

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

Mikaelle Lopes Diniz

**Avaliação da eficiência energética de um sistema de abastecimento
de água usando sistemas *fuzzy* para o controle da pressão**

**Paraíba - PB
Novembro – 2018**

MIKAELLE LOPES DINIZ

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA USANDO SISTEMAS *FUZZY* PARA O
CONTROLE DA PRESSÃO**

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

Paraíba – PB

Novembro – 2018

Diniz, Mikaelle Lopes

Avaliação da eficiência energética de um sistema de abastecimento de água usando sistemas *fuzzy* para o controle da pressão. / Mikaelle Lopes Diniz. – João Pessoa, 2017.

58f. il.:

Orientador: Dr. Prof. Juan Moises Maurício Villanueva.

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Lógica *fuzzy* 2. Sistemas de abastecimento de água 3. Eficiência energética

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. XXX.X(XXX)

Mikaelle Lopes Diniz

Avaliação da eficiência energética de um sistema de abastecimento de água usando sistemas *fuzzy* para o controle da pressão

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

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

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

Prof. Dr. Carlos Alberto de Souza Filho
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Gilberto Moreira Amado
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Heber Pimentel Gomes
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre me mostra os melhores caminhos!

À minha mãe, a meu pai e a minha irmã, Melânia, simplesmente por existirem na minha vida e tornarem tudo melhor.

À Felipe, pelo apoio nessa fase e em todas as outras.

Ao meu orientador desse trabalho, o professor Dr. Juan Moises Villanueva, pelas orientações, paciência e confiança nesse processo.

Ao meu orientador do Programa de Iniciação Científica, professor Dr. Gilberto que me introduziu ao conhecimento de diferentes áreas e pelos conselhos dados ao longo desses anos de graduação.

À todas as amizades construídas ao longo da graduação, que tornaram mais esses anos mais leves.

A todos os professores da graduação pela excelente formação que me proporcionaram.

Não poderia deixar de agradecer ao professor Dr. Heber por permitir o uso de seu laboratório e por compartilhar o seu conhecimento.

À Kamilla, que pacientemente compartilhou seus valiosos conhecimentos sobre a bancada.

Agradeço a Daniel e “Lia” por deixar o ambiente de trabalho mais agradável e por compartilhar comigo suas risadas.

O abastecimento de água e energia são imprescindíveis para a população, garantindo conforto. Para garantir o abastecimento é necessário o uso consciente de recursos hidráulicos e energéticos. Um meio de melhorar e evitar desperdícios nesse processo está na otimização dos meios de abastecimento de água. É amplamente conhecido os benefícios de utilizar métodos de controle e automatização na otimização de processos. Esse trabalho propõe utilizar o controlador inteligente *fuzzy* aplicado a zona com topologia baixa de abastecimento direto. O objetivo do controlador é garantir que a pressão de serviço no sistema de abastecimento, com consumos variáveis, se mantenha constante e próximo a um valor de referência a partir do controle da frequência do sistema de impulsão, formado por um conjunto motor bomba.

O desempenho do controlador foi analisado para diferentes consumos e com perturbações, simulando, por exemplo, vazamentos na rede de distribuição. O controlador também foi analisado no tocante dos benefícios da eficiência energética que ele fornece ao sistema. O controlador se mostrou eficiente ao conseguiu atuar sobre o conjunto motor bomba, mantendo as pressões aos em seus valores de referência em diferentes cenários de consumo, se mostrando mais eficiente que quando comparadas ao sistema sem controlador.

Palavras-Chaves: Logica *Fuzzy*, Sistemas de Abastecimento de Água, Eficiência Energética

ABSTRACT

The water and energy supply are essential for the population, providing comfort in daily activities. To ensure the supply, the use water and energy resources conscientiously shows necessary.

A way to improve and avoid wastage in this process, is in the optimization of the water supply. It is widely known of the benefits of using control and automation methods in optimization process. This work proposes to use the intelligent fuzzy controller applied to the low area topology with direct supply. The purpose of the controller is to ensure that the service pressure in the system, with variable consumption, is maintained constant and close to a reference value, using the control of frequency drive system, which is formed by a motor pump assembly.

The performance of the controller was analyzed for different consumptions and disturbances, simulating, for example, leaks in the distribution network. The controller has also been analyzed for the benefits of energy efficiency it provides to the system. The controller proved efficient in being able to operate on the pump motor assembly, maintaining the pressures close to their reference values in different consumption scenarios, being more efficient than when compared to the system without controller.

Key words: Water supply, Fuzzy logic, Efficient energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Sistema de abastecimento de água.....	19
Figura 2.2 Curva característica de uma bomba.	20
Figura 2.3- Fluxograma para um sistema baseado em logica <i>fuzzy</i>	22
Figura 2.4- Exemplo de Conjunto Fuzzy	23
Figura 2.5- Método de defuzzyficação por centro de área	25
Figura 3.1- Bancada Experimental	27
Figura 3.2- Conjunto Motor- Bomba de 3 CV.	28
Figura 3.3- Inversor de Frequência CFW-08	28
Figura 3.4- Transdutores de pressão da Acros.	30
Figura 3.5- Transdutores de vazão da Incontrol.	31
Figura 3.6- Válvula redutora proporcional.	32
Figura 3.7- Interface do LabView.	33
Figura 3.8- Esquema ilustrativo da bancada de testes.	34
Figura 3.9- Curva do conjunto motor bomba.	35
Figura 3.10- Curva do conjunto motor bomba.	36
Figura 3.11- Frequência versus Altura Manométrica (máximo consumo).....	37
Figura 3.12 Frequência versus Altura Manométrica (mínimo consumo).....	38
Figura 3.13- Sistema de controle de pressão: 2 entradas, 1 saída, 25 regras.....	39
Figura 3.14- Variáveis de entrada (ERRO)	40
Figura 3.15- Variáveis de entrada (derivada do ERRO)	41
Figura 3.16- Variáveis de saída (derivada da FREQUÊNCIA).....	41
Figura 3.17-Comportamento tridimensional das variáveis do controle <i>fuzzy</i>	44
Figura 3.18- Matriz associativa do controlador.....	45
Figura 4.1 - Gráfico da operação em malha aberta.....	47
Figura 4.2- Características do controlador <i>fuzzy</i>	48
Figura 4.3- Sistema sobre influência do controlador <i>fuzzy</i>	50
Figura 4.4- Resposta o sistema a perturbações do meio.....	51
Figura 4.5- Potência elétrica (P) requerida do motor	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Especificações técnicas do CMB.....	29
Tabela 3.2 Especificações técnicas do Inversor de frequência.....	29
Tabela 3.3- Especificações técnicas dos transdutores de pressão	30
Tabela 3.4- Especificações técnicas dos medidores de vazão	31
Tabela 3.5 Especificações técnicas das válvulas proporcionais.....	32
Tabela 3.6 Especificações técnicas das interfaces de aquisição de dados.....	33
Tabela 3.7- Dados referentes ao traçado da curva da bomba.	35
Tabela 3.8- dados referentes ao traçado da curva da bomba.	36
Tabela 3.9- 25 Regras <i>Fuzzy</i>	42
Tabela 3.10- Simplificação das Regras <i>Fuzzy</i>	43
Tabela 4.1- Característica do controlador.....	49
Tabela 4.2- Valores de potência para diferentes cenários de consumos em operação de malha aberta.	52
Tabela 4.3-Valores de potência para diferentes cenários de consumos em operação de malha fechada.....	53

LISTA DE SIGLAS

EUA: Estados Unidos da América

UFPB: Universidade Federal da Paraíba

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SAA: Sistema de Abastecimento de Água

LENHS: Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento

VRP: Válvula Redutora de Pressão

CMB: Conjunto Motor

CV: Válvula de Controle

PT: Transdutor de Pressão

FT: Medidor de Vazão

SADA: Sistema Automatizado de Distribuição de Água

EGN: Grande Erro Negativo

EM: Erro Negativo

EZ: Erro Zero

EP: Erro Positivo

EGP: Grande Erro Positivo

DEGN: Derivada do Erro Grande Negativo

DEN: Derivada do Erro Negativa

DEN: Derivada do Erro Zero

DEP: Derivada do Erro Positiva

DEGP: Grande Derivada Pressão Positiva

DFGN: Grande Delta de Frequência Negativo

DFN: Delta de Frequência Negativo

DFZ: Delta de Frequência Zero

DFP: Delta de Frequência Positivo

DFGP: Grande Delta de Frequência Positivo

P_m = Potência do motor

P = Potência Elétrica

η_m = Eficiência do motor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos.....	16
1.2.1. Objetivo Geral	16
1.2.2. Objetivos Específicos	16
1.3. Estrutura do Documento.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1. Sistemas de Abastecimento de Água.....	18
2.2. Conjunto Motor Bomba (CMB)	20
2.3. Conversores De Frequência.....	21
2.4. Fundamentos da Teoria Logica Fuzzy	21
2.4.1. Conjunto <i>Fuzzy</i>	22
2.4.2. Variável linguísticas	23
2.4.3. Função de pertinência.....	24
2.4.4. Inferência de Mandani	24
2.4.5. Fuzzyficação e Defuzzyficação	25
2.4.6. Regras Fuzzy	26
3. METODOLOGIA.....	27
3.1. Bancada experimental.....	27
3.2. Materiais e métodos.....	34
3.2.1. Curva do CMB	34
3.2.2. Relação entre a frequência aplicada ao motor e altura manométrica	37
3.3. Controlador <i>Fuzzy</i>	38
3.3.1. Definição das variáveis de entrada e de saída	39
3.3.2. Função pertinência de cada conjunto	40
3.3.3. Base de Regra e Processo de interferência	42
4. RESULTADO	46
4.1. Operação em Malha Aberta.....	46
4.2. Características do controlador	48

4.3. Operação em Malha Fechada	49
4.4. Resposta do sistema a perturbações em operação de malha fechada	51
4.5. Efeito do controlador no consumo de energia elétrica	52
5. CONCLUSÃO.....	54
5.1. Comentários e sugestões para futuros trabalhos.....	55
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1. INTRODUÇÃO

O capítulo a seguir traz uma introdução a crise hidráulica, a qual está presente em vários países, e também mostra os índices da distribuição de água no mundo. Este capítulo busca também oferecer uma solução para sanar alguns desafios encontrados nas redes de distribuição de água, usando controladores inteligente para otimizar tal processo, buscando a eficiência.

1.1. Motivação

É amplamente conhecido os números da distribuição da água no mundo, apenas 3% de todos os recursos hídricos existentes no planeta são de água doce, ou seja, própria para consumo. Segundo Revenga (2000), desses 3% de água doce existente, a maior parte encontra-se nas geleiras e nos lençóis freáticos, e 60% da água doce disponível está concentrada em 10 países: Brasil, Rússia, China, Canadá, Indonésia, EUA, Índia, Colômbia e Congo. O Brasil possui a maior reserva mundial de água potável, com 12% do montante total de água doce, o que não necessariamente livra o país de sofrer com a falta desse importante recurso natural (Pena, 2016). Agravando ainda mais os índices de distribuição, o Brasil registra elevado desperdício nas redes de distribuição: dependendo do município, até 60% da água tratada para consumo se perde, especialmente por vazamentos nas tubulações, (SAVEH, 2016).

Ainda sobre a distribuição da água, a localização geográfica do Brasil é naturalmente desigual, assim áreas com maior densidade demográfica possui menor concentração de recursos hídricos. A Tabela 1 mostra a relação entre densidade demográfica e a disponibilidade de água entre as diversas regiões do país.

Além dos problemas na distribuição de água no Brasil, o país vem convivendo com o desenvolvimento de uma crise energética. A crise tem origem em fatores como a redução de investimento na transmissão, distribuição e conservação de energia elétrica; dependência de usinas hidrelétricas para produzir quase a totalidade da energia elétrica consumida no país, transformações ambientais que afetam os índices pluviométricos, o qual reflete diretamente na matriz energética brasileira e aumento da demanda que cresce em razão desenvolvimento de novos empreendimentos.

Tabela 1.1 - Distribuição dos recursos hídricos e densidade demográfica do Brasil

Região	Densidade demográfica (hab/ km²)	Concentração dos recursos hídricos do país (%)
Norte	4,12	68,5
Nordeste	34,15	3,3
Centro-Oeste	8,75	15,7
Sudeste	86,92	6
Sul	48,58	6.5

Fonte: IBGE/ Agência Nacional das Águas (2010)

Segundo Gomes (2005), os gastos da energia de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações. Tsutiya (2006) afirma que mais de 90% dos gastos com energia elétrica das concessionárias de água devem-se às estações elevatórias dos sistemas de abastecimento público.

O cenário atual mostra uma saturação da matriz energética e elevados desperdícios hídricos, tornando necessário adotar medidas que possam reduzir os desperdícios e aperfeiçoar os processos envolvidos na distribuição de água. Otimizar o processo por meio de técnicas de controle moderno se torna uma opção viável, que vem demonstrando resultados ao proporcionar da eficiência hidráulica e energética, na maioria dos sistemas de abastecimento de água.

Pela implementação de sistemas de controle tem-se conseguido diminuir ou até dispensar o trabalho humano em diferentes processos. Por meio da automação é possível monitorar, controlar e interferir nas diversas unidades do sistema, em tempo real, possibilitando uma melhoria no desempenho operacional, mensuração de todas as atividades e a redução de custos.

Tsutiya (2006) propõem o procedimento de controle da pressão para aumentar a eficiência dos sistemas de distribuição de água sendo o mais eficiente. Para controlar a pressão e garantir a eficiência nas redes de distribuição de água são usados sistemas de automação e controle.

1.2. Objetivos

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

1.2.1. Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de controle inteligente para o controle das pressões em um sistema de bombeamento de água a qual pode ser influenciada com perturbações ou perdas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Implementar estratégias de controle *fuzzy* para o controle da pressão por meio da atuação no conjunto moto bomba utilizando o inversor de frequência.
- Uso de sistemas supervisórios para o controle de processos e implementação de estratégias de controle inteligente
- Análise das perdas de carga e perturbações no sistema de distribuição usando válvulas redutoras de pressão e sua influência nas ações de controle

1.3. Estrutura do Documento

A estrutura desse trabalho foi dividida em 6 capítulos, quais sejam:

- o Capítulo 1 trata da Introdução, que foi subdividida em motivação, objetivos gerais e específicos;
- o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, em que se abordam os conceitos básicos em redes de abastecimento de água, sistemas de bombeamento e fundamentos da teoria de lógica *fuzzy*;

- o Capítulo 3 descreve detalhadamente a bancada experimental que representa um sistema de abastecimento de água que será utilizado para o desenvolvimento deste trabalho. Serão descritas as metodológicas utilizadas, além da apresentação dos procedimentos para a construção da base de regras utilizadas para o projeto do controlador *fuzzy* que será implementada no programa computacional LabVIEW®;
- O Capítulo 4 apresenta os resultados experimentais do sistema após a atuação do controlador *fuzzy*, assim como uma análise da planta considerando-se perturbações no sistema de abastecimento;
- E por fim, o Capítulo 6 as considerações finais e conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordado o embasamento teórico referente as técnicas de controle moderno e caracterização do sistema.

Também serão apresentados os fundamentos básicos necessários para compreensão da planta e do sistema de abastecimento de água, tais como: conceito, estrutura e demais definições necessárias para a compreensão do sistema.

2.1. Sistemas de Abastecimento de Água

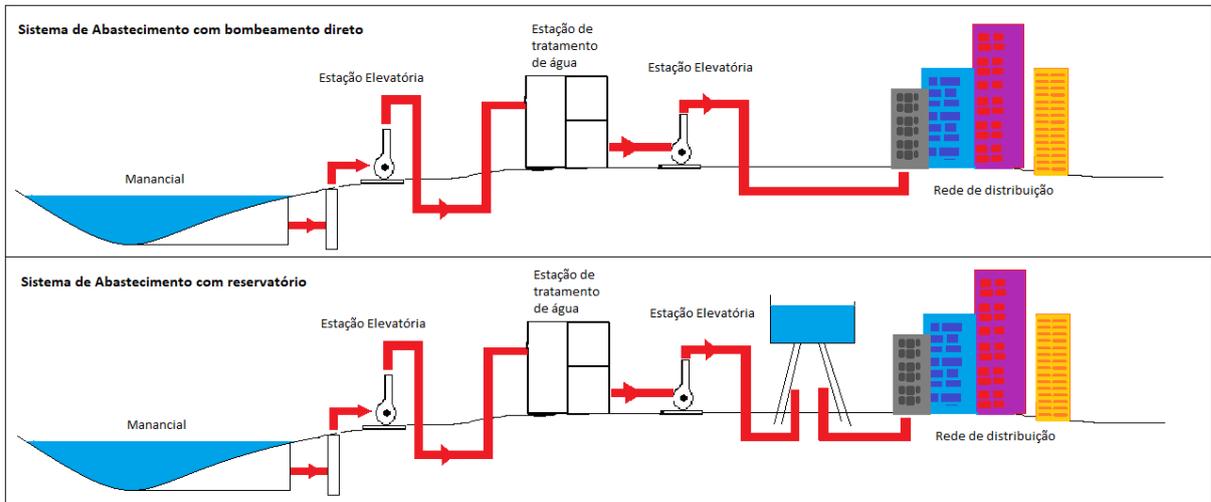
Os sistemas de abastecimento de água são formados por conjuntos de equipamentos, obras e serviços que variam com as características do projeto, topologia do local, disposição dos recursos naturais entre outros fatores. Esses conjuntos se integram de maneira a suprir a necessidade de água dos diversos segmentos da sociedade ou de uma indústria.

Em uma visão geral, um sistema de abastecimento de água é composto por manancial (reserva natural de onde é retirada a água para distribuição), ou seja, a fonte, a captação e a estação elevatória; estação de tratamento; reservatório; rede de distribuição e ligações domiciliares.

Como descrito anteriormente, essa é uma visão geral do sistema de abastecimento de água, não aplicado apenas a abastecimento de cidades, mas pode ser aplicada a indústria, empresariais, prédios, condomínios e entre outros.

A Figura 2.1 mostra duas diferentes concepções típicas de sistemas de abastecimento de água. A primeira figura mostra com uso de reservatório elevado e a segunda utiliza uma estação de bombeamento direto para a rede de distribuição.

Figura 2.1- Sistema de abastecimento de água.



Fonte: Autor.

A finalidade dos reservatórios nos sistemas de abastecimento de água são de servir de reserva de segurança para casos de paralisação ou caso aconteça incêndios, além de também ser utilizado para regular pressões e vazões na rede de distribuição. Também permite a parada do conjunto motobomba (CMB), em horários de pico, gerando um possível aumento no rendimento da estação elevatória. Esse aumento é resultado da manométrica e vazão que permanecerem praticamente com valores constantes.

Em sistemas com bombeamento direto na rede de distribuição de água, o CMB trabalha com o ponto de funcionamento móvel percorrendo a curva característica conforme a demanda do consumo. Como a demanda varia nesse sistema de distribuição de água, a pressão do sistema deve ser monitorada para evitar que em momentos de baixo consumo não se tenha elevados valores de pressão causando possíveis rompimentos nas tubulações e obtendo perdas de água e energia.

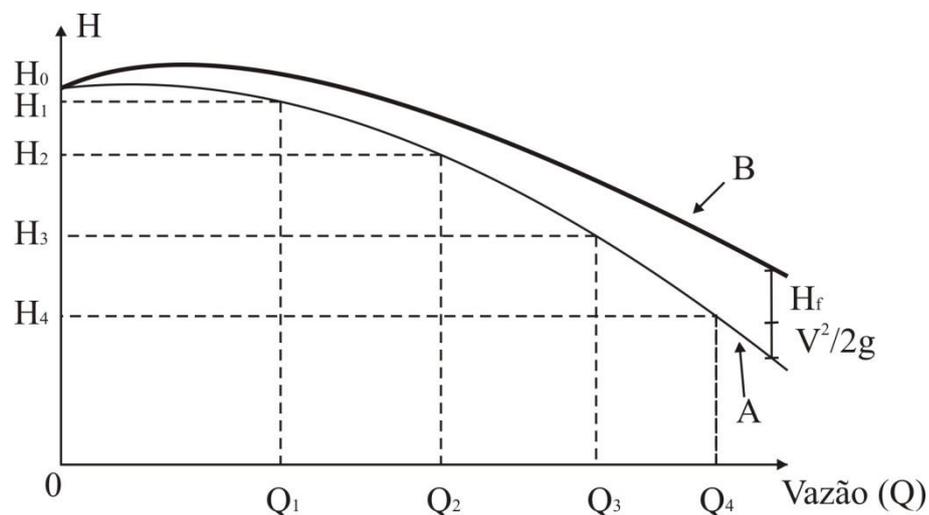
Segundo Bezerra (2009), a utilização de sistemas automáticos para o controle da pressão de sistemas de distribuição de água por meio do uso de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba se mostra satisfatório, podendo ser implementado diretamente em sistemas de distribuição. Sendo assim possível a redução das perdas e do consumo de água e energia elétrica.

2.2. Conjunto Motor Bomba (CMB)

A bomba centrífuga tem como função impulsionar líquidos no sistema de abastecimento. Através de impelidores, a bomba transfere energia centrífuga para o fluido, gerando uma pressão de sucção que produz o fluxo de bombeamento a altas velocidades. Esse impelidor é uma fonte externa à bomba, geralmente um motor elétrico de indução trifásico. A velocidade de rotação é caracterizada pela velocidade que a máquina de acionamento imprime à bomba. Quando é utilizado um motor elétrico, essa velocidade é função direta da frequência e do número de polos do motor.

Para escolha da bomba é necessário conhecer o ponto de operação da mesma, esse ponto é definido por suas curvas características. São estas curvas matemáticas que descrevem a relação entre as variáveis: altura manométrica e vazão de bombeamento. Sobre a altura manométrica, é composta pela soma de duas componentes: altura estática e altura dinâmica. A altura estática é a diferença de cota entre o ponto de sucção e de recalque, ou seja, corresponde a uma altura geométrica. A altura dinâmica é a soma das perdas de carga das tubulações e acessórios, tendo uma variação relacionada com o quadrado da vazão bombeada.

Figura 2.2 Curva característica de uma bomba.



Fonte: Autor

Gomes (2009) explica o gráfico na Figura 2.2 apresentando como um gráfico H x Q, onde a curva da bomba descreve a altura manométrica para diferentes valores de vazão, mantendo-se a rotação da bomba constante. A curva “A” seria a curva obtida se cada valor de

H_i correspondesse ao valor de Q_i . Considerando-se que para cada valor de vazão fosse acrescido às alturas referentes às perdas e a energia cinética remanescente, seria obtida a curva B.

2.3. Conversores De Frequência

O inversor de frequência permite acionar um motor elétrico variando a frequência e a tensão que é fornecida, com o objetivo de controlar a sua velocidade e a potência consumida. Com os valores adequados das variáveis de frequência e número de polos é possível ajustar o conjugado e a velocidade de rotação a necessidade da carga, assim é possível obter a velocidade desejada sem o empobrecimento da regulação de velocidade de rotação do motor.

2.4. Fundamentos da Teoria Logica Fuzzy

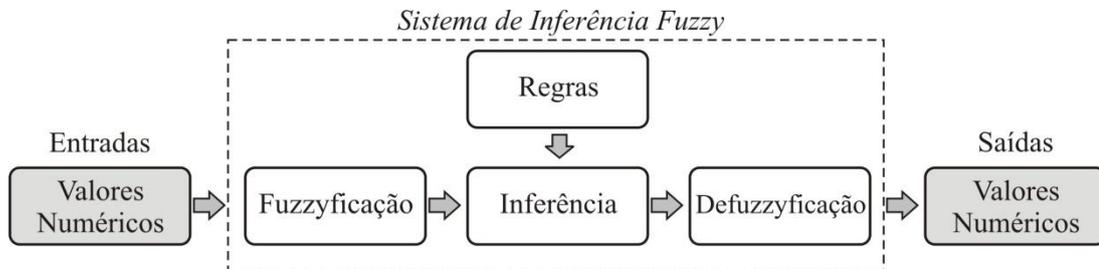
A Lógica *fuzzy* possui graus de pertinências que combinados com a lógica clássica provê um método de traduzir expressões verbais. No dia a dia, as pessoas costumam classificar situações de forma imprecisa e vaga. Ao questionar uma pessoa sobre o clima não se espera que ela responda com precisão os valores de temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, mas um exemplo provável da resposta a ser escutada será: muito frio, pouco húmido e ventos fortes. A lógica *fuzzy* traz métodos que traduzem números em expressões, e expressões em números.

Nas primeiras abordagens de conceitos sobre lógica fuzzy, os conceitos vagos foram desenvolvidos pelo polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956) em 1920, que introduziu conjuntos com três graus de pertinência sendo 0, $\frac{1}{2}$ e 1. Posteriormente expandiu para número infinito entre 0 e 1. Em 1965 um professor em Berkely da Universidade da Califórnia, Lotfi Asker Zadeh, fez a sua primeira publicação sobre a lógica *fuzzy*, traduzindo para o português, logica difusa.

A Figura 2.3 ilustra o funcionamento de um sistema baseado em lógica *fuzzy*. Neste diagrama são descritos os principais blocos que contemplam um sistema de inferência *fuzzy*. 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, base de regras, inferência (mapeamento), *fuzzy*ificação e defuzzyificação.

Figura 2.3- Fluxograma para um sistema baseado em lógica *fuzzy*.



Fonte: Autor.

2.4.1. Conjunto *Fuzzy*

Na teoria clássica dos conjuntos a pertinência de um elemento a um conjunto é bastante clara. Onde, dado um elemento de um conjunto (C) em certo universo U , os elementos deste universo pertencem ou não pertence aquele conjunto.

$$f_c(u) = \begin{cases} 1, & \text{se somente se } u \in C \\ 0, & \text{se somente se } u \notin C \end{cases} \quad (2.1)$$

Em 1965 Lotfi A. Zadeh e Dieter Klaua apresentaram uma extensão da noção clássica de conjuntos, os conjuntos difusos. Em seus estudos, eles puderam concluir que um dado elemento pode pertencer mais a um conjunto do que a outro. Esses conjuntos possuem grau de pertinência, valores iguais a 0 representam total exclusão e valores iguais a 1 indicam total pertinência.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

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:

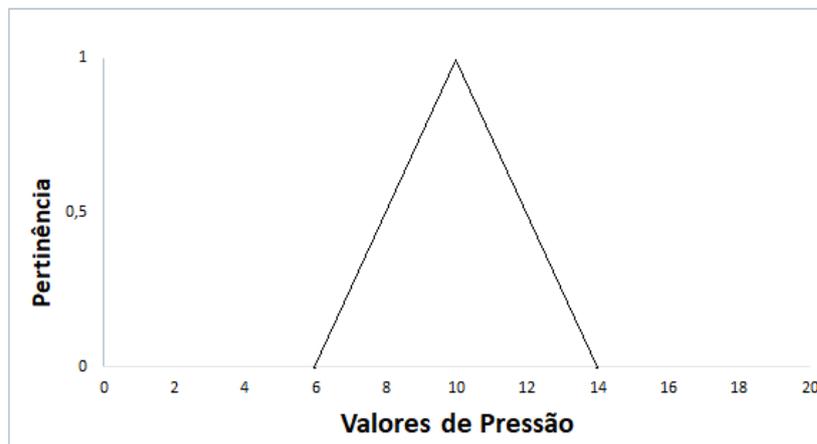
$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad (2.3)$$

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

$$A = \{\mu_A(u), u\}, u \in U \quad (2.4)$$

Para exemplificar este conceito na Figura 2.4 se ilustra um conjunto *fuzzy* triangular que representa uma variável de pressão, com suporte definido no intervalo de 6 a 14 e com pico em 10. É possível observar que quanto mais perto do valor de pressão igual 10, maior a sua pertinência a esse conjunto.

Figura 2.4- Exemplo de Conjunto Fuzzy



Fonte: Autor

2.4.2. Variável linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Uma variável linguística X no universo U é uma variável cujos valores assumidos por ela são subconjuntos *fuzzy* de U . Por meio de um conjunto *fuzzy* representado a partir de um grau de pertinência, uma variável linguística é um substantivo e seus valores são adjetivos. Exemplificando, “pressão” é uma variável e seus atributos podem ser “alta”, “baixa” ou “média”.

Os valores de uma variável linguísticas são sentenças formados a partir de termos primários, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores. Termos primários são nomes de conjuntos *fuzzy* como “alta”, “media” e “baixa”; conectivos lógicos pode ser negação, “E”, “OU” e conectivos mascarados como “mas” e “porém”; modificadores, como “muito”, “pouco”, “levemente”, “extremamente”; Delimitadores, como parênteses.

2.4.3. Função de pertinência

Para Zadeh (1965) um conjunto ordinário tem dois valores para função característica, zero ou um, enquanto os conjuntos *fuzzy* tem o intervalo $0 \leq x \leq 1$. Função de pertinência é a função que associa cada elemento de conjunto *fuzzy* “A” de acordo com a sua pertinência a esse conjunto. Elas são representadas por uma função numérica gráfica, que podem ser triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoide, spline cúbico, dentre outros. Neste trabalho será usado apenas forma triangular e trapezoidal.

2.4.4. Inferência de Mandani

Para implementar cada regra é necessário operadores lógicos que processam dos valores antecedentes e consequentes de cada regra. As regras *fuzzy* coordenam a ação de tomada de decisão do controlador, a agregação dessas regras resulta em um conjunto *fuzzy*, que define a saída do controlador. A saída do controlador precisa passar pelo processo de defuzzificação, para transformar em valores numéricos compreensíveis ao sistema o qual ele está aplicado.

Exemplificando, a estrutura do método de inferência *fuzzy* do tipo Mamdani é dado da forma:

“SE demanda ESTÁ aumentando muito E pressão está baixa, ENTÃO aumentar a
frequência”

Em um sistema típico 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*. Em seguida, a partir das funções de pertinência, os valores convertidos serão mapeados no intervalo [0,1]. As regras *fuzzy* são executadas e o resultado desse processo

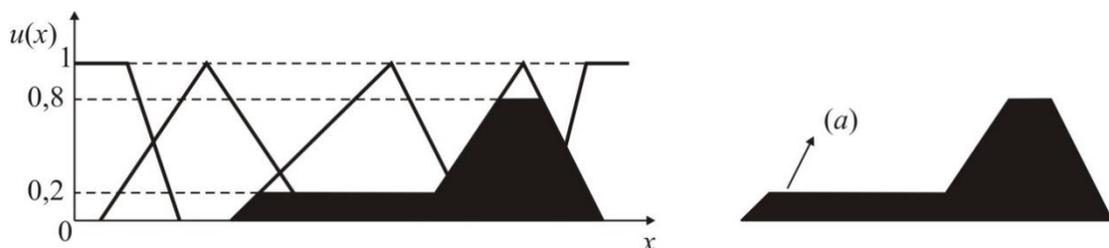
é um conjunto *fuzzy* de saída. Por último, o conjunto gerado é defuzzyficado, e assim, os valores *fuzzy* são convertidos conversão em valores escalares.

2.4.5. Fuzzyficação e Defuzzyficação

Os valores de entrada no sistema de inferência fuzzy são valores exatos e precisos, assim é necessário um processo para a conversão de valores precisos para conjuntos nebulosos. Esse processo é chamado de fuzzyficação e é realizado usando funções de pertinência.

Com a fuzzyficação se torna possível que a máquina de inferência que processa regras, envolvendo termos de variáveis linguísticas, possa compreender os valores numéricos que são provenientes do sistema, os valores de entrada. Enquanto a defuzzyficação torna compreensível a resposta da máquina de inferência. Ou seja, o valor da variável linguística recebido será inferido pelas regras difusas e convertido a um valor discreto. A Figura 2.5 esquematiza o funcionamento de um sistema baseado em lógica *fuzzy*.

Figura 2.5- Método de defuzzyficação por centro de área



Fonte: Autor

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

- Centro de área: calcula o centroide da área formada por todas as contribuições das regras aplicadas.
- Centro de máxima: calcula apenas os picos das funções de pertinências.
- Média do máximo: calcula a média de todos os máximos valores de pertinência obtidos.

2.4.6. Regras *fuzzy*

Para compor uma regra é necessário, no mínimo, mínimo um antecedente e um consequente. “Se a pressão está muito baixa” (antecedente), “a pressão deve aumentar” (consequente).

Segundo Mendonça (2016), uma base de regras *fuzzy* é formada por proposições difusas, onde as variáveis linguísticas são modeladas por conjuntos *fuzzy*. São regras que podem ser facilmente reproduzidas no dia a dia, utilizadas para operar os conjuntos *fuzzy*, com o intuito de obter consequentes. A saída é obtida após a inferência. Há dois métodos de inferências conhecidos, o Sugeno e o Mamdani. Por permitir uma maior faixa de valores de saída, o método de inferência escolhido para esse trabalho foi o Mamdani.

3. METODOLOGIA

3.1. Bancada experimental

O objeto de estudo desse trabalho foi a bancada experimental apresentada na Figura 3.1, ela foi construída de modo a emular um sistema de abastecimento que bombeia água para duas regiões com diferentes topologias, a primeira para a Zona Alta e outra para uma Zona Baixa. Ela é composta por um conjunto motor bomba (CMB), um *booster* (BST), canos, dois reservatórios, sensores de pressão e vazão e válvulas redutoras proporcionais (VRP). A bancada experimental se encontra no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

Figura 3.1- Bancada Experimental



A zona baixa é compreendida pelo percurso, sem ramificação, desde a saída do conjunto motobomba (CMB), e continua a percorrer pelo sensor de pressão PT-2, da VRP CV-

1, do segundo sensor de pressão PT-3, pela segunda VRP CV-2 e finalmente, chegando ao reservatório. O objeto de estudo desse relatório foi a região de zona baixa, então uma válvula manual que interliga as duas regiões foi fechada de modo a isolar a zona baixa. Posteriormente a válvula manual que conecta a zona alta e a zona baixa foi aberta para simular perturbações ao sistema. A zona baixa possui cota de 1,50 m e a zona alta uma cota de 6,50.

Para emular a estação elevatória, o sistema é composto por um conjunto motor bomba (CMB), com motor de indução trifásico, 220/380 V de 3 CV, como ilustrado na Figura 3.2. Para esse tipo de motor é necessário o uso de inversor de frequência para o acionamento e controle. Nessa bancada foi utilizado o CFW-08 DA Weg, como ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.2- Conjunto Motor- Bomba de 3 CV.



Figura 3.3- Inversor de Frequência CFW-08



O quadro de especificações do CMB segue detalhadamente na Tabela 3.1, e do inversor de frequência, Tabela 3.2.

Tabela 3.1 Especificações técnicas do CMB

Especificações	CMB
Fabricante	Schneider
Modelo	BC - 21R
DN de Recalque	1 1/2''
DN de Sucção	2''
Vazão Máxima	41,5 m ³ /h
Vazão Mínima	17,5 m ³ /h
Altura mínima	2 mca
Altura Máxima	23 mca
Rotações	Até 3450 rpm
Potência do motor	3 CV
Frequência	Até 60 HZ
Temperatura Ambiente	Até 40 °C

Fonte: Manual de Serviço: Bomba Centrífuga em Linha para Uso Geral, KSB.

Tabela 3.2 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
Umidade relativa do ar	5% - 90%

Fonte: Manual do Inversor de Frequência, WEG Equipamentos Elétricos S.A

Na Figura 3.3 são ilustrados os transdutores de pressão (PT-1, PT-2, PT-3), necessários para monitorar as pressões ao longo do caminho percorrido pela água. Os sensores de pressão

são do tipo piezoresistivo, isto é, um material resistivo que quando submetido a uma deformação tem sua resistência alterada. Há também medidores de vazão importantes para entender o comportamento do sistema. O sensor de vazão é do tipo eletromagnético que tem seu funcionamento baseado na Lei de Faraday. A Figura 3.4 e a Figura 3.5 exibem os transdutores detalhadamente e as Tabelas 3.3 e Tabela 3.4 apresentam informações técnicas dos transdutores de pressão e vazão respectivamente.

Figura 3.4- Transdutores de pressão da Acros.



Tabela 3.3- 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

Fonte: Instalação e Manutenção de Transmissores, ACROS Automação Industrial Ltda.

Figura 3.5- Transdutores de vazão da Incontrol.



Tabela 3.4- 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

Fonte: Manual de Operação e Instalação: Medidor e Transmissor de Vazão, Incontrol S/A.

No sistema há duas válvulas proporcionais, nomeadas de CV-1 e CV-2. A válvula CV-2 é responsável por simular o consumo ao variar o seu grau de fechamento, para esse estudo a

válvula CV-1 permaneceu 100% aberta não interferindo no sistema. Figura 3.6 exibe a válvula redutora proporcional na bancada, a Tabela 3.5 traz informações técnicas sobre a mesma.

Figura 3.6- Válvula redutora proporcional.



Tabela 3.5 Especificações técnicas das válvulas proporcionais.

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°

Fonte: Visual Instruction Sheet, B elimo Aircontrols Inc.

O sistema de aquisição de dados é responsável pela comunicação entre os transdutores e atuadores da bancada experimental e o computador, para esta finalidade foi utilizado a placa de aquisição de dados da National Instruments e o programa de computador desenvolvido no Labview® para representar o supervisor do sistema. As interfaces são responsáveis por enviar os sinais de excitação para os inversores e para a válvula e CV-2, receber os sinais dos transdutores de pressão e de vazão. A Figura 3.7 apresenta a interface de aquisição de dados utilizadas na bancada experimental. A Tabela 3.6 tem as informações das placas.

Figura 3.7- Interface do LabView.



Tabela 3.6 Especificações técnicas das interfaces de aquisição de dados.

Modelo / Fabricante	NI USB – 6229 National Instruments	NI USB – 6221 National Instruments
Alimentação	220 V AC	220 V AC
Canais de saída analógica	4	4
Canais de entrada analógica	32	32
Canais de entrada digital	32	32
Taxa de amostragem	50 ns	50 ns
Faixa de tensão de entrada	± 10 V	± 10 V
Faixa de tensão de saída	0 – 5 V	0 – 5 V
Corrente de saída	± 20 mA	± 20 mA
Transferência dos dados	Cabo USB	Cabo USB

Fonte: DAQ M Series: NI USB – 621x User Manual, National Instruments Corporation.

Na Figura 3.8 se ilustra o digrama de interação entre o supervisor e a bancada experimental, por meio do processo de aquisição de dados para o monitoramento e atuação das variáveis do processo.

Figura 3.8- Esquema ilustrativo da bancada de testes.



Fonte: Autor.

3.2. Materiais e métodos

O controlador tem por objetivo manter a pressão no ponto PT-3 constante, sendo a pressão desejada nesse ponto uma altura de manométrica de 9 metros, para diferentes situações de consumo.

Para projetar o controlador *fuzzy* é necessário realizar a caracterização da planta o qual o sistema de controle vai atuar. Para isso, foram construídas curvas sobre diferentes cenários dos principais elementos do controle: o conjunto motor bomba (CMB), a válvula redutora de pressão CV-2 e a pressão no ponto PT-3.

Os experimentos foram realizados variando o ângulo da válvula e a frequência de controle no inversor da bomba. O ângulo da válvula pode variar de 0 a 90 graus, sendo 0 graus totalmente aberta e 90 graus totalmente fechada. A frequência variou entre 35 e 55 Hz.

3.2.1. Curva do CMB

Para analisar o sistema de bombeamento da bancada foi necessário realizar as curvas do sistema e as curvas da bomba. Para as curvas da bomba foram relacionados: vazão, FT-1, e altura manométrica, PT-3. Os valores foram obtidos para nove diferentes cenários de consumo,

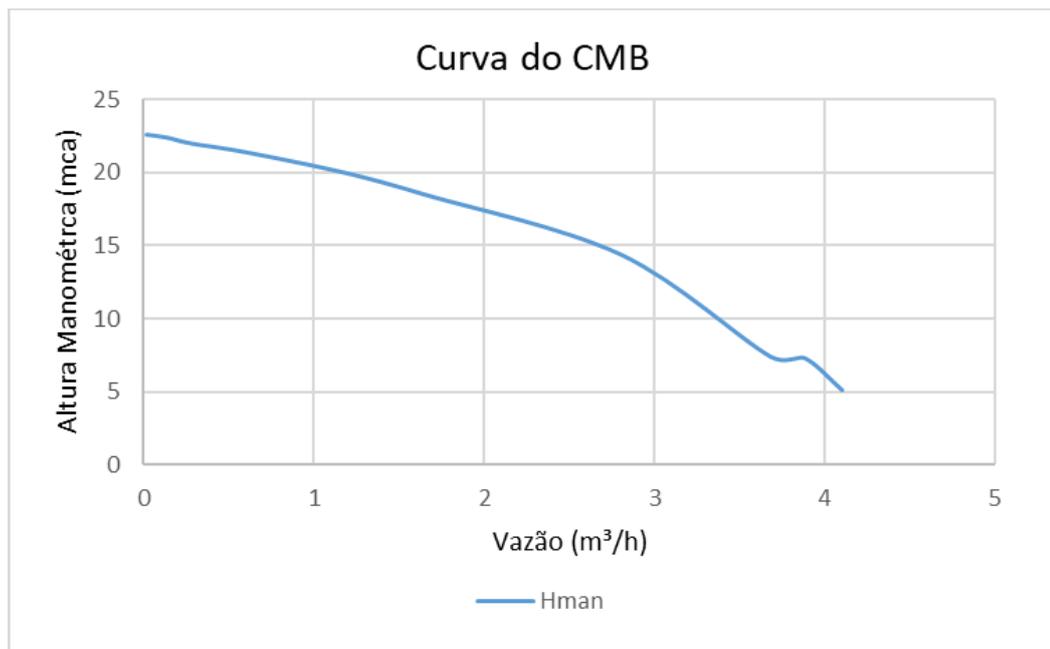
com o motor rotacionando com máxima frequência, de 55 Hz. O primeiro cenário foi projetado com a válvula redutora totalmente aberta, sendo na sequência fechada de forma regular.

A Tabela 3.7 apresenta os valores obtidos de pressão e vazão a uma frequência de 55 Hz. O gráfico na Figura 3.9 relaciona os valores.

Tabela 3.7- Dados referentes ao traçado da curva da bomba.

Ângulo da válvula CV-2 (em graus)	Pressão PT-3 (mca)	Vazão FT-1 (m ³ /h)
0	5,1	4,05
10	7,3	3,90
20	7,4	3,78
30	8,4	2,80
40	18,5	1,65
50	20,0	1,18
60	21,4	0,60
70	22,0	0,49
80	22,4	0,14
90	22,6	0,02

Figura 3.9- Curva do conjunto motor bomba.



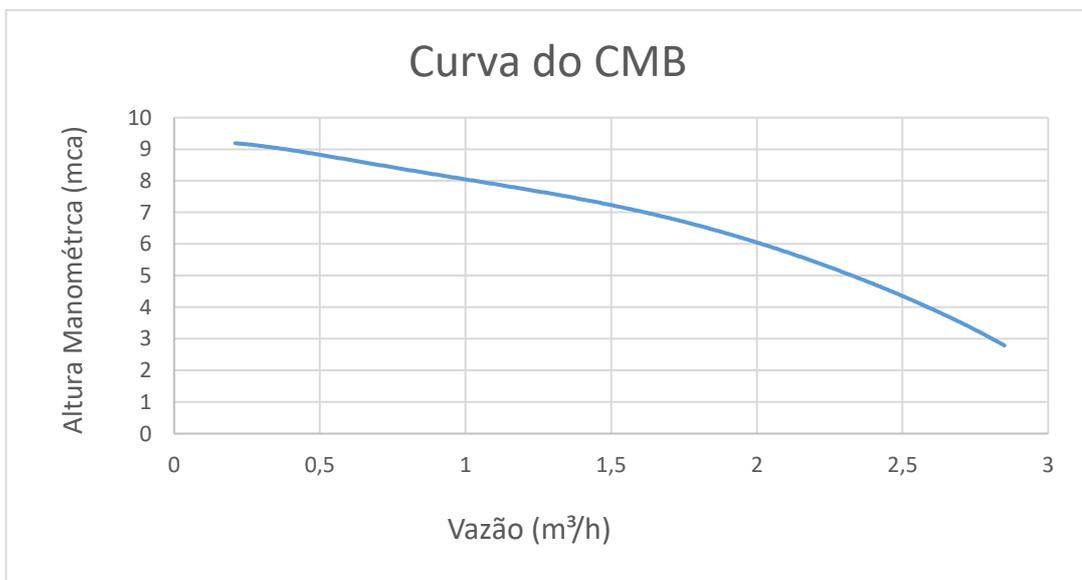
Quando a válvula está totalmente aberta, posição 0 graus, a curva apresenta uma altura manométrica de aproximadamente de 5,1 metros e vazão máxima de 4,05 m³/h. Com a válvula na posição de 90 graus, totalmente fechada, a vazão vai a zero e a altura manométrica é de 22,6 metros.

Foi também realizado a curva do sistema para a frequência de 35 Hz. O resultado dos valores de pressão e vazão obtidos estão na Tabela 3.8 e relacionados no gráfico da Figura 3.10.

Tabela 3.8- dados referentes ao traçado da curva da bomba.

Ângulo da válvula CV-2 (em graus)	Pressão PT-3 (mca)	Vazão FT-1 (m ³ /h)
0	2,76	2,85
10	2,99	2,8
20	3,46	2,73
30	4,4	2,48
40	6,12	1,98
50	7,6	1,31
60	8,32	0,85
70	8,76	0,53
80	9,09	0,3
90	9,36	0,21

Figura 3.10- Curva do conjunto motor bomba.



3.2.2. Relação entre a frequência aplicada ao motor e altura manométrica

Através das análises dos ensaios anteriores foi determinado que para emular o consumo máximo a válvula deve estar na posição de 70 graus e para mínimo consumo a válvula está na posição de 30 graus.

Para melhor compreensão da variável de altura manométrica do sistema foi realizado o gráfico relacionando a altura manométrica e a frequência aplicada ao motor para os cenários de maior consumo e menor consumo. Para o cenário de maior consumo, Figura 3.11, a pressão varia entre 3,75 e 10,5 mca, já no cenário de menor consumo a faixa de pressão é de 8,65 a 21,87 mca.

Figura 3.11- Frequência versus Altura Manométrica (máximo consumo)

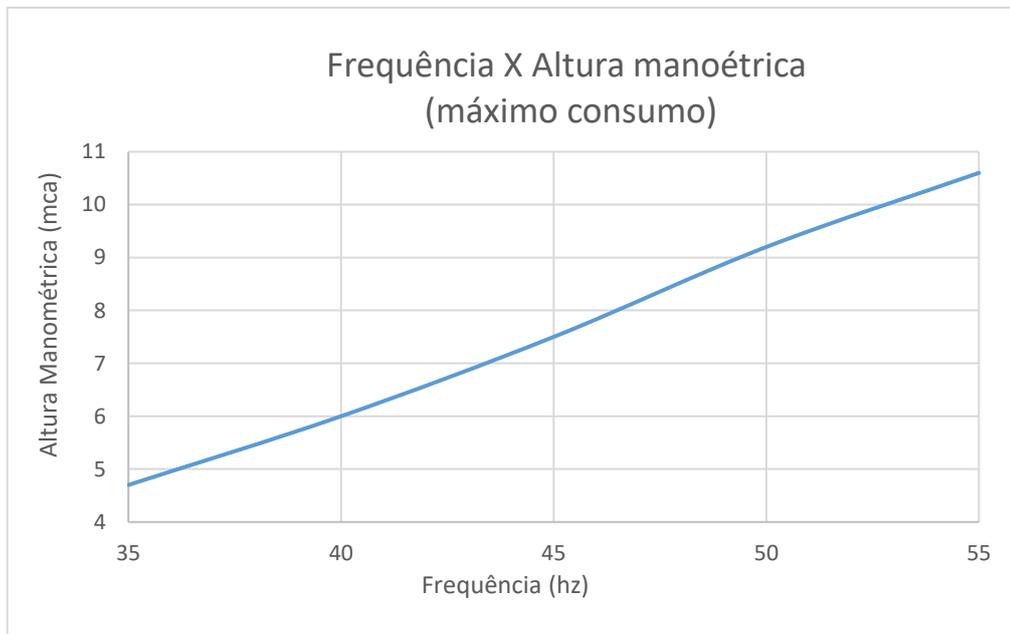
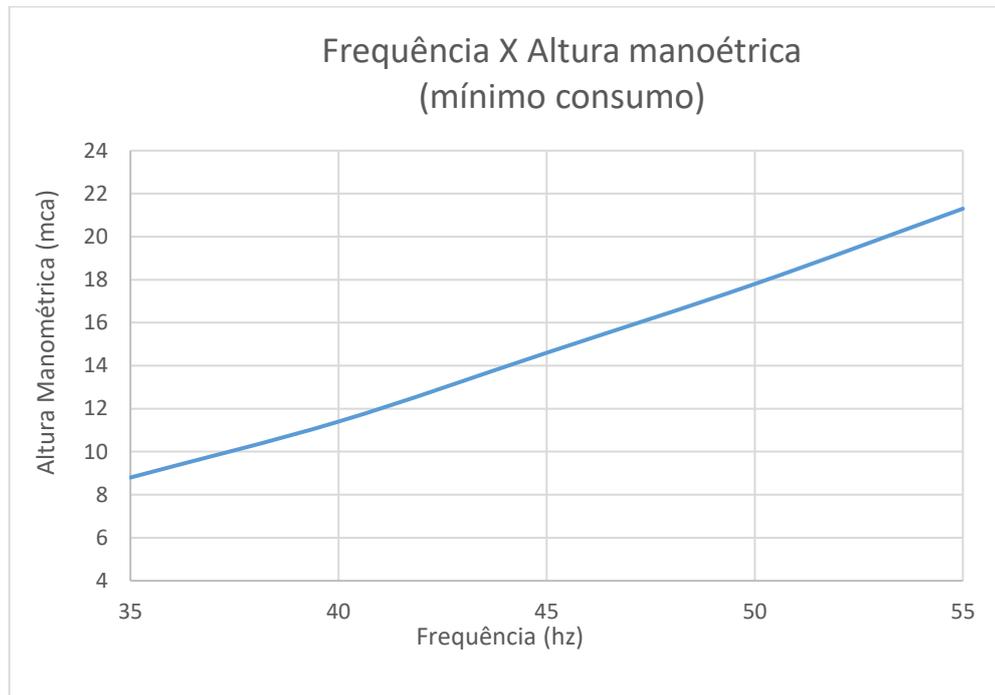


Figura 3.12 Frequência versus Altura Manométrica (mínimo consumo)



3.3. Controlador *Fuzzy*

Para obter eficiência no sistema, o controlador tem por finalidade manter a pressão da rede de abastecimento de água em níveis ideais. Controlando a pressão na rede de abastecimento é esperado sanar ou minimizar alguns problemas comuns no sistema, tais como: diminuição no custo de manutenção, vazamento, eficiência energética, reduzir os desgastes nas peças e conexões.

Redes de distribuição de água em grandes cidades são extensas chegando a centenas de metros facilmente, e são extremamente ramificados para chegar em diferentes pontos da cidade tornando o sistema altamente não-linear. Visto isso, métodos de controles tradicionais, ou até mesmo modernos, não são indicados nesses sistemas. Outro fator é o tempo morto existente, o que resulta em um adicional no tempo de resposta do conjunto motor bomba.

Por razões citadas acima, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um “sistema de controle com controlador lógico *fuzzy*”. Para esse tipo de controlador não há necessidade de identificar o modelo matemático do sistema.

3.3.1. Definição das variáveis de entrada e de saída

Para correta implantação da lógica *fuzzy* em um controlador é fundamental ter o conhecimento do comportamento da planta em diferentes cenários, para assim decidir as entradas do controlador e elaborar corretamente as regras *fuzzy*. O sistema de controle *fuzzy* apresentado neste trabalho é baseado em regras do tipo Mamdani.

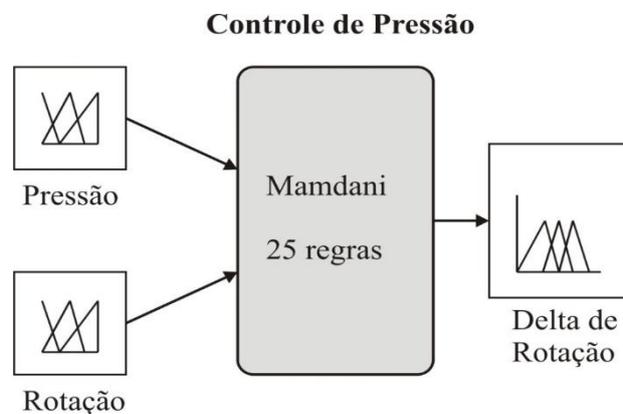
As entradas do controlador são variáveis que correspondem a dados reais fornecidos pelo sistema, para que assim o controlador possa tomar decisões. Na modelagem do sistema as entradas são erro da pressão (diferença entre o valor da pressão desejada e da pressão medida) e a derivada do erro da pressão, respectivamente denominadas de: E e dE.

Tanto para a variável E e dE foi utilizado cinco vetores de pertinência para composição das funções de pertinência. O conjunto E ficou delimitado entre -15 e 15 mca, corresponde a faixa de a pressão. O conjunto dE é conjunto menor, já que a frequência de amostragem é alta, delimitado entre -5 e 5.

O controlador possui apenas uma saída, o delta de frequência, denominado dF. A frequência está diretamente relacionada com a pressão. Esse valor de saída representa um valor de incremento positivo ou negativo que será adicionado ao valor da frequência que controla a velocidade do conjunto motor bomba. Um incremento negativo representa que a pressão está acima do valor de referência, o contrário representa que a pressão medida está abaixo da referência.

Foram atribuídas cinco funções de pertinências a variável de saída dF. Seu universo foi compreendido entre -5 e 5.

Figura 3.13- Sistema de controle de pressão: 2 entradas, 1 saída, 25 regras.



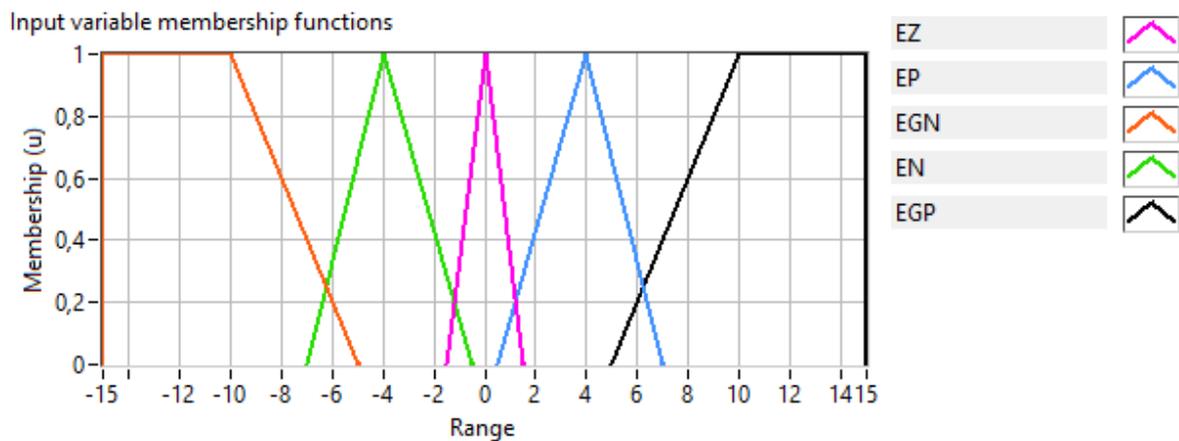
Fonte: Autor.

3.3.2. Função pertinência de cada conjunto

Uma vez identificadas as variáveis linguísticas, desenvolveram-se as funções de pertinências com seus respectivos universos de discursos e seus valores linguísticos.

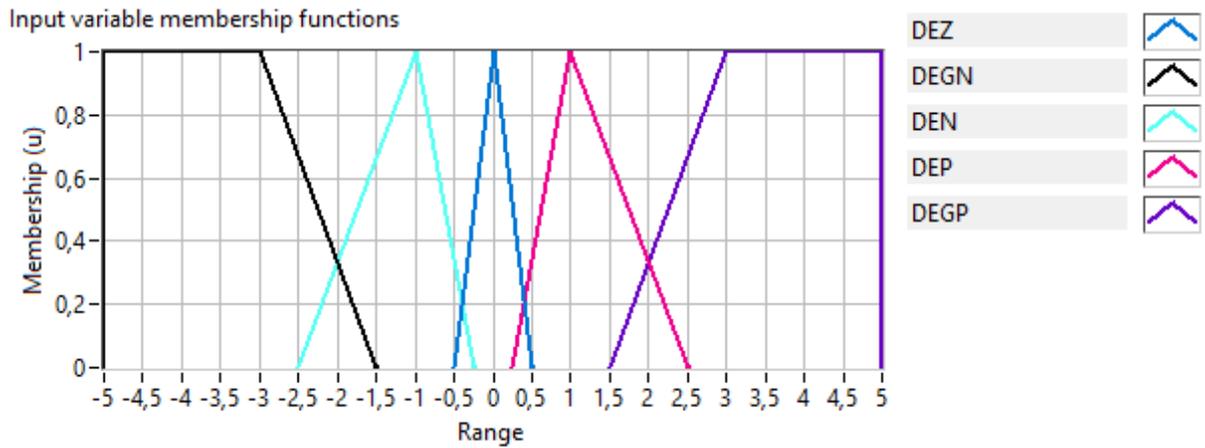
- Para a variável E foram associadas cinco funções de pertinências: EGN (erro grande negativo) e EGP (erro grande positivo) representam uma diferença, seja ela positiva ou negativa, grande entre o valor medido da pressão e o valor desejado da pressão; EN (erro negativo) e EP (erro positivo) representam uma diferença não tão grande em comparação as pertinências anteriores; e EZ (erro zero) que representa quando o valor medido é igual ao valor desejado de pressão. Figura 3.14.

Figura 3.14- Variáveis de entrada (ERRO)



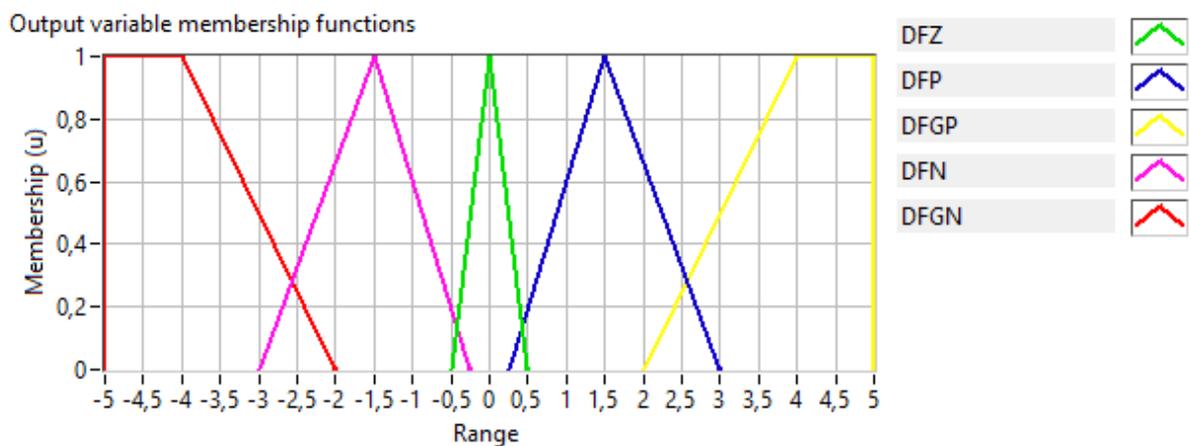
- Para a variável DE foram associados cinco funções de pertinência: DEGN (derivada do erro grande negativo) indica que a pressão está diminuindo rapidamente; DEDN (derivada do erro negativo) a pressão está diminuindo não tão rápido; DEZ (zero derivada da pressão) indica que o valor está estabilizado; DEP (derivada do erro positivo) a pressão está aumentando; DEGP (derivada do erro grande positiva) que indica que a pressão está aumentando rapidamente.

Figura 3.15- Variáveis de entrada (derivada do ERRO)



- Para a variável dF foram associados cinco funções de pertinência: DFGN (derivada da frequência grande negativo) fornece ao sistema um grande decremento a frequência; DFN (derivada da frequência negativo) fornece um decremento a frequência; DFZ (zero derivada da frequência zero) mantém atual igual a anterior; DFP (derivada da frequência positiva) fornece um incremento a frequência e DFGP (derivada da frequência grande positiva) fornece ao sistema um grande incremento a frequência.

Figura 3.16- Variáveis de saída (derivada da FREQUÊNCIA)



3.3.3. Base de Regra e Processo de interferência

Após definir as funções de pertinência e seus valores linguísticos, as regras fuzzy foram determinadas. Sendo considerada a relação entre a pressão do sistema e frequência de controle do motor, foram criadas inicialmente 25 regras estabelecidas. Na tabela 3.9 são apresentadas as regras do tipo Mamdani definidas para o controlador. O método de defuzzificação adotado foi o centro de máximo.

Tabela 3.9- 25 Regras *Fuzzy*

1- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
2- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
3- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
4- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
5- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
6- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
7- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
8- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
9- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
10- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGN
11- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
12- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
13- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
14- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
15- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
16- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
17- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP

18- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
19- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
20- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
21- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
22- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
23- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
24- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
25- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP

As regras podem ainda serem simplificadas, observando as regras 11, 12, 13, 14 e 15 é possível identificar que independente da derivada do erro da pressão, sendo a variável E (erro) pertinente na função EZ a variável de saída DF se encontra na função de DFZ. Assim após a redução de regras tem-se 21 regras que encontram descritas na Tabela 3.10.

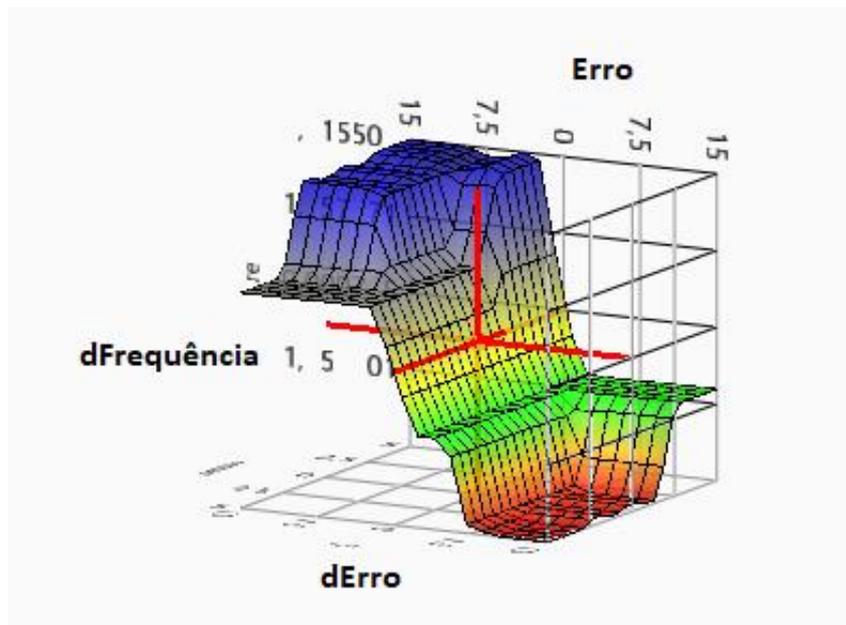
Tabela 3.10- Simplificação das Regras *Fuzzy*

1- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
2- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
3- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
4- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
5- IF 'Erro' IS 'EGN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DGFN
6- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
7- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
8- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
9- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFN
10- IF 'Erro' IS 'EN' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGN
11- IF 'Erro' IS 'EZ' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFZ
12- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP

13- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
14- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
15- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
16- IF 'Erro' IS 'EP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP
17- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
18- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEN' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
19- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEZ' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
20- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFGP
21- IF 'Erro' IS 'EGP' ADN 'Derivada do Erro' IS 'DEGP' THEN 'Delta de Frequência' IS 'DFP

A Figura 3.17 ilustra a superfície de controle adotado, mostrando a superfície unindo as três variáveis no mesmo sistema de eixo:

Figura 3.17-Comportamento tridimensional das variáveis do controle *fuzzy*



Na Figura 2.18 exibe a matriz associativa do controlador.

Figura 3.18- Matriz associativa do controlador.

REGRAS						
		ERRO				
		EGN	EN	EZ	DEP	DEGP
DERIVADA DO ERRO	DEGN	DFN	DFN	DFZ	DFGP	DFGP
	DEN	DFGN	DFN	DFZ	DFP	DFGP
	DEZ	DFGN	DFN	DFZ	DFP	DFGP
	DEP	DFGN	DFN	DFZ	DFP	DFGP
	DEGP	DFGN	DFGN	DFZ	DFP	DFP

4. RESULTADO

Após identificar o comportamento da planta e realizar a construção do controlador *fuzzy*, a última etapa foi a aplicação do controlador na planta e a análise dos resultados obtidos. Serão mostrados os resultados obtidos para operação do sistema em malha aberta e, depois, sob a ação do sistema *fuzzy*, que atuou na bomba para controlar a pressão nos ramais de saída da rede de distribuição.

Pelas análises obtidas nos ensaios no capítulo anterior, foi definido que a bomba operasse a uma pressão de 9 mca, pois essa pressão permite que a bomba atenda a toda a faixa de demanda de água e de vazão do sistema sem comprometer a eficiência do controle. Para o cenário de maior consumo, posição da válvula em 30 graus, esse valor de pressão oferece ao sistema uma vazão de 2,5 m³/h e para o menor consumo 0,5 m³/h. Essa vazão foi considerada aceitável para a configuração proposta.

Nesta seção, foram estabelecidos três cenários para a obtenção e análise dos resultados, os quais são:

- Operação do sistema em malha aberta para o consumo variando entre máxima e mínima;
- Influência e características do controlador *fuzzy*;
- Operação da rede sobre a ação do controlador *fuzzy* o consumo variando entre máxima e mínima.

4.1. Operação em Malha Aberta

O primeiro experimento foi executado variando o consumo ao longo do período do ensaio, iniciando o sistema com menor consumo variando ao maior consumo, e posteriormente, retornando ao menor consumo. O intuito desse experimento é mostrar que, independente da variação do consumo durante o período de ensaio, a frequência da CMB se manterá constante, e desse modo haverá momentos em que a pressão do sistema será superior ao necessário, demandando maior potência.

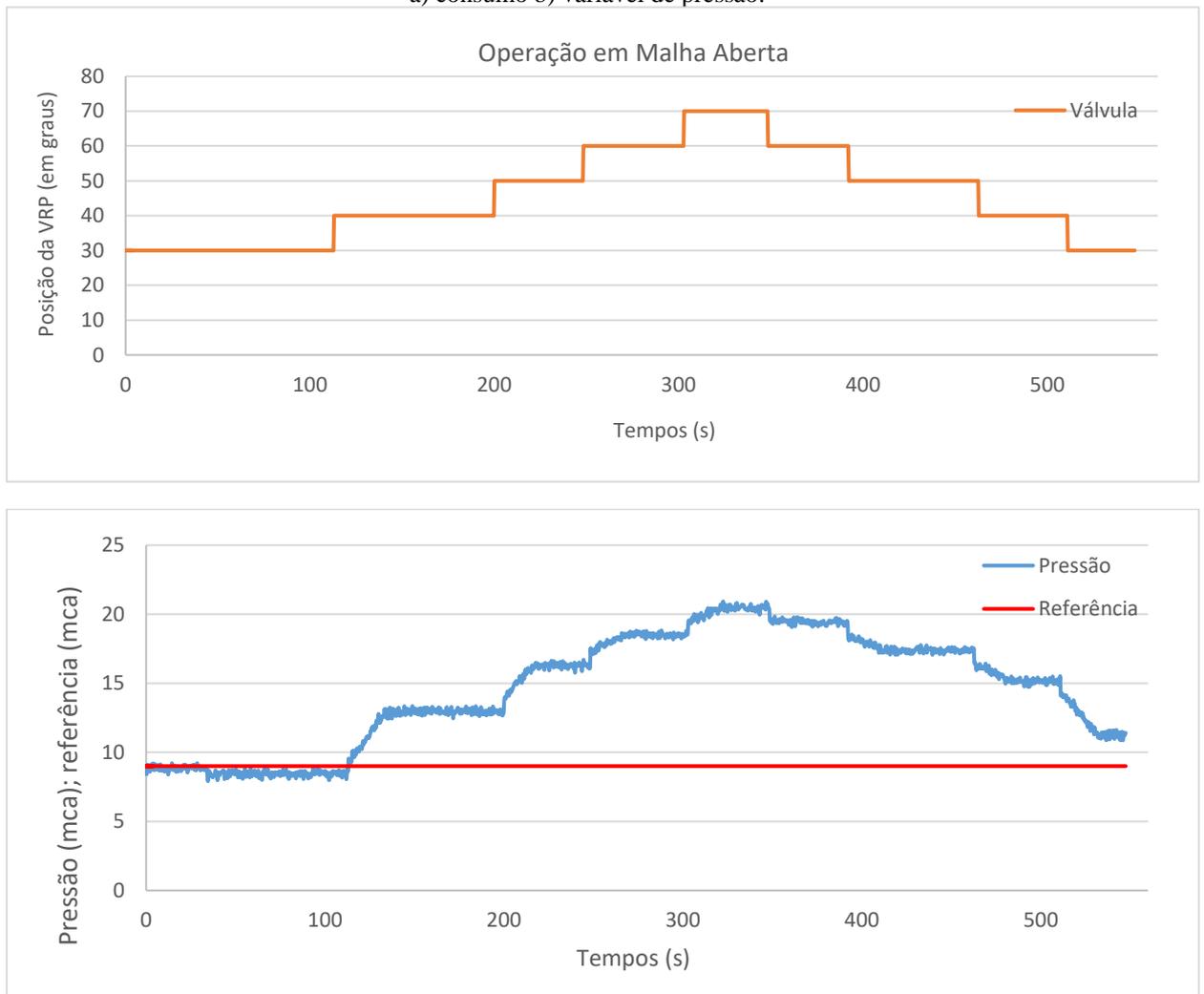
Nesse ensaio a frequência do CMB se manteve constante, pois o sistema atuava em malha aberta, não estava sobre influência do controlador. Assim, para que atendesse a faixa de vazão proposta para todos os cenários de consumo a frequência foi fixada em 55 Hz.

Como observado em análises anteriores, quando a válvula está na posição de 30 graus, simulando o maior consumo, é necessário oferecer uma frequência ao CMB de no mínimo 50 Hz.

Essa operação demorou cerca de 5 minutos antes de iniciar a coleta dos dados, para assim, garantir que o ar que fica armazenado no interior da tubulação da rede quando o sistema está parado e a canalização vazia tenha sido extraído e não interfira nas medições. Na Figura 4.1 se ilustra os comportamentos das variáveis envolvidas no processo.

Figura 4.1 - Gráfico da operação em malha aberta

a) consumo b) variável de pressão.



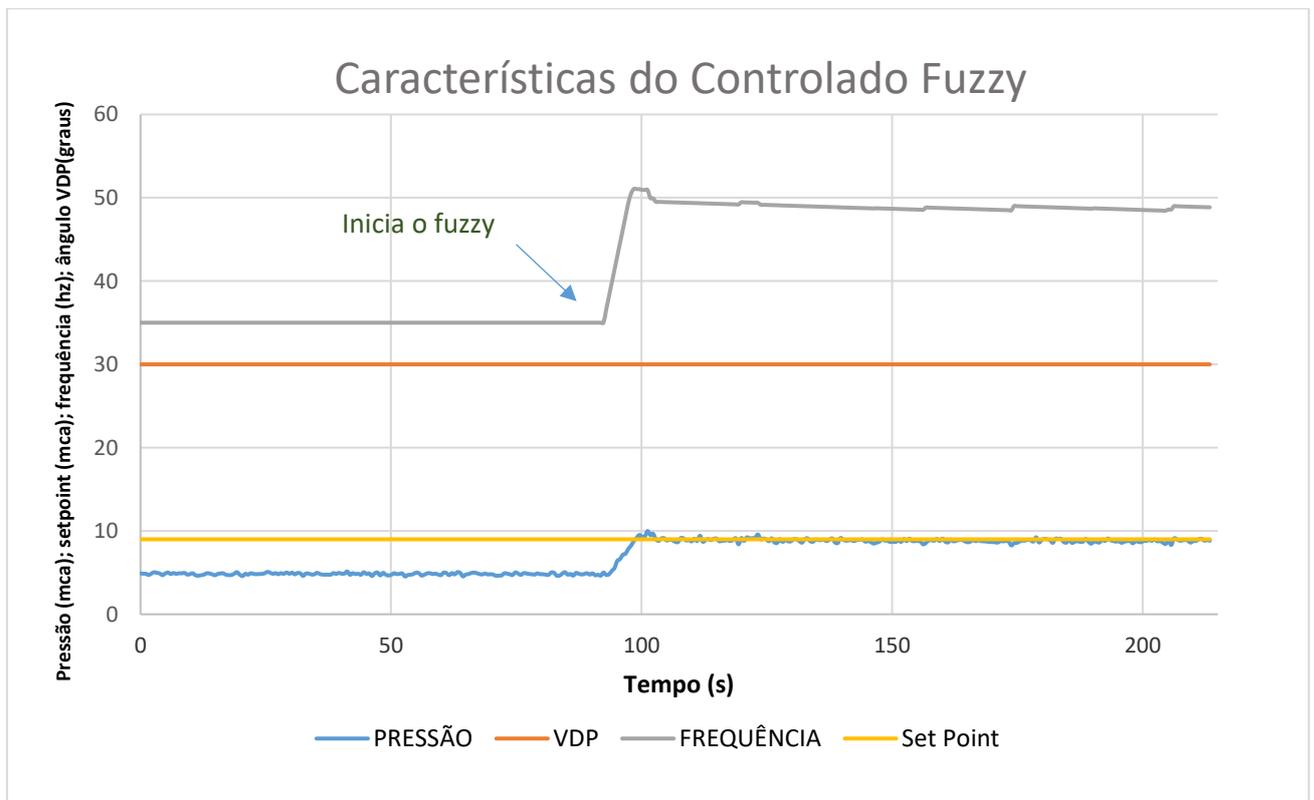
Dado que a frequência do ensaio se manteve constante, é possível observar que quando o consumo de água é reduzido a pressão se eleva e se distancia do referencial. O ponto crítico é quando o consumo é mínimo, VRP CV-2 na posição de 70 graus, a diferença entre a pressão

medida e a referência é de 12 mca. Isso significa que o sistema está trabalhando acima do necessário e essas pressões exercidas nas tubulações podem resultar em vazamentos.

4.2. Características do controlador

O segundo experimento foi realizado com o intuito de observar o desempenho do controlador no momento que ele é acionado, geralmente é medido pela aplicação de uma função degrau definida como comando *Set Point*, em seguida é medida a resposta da variável de processo. Como o intuito desse controlador é manter um *set point* estável, a coleta de dados iniciou sem a ação do controlador e posteriormente o controle foi acionado. A resposta é quantificada pelas características da onda de resposta. Na Figura 4.2 é possível observar o momento o qual o controlador é ativado.

Figura 4.2- Características do controlador *fuzzy*.



As características analisadas foram:

- o tempo de subida, tempo que o sistema para chegar ao valor de referência;

- percentual de *overshoot*, o valor que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso como uma porcentagem do valor final;
- tempo de assentamento, tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem do valor final;
- e o *Steady-State*, diferença final entre as variáveis do processo e o set point.

Os valores foram determinados por análise das curvas de referência e da pressão durante o estado transitório e em regime estacionário, os quais são apresentados na Tabela 4.2.

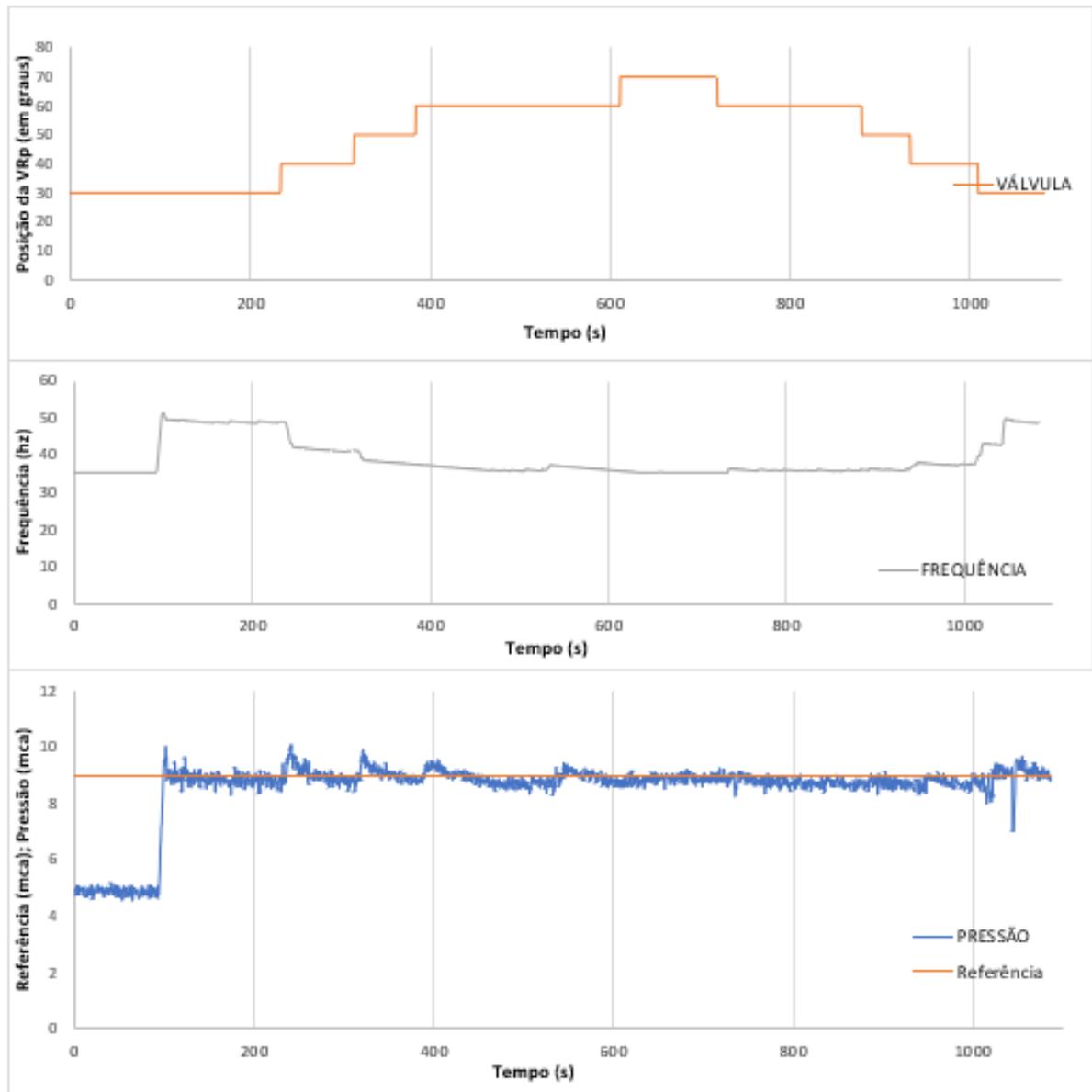
Tabela 4.1- Característica do controlador

Características	Valores
Percentual de over <i>shoot</i>	9,56 %
Tempo de assentamento	10,4 segundos
<i>Steady-State</i>	1,77 %
Tempo de subida	5,6 segundos

4.3. Operação em Malha Fechada

O sistema *fuzzy* desenvolvido teve como objetivo controlar e manter constante a pressão no ponto PT-3, próxima ao valor de referência estimado ao modificar a velocidade do motor. Após ligar o conjunto motor bomba, esperaram-se alguns segundos para que o controlador entre em atividade. Durante o ensaio foi variada a VRP CV-2 para diferentes cenários de consumo, iniciando com o menor consumo, posição de 30 graus, acrescentando 10 graus até chegar ao consumo máximo, e posteriormente, retornando à posição de mínimo consumo. Na Figura 4.3, é possível observar o comportamento das variáveis hidráulicas e elétricas com essa operação.

Figura 4.3- Sistema sobre influência do controlador *fuzzy*.



Com a análise dessa operação é possível observar que as alturas manométricas foram significativamente reduzidas assim como a velocidade do CMB, que antes operava sobre a frequência da tensão de entrada a 55 Hz.

Após a ação do controlador a frequência foi significativamente reduzida conforme o consumo foi sendo reduzido.

4.4. Resposta do sistema a perturbações em operação de malha fechada

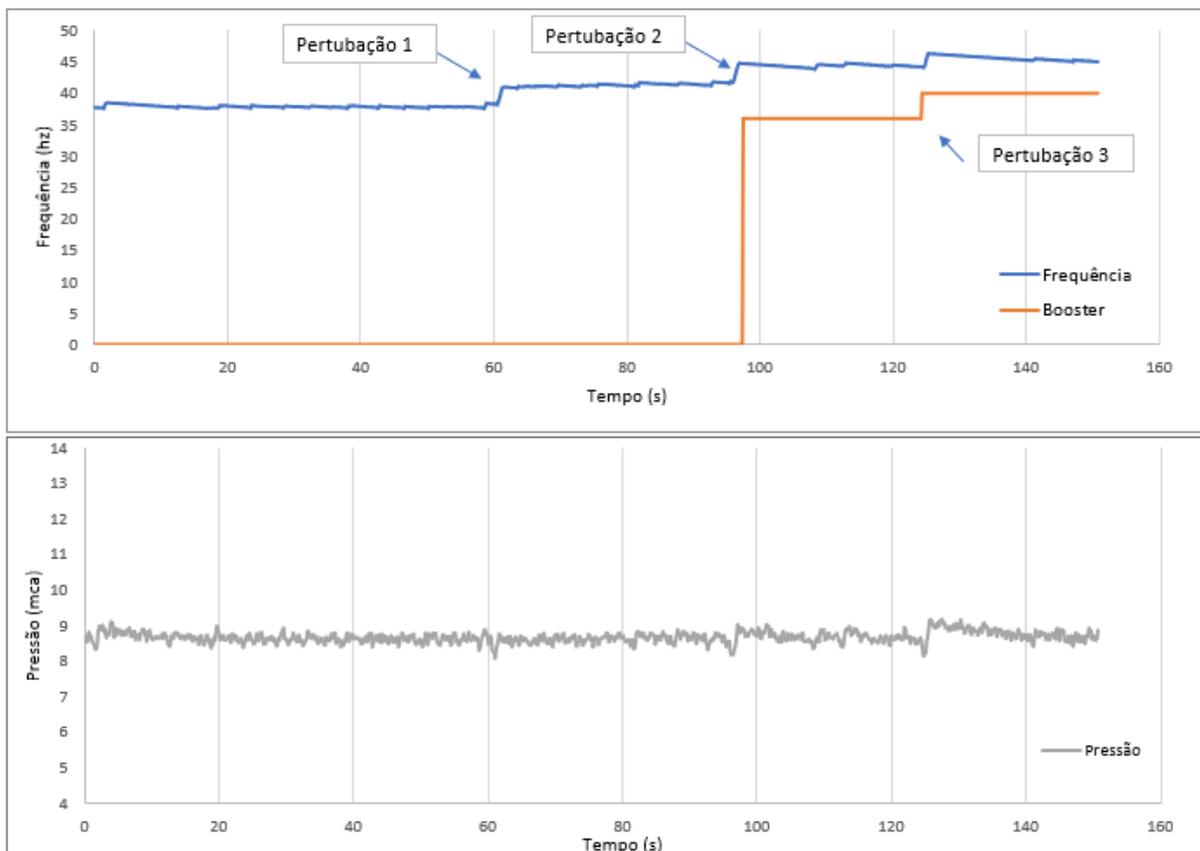
O controlador teve um excelente desempenho no controle da pressão, se mantendo em 9 mca para os diferentes cenários de consumo. Além de variar o consumo, foram impostas ao sistema diferentes perturbações, como, por exemplo, permitindo a fuga de água para outro setor. As ações de perturbação são ilustradas na Figura 4.4.

A perturbação 1, foi o momento onde a válvula de saída de água para outro setor foi aberta e iniciou-se a perturbação. A perturbação 2, o *booster* foi acionado a uma frequência de 35 Hz, provocando uma perturbação mais significativa. Com o intuito de observar o comportamento do controlador a uma situação a qual simula um vazamento ainda mais significativo, a frequência do booster foi elevada 40 hz, caracterizando essa a perturbação 3.

Analisando as curvas apresentadas na Figura 4.4 é possível notar que tais perturbações não provocaram grandes impactos e que o valor da pressão medida acompanha a pressão de referência.

Figura 4.4- Resposta o sistema a perturbações do meio

a) variável da frequência do *booster* e do CMB b) variável da pressão



Além do excelente resultado que o controlador apresentou para os diferentes cenários com a faixa de consumo variando entre a máximo e a mínimo, o sistema em malha fechada se mostrou eficaz quando exposto a perturbações.

4.5. Efeito do controlador no consumo de energia elétrica

Todo motor elétrico possui em sua descrição o valor de seu rendimento, que é a relação entre a potência transmitida a carga, P_m , e a potência elétrica, P . Esta relação está presente na Equação (4.1), em que n_m é o rendimento do motor elétrico. Para o motor usado na bancada experimental, $n_m = 0,72$.

$$n_m = \frac{P_m}{P} \quad (4.1)$$

Como os ensaios anteriores mostram, houve uma redução da altura monométrica e da frequência no CMB, resultando na redução da velocidade do mesmo, obteve uma redução da potencia requerida do motor.

Com o objetivo de verificar se o uso do controle de pressão ofereceu ao sistema eficiência energética, os valores de potência de saída do motor quando o sistema atuava em operação fechada e em malha aberta foram adquiridos de forma pontual através da interface homem maquina, presente no painel do inversor de frequência. Os valores estão apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente para operação em malha aberta e em malha fechada. Pela Equação (4.1), foi possível obter os seus respectivos valores de potência elétrica (P). A Figura 4.5 apresenta o gráfico dos valores de potência elétrica, em operação de malha aberta e malhar fechada, para diferentes cenários de consumo.

Tabela 4.2- Valores de potência para diferentes cenários de consumos em operação de malha aberta.

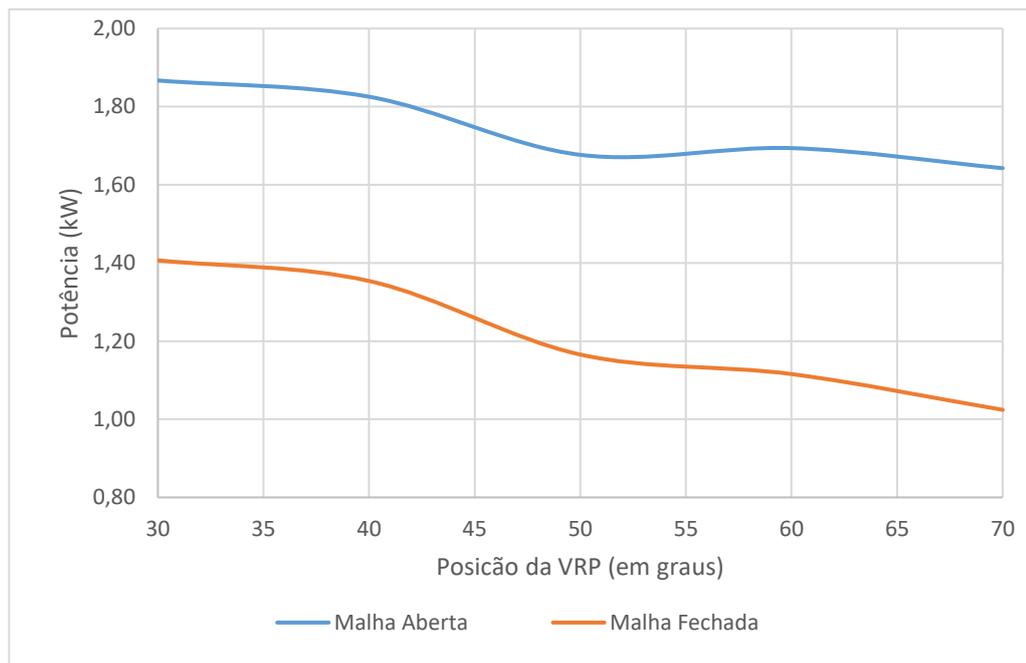
Posição da válvula (em graus)	P_m (kW)	P (kW)
30	1,87	2,59
40	1,83	2,54
50	1,68	2,33

60	1,69	2,35
70	1,64	2,28

Tabela 4.3-Valores de potência para diferentes cenários de consumos em operação de malha fechada

Posição da válvula (em graus)	P_m (kW)	P(kW)
30	1,87	2,59
40	1,83	2,54
50	1,68	2,33
60	1,69	2,35
70	1,64	2,28

Figura 4.5- Potência elétrica (P) requerida do motor



Para o cenário de máximo consumo houve uma redução de 20%, já para o cenário de mínimo consumo a redução foi de 40% do consumo de potência elétrica requerida da rede. Além da redução do consumo de energia elétrica, a redução da pressão apresenta possíveis melhoras ao sistema, evitando rompimentos na tubulação e possíveis vazamentos.

5. CONCLUSÃO

A proposta desse trabalho foi buscar um meio de otimização nos setores de distribuição de água, permitindo a eficiência energética e a redução da interferência humana no processo. O cenário para esse trabalho simulou uma zona com topologia baixa, exposta a diferentes níveis com consumo. Essa é uma situação comum em redes de abastecimento, seja um grupo de consumidores grande ou pequeno ou até mesmo um consumidor de grande porte, como uma indústria.

Foi constatado por meios de outros trabalhos na área que o controle de pressões em um sistema automatizado é eficaz na otimização do sistema. O primeiro passo para projetar o controlador foi conhecer o comportamento da planta a qual o controlador estaria inserido. Após verificada a sua não linearidade por ser um sistema, optou-se por um controlador *fuzzy*.

O controlador foi projetado com base em regras comprovadas empiricamente e teoricamente. Após projetado, o controlador baseado na lógica *fuzzy* foi inserido ao sistema e realizados experimentos com o intuito de constatar que ele cumpriu a sua missão de manter constante a pressão em diferentes cenários e analisar as características do controlador. Também foi levantado os valores de potência requerida do motor em operação de malha aberta e de malha fechada, ou seja, com e sem influência do controlador para verificar se houve eficiência energética. Além dos cenários de diferentes consumos, a resposta do controlador foi analisada em diferentes perturbações, simulando um vazamento a rede.

Pelo resultado dos experimentos o uso do controlador *fuzzy* se mostrou satisfatório para ao manter a pressão próxima da pressão escolhida como de referência nos diferentes cenários de consumo e para as perturbações simuladas na planta, com o percentual erro no regime estacionário de 1,77%. Quando analisadas as potências quando o sistema operava com e sem interferência do controlador, foi constatado uma significativa redução do consumo da potência do motor de aproximadamente de 40% para o cenário de menor consumo.

Deste modo, o objetivo desse trabalho foi alcançado de forma satisfatória ao alcançar eficiência energética na redução da potência requerida do motor e a eficiência hidráulica no tocante de ao manter a pressão próxima de seu referencial com a interferência do controlador *fuzzy*.

5.1. Comentários e sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para melhoramento dos resultados, e futuras aplicações de controle na planta, sugerem-se a aplicação dos seguintes pontos.

1. Interligar a zona baixa a zona alta a fim de controlar as pressões para ambas as regiões.
2. Aplicação de dois controladores diferenciados com o intuito de apontar as vantagens e desvantagens entre eles.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA, Agência Nacional de Águas, 2010. (Data de Acesso 26/10/2018) Fonte: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>.

BEZERRA, S. T. M. **Sistema fuzzy para controle piezométrico de sistemas de distribuição de água visando à economia de água e energia**. 2009. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, 2009.

GOMES, H.P. **Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos**. Rio de Janeiro: ABES, 114p. 2005.

GOMES, H.P. (2009). **Sistemas de Bombeamento- Eficiência Energética**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB.

INCONTROL S/A. **Manual de Operação e Instalação: Medidor e Transmissor de Vazão. Série: VMS**, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010. **Distribuição dos recursos hídricos e densidade demográfica do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1998.

NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **DAQ M Series: NI USB – 621x User Manual**. Austin, Texas, USA, 2009.

PENA, R.F. (Data de acesso em 16 de outubro 2018). Uol. Fonte: Mundo Educação: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/distribuicao-agua-no-brasil.htm>.

Revenga, C., Brunner, J., Henniger, N., Kassem, K., and R. Payner, 2000: **Pilot Analysis of Global Ecosystems, Freshwater Systems**, World Resources Institute, Washington, DC.

SAVEH, **Sistema de Autoavaliação de Eficiência Hídrica**. (2016). Fonte: <https://saveh.com.br/artigos/a-disponibilidade-de-agua-no-mundo-e-no-brasil/>

TSUTIYA, M. T. **Abastecimento de Água**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidraulica e Sanitaria da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, v. 3, 2006.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Manual do Inversor de Frequência**. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, Brasil, 2009.