separadamente cada uma das variáveis de controle. E o segundo, um sistema centralizado, que irá atuar sozinho no controle da CV-1 e do CMB ao mesmo tempo. O primeiro controle serão dois sistemas MISO, ou seja, múltiplas entradas e uma única saída, aplicada em cada uma das zonas de pressão. Para a zona baixa, as variáveis de entrada determinadas foram o erro, ou seja, a diferença entre o set point estabelecido e o valor registrado da pressão, no PT-3; e a derivada da pressão, um delta que relaciona a diferença entre dois pontos consecutivos na curva na pressão, com o tempo de amostragem. O valor adotado para o tempo de amostragem entre a medição de cada dado é de 100 ms. Como variável de saída obtém-se a angulação da CV-1.

O segundo sistema MISO, foi aplicado na zona alta. As variáveis de entrada determinadas foram o erro, ou seja, a diferença entre o set point estabelecido e o valor registrado da pressão, no PT-5; e a derivada da pressão, um delta que relaciona a diferença entre dois pontos consecutivos na curva na pressão, com o tempo de amostragem. O valor adotado para o tempo de amostragem entre a medição de cada dado é de 100 ms. Como variável de saída obtém-se a frequência do CMB.

O segundo controlador será aplicado em um sistema MIMO, ou seja, múltiplas entradas e múltiplas saídas e irá atuar sozinho no controle da angulação da válvula na CV-1 e da frequência do CMB. As variáveis de entrada do sistema serão a diferença entre as pressões no PT-5 e PT-3, e o erro, ou seja, a diferença entre o set point estabelecido e o valor registrado da pressão, no PT-5. Como variáveis de saída, tem-se o grau da CV-1 e a frequência do CMB. Trabalhando, desta forma, de maneira centralizada.

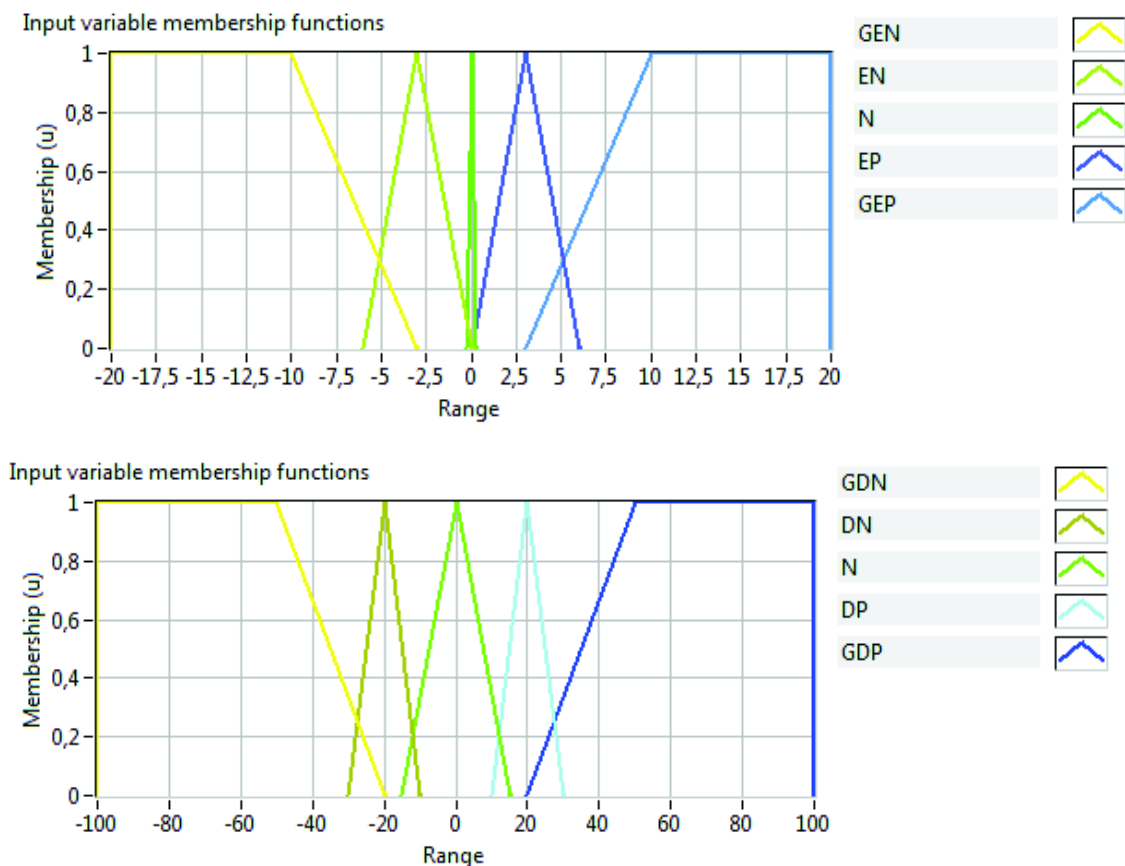
4.4.1 Controle *fuzzy* em um Sistema Descentralizado

Como o objetivo do controlador é garantir que as pressões nas zonas altas e baixas sejam 16,5 mca e 11,5 mca, respectivamente, o controlador irá atuar no CMB para pressurizar a ZA e a CV-1 para garantir as pressões de serviço na ZB. Os valores escolhidos para o set point em consideração a cota topográfica das duas zonas, uma

elevação de 6,5 m na ZA, e 1,5 m na ZB. Portanto, o objetivo é que os dois pontos atinjam os valores mínimos de 10 mca.

Iniciando pela ZA, foram criadas duas variáveis de entrada e uma de saída. Como variáveis de entrada, tem-se: o erro e a derivada da pressão. Como erro entende-se a diferença entre o set-point considerado e a pressão medida no instante de tempo. A variável de saída será dada por um delta de rotação a ser incrementado ou retirado do CMB. A Figura 4.8 traz os gráficos das variáveis de entrada, enquanto que a Figura 4.9 representa a saída do controle.

Figura 4.8 - Variáveis de entrada do controle descentralizado para a ZA



Onde:

GEN: Grande Erro Negativo

EN: Erro Negativo

N: Erro Normal

EP: Erro Positivo

GEP: Grande Erro Positivo

GDN: Grande Derivada Negativa

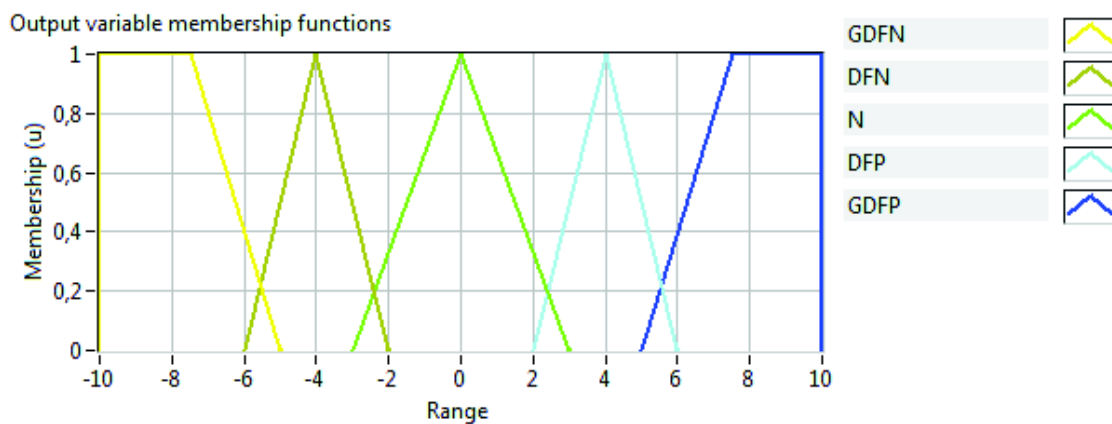
DN: Derivada Negativa

N: Derivada Normal

DP: Derivada Positiva

GDP: Grande Derivada Positiva

Figura 4.9 - Variável de saída – delta de frequência do CMB



Onde:

GDFN: Grande Delta de Frequência Negativo

DFN: Delta de Frequência Negativo

N: Delta de Frequência Normal

DFP: Delta de Frequência Positivo

GDFP: Grande Delta de Frequência Positivo

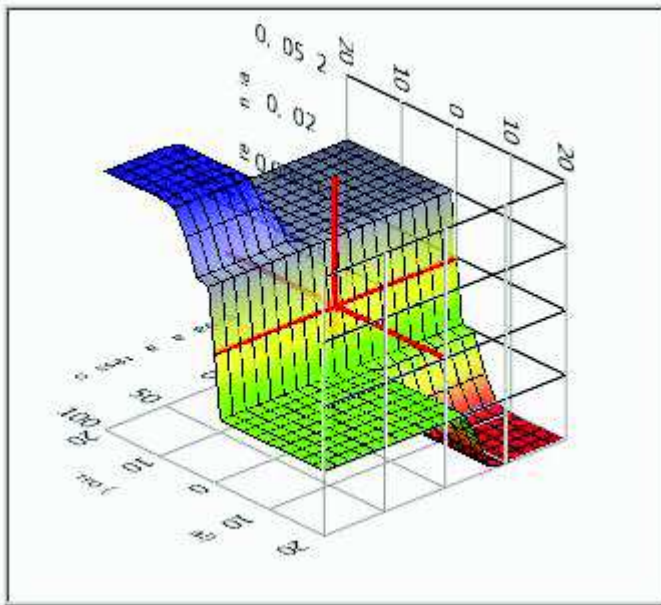
A Tabela 4.5 apresenta as regras que relacionam o erro e a derivada da pressão com o delta de frequência do CMB.

Tabela 4.5- Regras *fuzzy* para controlar a pressão da ZA

Nº	Regra
1	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'GDFN'
2	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
3	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
4	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
5	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
6	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
7	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
8	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
9	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
10	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN'
11	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'N'
12	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'N'
13	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta de Frequência' IS 'N'
14	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'N'
15	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'N'
16	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
17	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
18	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
19	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
20	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
21	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
22	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
23	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
24	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP'
25	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'GDFP'

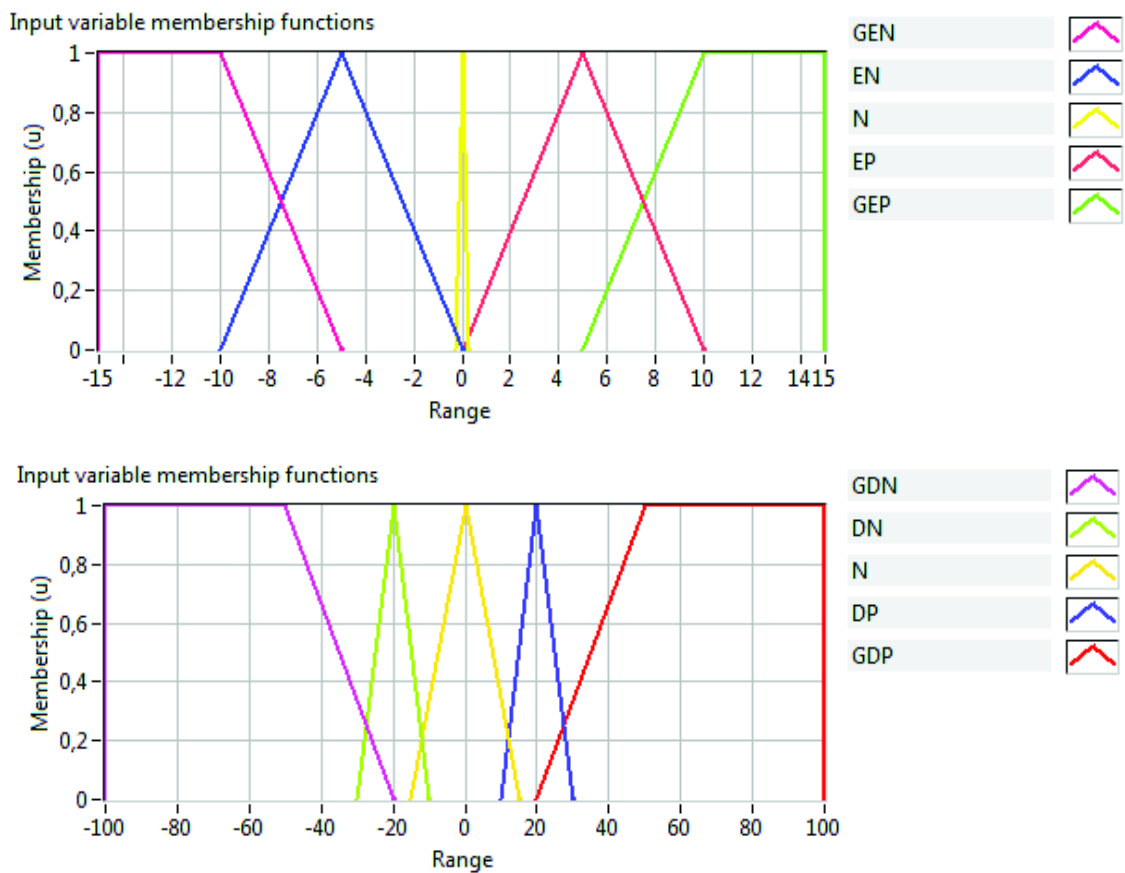
O Gráfico 4.8 abaixo ilustra o comportamento tridimensional da interação das três variáveis estudadas.

Gráfico 4.8 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle para a ZA



O controle da ZB será feito a partir da regulação do grau de fechamento da CV-1. Assim como no controlador da ZA, o sistema possuirá duas entradas e uma saída, sendo as entradas o erro e a derivada de pressão, enquanto que a saída irá regular o grau de funcionamento da CV-1. A Figura 4.10 traz os gráficos das variáveis de entrada, enquanto que a Figura 4.10 representa a saída do controlador ou do sistema de controle.

Figura 4.10 - Variáveis de entrada



Onde:

GEN: Grande Erro Negativo

EN: Erro Negativo

N: Erro Normal

EP: Erro Positivo

GEP: Grande Erro Positivo

GDN: Grande Derivada Negativa

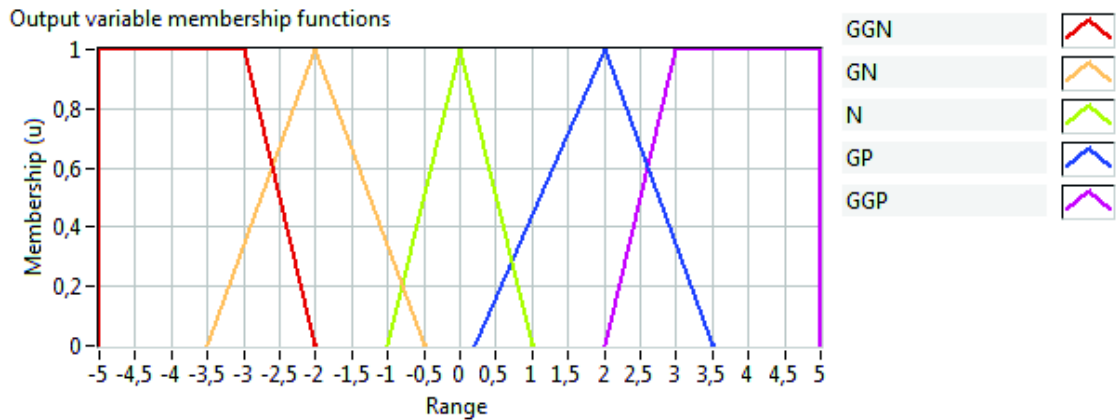
DN: Derivada Negativa

N: Derivada Normal

DP: Derivada Positiva

GDP: Grande Derivada Positiva

Figura 4.11 - Variável de saída



Onde:

GGN: Grande Grau Negativo

GN: Grau Negativo

N: Grau Normal

GP: Grau Positivo

GGP: Grande Grau Positivo

A Tabela 4.6 apresenta as regras que relacionam o erro e a derivada da pressão com o delta do grau da CV-1.

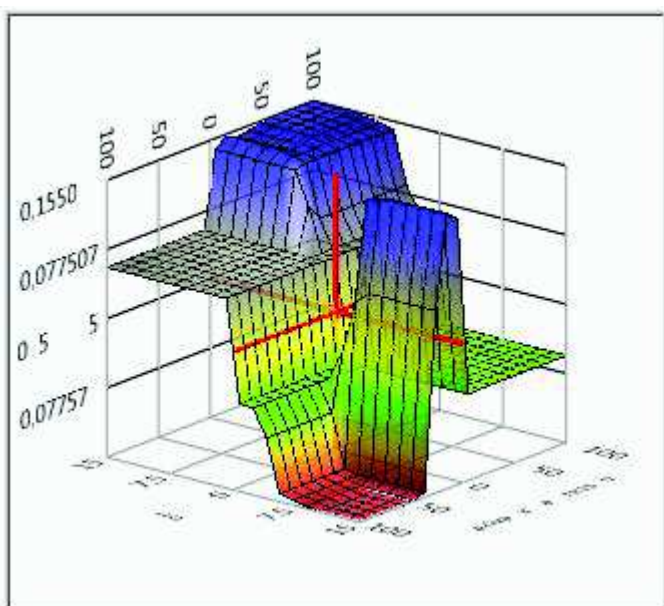
Tabela 4.6 - Regras *fuzzy* para controlar a pressão da ZB

1	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GGP'
2	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
3	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
4	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
5	IF 'Erro' IS 'GEN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
6	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
7	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
8	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
9	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
10	IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GP'
11	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'N'
12	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'N'
13	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN 'Delta Grau CV' IS 'N'
14	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'N'
15	IF 'Erro' IS 'N' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'N'

16	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GN'
17	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DN' THEN "Delta Grau CV" IS 'GN'
18	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'N' THEN' Delta Grau CV' IS 'GN'
19	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'DP' THEN 'Delta Grau CV' IS 'GN'
20	IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDP' THEN' Delta Grau CV' IS 'GN'
21	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV'IS 'GN'
22	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV'IS 'GN'
23	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV'IS 'GN'
24	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN'Delta Grau CV'IS 'GN'
25	IF 'Erro' IS 'GEP' ADN 'Derivada da Pressão' IS 'GDN' THEN 'Delta Grau CV'IS 'GGN'

O Gráfico 4.9 abaixo ilustra o comportamento tridimensional da interação das três variáveis estudadas.

Gráfico 4.9 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle para a ZB



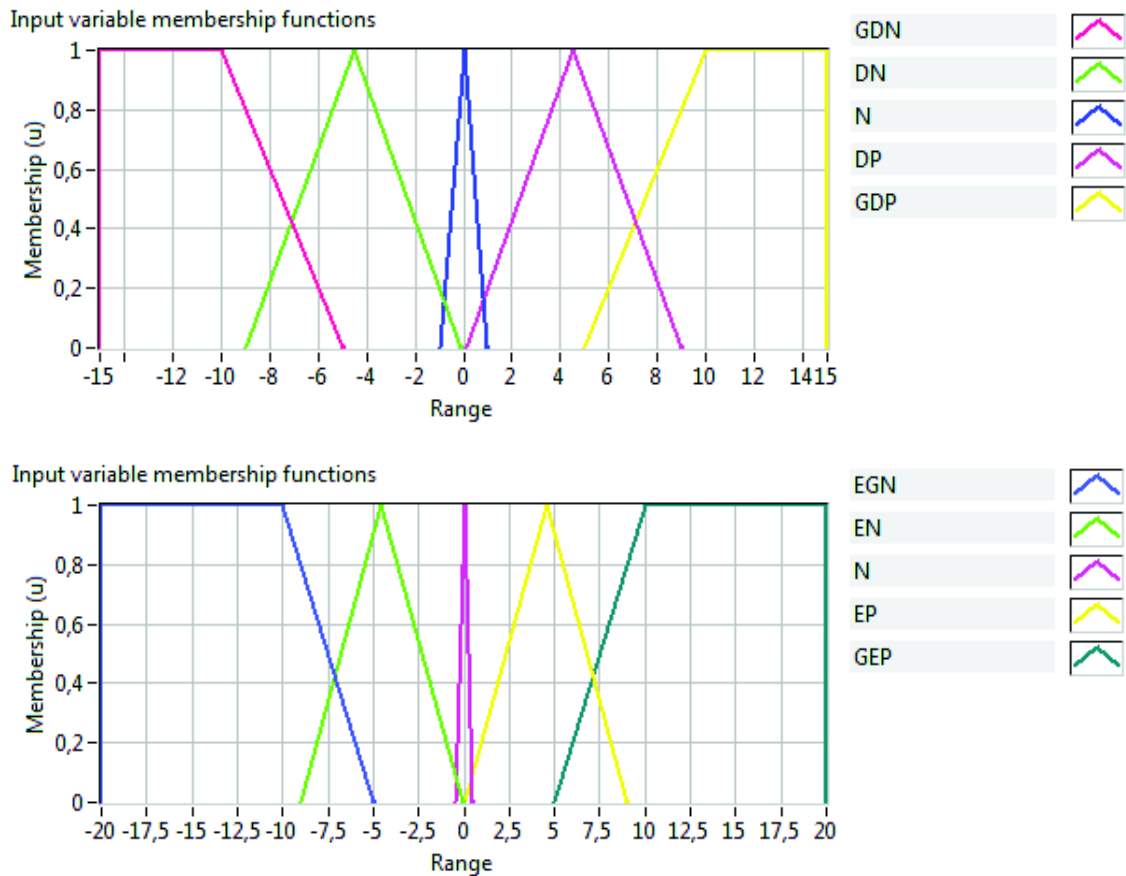
4.4.2 Controle *fuzzy* em um Sistema Centralizado

Nesse segundo controle, as variáveis de entrada e saída serão acionadas por um único sistema, controlando, em apenas um conjunto de regras, as pressões de serviço nas duas zonas de pressão. As variáveis de entrada, como já citado anteriormente será a diferença de pressão entre as duas zonas, e o erro, a diferença entre o set point e a pressão

do PT-5. As variáveis de saída serão o ângulo de fechamento da CV-1 e o delta de rotação do CMB.

A Figura 4.12 traz os gráficos das variáveis de entrada, enquanto que a Figura 4.13 representa a saída do controle.

Figura 4.12 - Variáveis de entrada do sistema centralizado



Onde:

GDN: Grande diferença negativa

DN: Diferença negativa

N: Normal

DP: Diferença positiva

GDP: Grande diferença positiva

EGN: Erro grande negativo

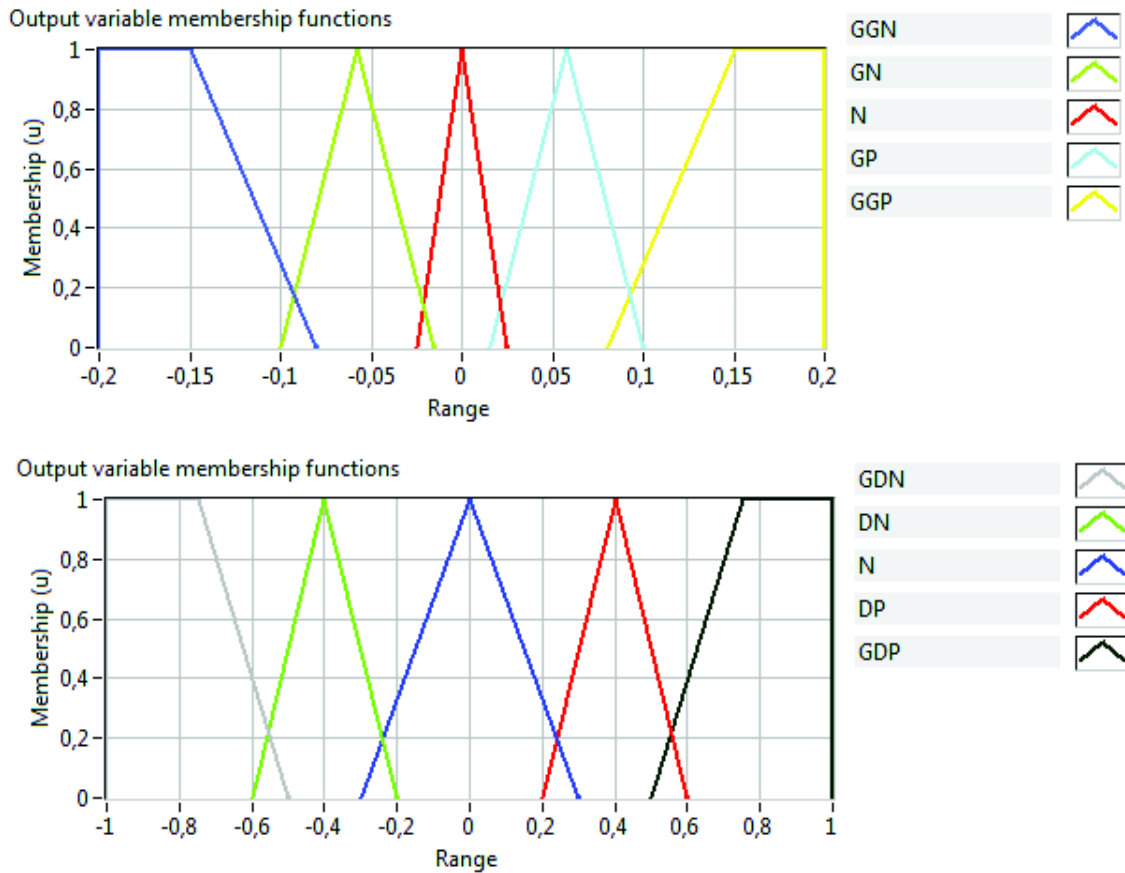
EN: Erro negativo

N: Normal

EP: Erro positivo

GEP: Grande erro positivo

Figura 4.13 - Variáveis de saída do sistema centralizado



Onde:

GGN: Grande grau negativo

GN: Grau negativo

N: Normal

GP: Grau positivo

GGP: Grande grau positivo

GDN: Grande delta negativo

DN: Delta negativo

N: Normal

DP: Delta positivo

GDP: Grande delta positivo

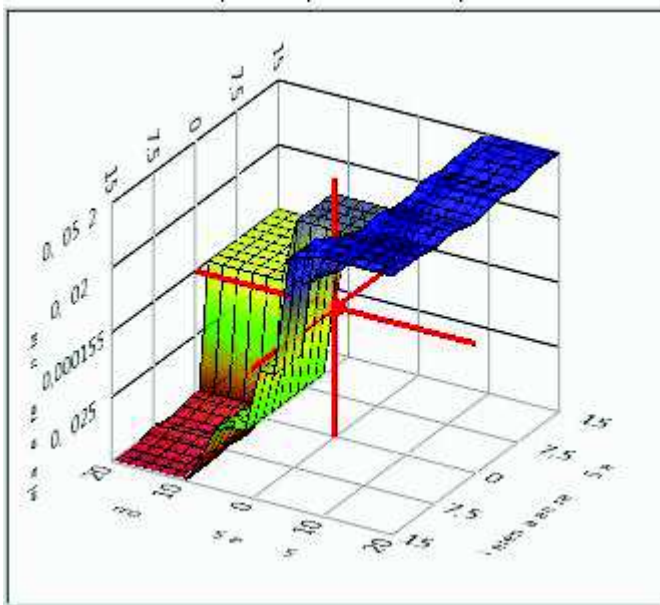
A Tabela 4.8 apresenta as regras que relacionam as variáveis de entrada com as variáveis de saída para o sistema centralizado.

Tabela 4.7 - Regras *fuzzy* para controlar a pressão da ZB e da ZA

1	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
2	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'GEP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDP'
3	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
4	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'GEP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDP'
5	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'N' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EGN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'N' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDN'
6	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'N' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'N' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DN'
7	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'N' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'N' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'N' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'N'
8	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'N' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'N' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
9	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'N' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'GEP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'N' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDP'
10	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EGN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDN'
11	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DN'
12	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'N' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'N'
13	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
14	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'GEP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDP'
15	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EGN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'GDN'
16	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'N' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGN' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'N'
17	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDP' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
18	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'GDN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EP' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'N'
19	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'N' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GGP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'
20	IF 'Diferença entre PT-5 e PT-3' IS 'DN' ADN 'Erro SP PT-5 e PT-5' IS 'EN' THEN 'Saída Grau da VRP' IS 'GP' ALSO 'Delta de Frequência CMB' IS 'DP'

O Gráfico 4.10 abaixo ilustra o comportamento tridimensional da interação das quatro variáveis estudadas.

Gráfico 4.10 - Comportamento tridimensional das variáveis do controle



A Tabela 4.8 relaciona todos os experimentos realizados com e sem a aplicação de todos os controladores desenvolvidos.

Tabela 4.8– Relação de experimentos

Experimento	Descrição
Experimento 1	Comportamento da bancada sem a atuação do controlador na situação de máxima demanda.
Experimento 2	Comportamento da bancada sem a atuação do controlador na situação de mínima demanda.
Experimento 3	Comportamento da bancada com a atuação do controlador no sistema descentralizado situação de máxima demanda.
Experimento 4	Comportamento da bancada com a atuação do controlador no sistema descentralizado situação de mínima demanda.
Experimento 5	Comportamento da bancada com a atuação do controlador aplicado apenas na CV-1,

	com o CMB a 60 Hz, na situação de máxima demanda.
Experimento 6	Comportamento da bancada com a atuação do controlador aplicado apenas na CV-1, com o CMB a 60 Hz, na situação de mínima demanda.
Experimento 7	Comportamento da bancada com a atuação do controlador aplicado apenas no CMB, com o CV-1 totalmente aberta a 0°, na situação de máxima demanda.
Experimento 8	Comportamento da bancada com a atuação do controlador aplicado apenas no CMB, com o CV-1 totalmente aberta a 0°, na situação de mínima demanda.
Experimento 9	Comportamento da bancada com a atuação do controlador no sistema centralizado situação de máxima demanda.
Experimento 10	Comportamento da bancada com a atuação do controlador no sistema centralizado situação de mínima demanda.

4.5 CONCLUSÕES

Para que se possa criar um controlador *fuzzy* é preciso que se conheça em profundidade todos os procedimentos operacionais da planta em questão. A base de regras tem como fundamento, as técnicas empregadas pelo próprio operador. Para tanto, é de suprema importância, que as regras desenvolvidas sejam resultado de uma análise minuciosa do comportamento do sistema.

Após a definição das regras, o passo seguinte é a aplicação do controlador e a análise dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Após a realização do estudo do sistema *fuzzy*, e da planta física onde será aplicado o controle, a etapa final está na aplicação do controlador e na análise dos resultados obtidos. Os controles desenvolvidos foram aplicados em dois tipos de sistemas, centralizado e descentralizado submetidos às mesmas condições de operação.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os controles desenvolvidos, baseado na lógica *fuzzy*, foram aplicados em duas situações: com a máxima demanda, ou seja, as válvulas CV-2 e CV-3 a 40° de ângulo de fechamento; e com a mínima demanda: as válvulas CV-2 e CV-3 a 60° de ângulo de fechamento. Essa angulação foi constatada após a realização de testes na bancada, conforme já abordado no capítulo 4. Esses testes garantiram que angulações acima ou abaixo desses valores de referência, não representaram variações nos resultados obtidos.

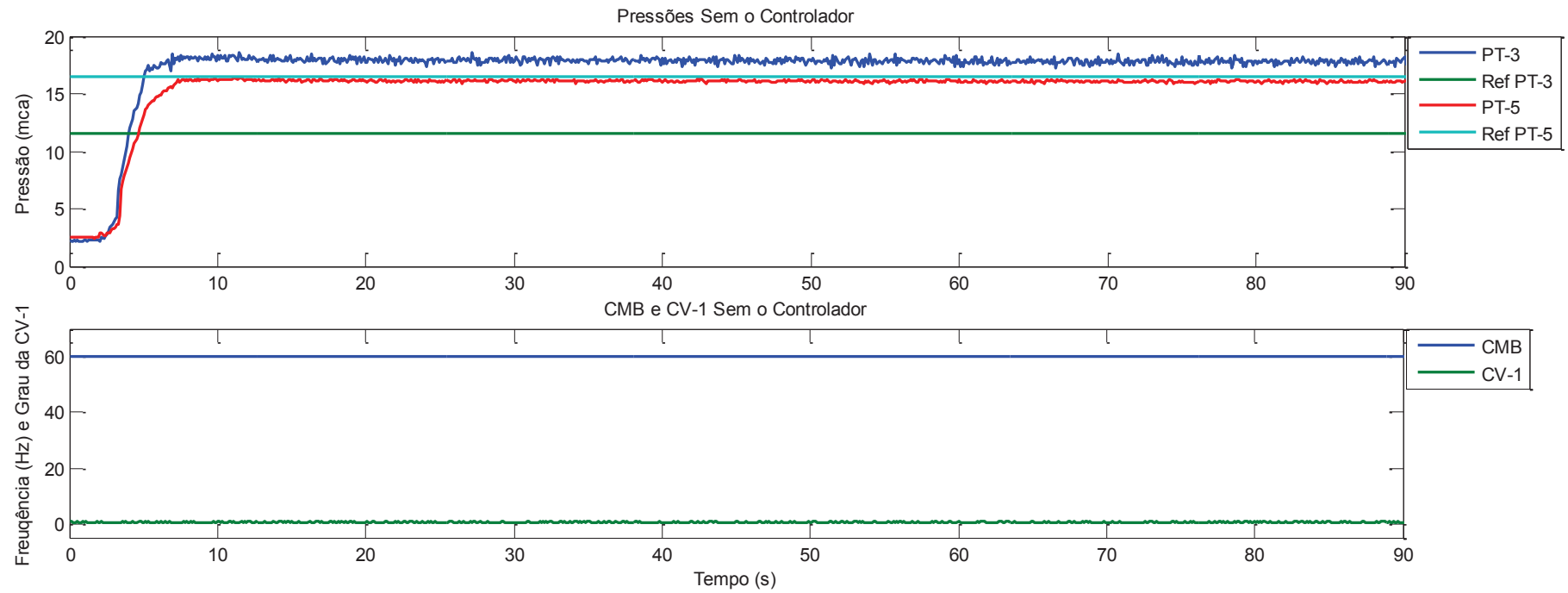
Além das duas situações acima descritas, foram realizadas perturbações na planta, com o intuito de constatar o comportamento do controlador e sua capacidade em retornar as pressões de serviço, mesmo após variações bruscas de demanda.

O primeiro nível de operação abordou uma aplicação do controle *fuzzy* em um sistema descentralizado, o objetivo é realizar uma comparação entre os dois sistemas, centralizado e descentralizado.

5.2.1 Controle *fuzzy* em um Sistema Descentralizado

Nesta primeira simulação, foram realizados diversos testes, com e sem a aplicação do controlador, para as situações de máxima e mínima demanda. A Figura 5.1 representa a variação das pressões no PT-3 e PT-5, com o CMB trabalhando a uma frequência de 60 Hz e a CV-01 totalmente aberta à 0°, e as válvulas CV-2 e CV-3 a 40°. As informações dispostas na Figura 5.1 na Tabela 5.1 e 5.2 são referentes ao funcionamento da rede sem a aplicação de um controlador, simulando a máxima demanda.

Figura 5.1- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, sem a aplicação do controlador na máxima demanda



A Figura 5.1 apresenta o comportamento do sistema operando com as válvulas CV-2 e CV-3, simulando a máxima demanda para as duas zonas de pressão, a válvula CV-1 a 0° e o CMB operando com uma frequência de 60 Hz. Ao observar a parte superior do gráfico, registra-se que, para a ZB, o sistema operou com pressões bem acima do valor de referência determinado, 11,50 mca. Enquanto na ZA, as pressões ficaram um pouco abaixo do valor tomado como referência, 16,50 mca. A bancada operou durante 1 minuto de 30 segundo, sem alterações significativas após os 8 segundos iniciais.

A Tabela 5.1 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros do sistema, com a CV-2 e CV-3 a 40°, CV-1 totalmente aberta a 0° e a frequência a 60 Hz.

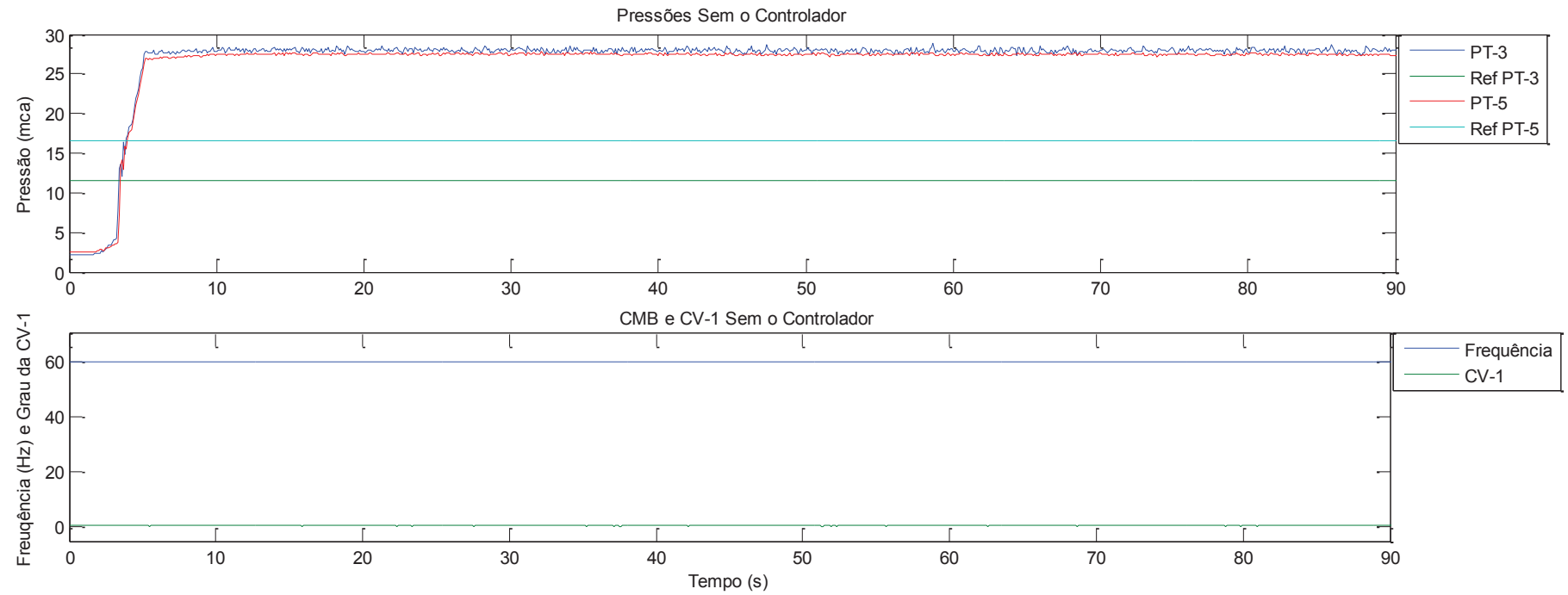
Tabela 5.1 - Parâmetros da planta sem aplicação do controlador

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	15,46	17,19
Vazão (m³/h)	4,39	6,79

Analizando os dados obtidos na simulação, e apresentados na Tabela 5.1, as duas zonas de pressão apresentam um excesso significativo de pressões em seus pontos de consumo. A zona baixa apresentou um acréscimo de 5,69 mca, enquanto que a zona alta registrou uma redução da carga hidráulica de 1,054 mca.

Além da operação do sistema, com as válvulas CV-2 e CV-3 simulando a máxima demanda, também foram realizados experimentos para analisar o comportamento do sistema, quando este simula uma operação de mínima demanda. A Figura 5.2 apresenta os valores das pressões registrados para o cenário de menor demanda.

Figura 5.2 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, sem a aplicação do controlador na mínima demanda



A Figura 5.2 apresenta o comportamento do sistema operando com as válvulas CV-2 e CV-3, simulando a mínima demanda para as duas zonas de pressão, a válvula CV-1 a 0° e o CMB operando com uma frequência de 60 Hz. Ao observar a parte superior do gráfico, registra-se que as duas zonas de pressão apresentaram sobrepressão, para a ZB, o sistema operou com pressões bem acima do valor de referência determinado, 11,50 mca, registrando uma máxima de 28,81 mca. Enquanto na ZA, a máxima registrada foi de 27,77 mca, valor bem superior ao set point determinado, de 16,50 mca. A bancada operou durante 1 minuto de 30 segundo, sem alterações significativas após os 6 segundos iniciais.

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros do sistema, com a CV-2 e CV-3 a 60°, CV-1 totalmente aberta a 0° e a frequência a 60 Hz.

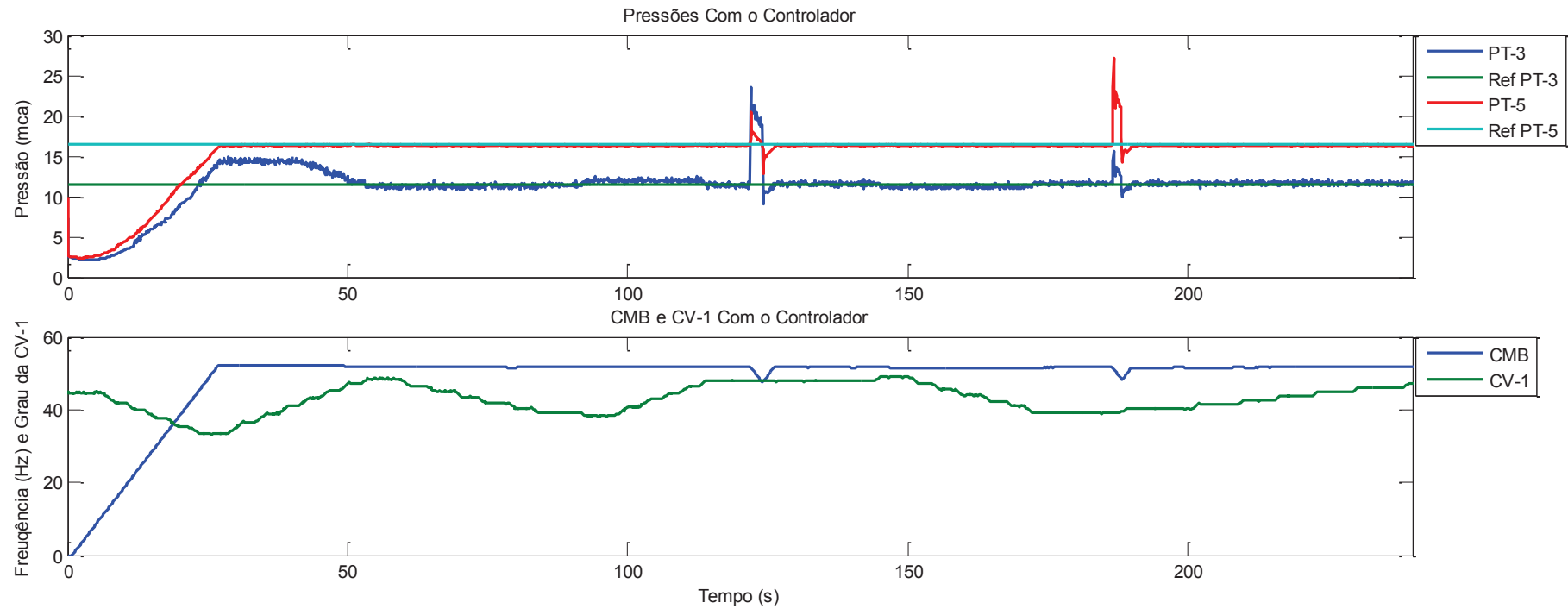
Tabela 5.2 - Parâmetros da planta sem aplicação do controlador

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	26,38	26,86
Vazão (m³/h)	4,78	6,37

Analisando os dados obtidos na simulação, e apresentados na Tabela 5.2, as duas zonas de pressão apresentam um excesso significativo de pressões em seus pontos de consumo. A zona baixa apresentou um acréscimo de 15,36 mca, enquanto que a zona alta registrou uma redução da carga hidráulica de 9,88 mca.

A aplicação do controlador visa reduzir as pressões na zona baixa, reduzindo a angulação da CV-1, e elevar as pressões na zona alta com a regulação da frequência do CMB, a partir a variação da rotação com o inversor de frequência. A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos na máxima demanda, ou seja, CV-2 e CV-3 a 40° com a aplicação do controlador.

Figura 5.3- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema descentralizado na máxima demanda



A Figura 5.3 traz o comportamento do sistema após a aplicação do controlador no sistema descentralizado. Na parte superior do gráfico, é possível observar que o PT-3 apresentou sobressinal, no entanto, após 50 segundos de acionamento do controle, adquiriu estabilidade, atingindo o valor de referência desejado, de 11,50 mca. O PT-5, por outro lado, não registrou sobressinal, e 26,4 s após o acionamento do controle, atingiu a pressão de referência de 16, 50 mca.

Na região inferior do gráfico, é possível analisar o comportamento das duas variáveis de controle, o CMB e a CV-1. O PT-5 acompanha o desenvolvimento do CMB, que registra uma frequência de 48,7 Hz, quando o PT-5 atinge o estado estacionário. O comportamento da CV-1, no entanto, não apresenta a mesma regularidade em torno de apenas um valor, suas variações são mais visíveis, no entanto, não interfere na chegada do PT-3 ao seu valor de referência.

Nos instantes, de 2 e 3 minutos, foram realizadas variações bruscas na demanda na zona baixa e zona alta, respectivamente. O objetivo era garantir, que mesmo após interrupções bruscas no sistema, com o fechamento do registro de saída, o controle, se mostraria eficiente, ao ponto de restabelecer as pressões, aos valores de referência. Conforme ilustrado no próprio gráfico, o controle reagiu de maneira satisfatória e garantiu a estabilidade do sistema, com suas pressões de serviço. Após essas interrupções, é possível detectar a diminuição simultânea na frequência do CMB.

O teste acima foi realizado em um período de 4 minutos, com aquisição online dos resultados. A Tabela 5.3 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar a resposta do sistema sob ação do controlador *fuzzy* no sistema descentralizado.

Tabela 5.3 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	26,4 s	3,4 mca	54 s	0,87%
PT-5	26,4 s	0	26,4 s	0

Conforme informações extraídas da Tabela 5.3 o controlador obteve uma resposta mais eficiente e atuante no PT-5, visto que nesse ponto não houve registro de sobressinal, e seu tempo de estabelecimento foram bem inferiores ao do PT-3. Na ZB, após a realização

das duas perturbações, não foi registrado erro em regime permanente, garantindo uma pressão de 11,50 mca. Apesar do tempo de estabelecimento verificado ter sido quase o dobro, em relação à ZA, o controlador atuou de maneira satisfatória, controlando a pressão necessária ao funcionamento eficiente da rede.

A Tabela 5.4 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros hidráulicos do sistema com a CV-2 e CV-3 a 40°.

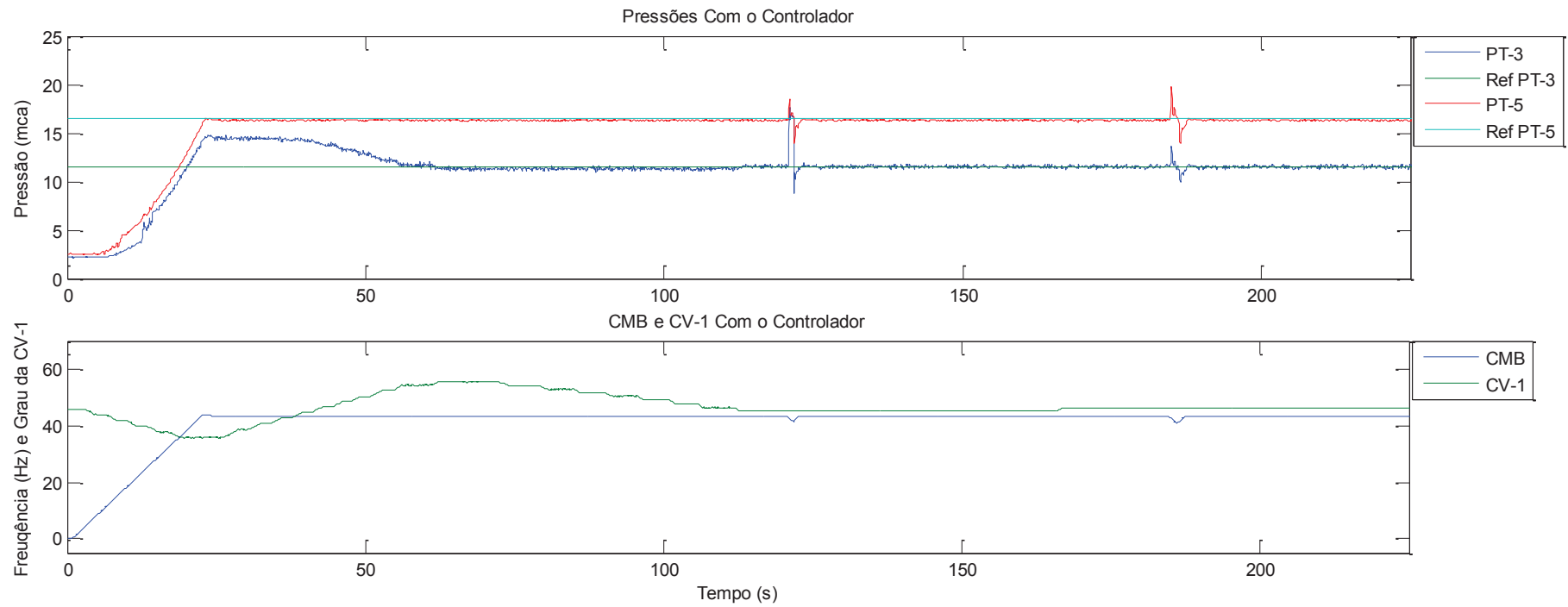
Tabela 5.4 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	16,50	11,60
Vazão (m³/h)	6,67	4,7
CV-1	42,98°	
Frequência do CMB (Hz)	48,69	

A partir da análise dos dados registrados na Tabela 5.3, constata-se a eficiência do controlador em reduzir as pressões aos valores inicialmente estipulados como necessários à operação da rede. Além da redução das pressões, observa-se uma redução de 18,85% na frequência do CMB, o que pode gerar uma queda no consumo energético do sistema de distribuição.

Também foram realizados testes simulando uma rede a mínima demanda, ou seja, com as válvulas CV-2 e CV-3 a 60° com a aplicação do controlador, para o mesmo sistema descentralizado. A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos.

Figura 5.4 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema descentralizado na mínima demanda



A Figura 5.4 traz o comportamento do sistema também operando de maneira descentralizada. Na parte superior do gráfico, observa-se que o PT-3 apresentou sobressinal, no entanto, após 58 segundos de acionamento do controle, adquiriu estabilidade, atingindo o valor de referência desejado, de 11,50 mca. O PT-5, por outro lado, não registrou sobressinal, e 23 s após o acionamento do controle, atingiu a pressão de referência de 16,50 mca.

Na região inferior do gráfico, é possível analisar o comportamento das duas variáveis de controle, o CMB e a CV-1. O PT-5 acompanha o desenvolvimento do CMB, que registra uma frequência de 43,17 Hz, quando o PT-5 atinge o estado estacionário. O comportamento da CV-1, de forma análoga, acompanha o desempenho do PT-3, atingindo valores mais constantes, após a fase de estabilização do controle. Na mínima demanda, é possível constatar que a válvula influencia, de maneira mais direta e eficiente no comportamento de PT-3, fazendo com que as pressões de serviço sejam atingidas, sem grandes variações em sua angulação.

Nos instantes, de 2 e 3 minutos, foram realizadas variações bruscas na demanda na zona baixa e zona alta, respectivamente. O objetivo era garantir, que mesmo após interrupções bruscas no sistema, com o fechamento do registro de saída, o controle, se mostrasse eficiente, ao ponto de restabelecer as pressões, aos valores de referência. Conforme ilustrado no próprio gráfico, o controle reagiu de maneira satisfatória e garantiu a estabilidade do sistema, com suas pressões de serviço. Após essas interrupções, é possível detectar a diminuição simultânea na frequência do CMB e sua ágil resposta, ao retorno das condições normais de operação.

O teste acima foi realizado em um período de 3 minutos e 50 segundos, com aquisição online dos resultados. A Tabela 5.5 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar a resposta da planta sob ação do controlador no sistema descentralizado.

Tabela 5.5 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	23 s	3,17 mca	58 s	0,18
PT-5	23 s	0	23 s	0

Conforme informações extraídas da Tabela 5.5 o controlador obteve uma resposta mais eficiente e atuante no PT-5, visto que nesse ponto não houve registro de sobressinal, e seu tempo de estabelecimento foram bem inferiores ao do PT-3. Na ZB, após a realização das duas perturbações, não foi registrado erro em regime, garantindo uma pressão de 11,50 mca. Apesar do tempo de estabelecimento verificado ter sido quase o dobro, em relação à ZA, o controlador atuou de maneira satisfatória, controlando a pressão necessária ao funcionamento eficiente da rede.

A Tabela 5.6 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros hidráulicos do sistema com a CV-2 e CV-3 a 60°.

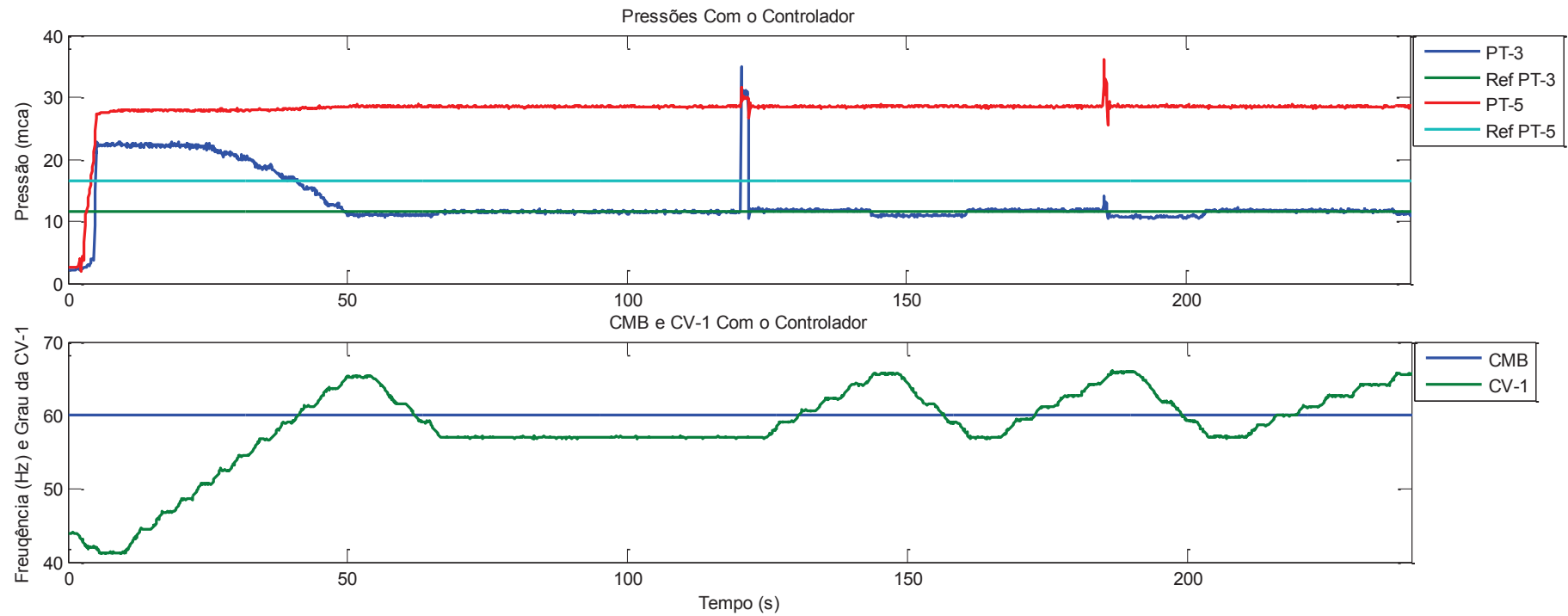
Tabela 5.6 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador no sistema descentralizado

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	16,50	11,52
Vazão (m³/h)	3,6	5,8
CV-1	46,53°	
Frequência do CMB (Hz)	40,99	

A partir da análise dos dados registrados na Tabela 5.6, constata-se a eficiência do controlador em reduzir as pressões aos valores inicialmente estipulados como necessários à operação da rede. Além da redução das pressões, observa-se uma redução de 31,68% na frequência do CMB, o que pode gerar uma queda no consumo energético do sistema de distribuição. Uma redução bem superior àquela registrada no sistema na operação de máxima demanda.

Com o objetivo de verificar a influência individual do CMB e da CV-1 no comportamento e no controle das pressões, em cada zona de pressão, foram realizados experimentos onde simulou a utilização de apenas um, dos dois controles. A Figura 5.5 apresenta os registros da operação do sistema, em sua máxima demanda, funcionando a uma frequência constante de 60 Hz, com apenas a CV-1 atuando no controle das pressões.

Figura 5.5- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas na CV-1, na máxima demanda



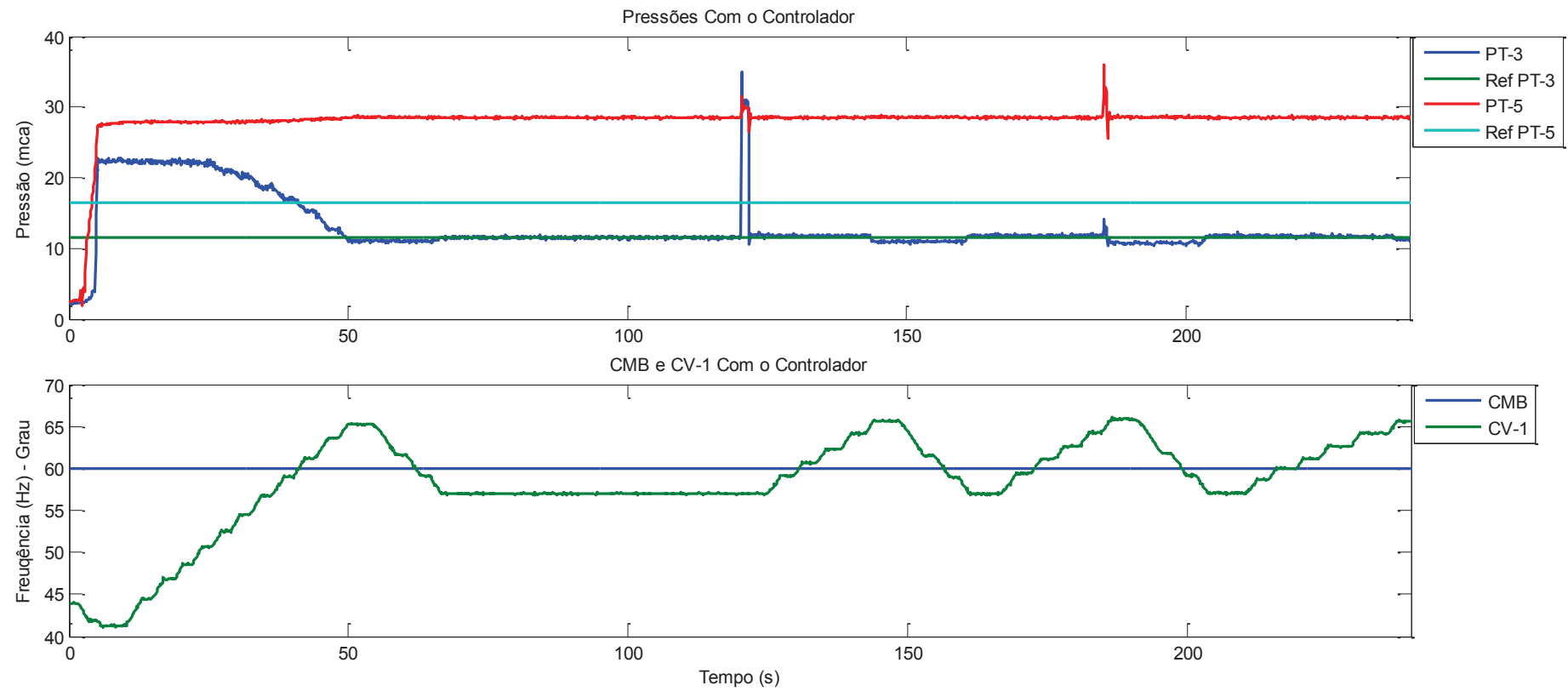
A Figura 5.5 apresenta o comportamento da rede SADA, ao acionar apenas o controle da CV-1, permanecendo a frequência do CMB constante em 60 Hz. Como esperado, após aparição do sobressinal na subida, apenas PT-3 atinge seu valor de referência. O sistema não consegue se ajustar, apenas com a variação da angulação da válvula CV-1, apresentado pressões elevadas e bem acima do set point na ZA. O máximo valor registrado no PT-5, excetuando-se os pontos de perturbações, foi de 24,90 mca. As perturbações realizadas, em 1 minuto e 30 segundos e 2 minutos de 30 segundos mostram a eficiência do controlador atuante no CV-1, que consegue restabelecer as pressões desejadas na zona baixa. A Tabela 5.7 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

Tabela 5.7 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	5,2 s	3,00 mca	33,2 s	1,23%

O tempo de subida e o de estabelecimento apresentaram reduções significativas, quando comparados aos sistemas controlados anteriormente. O erro em regime apresentou uma leve subida, no entanto, o valor registrado fica dentro da faixa de limite estabelecida de 2% a 5% para mais ou para menos. Além da situação de máxima demanda, também foram registrados os valores das pressões no sistema, com o funcionamento apenas do controlador atuante na válvula, na situação de mínima demanda, conforme Figura 5.6.

Figura 5.6 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas na CV-1, na mínima demanda



A Figura 5.6 apresenta o comportamento da rede SADA, ao acionar apenas o controle da CV-1, permanecendo a frequência do CMB constante em 60 Hz, na mínima demanda. Como esperado, após aparição do sobressinal na subida, apenas PT-3 atinge seu valor de referência. O sistema não consegue se ajustar, apenas com a variação da angulação da válvula CV-1, apresentado pressões elevadas e bem acima do set point na ZA. O máximo valor registrado no PT-5, excetuando-se os pontos de perturbações, foi de 35,96 mca. As perturbações realizadas, em 2 minutos e 3 minutos, após o acionamento da bancada, mostram a eficiência do controlador atuante no CV-1, que consegue restabelecer as pressões desejadas na zona baixa. No entanto, observa-se uma maior instabilidade no controlador, nesse cenário, visto que a CV-1 permanece por um maior período de tempo em fase de ajuste.

A Tabela 5.8 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

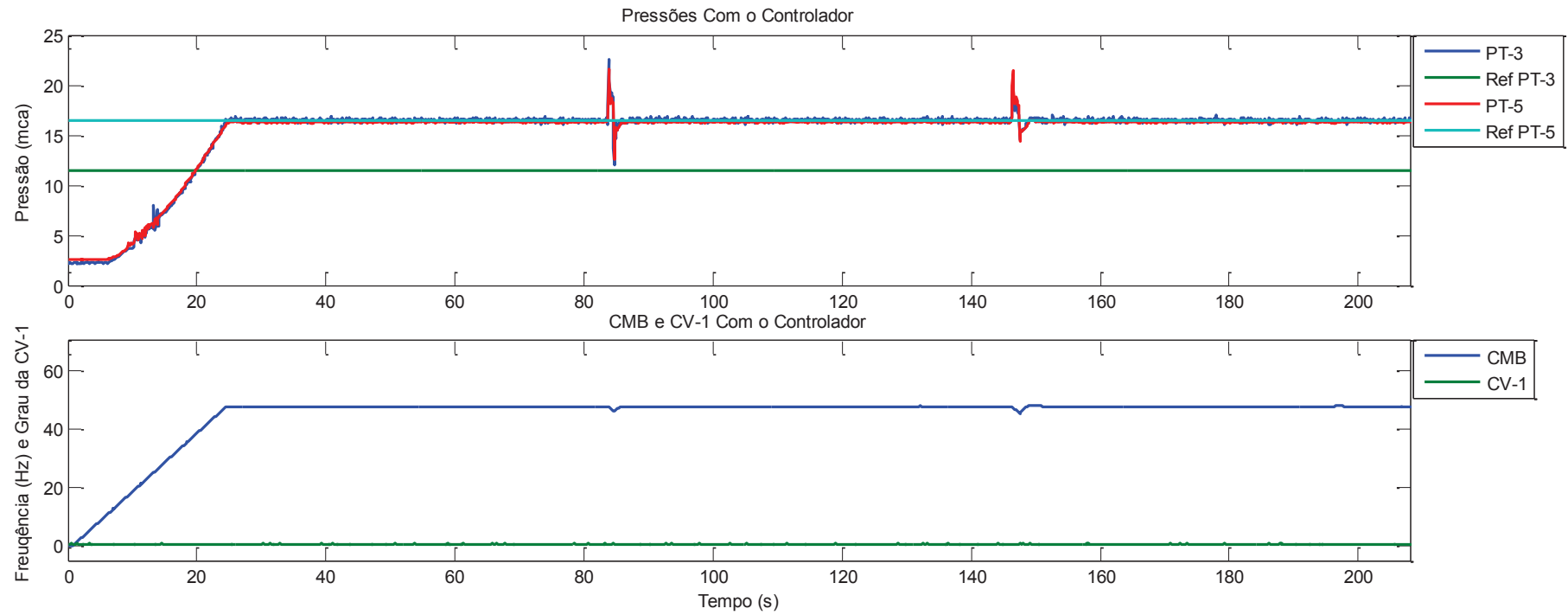
Tabela 5.8 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	9,3 s	11,2 mca	70 s	0,78%

O tempo de subida e o de estabelecimento apresentaram aumentos significativos, quando comparados aos dados da Tabela 5.8. O erro em regime apresentou um leve declínio, no entanto, o valor registrado permanece dentro da faixa de limite estabelecida de 2% a 5% para mais ou para menos.

Ao realizar o funcionamento do sistema com o controle apenas da válvula, necessita-se, em termos comparativos, de dados que relacionem o comportamento da pressão no PT-5, quando submetido ao controle apenas do CMB. Além da situação de máxima demanda, também foram registrados os valores das pressões no sistema, com o funcionamento apenas do controlador atuante na válvula, na situação de mínima demanda, conforme Figura 5.7 apresenta o comportamento da rede com o controlador atuando apenas no CMB, na situação de mínima demanda.

Figura 5.7 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas no CMB, na máxima demanda



A Figura 5.7 apresenta o comportamento da rede SADA, ao acionar apenas o controle da CV-1, permanecendo a frequência do CMB constante em 60 Hz, na condição de máxima demanda. Como esperado, após aparição do sobressinal na subida, apenas PT-5 atinge seu valor de referência. O sistema não consegue se ajustar, apenas com a variação da rotação do CMB, apresentado pressões elevadas e bem acima do set point na ZB. O máximo valor registrado no PT-3, excetuando-se os pontos de perturbações, foi de 16,6 mca. As perturbações realizadas, em 1 minuto e 20 segundos e 2 minutos e 20 segundos, após o acionamento da bancada, mostram a eficiência do controlador atuante no CMB, que consegue restabelecer as pressões desejadas na zona alta, a uma frequência aproximada de 48 Hz.

A Tabela 5.9 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

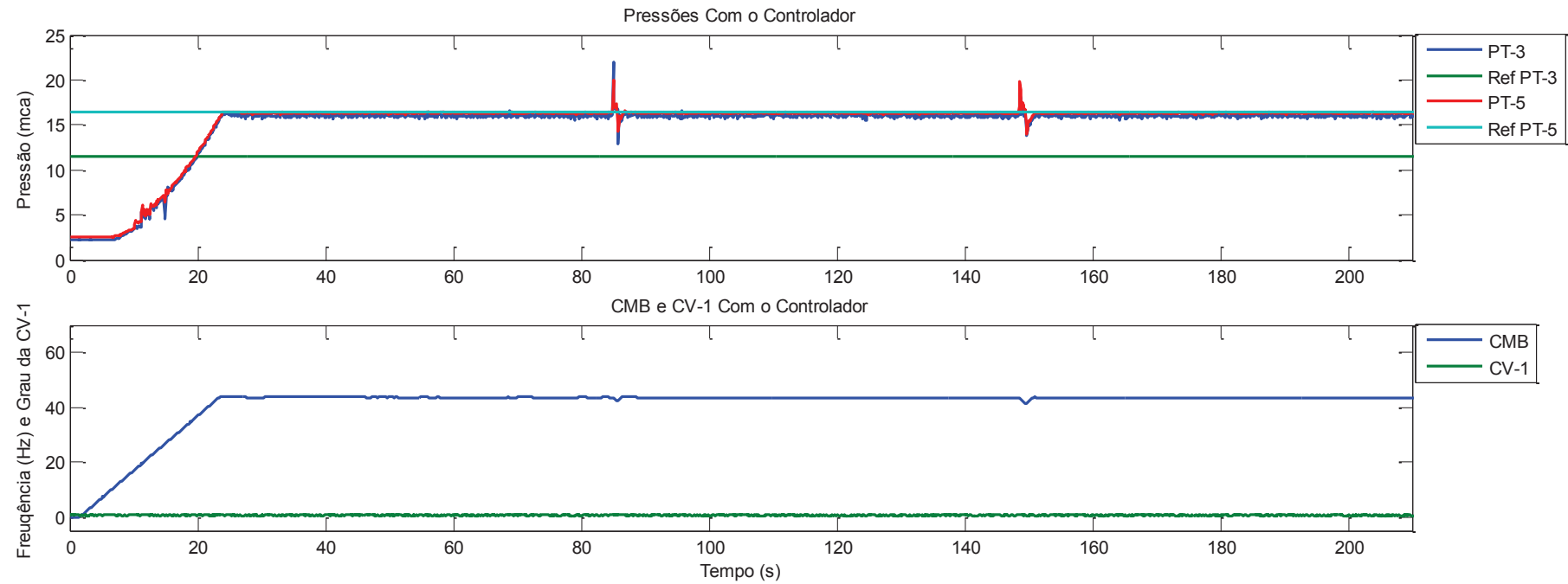
Tabela 5.9 - Resposta do sistema para a situação de máxima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	25 s	0 mca	25 s	0

O tempo de subida e o de estabelecimento apresenta o mesmo valor, visto que não houve registro de sobressinal, e a pressão no PT-5 atingiu seu set point no momento da subida. Não foi registrado erro em regime.

Ao realizar o funcionamento do sistema com o controle apenas da válvula, necessita-se, em termos comparativos, de dados que relacionem o comportamento da pressão no PT-5, quando submetido ao controle apenas do CMB. Além da situação de máxima demanda, também foram registrados os valores das pressões no sistema, com o funcionamento apenas do controlador atuante no CMB, na situação de mínima demanda. A Figura 5.8 apresenta o comportamento da rede com o controlador atuando no CMB, com CV-2 e CV-3 a 60°.

Figura 5.8- Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador apenas no CMB, na mínima demanda



Bem como a situação registrada na Figura 5.8, a parte superior do gráfico mostra que as pressões no PT-3 e PT-5 atingiram o mesmo valor, estando apenas a ZA com seu valor de referência atendido. As duas pressões apresentam os mesmos dados em termos de controle e hidráulico, com os mesmos tempos de subida, mesmo erro em regime permanente, tempo de estabelecimento. A exceção só se observa no sobressinal que o PT-3 apresenta, cerca de 5 mca. Na parte inferior verifica-se o comportamento das variáveis de controle, CV-1 e CMB. A CV-1, como estado inicial, se mantém a 0°, ou seja, totalmente aberta. O CMB apresenta uma frequência média de 41 Hz, após fazer com que o PT-5 atinja seu set point de referência. A frequência registrada na máxima demanda (ver Gráfico 5.7) é 14,6% maior, quando comparada a da Figura 5.8, o que se justifica pela diminuição da demanda no sistema.

As perturbações geradas causam variações na rotação do CMB, que tenta se adequar as novas condições de demanda, e consequentemente nas pressões da ZA. No entanto, depois de cessado os distúrbios, o controle age rapidamente e retorna a seu valor de referência. O teste foi realizado em um período de 2 minutos e 30 segundos, e o intervalo entre as perturbações foi de exatamente 1 minuto.

A Tabela 5.10 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

Tabela 5.10 - Resposta do sistema para a situação de mínima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	24 s	0 mca	24 s	0

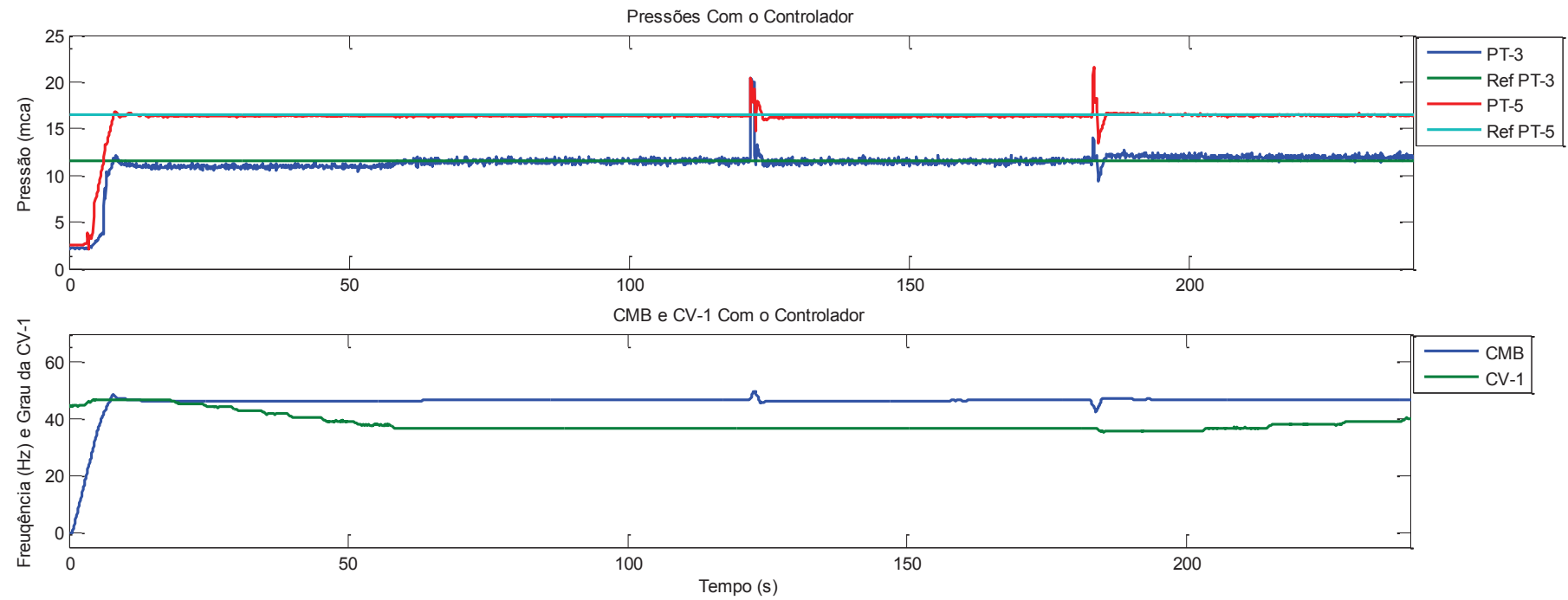
Como já mencionado, os parâmetros da Tabela 5.10 corroboram o funcionamento do CMB no controle das pressões da ZA. Não registrando sobressinal, e com um comportamento bem regular, exemplificado pela falta de erro em regime permanente.

5.2.2 Controle *Fuzzy* Aplicado em Sistema Centralizado

Nesta segunda etapa, foram realizados dois testes com a aplicação do controlador no sistema centralizado, para as situações de máxima e mínima demanda. Não se vê a necessidade de registrar os valores do sistema para o sistema sem controle, visto que tal simulação já foi abordada nas Figuras 5.1 e 5.2, que representam a variação das pressões no PT-3 e PT-5, com o CMB trabalhando a uma frequência de 60 Hz e a CV-01 totalmente aberta à 0°, e as válvulas CV-2 e CV-3 a 40°, e a 60° respectivamente.

O controle *fuzzy*, submetido ao sistema centralizado, trabalha de maneira integrada com as duas variáveis de controle, CV-1 e CMB, com o objetivo de controlar as variáveis de estado, as pressões na ZB e ZA, de forma dependente, com apenas o acionamento de um controlador. A Figura 5.9 apresenta o comportamento do sistema, com as válvulas CV-2 e CV-3 simulando a máxima demanda, ou seja, a 40°.

Figura 5.9 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema centralizado, na máxima demanda



A Figura 5.9 traz a atuação do controlador *fuzzy* no sistema centralizado, na fase de máxima demanda. Em sua região superior, destacam-se as variáveis de estado com seus set points de referência. Logo abaixo, relacionam-se, em igual período de tempo as variáveis de controle, o CMB e a CV-1.

Com a aplicação do controlador, observa-se uma resposta mais veloz da CV-1 e do CMB, levando rapidamente as pressões aos seus valores de referência. O CMB, de maneira mais ágil, leva cerca de 8 segundos para atingir o valor de 16,5 mca, enquanto que a válvula demora um pouco mais para encontrar o valor ótimo de sua angulação, garantindo em 58,6 s a pressão de 11, 5 mca na ZB.

As perturbações foram realizadas após as duas variáveis de estado terem atingido seus valores de referência, e com um intervalo de 1 minuto entre o primeiro e o segundo distúrbio. Na primeira perturbação, causada pelo fechamento do registro de saída da ZB, observa-se um aumento da frequência no CMB, visto que a vazão na ZB diminuiu, enquanto que na ZA aumentou requerendo maior esforço de CMB. No segundo distúrbio, foi realizado o fechamento do registro de saída da ZA, o que inverteu a situação em termos de vazões, com a diminuição na ZA, o CMB se apresentou menos requisitado, logo, seu comportamento foi de reduzir a frequência. Apesar dessas alterações, o controlador se mostrou bastante eficiente, e permitiu que as pressões de serviço fossem novamente atingidas. O teste foi realizado em um intervalo de 3 minutos. A Tabela 5.11 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

Tabela 5.11 - Resposta do sistema centralizado para a situação de máxima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	7,9 s	0,59 mca	58,6 s	1,54%
PT-5	8 s	0,34 mca	10,8 s	0,49%

Conforme informações extraídas da Tabela 5.11, o tempo de subida, ou seja, o tempo levado pelas duas variáveis de estado para atingirem, pela primeira vez o valor de referência, foi muito próximo um do outro. Os valores do sobressinal foram inferiores a 1 mca, bem como o erro em regime permanente inferiores a 2%. No entanto o tempo de estabelecimento do PT-3 foi 81,57% maior do que o PT-5. Ao comparar o tempo de

estabelecimento nos outros gráficos, observa-se que o Ts do PT-3 é bem próximo ao do PT-5, isso porque além da CV-1, o CMB também influencia, de forma muito mais direta na pressurização da ZB, do que a CV-1 na ZA. A VRP age de maneira muito mais discreta no incremento da pressão da ZA, do que se observa no CMB, em relação à ZB. No entanto, apesar dos distúrbios e do tempo de estabelecimento verificado, o controlador atuou de maneira satisfatória, controlando a pressão necessária ao funcionamento eficiente da rede, nos dois pontos de pressão.

A Tabela 5.12 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros hidráulicos do sistema com a CV-2 e CV-3 a 40°.

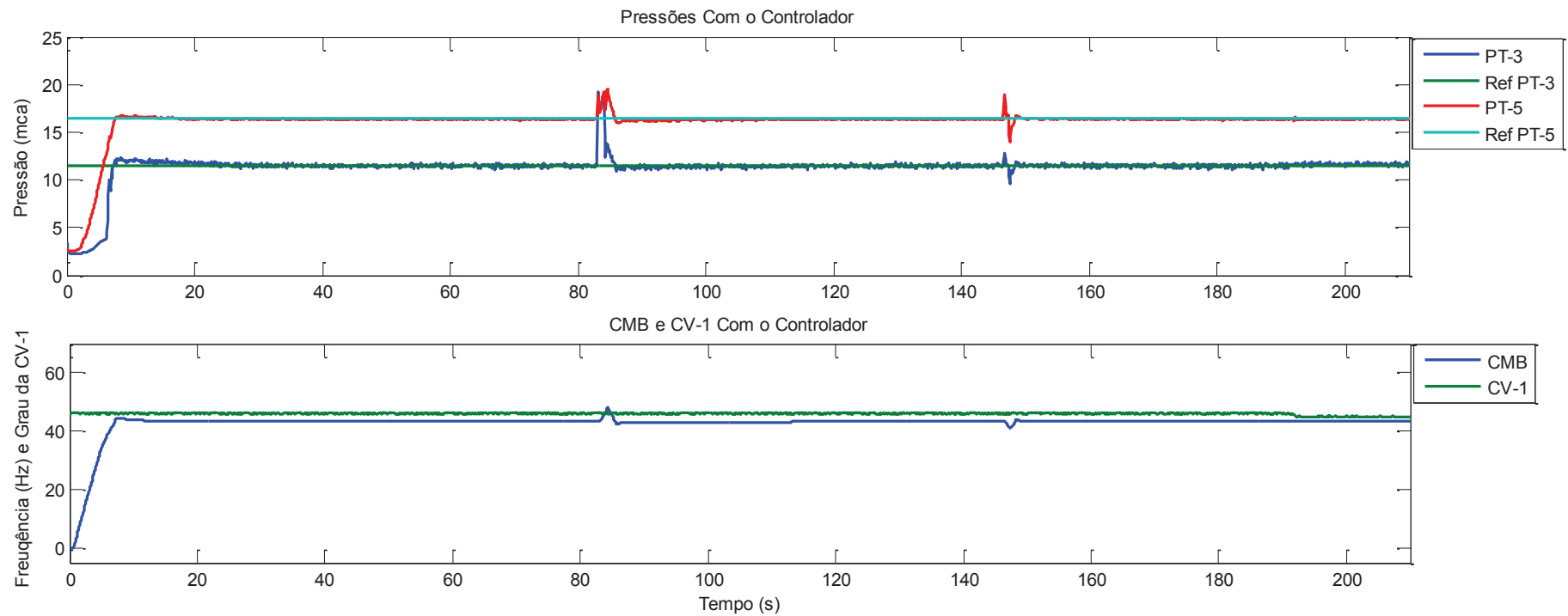
Tabela 5.12 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador no sistema centralizado

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	16,58	11,35
Vazão (m³/h)	5,13	5,07
CV-1	36,80°	
Frequência do CMB (Hz)	46,64	

A partir da análise dos dados registrados na Tabela 5.12, constata-se a eficiência do controlador em reduzir as pressões aos valores inicialmente estipulados como necessários à operação da rede. Além da redução das pressões, observa-se uma redução de 22,27% na frequência do CMB, o que pode gerar uma queda no consumo energético do sistema de distribuição.

Também foram realizados os mesmos procedimentos para a verificação do comportamento da rede a esse controlador, na situação de mínima demanda. A Figura 5.10 apresenta o comportamento da rede.

Figura 5.10 - Relação entre as pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus valores de referência, com a aplicação do controlador no sistema centralizado, na mínima demanda



A Figura 5.10 traz a atuação do controlador *fuzzy* para o sistema centralizado, na situação de mínima demanda. Na região superior, destacam-se as variáveis de estado com seus set points de referência. Logo abaixo, relacionam-se, em igual período de tempo as variáveis de controle, o CMB e a CV-1.

Com a aplicação do controlador, observa-se uma resposta mais ágil da CV-1 e do CMB, levando rapidamente as pressões aos seus valores de referência. O CMB, de maneira mais ágil, leva 7,7 segundos para atingir o valor de 16,5 mca, enquanto que a válvula demora um pouco mais para encontrar o valor ótimo de sua angulação, garantindo em 24,8 s a pressão de 11, 5 mca na ZB.

As perturbações foram realizadas após as duas variáveis de estado terem atingido seus valores de referência, e com um intervalo de 1 minuto entre o primeiro e o segundo distúrbio. Na primeira perturbação, causada pelo fechamento do registro de saída da ZB, observa-se, novamente, um aumento da frequência no CMB, visto que a vazão na ZB diminuiu, enquanto que na ZA aumentou requerendo maior esforço de CMB. No segundo distúrbio, foi realizado o fechamento do registro de saída da ZA, o que inverteu a situação, bem como ocorreu para a simulação de máxima demanda (ver Figura 5.9), em termos de vazões, com a diminuição na ZA, o CMB se apresentou menos requisitado, logo, seu comportamento foi de reduzir a frequência. Apesar dessas alterações, o controlador se mostrou bastante eficiente, e permitiu que as pressões de serviço fossem novamente atingidas. O teste foi realizado em um intervalo de 2 minutos e 30 segundos. A Tabela 5.13 apresenta uma síntese dos valores obtidos ao se analisar o controlador.

Tabela 5.13 - Resposta do sistema centralizado para a situação de mínima demanda

Pressão	Tempo de Subida (tr)	Sobressinal (Mp)	Tempo de Estabelecimento (ts)	Erro em regime (ess)
PT-3	7,4 s	0,63 mca	24,8 s	0,26%
PT-5	7,7 s	0,0 mca	7,7 s	0,25%

Conforme informações extraídas da Tabela 5.13, o tempo de subida, ou seja, o tempo levado pelas duas variáveis de estado para atingirem, pela primeira vez o valor de referência, foi muito próximo um do outro. Os valores do sobressinal foram inferiores a 1

mca, bem como o erro em regime permanente inferiores a 2%. No entanto o tempo de estabelecimento do PT-3 foi novamente bem superior ao registrado pelo PT-5.

A Tabela 5.14 apresenta os valores médios obtidos dos principais parâmetros hidráulicos do sistema com a CV-2 e CV-3 a 40°.

Tabela 5.14 - Parâmetros da planta com aplicação do controlador

Parâmetro	Zona Alta	Zona Baixa
Pressão (mca)	16,55	11,49
Vazão (m³/h)	3,56	4,18
CV-1	46,13°	
Frequência do CMB (Hz)	43,35	

A partir da análise dos dados registrados na Tabela 5.14, constata-se a eficiência do controlador em reduzir as pressões aos valores inicialmente estipulados como necessários à operação da rede. Além da redução das pressões, observa-se uma redução de 27,75% na frequência do CMB, o que pode gerar uma queda no consumo energético do sistema de distribuição.

5.3 CONCLUSÕES

A partir dos resultados mostrados através dos gráficos e tabelas já dispostos nesse capítulo, é possível verificar a utilidade e validade da aplicação do controlador *fuzzy* no sistema de abastecimento simulado pela bancada SADA. O controle não apresentou sobressinal acima de 2 mca, e seu comportamento estacionário foi verificado em menos de 60s de operação após o seu acionamento para os sistemas centralizados e descentralizados, nas duas situações de máxima e mínima demanda. Apesar das variações registradas na CV-1, a frequência do CMB mostrou-se mais protagonista em garantir as pressões de serviço nas duas zonas de pressão.

Os controladores também se mostraram bastantes eficientes controlar as pressões, fazendo-as retornarem aos seus valores de referência, mesmo após a imposição de perturbações. Essas variações foram geradas por meio do fechamento e abertura do registro localizado a montante da saída das duas zonas de pressão.

No entanto, pelos resultados apresentado, ao se comparar os dois controladores, é possível constatar que a atuação do controle no sistema centralizado se mostrou mais eficiente quando comparado ao descentralizado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 INTRODUÇÃO

A água e a energia são recursos indispensáveis ao desenvolvimento de uma sociedade, independente de seu porte. A cada dia aumentam as demandas para o consumo desses dois insumos, acompanhando a demanda populacional. No entanto, o uso, que deveria ser consciente e eficiente, mostra-se desregulado e ineficiente, com tecnologias ultrapassadas e de notório interesse econômico, sem a interação entre o meio-ambiente e o desenvolvimento socioeconômico de uma região.

No entanto, o parâmetro atual, em um mundo onde não é mais possível o ato desenfreado do desperdício, exige uma maior preocupação por parte dos gestores e pesquisadores, em diversas áreas, com o objetivo comum de criar novas metodologias e tecnologias que visem o uso racional e eficiente de recursos indispensáveis ao desenvolvimento humano, tais como a água e a energia elétrica.

6.2 CONCLUSÕES FINAIS

Nesta pesquisa, foi proposto, desenvolvido e aplicado um controlador baseado na lógica *fuzzy* com o intuito de controlar as pressões em um sistema automatizado de distribuição de água, que simulou duas zonas topográficas diferenciadas. Situação esta muito comum nas redes de abastecimento de água, das grandes ou pequenas comunidades.

O controle *fuzzy*, baseado na experiência de operadores e no funcionamento de um sistema já analisado, mostrou-se de fácil manuseio e extremamente interativo, simulando as manobras feitas por operadores. No entanto, o controle tinha como base de regras requisitos hidráulicos e teóricos, o que garante uma operação mais eficiente do que as situações encontradas no dia a dia das intervenções feitas em um SAA.

Foram desenvolvidos dois controladores, um para funcionamento em sistema descentralizado, que controlava de maneira independente as pressões em cada zona de pressão. E um controlador aplicado em um sistema centralizado, cujo objetivo de funcionamento era controlar, ao mesmo tempo e de forma dependente, as pressões nas duas zonas. Pelos resultados apresentados, o segundo controle se mostrou mais eficiente e com respostas mais ágeis, quando comparado ao aplicado no sistema descentralizado. Nas duas situações, foi possível constatar a influência mais significativa do CMB na pressurização das duas zonas, no entanto, a CV-1 foi de extrema importância na regulação dessas pressões. O experimento 3 apresentou sobressinal de 3,4 mca, no entanto, atingiu seus valores de referência em menos de 60 s. Os experimentos 9 e 10 não apresentaram sobressinal superior a 0,2 mca, além disso, o sistema adquiriu estabilidade em menos de 10s. Os dois controladores se mostraram eficientes em controlar as pressões na bancada, no entanto ressalta-se uma resposta mais rápida alcançada pelo sistema centralizado.

Os resultados apresentados validam a utilização de controladores em redes pressurizadas de abastecimento de água, garantindo maior eficiência e uma operação técnica mais centrada em parâmetros científicos. Desta forma, o objetivo final, de garantir pressões e vazões, com a redução de consumo de água e energia, pode ser alcançado de maneira satisfatória.

6.3 COMENTÁRIOS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestões para melhoramento dos resultados, e futuras aplicações de controle no SADA, sugerem-se a aplicação dos seguintes pontos:

- 1 – Utilização do *booster* como mais uma variável de controle na pressurização da ZA;
- 2 – Aplicação de parâmetros elétricos na análise dos resultados, bem como na validação da eficiência energética, quando da aplicação de um controlador em um SAA;

3– Aplicação de dois controladores diferenciados, tais como Redes Neurais Artificiais e lógica *fuzzy* a fim de realizar testes comparativos e determinar as diferenças, vantagens e desvantagens entre cada um dos dois.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ABES] – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água: Diagnóstico, Potencial de Ganhos com sua Redução e Propostas de Medidas para o Efetivo Combate. 2013.

[ABES] – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Controle e Redução de Perdas nos Sistemas Públicos de Abastecimento de Água: Posicionamento e Contribuições Técnicas da ABES. 2015.

[SABESP] Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Mananciais. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/>> Acesso em abril de 2014.

[SABESP] Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Programa de Controle e Redução de Perdas – Diretoria Metropolitana de Distribuição / M. 2004.

[SENAI] Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção. Instrumentação – Elementos Finais de Controle. Espírito Santo, 1999.

[SNIS] Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto – 2012. Brasília, 2014.

ALENCAR, R. I. S. **Sistemas de Bombeamento** – Organizador Heber Pimentel Gomes. Capítulo 4 Válvulas de Controle. 2º ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

ALMEIDA, P. E. M.; EVSUKOFF, A. G. Sistemas Fuzzy. In: Solange Oliveira Rezende. (Org.). **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. 2º ed. São Paulo, SP: Editora Manole, 2003, v., p. 169-202.

ANDRADE, M.; JACQUES, M.A.P. **Estudo Comparativo de Controladores de Mamdani e Sugeno para Controle de Tráfego em Interseções Isoladas**. TRANSPORTES, v. XVI, n. 2, p. 24-31, dezembro 2008.

ANDRADE FILHO, L. S. **Sistemas de Bombeamento** – Organizador Heber Pimentel Gomes. Capítulo 2 Bombas e Estações Elevatórias. 2º ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

ARAÚJO, F.M.U. **Sistemas de Controle**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

BAUCHSPIESS, A. **Introdução aos Sistemas Inteligentes: Aplicações em Engenharia de Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy**. Universidade de Brasília. Brasília, 2008.

BELLUCCI, D.P. **Sistemas Baseados em Regras Fuzzy e Aplicações**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC. Santo André, 2009.

BEZERRA, S.T.M. SILVA, S.A. GOMES, H.P. **Operational optimisation of water supply networks using a fuzzy system**. Water SA Vol. 38 No. 4, ISSN 0378-4738. July, 2012.

BEZERRA, S.T.M.; CHEUNG, P.B. **Perdas de Água – Tecnologias de Controle**. 1 ed. João Pessoa: Editora Universitária da Universidade Federal, 220p. ISBN: 9788523707019, 2013.

BILOBREVEC, M.; MARÇAL, R.F.M.; KOVALESKI, J.L. Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando à lógica *fuzzy*. In: XI Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP – Bauru, 2004.

BRAZ, P. H. A.; VIANA, D. C. Implementação de Controladores Fuzzy em CLP's de Pequeno Porte. In: XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI) Natal – RN, 25 a 28 de outubro de 2015.

CAMBOIM, W. L. L.; SILVA, S.A.; GOMES, H.P. **Aplicação de técnicas de controle Fuzzy em sistemas de abastecimento**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v.19, n.1, Rio de Janeiro, 2014.

DIAS, M.A. **Introdução ao Estudo das Implicações Fuzzy Valoradas Intervalarmente**. Universidade Católica de Pelotas. Pelotas, 2010.

FONSECA, F.R. **Modelo de Sistema de Automação Aplicado à Setorização de Redes de Abastecimento Hídrico**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 155p. São Paulo, 2011.

GARCIA, A.L.J. **Implementação Eletrônica de Sistemas Fuzzy**. Dissertação Submetida à Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento – Análise Econômica de Projetos**. 1 ed, Rio de Janeiro: Editora da ABES Nacional, 2005.

GOMES, H.P. **Sistemas de Abastecimento de Água – Dimensionamento Econômico e Operação de Redes Elevatórias**. 3 ed, João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.

GOMES, H.P. **Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética**. 1º Ed. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2009.

GOMES, H.P.; CARVALHO, P.S.O. **Manual de Sistemas de Bombeamento – Eficiência Energética. Manual do Usuário**, PROCEL / SANEAR. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2012.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações**. In: VI International Fuzzy Systems Association World Congress, 1995, São Paulo. Tutorials of IFSA '95, 1995. v. 1. p. 1-38

HUBKA, V.; EDER, W.E. **Theory of thecnical systems**. 275 p. ISBN 3-540-17451-6Germany: Springer-Verlag, 1988.

ITALLIANO, W. L.; NOZAKI, A. K.; NOZAKI, V. T.; HOJAIJ, A.; SARGI, J. M. **Automação de Unidades de Abastecimento de Água – Avanço Tecnológico d Redução de Gastos**. Associação Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento. Saneamento ambiental: a hora da solução. Rio Grande do Sul, ASSEMAE, 2004, p.7 Ilus. São Paulo, 2004.

JIANG, W. **The Application of the Fuzzy Theory in the Design of Intelligent Building Control of Water Tank**. *Journal of Software*, Vol. 6, Nº. 6, June 2011.

KATBAB, A. **Fuzzy Logic and Controller Design-A Review**. Southeastcon '95. Visualize the Future., Proceedings., IEEE, 1995.

LEE, C.C. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I**. IEEE, Transactions on Systems, Man and Cyberneties. Vol. 20, Nº 2, Março/Abril 1990.

LINDEIL E.; ORMSBEE I.; LANSEY, E. K. **Optimal Control of Water Supply Pumping Systems**. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 1994.

LOPES, J. S. B.; FERNANDES JÚNIOR, F.G.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U.; OLIVEIRA, L. A. H.G. Implementação de Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy e

Instrumentação Industrial. In: VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, setembro de 2005.

LUIZ, C.C.; SILVA, C.C.; COELHO, A.A.R.; BRUCIAPAGLIA, A.H. **Controle Adaptativo Versus Controle Fuzzy: Um Estudo de Caso em um Processo de Nível.** SBA Controle & Automação. v.8, n. 2, 1997.

MALHEIRO, R.; MARTINS, J.P.; LACERDA, F. **Controlo de Perdas Aparentes em Sistemas de Abastecimento de Água com Utilização de Telecontagem.** Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, ISBN 978-989-95557-5-4. Portugal, 2011.

MALINOWSKA, A.; HEJMANOWSKI, R.; RUSEK, J. **Estimation of the Parameters Affecting the Water Pipelines on the Mining Terrains with a Use of an Adaptive Fuzzy System.** Arch. Min. Sci., Vol. 61 (2016), No 1, p. 183–197.

MAMDANI, E.H. **Application of Fuzzy Logic to Aproximate Reasoning Using Linguistic Synthesis.** IEEE Transactions on Computers. v. C-26, n. 12, 1977.

MARINOS, P. N. **Fuzzy Logic and Its Application to Switching Systems.** IEEE Trans. Computers, vol. C-18, pp. 343-348, April 1969.

MARODIN, J.K.; SANTOS, L.C.; TRAUTWEIN Jr. B. Impactos da Automação em Sistemas de Abastecimento de Água: Aspectos de Gestão do Conhecimento. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

MARRO, A.A.; SOUZA, A.M.C.; CAVALCANTE, E.R.S.; BEZERRA, G.S.; NUNES, R.O. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações.** Natal, 2009.

MARQUES, L.C.S. **Inversores de Frequência.** Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Porto Alegre, 2010.

MELO, J.R.C. **Projeto de Sistemas de Abastecimento de Água.** Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2011.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC. 695 p. ISBN 8521613016, 2002.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil. 809 p. ISBN 9788576058106, 2003.

ORTEGA, N. R. S. **Aplicação da Teoria de Conjuntos Fuzzy a Problemas da Biomedicina**. Tese de Doutorado submetida ao Instituto de Física da Universidade São Paulo. São Paulo, 2001.

PEREIRA, J.A.R.; CONDURÚ, M.T. **Abastecimento de Água – Informação para Eficiência Hidroenergética**. João Pessoa: Editora Universitária – UFPB, 2014.

PINTO, M. B. B.; MOTA, J. G. R.; ALMEIDA, O. M. **Pid self-adjustable fuzzy logic mimo case: method and application**. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON, 2010.

RABELO, R.A.L.; CARNEIRO, A.A.F.M.; BRAGA, R.T.V. Um Sistema de Inferência Fuzzy Paramétrico Aplicado ao Planejamento da Operação Energética de Sistemas Hidrotérmicos de Geração. Sba Controle & Automação vol.22 no.1 Campinas Feb. 2011.

RHEINGANTZ, P.A. Lógica Fuzzy e Variáveis Linguísticas Aplicadas na Avaliação de Desempenho de Edifícios de Escritório. Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Rio de Janeiro, 2002.

RIGNEL, D.G.S.; CHENCI, G.P.; LUCAS, C.A. **Uma Introdução a Lógica Fuzzy**. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica. Vol. 01, Nr. 01, 2011

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engeneering Applications**. Wiley, third edition, 2010.

SALOMÃO, J.M. **Introdução à Lógica Matemática – Lógica e Sistemas Difuso (Lógica Fuzzy)**. Curso de Engenharia Elétrica. Coordenadoria de Eletrotécnica, CEFTE-ES. Espírito Santo, 2007.

SHARMA, A.; MANDLIK, P.; DESHPANDE, A.; YADAV, J.; LADKAT, P. **Fuzzy Logic Application in Water Supply System Management: A case study**. Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), Annual Meeting of the North American, 2012.

SINGHALA, P. SHAH, D. N. PATEL, B. **Temperature Control using Fuzzy Logic**. International Journal of Instrumentation and Control Systems (IJICS) Vol.4, No.1, India, January 2014.

SILVA, A.W.; SILVA, C.R.; AZEVEDO, E.S.; SOUZA, M.X. 3 CHAVES, P. **Automação do Sistema de Abastecimento dos Apanhadores de Água - Minas do Complexo Mariana – Vale S.A.** 8º In: Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto. Minas Gerais, 2014.

SILVA, M. J. G.; ARAÚJO, C. S.; BEZERRA, S. T. M.; ARNAUD, S.; SOUTO, C. R.; GOMES, H. P. **Sistema de Controle Adaptativo Aplicado a um Sistema de Distribuição de Água com Ênfase na Eficiência Energética**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.20 n.3, jul/set 2015, 405-413.

SIMÕES, M.G.; SHAW, I.S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2º ed. São Paulo: Editora Blucher: FAPESP. ISBN: 9788521204169. 2007.

TAHAVORI, M.; KALLESØE, C.S.; WISNIEWSKI, J.L.R. **Modeling of Water Supply Systems: Circuit Theoretic Approach**. 7th IEEE In: Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2012.

TANSCHKEIT, R. **Sistemas Fuzzy**. DEE-PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1995.

TIAN, H.; WU, Z. 1.; QI, X. **Design and Implementation of Cascade Fuzzy Controller For Secondary Pipe Network Of Heat Exchange Station**. International Journal of Control and Automation. Vol.8, No.8, pp.75-86. China, 2015.

TSUTIYA, M. T., **Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água**. ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 2006.

YEN, J.; LANGARI, R. **Fuzzy Logic: Intelligence, control, and Information**. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999.

YU, Y.; FOWLER, E.R. **Rule Based Fuzzy Logic Inferencing. Systems, Man, and Cybernetics**, 1994. Humans, Information and Technology, 1994 IEEE International Conference.

ZADEH, L. **Fuzzy Sets - Information and Control**, vol. 8, pp 338-353, 1965.

ZADEH, L. A. **Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes**. IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics, VOL. SMC-3, NO. 1, JANUARY 1973.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets and applications**. USA: John Wiley & Sons, 684p. 1987.

ZIMMERMANN, H. J., **Fuzzy Set Theory and Its Applications**, U.S.A, Kluwer Nijhoff Publishing. 1985.

APÊNDICE A

8.1 A.1 – INTRODUÇÃO

O Apêndice A traz toda a programação utilizada na plataforma LabVIEW®. As figuras a seguir mostram toda a programação desenvolvida para automatização e controle do SADA. Também serão mostradas as interfaces de automação para acionamento da bancada, bem como a interface do controlador *fuzzy* para os dois tipos de sistemas aqui utilizados, o centralizado e descentralizado.

Figura A.8.1 – Interface de acionamento da bancada

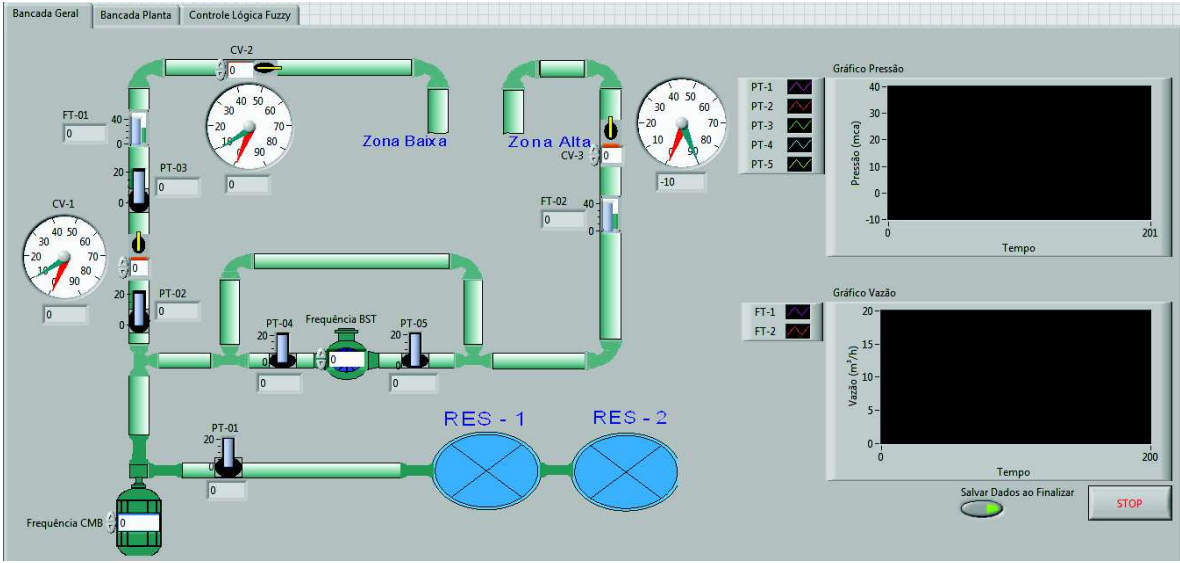
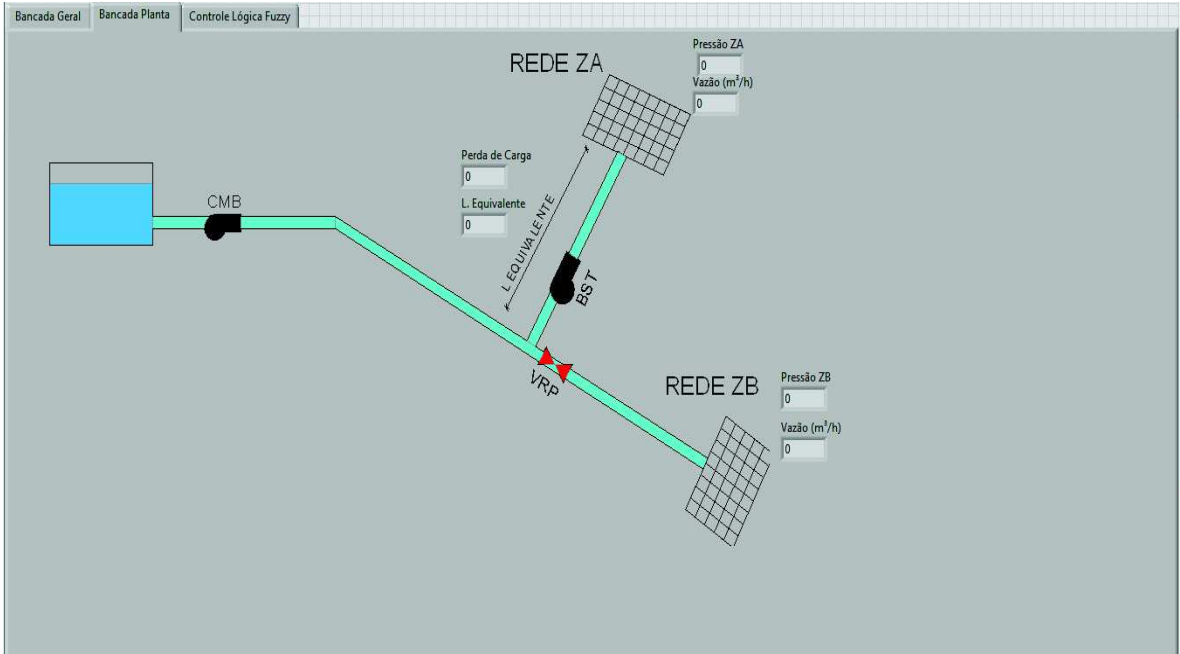


Figura A.8.2 – Esquemática das zonas de pressão em planta



Bancada Geral Bancada Planta **Controle Lógica Fuzzy**

Ativar Controle (CMB) ☒ ZP Baixa ☒ SP ZP Baixa ☒ ZP Alta ☒ SP ZP Alta

Ativar Controle (CV) SP PT-03 11,5 SP PT-05 16,3

Ativar Controle Sistema Centralizado

Gráfico Pressão 2

Pressão (mca)

Tempo

Gráfico Pressão 3

Pressão (mca)

Tempo

[illegible]

Figura A.8.5 - Programação LabVIEW® - Parte II

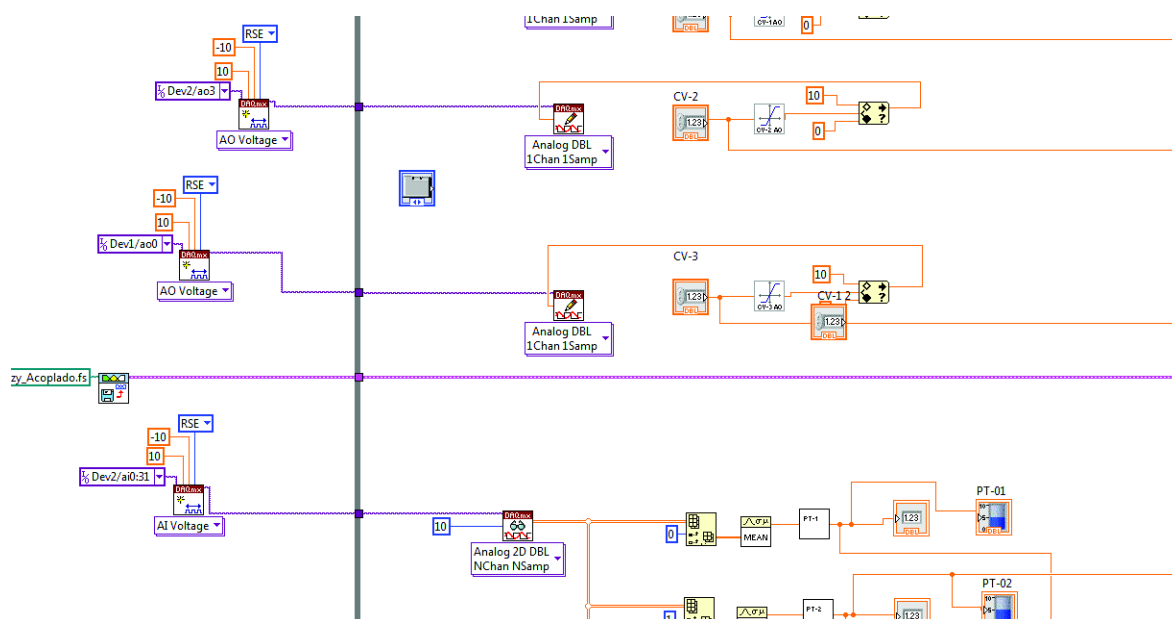


Figura A.8.6 - Programação LabVIEW® - Parte III

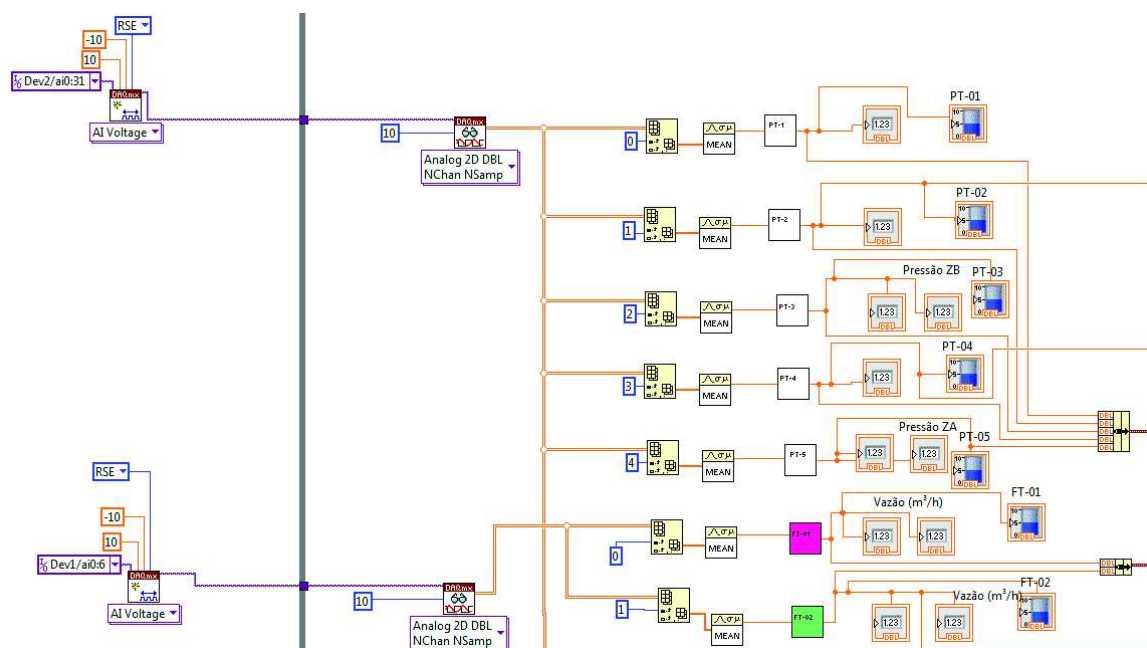


Figura A.8.7 - Programação LabVIEW® - Parte IV

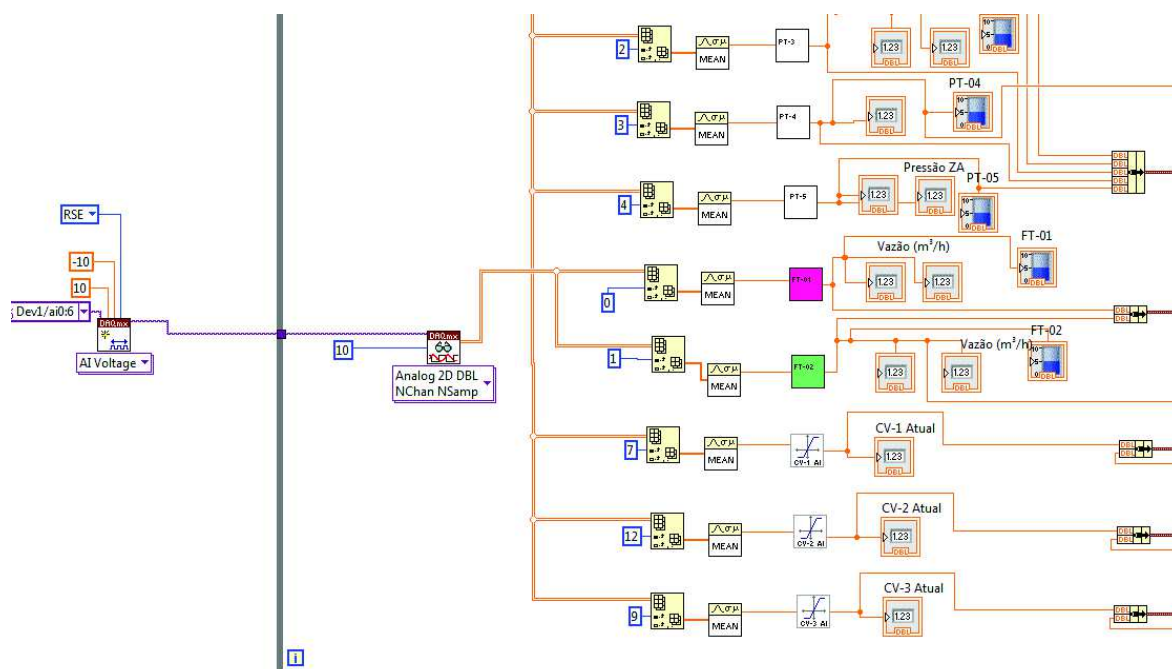


Figura A.8.8 - Programação LabVIEW® - Parte V

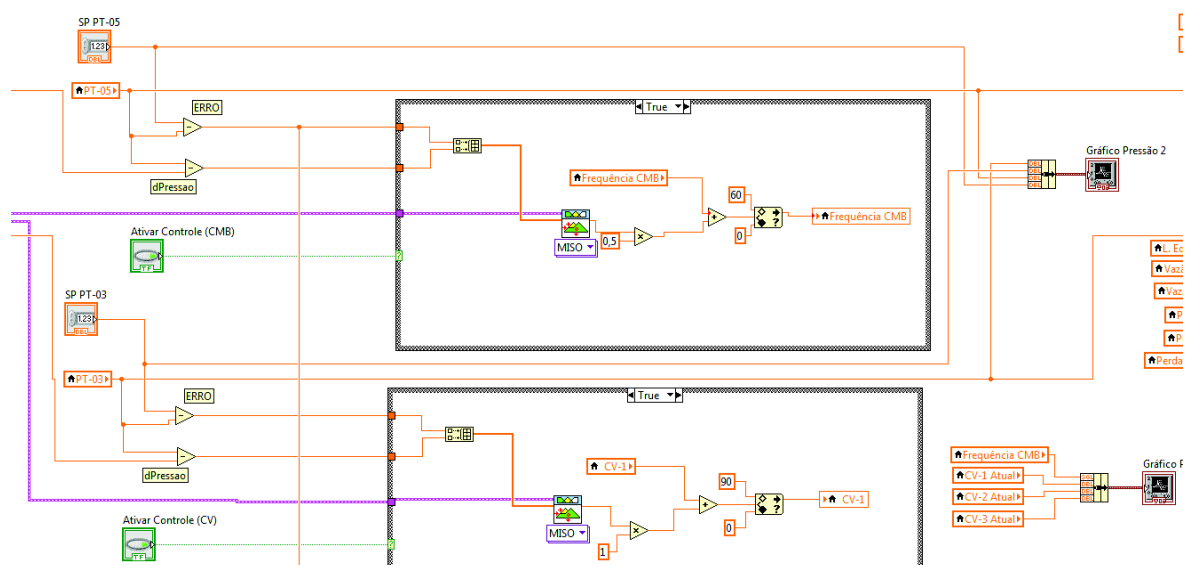


Figura A.8.9 - Programação LabVIEW® - Parte VI

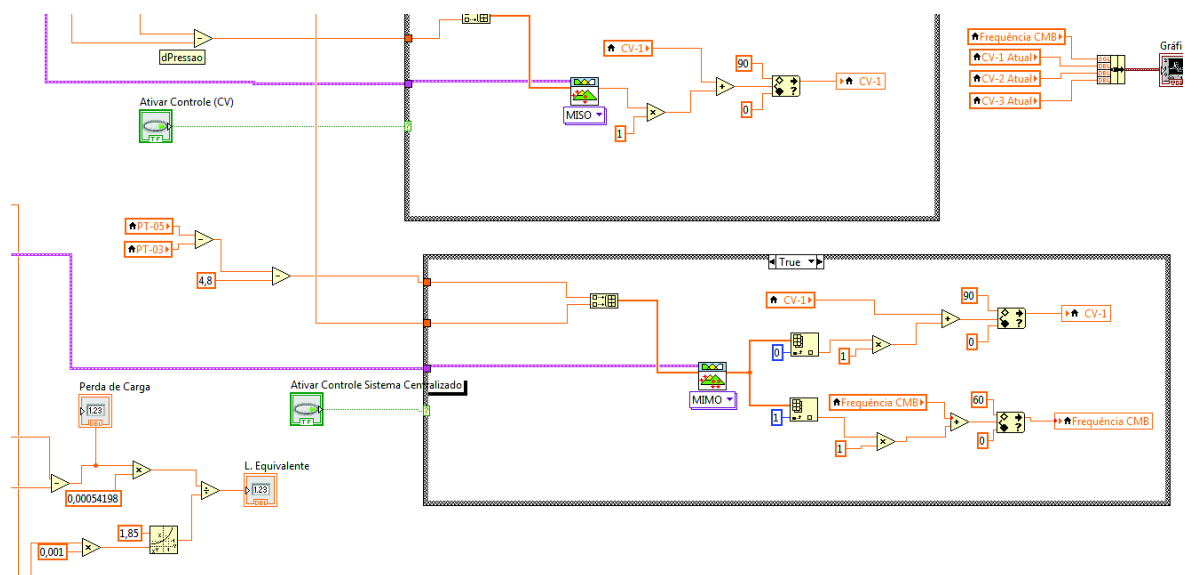


Figura A.8.10 - Programação LabVIEW® - Parte VII

