



XI-007 – APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE FUZZY PARA AUTOMAÇÃO SISTEMAS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Wil Lavor Lucena Camboim⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Dutorando em Engenharia Mecânica PPGEM/UFPB.

Saulo de Tarso Marques Bezerra⁽²⁾

Engenheiro civil, mestre em Engenharia Civil (Hidráulica) e Doutor em Engenharia Mecânica (Automação). Atualmente é consultor técnico do LENHS UFPB e Instrutor de cursos da ABES.

Heber Pimentel Gomes⁽³⁾

Professor do Departamento de Engenharia Civil - Centro de Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba - Cidade Universitária - João Pessoa - PB – Brasil.

Simplício Arnaud da Silva⁽⁴⁾

Professor do Departamento de Engenharia Mecânica - Centro de Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba - Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil.

Endereço⁽¹⁾: Rua Maurício de Oliveira, 715 – Jardim 13 de Maio – João Pessoa - PB - CEP: 58025-030 - Brasil - Tel: (83) 9304-7069 - e-mail: wilcamboim@lenhs.ct.ufpb.br

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema Fuzzy, para o controle da pressão de uma rede de distribuição de água. Este sistema de controle mantém a pressão na rede de abastecimento de água constante, de forma automática, por meio da variação de velocidade de rotação do conjunto motor-bomba. O controle de velocidade do motor de acionamento da bomba (motor elétrico de indução trifásico) é feito através de um conversor de frequência variável, comandado por um sinal elétrico de tensão variável. Este sinal elétrico é fornecido por um computador, por meio de uma placa de aquisição de dados, e muda em função das condições e características do sistema. Estas peculiaridades são admitidas através de sensores e transdutores que apresentam ao controle fuzzy dados referente à pressão, vazão e velocidade de rotação do motor. A modelagem foi feita no Fuzzy Logic Controller Desing (Toolkit do LabVIEWTM) do programa computacional LABVIEWTM. O trabalho busca eficientizar o sistema, racionalizando o consumo de água e energia e reduzindo, conseqüentemente os custos operacionais. O trabalho foi aplicado a uma bancada experimental de distribuição de água do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, LENHS, da UFPB. Com a aplicação da modelagem desenvolvida, obteve-se uma redução 27,4% no consumo de energia sem comprometer as características hidráulicas do sistema de abastecimento.

PALAVRAS-CHAVE: Controle Fuzzy, Conversor de Frequência, Eficiência Energética.

INTRODUÇÃO

Um dos recursos naturais mais importantes para o bem estar da humanidade é a água. Durante muito tempo foi um bem usado pelo homem de forma inteiramente livre e despreocupada. Com o progresso, surgiram os agrupamentos humanos, cujas várias atividades exigiam uma maior quantidade de água. O desenvolvimento levou, também, conforto aos usuários, fornecendo esse recurso natural de maneira cada vez mais cômoda em seus pontos de utilização, demandando instalações ainda mais complexas. Ainda como agravante, a maioria das empresas passaria a utilizar a água como matéria prima para confecção de seus produtos.

Esse cenário de necessidades gerou uma expansão desenfreada dos sistemas de abastecimentos de água. Hoje esses sistemas se mostram velhos e obsoletos, com problemas que vem se agravando ao longo dos anos devido ao envelhecimento das instalações, extensões desordenadas dos sistemas de abastecimento, ausência de sistemas adequados de medições e problemas de gestão operacional.

De acordo com dados do Sistema Nacional de Informação em Saneamento (SNIS, 2006) as perdas de Água (SAA) do Brasil, são da ordem de 40%, chegando a alcançar 70% em algumas cidades brasileiras. Parte destas perdas podem ser reduzidos com o controle da pressão na rede. Segundo TSUTIYA (2004) o controle de



pressão em sistemas de abastecimento de água é um dos aspectos importantes para definir e controlar as perdas, pois a relação pressão x vazamento é comprovadamente um componente potencial para as perdas.

No que diz respeito à metodologia a ser utilizada na diminuição das pressões nos sistemas de abastecimento de água, RODRIGUES (2003) afirma que conversores de frequência incrementados aos sistemas de bombeamento com a função de manter a operação em níveis necessários ao pleno atendimento das demandas, podem evitar desperdícios ao proporcionar um melhor controle operacional.

Por sua vez a utilização dos conversores de frequência implica em uma série de comandos e decisões, que para um melhor aproveitamento dos equipamentos, é aconselhável a aplicação de técnicas computacionais na sua operação. Assim a utilização da Lógica Fuzzy, pautada nos benefícios da automação fecham o processo de melhoramentos e aperfeiçoamentos sugeridos para um sistema de abastecimento de água.

Diante do exposto anteriormente, a pesquisa realizada busca reunir todos esses conceitos e técnicas, e aplicá-las na tentativa de tornar o sistema mais eficiente.

A pesquisa desenvolveu um sistema de controle automatizado, com o emprego de técnicas Fuzzy, para operação de sistemas de distribuição de água, proporcionando à redução de perdas de água e energia. A ferramenta computacional desenvolvida automatizará a tomada de decisão na operação dos sistemas de distribuição, acarretando ações referentes ao estado dos motores (velocidade de rotação), aumentando ou diminuindo sua velocidade de rotação por meio da utilização de um conversor de frequência.

Todo o procedimento ocorrerá, em tempo real, buscando sempre a diminuição do excesso de pressão no sistema e proporcionando, conseqüentemente, redução no consumo de energia elétrica e água (principal foco do estudo). Com isso, as decisões das manobras dos equipamentos passam a ser orientadas a partir de uma lógica computacional, sendo escolhida, a cada instante, aquela que apresentar melhores condições para manutenção da pressão constante, respeitando as restrições inerentes aos sistemas pressurizados de distribuição de água, a capacidade mecânica dos motores e a disponibilidade energética da rede de abastecimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram divididos em dois módulos: no primeiro as perturbações do sistema estarão por conta de um simulador de demanda, que simula uma vazão requerida pelo sistema semelhante à uma situação real, enquanto no segundo módulo o motor será submetido a perturbações bruscas. Haverá um rigoroso controle da pressão na rede de abastecimento, mantendo-a em valores ideais, previamente fixados, fazendo para isso o uso da Lógica Fuzzy, desenvolvido na Fuzzy Logic Toolbox do LabVIEWTM, os quais foram ativados, desenvolvidos e implementados no ambiente computacional de LabVIEWTM.

Para a realização dos experimentos optou-se pela criação de uma bancada reduzida, uma vez que assim tem-se um perfeito acompanhamento de todo o caminhar da rede de tubulações, a localização e o comportamento físico dos equipamentos, facilitando a realização de ajustes.

A bancada compacta, aparelhada com equipamentos, de forma a oferecer total condição de simulação de um sistema de abastecimento real, é composta de um conjunto motor bomba ligada ao conversor de frequência, uma válvula redutora de pressão, um transdutor de pressão, duas fontes de alimentação, um manômetro, medidor de vazão, uma placa de aquisição de dados, analisador de energia e um computador, além de toda uma estrutura de tubos, conexões e reservatórios que simulam um sistema de abastecimento real. A Figura 1 mostra a bancada experimental utilizada neste trabalho, e todos os equipamentos necessários.



Figura 1- Bancada experimental.

DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Os experimentos foram realizados simulando o abastecimento de uma rede de distribuição, com um consumo diário padrão. Cada simulação durou quinze minutos (900 segundos), sendo as vinte e quatro horas normais do dia típico, convertidas nesse período.

Em uma rede de abastecimento real as perturbações são provenientes da demanda variável dos usuários, de vazamentos ou manobras bruscas na rede. Para o experimento foi desenvolvido, no ambiente LabVIEW™, um simulador de demanda, que através da operação remota da válvula, varia a vazão na rede simulando o consumo de água de um sistema real.

A Figura 2 apresenta uma curva de consumo médio diário e a Figura 3 a mesma simulação dada pela válvula através do comando remoto do LabVIEW™, utilizada no experimento.

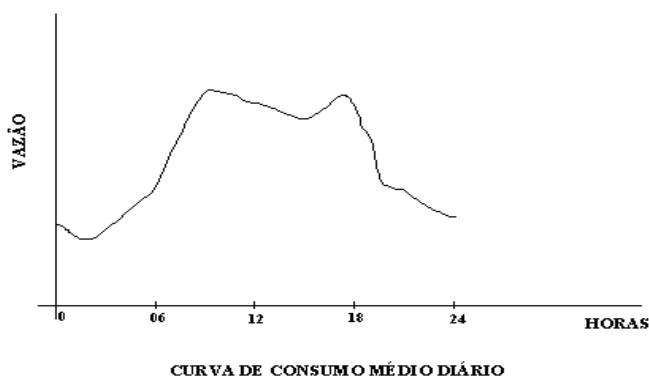


Figura 2 – Curva de Consumo Médio Diário

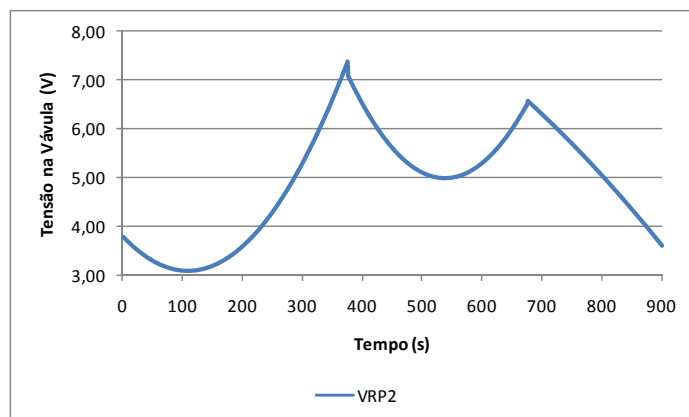


Figura 3- Curva de Consumo Médio Diário Simulado

Foram realizados três experimentos. No primeiro utilizou-se uma ligação convencional, ou seja, a bomba alimentada diretamente pela rede elétrica, suprimindo a demanda de pressão e vazão do sistema de abastecimento. Neste caso para o dimensionamento considera-se a demanda máxima horária, já que o sistema deve atender à situação mais desfavorável de projeto, que corresponde à hora de maior consumo ao longo do dia (GOMES, 2004).

Evidentemente que nas demais horas existirá um excedente de pressão, devido a um consumo mais baixo por parte dos usuários e esta pressão excedente causa um desperdício de energia bastante significativo, além do desgaste na tubulação, aumento nos vazamentos, diminuição da vida útil das peças e conexões, etc

Fundamentado neste panorama, propôs-se um segundo modelo, onde atuaria um rígido controle de pressão, com o intuito de fornecer à rede de abastecimento apenas a pressão necessária para o bom uso da água pelos usuários. Para isso foi agrupado ao sistema o conversor de frequência que alimentará o motor bomba fornecendo uma maior ou menor velocidade de rotação, conforme a demanda diária.

Em ambos os experimentos foi utilizado o analisador de energia para armazenar as grandezas elétricas e posteriormente serem comparadas.

Finalmente com o intuito de avaliar a robustez e eficiência do controlador Fuzzy, realizou-se um terceiro experimento. Nesta situação submeteu-se o sistema a variações bruscas de pressão a fim de analisar seu comportamento e obter os parâmetros de controle. Inicialmente o sistema partiu do repouso a fim de alcançar a pressão considerada ótima de operação de 20 mca. Após sua estabilização o sistema foi submetido a um aumento de pressão instantâneo através de um fechamento de uma válvula.

MODELAGEM DO SISTEMA FUZZY

O sistema de controle utiliza técnicas fuzzy e visa manter a pressão em 20 mca em um determinado ponto da bancada experimental (Figura 1). O controlador foi implementado no ambiente LabVIEW e é composto de três etapas (SHAW E SIMÕES, 1999): fuzzificação, inferência fuzzy (base de regras) e defuzzificação (Figura 4).

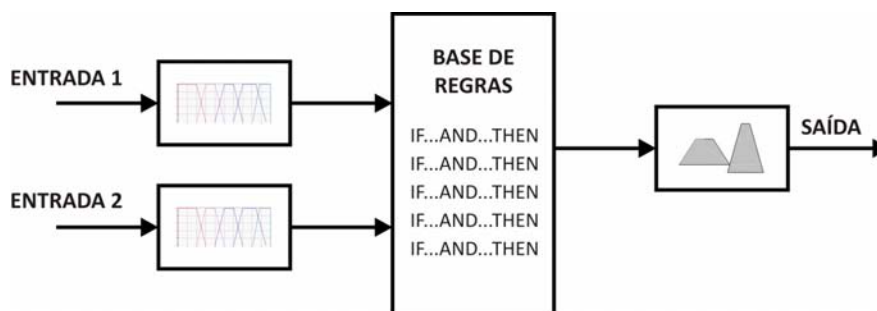


Figura 4: Variáveis lingüísticas de entrada e saída do sistema fuzzy.



Na modelagem do sistema de controle foi utilizado o método de inferência MAX-MIN, disponível na Fuzzy Logic Controller Design do LabVIEW. Neste método, a inferência fuzzy é construída utilizando o conhecimento prévio do sistema a ser projetado e a base de regras é estritamente lingüística. O método de defuzzificação é o Centro-do-Máximo (C-o-M).

As variáveis de entrada correspondem a dados reais que o sistema fornece ao controlador, para servir de subsídios para sua tomada de decisão.

Na modelagem do sistema, as duas entradas “rotação do motor” e “pressão no sistema” são denominadas RM e PS, e são referidas como variáveis lingüísticas Fuzzy de entrada do controlador. Tanto para a variável RM como PS, utilizou-se cinco vetores de pertinência para composição das funções de pertinência.

A saída do controlador refere-se a um delta de rotação relativamente pequeno. Tal valor deve ser aplicado à velocidade de rotação do motor. O controlador disponibilizará um incremento positivo ou negativo, que somado a velocidade de rotação inicial ajustará a rotação do sistema adequando-a à vazão requerida, em função da pressão na linha de operação.

Na modelagem do sistema, a saída “Delta de Rotação”, foi denominada DR e é referida como variáveis lingüísticas Fuzzy de saída do controlador.

Dessa forma, uma vez identificadas as variáveis lingüísticas de entrada(rotação do motor e pressão no sistema) e as de saída (delta de rotação), determinou-se, para cada variável, seu universo de discurso, a partição do conjunto de termos e os respectivos conjuntos fuzzy.

As variáveis lingüísticas tiveram suas faixas de valores estabelecidas através de contato com especialistas em sistemas de abastecimento hidráulico e também dos conhecimentos adquiridos nos testes iniciais.

Funções de Pertinência do Sistema Fuzzy

- *Variável Lingüística Rotação do Motor (RM):*

A função matemática utilizada para essa variável lingüística foi à trapezoidal. À variável de entrada RM foram associadas cinco funções de pertinência: MIN (rotação muito baixa), ROT2 (rotação baixa), ROT3 (rotação média), ROT4 (rotação alta), MAX (rotação nominal). Estas cinco funções de pertinência foram implementadas para servirem de subsídios na escolha da variável de saída, servindo de parâmetro na escolha de um maior ou menor delta de rotação. MIN é uma rotação extremamente baixa, próximo ao estado de repouso do motor, o que possibilita um grande incremento positivo de rotação, ROT2 é uma segunda faixa de rotação, um pouco maior do que a anterior, porém ainda muito baixa, ROT3 é a faixa de rotação intermediária a rotação nominal do motor, ROT4 é uma rotação considerada alta e que já não suporta grandes incrementos positivos e MAX é a última faixa, chegando a alcançar os valores de rotação nominal estando susceptível apenas a valores de incremento negativo.

Na Figura 5 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável lingüística “Rotação do Motor”.

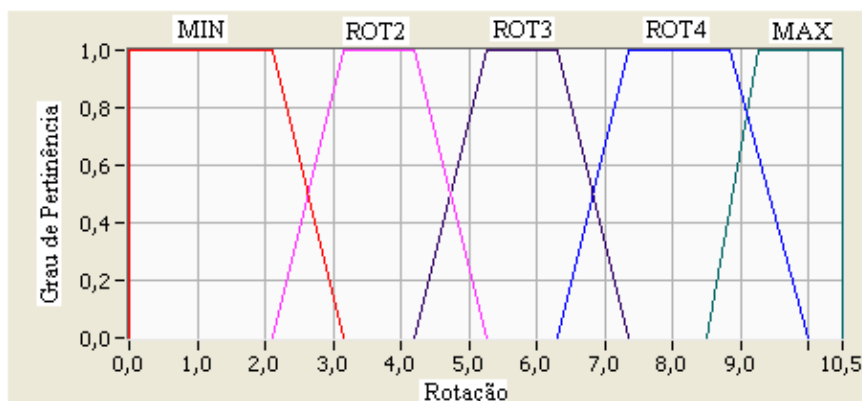


Figura 5 - Funções de pertinência variável lingüística “Rotação do Motor”.



- *Variável Linguística Pressão no Sistema (PS):*

Uma das funções utilizadas para essa variável, assim como para a variável linguística “rotação no motor”, foi a trapezoidal. Também foi utilizada para definição dessa variável a função Singleton, que é definida com um único parâmetro.

A variável de entrada “PS” foi associada a cinco funções de pertinência: MB (pressão muito baixa), BA (pressão baixa), OT (pressão ótima), AL (pressão alta), MA (pressão muito alta). Juntamente com as demais funções de pertinência da variável linguística rotação do motor estas cinco funções de pertinência também foram implementadas para servirem de subsídios na escolha da variável de saída, servindo de parâmetro na escolha de um maior ou menor delta de rotação.

A Figura 6 mostra o gráfico das funções de pertinência da variável linguística PS.

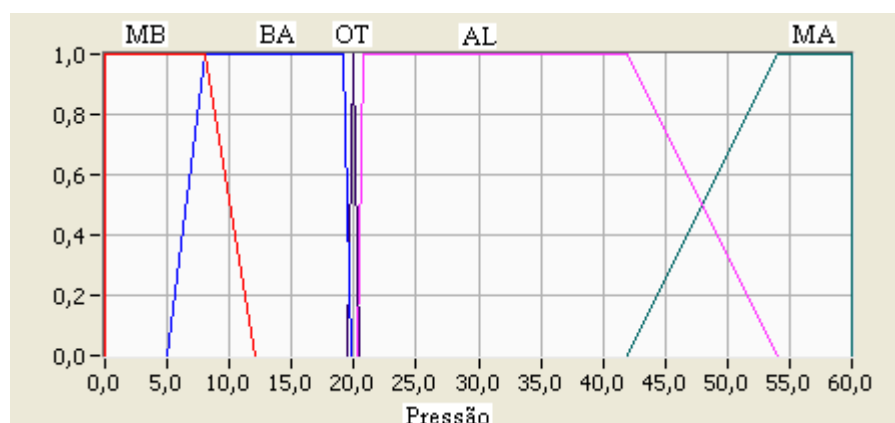


Figura 6 - Funções de pertinência variável linguística “Pressão do Sistema”.

- *Variável linguística Delta de Rotação(DR):*

As funções matemáticas utilizadas para essa variável linguística foram a trapezoidal, a Singleton, já descritas anteriormente, e a triangular, que é definida por três parâmetros: base esquerda, centro e base direita.

À variável de saída DR, foram associadas cinco funções de pertinência: AN (delta alto negativo), BN (delta baixo negativo), ZE (delta zero), BP (delta baixo positivo), AP (delta alto positivo). Essa função de pertinência é determinada a partir das funções de entrada e representa os vários valores que podem ser implementados à velocidade de rotação do motor, conforme a necessidade do sistema. AN é um delta de rotação negativo de módulo alto, utilizado para reduzir as pressões na rede, pois quando adotado irá diminuir a velocidade de rotação no motor, BN é um delta de rotação também negativo, porém com um valor em módulo menor, ZE é um delta de rotação próximo a zero, implementado em situações onde a pressão está ideal, BP é um delta de rotação positivo de módulo baixo, utilizado para aumentar a pressão na rede, pois quando implementado irá subir a velocidade de rotação do motor, AP é um delta de rotação positivo, porém a uma taxa maior de crescimento.

Na Figura 7 são apresentadas as funções de pertinência relacionadas à variável linguística “Delta de rotação”.

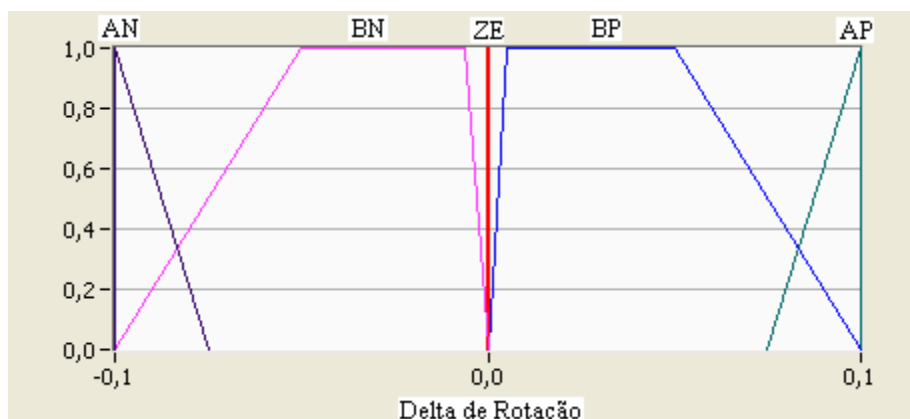


Figura 7 - Funções de pertinência variável lingüística “Delta de Rotação”.

Sistema de Inferência Fuzzy (Base de Regras):

Com as funções de pertinência definidas e seus respectivos valores lingüísticos, foram criadas vinte e cinco regras de inferência. Tais regras foram definidas levando em conta a pressão no sistema, relacionando-a com a velocidade de rotação do motor. Na Tabela 1, são apresentadas as regras estabelecidas para o controlador Fuzzy. Observa-se que os valores utilizados na base de regras são valores Fuzzy do universo de discurso de cada variável do sistema de controle, não demonstrando valores diretamente numéricos.

Tabela 1 - Base de Regras para o controlador Fuzzy.

Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.
Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
Se a PRESSÃO é MB e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é BP.
Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é AP.
Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é AP.
Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BP.
Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BP.
Se a PRESSÃO é BA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é OT e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é ZE.
Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é BN.
Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é BN.
Se a PRESSÃO é AT e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.
Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MIN, então o DELTA é BN.
Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT2, então o DELTA é BN.
Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT3, então o DELTA é AN.
Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é ROT4, então o DELTA é AN.
Se a PRESSÃO é MA e a ROTAÇÃO é MAX, então o DELTA é AN.

A Figura 8 ilustra a superfície de controle adotada para o controlador, unindo as três variáveis no mesmo sistema de eixos:

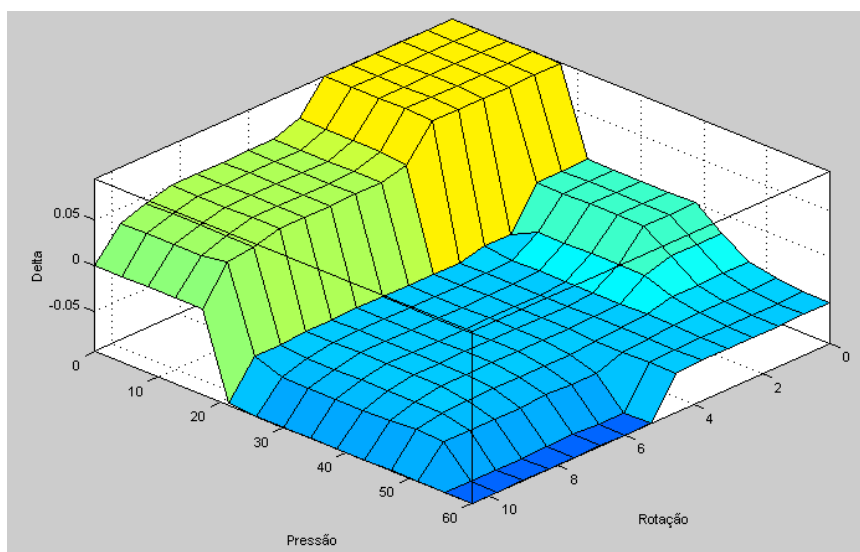


Figura 8 - Superfície de Controle (base de regras).

Na tabela 2, apresenta-se a matriz associativa do controlador.

Tabela 2 - Matriz associativa do controlador.

		ROTAÇÃO				
		MIN	ROT2	ROT3	ROT4	MAX
PRESSÃO	MB	AP	AP	BP	BP	ZE
	BA	AP	AP	BP	BP	ZE
	OT	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	AL	ZE	BN	BN	BN	AN
	MA	BN	BN	AN	AN	AN

Características do Controlador (Resumo):

A Tabela 3 apresenta um resumo de todas as especificações do controlador utilizado:

Tabela 3 - Características do Controlador.

Controlador:	Fuzzy
Modelo:	Mamdani
Ferramenta Computacional:	Fuzzy Logic Control (LabVIEWTM)
No de entradas:	2
No de saídas:	1
Entradas:	Pressão do Sistema Rotação no Motor
Saída:	Delta de Rotação
No de Regras:	25
Método de Defuzzificação:	Centro de Máximo

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como descrito anteriormente, foram realizados três experimentos, sendo dois de caráter comparativo (simulando uma situação de abastecimento sem controlador e outra com o controle fuzzy proposto) e um terceiro sendo aplicados degraus de entrada, a fim de testar a robustez do controlador.



Em todos os experimentos controlados (segundo e terceiro) o controlador fuzzy foi desenvolvido na Fuzzy Logic Toolbox do LabVIEW™, o qual também serviu de ambiente computacional para criar a interface com o operador.

Experimentos 01 e 02:

Todas as ações do controlador foram decorrentes de perturbações no sistema. Os experimentos 01 e 02 foram submetidos a uma demanda variável, provenientes do simulador de demanda. No experimento 01 o motor é alimentado diretamente da rede elétrica e no experimento 02 o motor é alimentado pelo conversor de frequência e controlado pela lógica fuzzy. Para ambos os experimentos, inicialmente o sistema se encontrava em repouso.

A Figura 9 apresenta os resultados relativos à pressão obtidos nos dois experimentos:

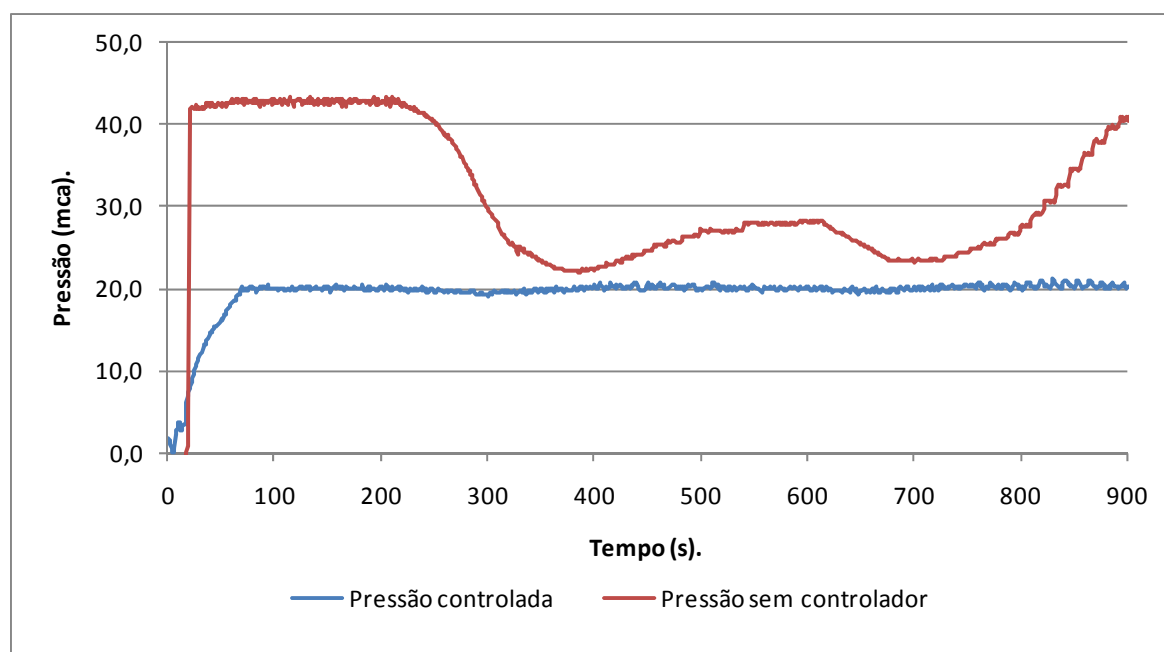


Figura 9 - Curvas de pressão do sistema controlado e sem controlador.

Observa-se que para o experimento com o sistema sem controlador, a pressão oscila conforme a demanda. É evidente que, em momento algum, a pressão atinge valores inferiores a 20 mca, atendendo às necessidades mínimas de abastecimento. Em grande parte do período existe uma pressão excessiva na rede, tornando a instalação ineficiente.

No experimento com pressão controlada, os períodos com pressão excessiva foram suprimidos através da ação do conversor de frequência. Com o controlador fuzzy atuando, a velocidade de rotação da bomba varia, diminuindo o consumo de energia, melhorando, conseqüentemente, a eficiência do sistema.

A Figura 10, apresenta um comparativo da variação de velocidade de rotação do motor. No experimento 01 o conjunto trabalha com a rotação nominal (3440 rpm), enquanto que no experimento 02, com a atuação do controlador e do conversor de frequência, percebe-se a redução da velocidade de rotação nos períodos de menor demanda e uma rotação próxima à nominal nos períodos de maior demanda.

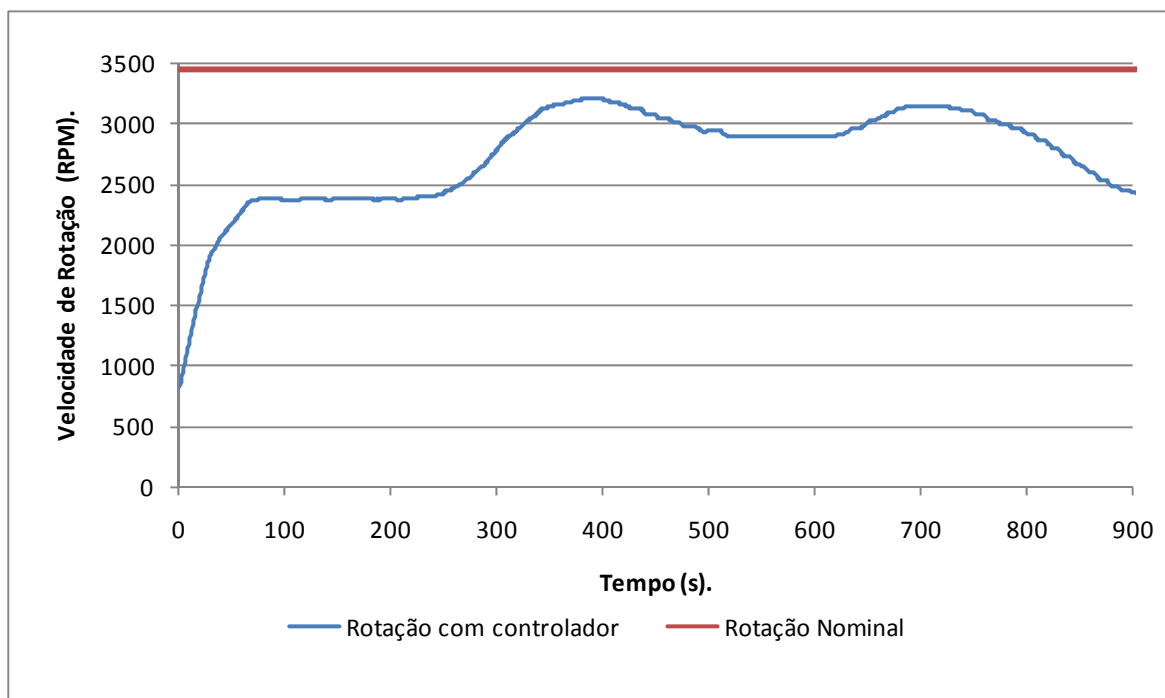


Figura 10 - Rotação do motor com aplicação do controlador.

Paralelamente ao estudo das pressões, realizou-se uma análise do consumo energético em ambas as situações. Os dados foram registrados usando o analisador de energia. A aquisição de dados foi feita a cada 2 segundos, gerando uma massa de 450 amostras, que suscitou nos gráficos mostrados na Figura 11:

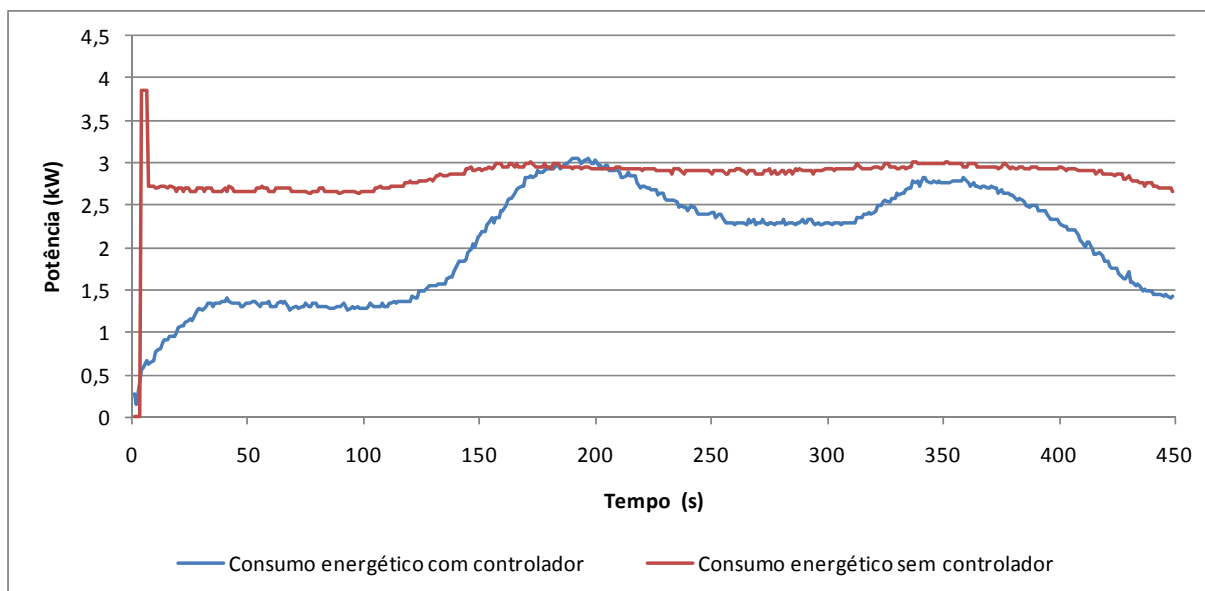


Figura 11 - Consumo energético dos motores.

Percebe-se que o consumo energético do sistema sem controlador possui apenas uma leve variação, durante todo experimento, com exceção do pico inicial provocado pelo acionamento do motor. No sistema com controlador observa-se uma oscilação no consumo proporcional a velocidade de rotação do motor.

Como era esperado o consumo energético do motor, utilizando conversor de frequência, foi menor do que o consumo do motor alimentado diretamente pela rede elétrica, mostrado no tabela 4.

**Tabela 4 - Comparativo de consumo energético dos motores.**

Situação	Energia Consumida no experimento (900s).Wh	Consumo diário. kWh.
Sem controlador	710,50	68,21
Com controlador	515,94	49,53

O consumo energético diário do sistema diminuiu de 68,21 para 49,53 kWh representando uma economia de 27,4%.

Outro resultado expressivo, facilmente analisado através da Figura 11 é a ausência de corrente de pico na partida do motor com a utilização do conversor de frequência. A corrente de pico é extremamente maléfica para o motor, diminuindo sua vida útil além de superar instantaneamente a potência requerida pelo sistema, provocando penalidade ao consumidor. No experimento a corrente de pico alcançou um valor 33% maior do que o valor de serviço. Com a utilização do conversor de frequência a corrente consumida apresentou incrementos gradativos.

É importante destacar, também, que o conversor de frequência provocou perdas de cerca de 5% da energia total do sistema, ocasionando um decréscimo de rendimento energético do motor. Entretanto, estas perdas são pequenas quando comparadas com a economia gerada. Porém, isto justifica o fato de mesmo não ter alcançando a velocidade de rotação nominal o consumo energético nas medições entre 187 e 205 segundos (Figura 11), serem superiores ao consumo em condições normais.

Ainda como forma de avaliar a eficiência energética do sistema experimental, utilizou-se os indicadores de Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) e o Consumo Específico de Energia Normalizado Inclusa a Eficiência Hidráulica a jusante da bomba (CONHID).

O CE, largamente utilizado no setor, é a relação entre o consumo de energia (kWh) de um determinado grupo e o volume bombeado (m^3), na unidade de tempo. Ele reflete a eficiência do conjunto motor-bomba misturada com a eficiência do sistema hidráulico a jusante da bomba.

O CONHID é definido como a quantidade média de energia gasta para elevar 1 metro cúbico de água a 100 m de desnível geométrico, mais as perdas de carga a jusante das bombas, por meio de instalações de bombeamento (CEPEL, 2006).

A metodologia dos indicadores de consumo específico compõe uma ferramenta importante na avaliação de projetos, permitindo ponderar sua qualidade do ponto de vista da eficiência energética das instalações hidráulicas, subsidiando as ações para a melhoria da eficiência nos bombeamentos.

No Tabela 5 abaixo, apresentam-se os valores destes parâmetros obtido dos experimentos realizados.

Tabela 5 - Indicadores de consumo.

	Sistema sem Controlador	Sistema Controlado
Consumo de Energia (kWh)	68,21	49,53
CE	1,47	1,28
CONHID	37,66	32,91

A redução nos dados expressa a melhoria do sistema, que tornou-se mais eficiente.

Experimentos 03:

A fim de testar a robustez do controlador, bem como obter os parâmetros que o caracterizam, foi realizado o terceiro experimento. Assim como nos casos anteriores todas as ações do controlador foram decorrentes de perturbações no sistema. O experimento 03 foi submetido a mudanças bruscas de demanda provenientes de distúrbios provocados na rede. Inicialmente partiu do repouso sofrendo um distúrbio em forma de degrau de 15 mca, a pressão foi elevada instantaneamente através do fechamento de uma válvula. Foram obtidos os seguintes resultados mostrados na Figura 12:

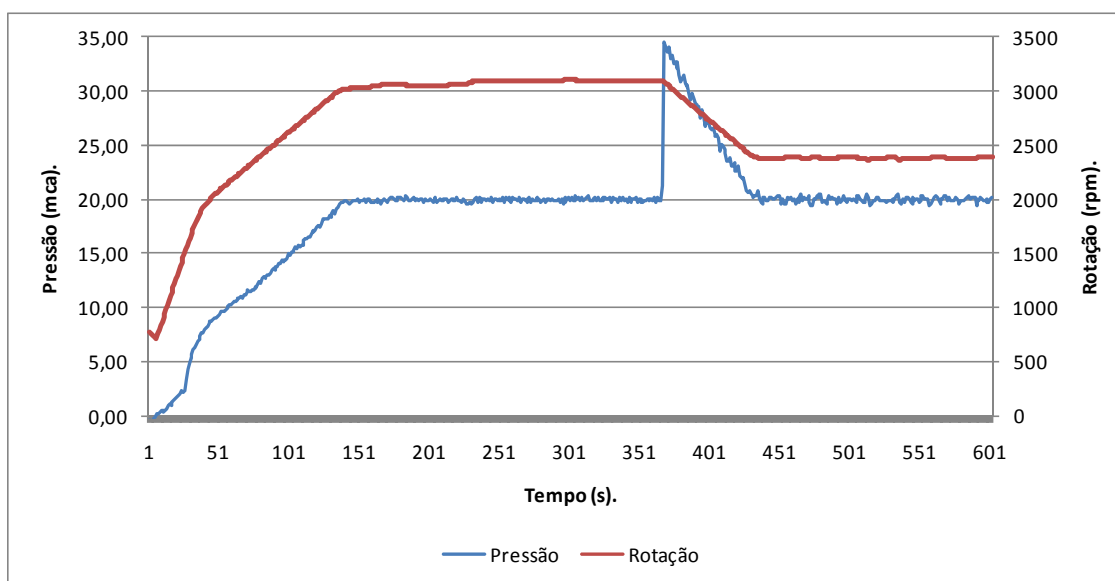


Figura 12 - Pressão controlada proveniente de distúrbios na rede.

Percebe-se que após o distúrbio, rapidamente o sistema de controle Fuzzy respondeu com uma redução na velocidade de rotação, retornando o valor da pressão para o patamar de controle no ponto de aquisição 430, com os parâmetros apresentados no Tabela 6:

Tabela 6 - Parâmetros do sistema.

Tempo de assentamento	68 segundos.
Sobresinal	0.
Erro de regime permanente	$\pm 2,9\%$ (0,58 mca)

CONCLUSÕES

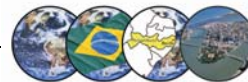
O objetivo do trabalho foi desenvolver um controlador fuzzy que, através de um conversor de frequência, mantivesse, de forma automática, a pressão constante na rede, independente do consumo de água. Essa ação traz benefícios como: diminuição do desgaste das peças, do volume de vazamentos, da perda de carga e principalmente o custo com energia elétrica. Todas estas vantagens culminaram em uma questão extremamente discutida e de relevância no setor de abastecimento: a melhoria da eficiência energética e hidráulica dos sistemas de abastecimento de água.

O controlador fuzzy alcançou resultados bastante satisfatórios, creditados principalmente à forma abrangente que a lógica fuzzy modela seus sistemas, conseguindo atender as especificidades das redes de abastecimento, bastando para isso uma boa base de regras e funções de pertinência definidas coerentemente.

Nesse sentido a Lógica Fuzzy, por meio da atuação do conversor de frequência, se mostrou uma ferramenta eficaz para o controle da velocidade de rotação de conjunto motor-bomba (conseqüentemente o controle da pressão do sistema), apresentando respostas concisas e robustas, visto que as técnicas de controle convencionais nem sempre respondem bem ao alto grau de não-linearidade dos sistemas de distribuição de água.

Toda a eficiência obtida pelo controlador é creditada também à aplicação do conversor de frequência no acionamento do conjunto motor-bomba. Contudo o uso do equipamento é viável, desde que as características de funcionamento do sistema apresentem condições de operação que tenham variações de vazão nas tubulações.

Com a aplicação destas tecnologias na bancada experimental o controlador fuzzy manteve a pressão na rede constante, resultando no índice de redução do consumo de energia elétrica de **27,4%**, devido a diminuição da



velocidade de rotação da bomba. Em sistemas reais a diminuição da pressão proporciona também uma redução nas perdas reais (perdas por vazamentos) tornando os sistemas mais eficiente. A pressão na rede permaneceu constante (20 mca), com uma variação inferior a **3%** (erro de estado estacionário), o que confirma a estabilidade do sistema. Foi obtido também uma redução dos indicadores de consumo CE e CONHID de **13,7%** e **12,5%** respectivamente.

Finalmente, constatou-se que em sistemas de abastecimento de água são poucos os trabalhos existentes que utilizam lógica fuzzy, sendo esta área ainda muito incipiente. Neste sentido, uma das contribuições importantes dessa trabalho é a de agregar algum conhecimento às pesquisas realizadas nessa área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CEPEL, 2006, Indicadores relacionados ao consumo de energia utilizáveis em metodologias de avaliação hidráulica, Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Rio de Janeiro – RJ.
2. GOMES, H.P.,(2004), “Dimensionamento econômico e operação de redes e elevatórias”, 2a edição, João Pessoa, Editora Universitária.
3. LIMA, F.M.C.,(2007).”Desenvolvimento de um Sistema de Controle Fuzzy de Potencial Matricial da Água no Solo visando à Otimização de Processo de Irrigação”.Tese de Doutorado. UFPB, Brasil.
4. RODRIGUES, W., LUVIZOTTO, E.,(2003), Conversor de Frequencia em Sistemas de Bombeamento.
5. SHAW, I.S., SIMÕES, M.G.,(2004), Controle e Modelagem Fuzzy, ed. 1, São Paulo-SP, Editora Edgard Blücher Ltda.
6. SNIS, (2006), Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento, “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2006, Brasília, MCIDADES. SNSA.
7. TSUTIYA, M.T., (2006), “Abastecimento de água”.3a edição, São Paulo - SP, Editora Universitária.
8. TSUTIYA, M.T., (2007), “Uso de inversores de frequência para diminuição do consumo de energia em bombeamentos”, In: Gomes, H.P., Garcia, R.P., Rey, P.L.I., Abastecimento de água – O estado da arte e técnicas avançadas.1a edição, Capítulo 7, João Pessoa – PB, Editora Universitária.