



## Eficiência energética em sistemas de abastecimentos de água com controle de pressão para uma rede sem reservatório – Estudo de Caso

José Kleber Costa de Oliveira<sup>1</sup>, Fábio Araújo de Lima<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestre Engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Automação e sistemas – IFPB. e-mail: jose.oliveira@ifpb.edu.br

<sup>2</sup> Mestre Engenharia elétrica do Programa de Pós-Graduação em Automação e sistemas – IFPB. e-mail: fabioarsp@gmail.com

**Resumo:** As empresas de saneamento atualmente já enfrentam, em alguns casos, a escassez dos recursos hídricos. Contudo, a evolução tecnológica está presente para diminuir os desperdícios e contemplar os usuários com maior qualidade e eficiência nos serviços. Diante disso, desenvolveu-se um trabalho de pesquisa através de um método que busca controlar a pressão da rede de distribuição em um sistema que não possui reservatório e que por isso a água sai do poço diretamente para a rede de distribuição. O método aplicado utilizou a lógica *fuzzy* no controle da pressão (controle inteligente) para eliminar o desperdício de energia elétrica e os vazamentos provocados pela produção da bomba, que injeta água diretamente na rede de distribuição. Esse trabalho foi realizado no condomínio Green Club II, situado na cidade de Parnamirim - RN, com o objetivo de solucionar o problema dos vazamentos existentes na rede, para isso foi necessário coletar dados do sistema, aplicar duas estratégias de controle na planta, o Proporcional e Integral – PI e o controle *fuzzy*, obtendo um ganho de aproximadamente 13% de eficiência energética com controle PI e 28% com controle *fuzzy* associado com o PI.

**Palavras-chave:** controle da pressão, eficiência energética, lógica *FUZZY*, rede de distribuição de água

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Carrijo *et al.* (2003), O crescimento desordenado das cidades brasileiras aliado à falta de investimentos no setor de saneamento básico tornam os sistemas de abastecimento de água ineficazes e de difícil operacionalidade.

Uma das maneiras encontradas para contornar a falta de recursos no setor foi a construção mais barata de novos sistemas sem a presença de reservatórios de distribuição. Assim sendo, é necessária a existencia de um controle eficaz na pressão da rede de distribuição para não prejudicar o desempenho das estações de bombeamento, pois a retirada do reservatório implica na variação do ponto de trabalho das bombas presentes nas estações que servem para bombear água para a rede de distribuição, podendo aumentar sua potência requerida, quando a pressão diminuir e consequentemente a vazão aumentar, ou chegar ao extremo de funcionar sem bombear, quando a pressão aumentar muito e sua vazão chegar a valores próximos de zero, definido como o ponto de *shut off* da bomba.

O reservatório de distribuição representa cerca de 20% a 40% (vinte a quarenta por cento) do valor total da obra dos sistemas de abastecimento de água, de acordo com informações obtidas a partir dos orçamentos realizados no ano de 2010 pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte – CAERN. Assim, encontrar uma forma de retirá-lo do processo de abastecimento sem perdas na qualidade do abastecimento ou sem causar dificuldades operacionais no sistema representa uma das alternativas para solução do problema da falta de recursos financeiros.

As dificuldades operacionais apresentadas por sistemas que não dispõe de reservatórios de distribuição e que, por esse motivo, injetam água diretamente na rede de distribuição, resultam em:

- ✓ Saturação da rede de distribuição em determinados horários (diminuição do consumo de água) levando-a a criar faixas de altas pressões que tem como consequência o surgimento de inúmeros vazamentos;
- ✓ Desperdício de produtos químicos; desgastes prematuros nos equipamentos; aumento do consumo de energia elétrica, entre outros.



Um sistema de abastecimento de água capaz de atender a população de forma mais barata e que mantenha a qualidade do produto é algo de interesse das empresas do setor de saneamento e de pesquisadores da área como, por exemplo, Gomes e Carrijo. Por essa razão foi realizado um estudo sobre o assunto em questão com o objetivo de encontrar soluções voltadas para este fim.

A pesquisa abrange o controle do conjunto motobomba através do uso de um inversor de frequência para modular a velocidade do motor e assim poder controlar a pressão na rede de distribuição, porque determinados sistemas de bombeamento requerem um controle de vazão e pressão, principalmente quando há variação da demanda, o que torna essas variáveis, vazão e pressão, imprescindíveis.

Para conseguir esse tipo de controle que emula a forma humana de pensar é necessário o uso de um controlador Lógico Programável (CLP), ou algum outro dispositivo de comando que tenha lógica *fuzzy* incorporada, pois segundo Simões e Shaw (2007) “A lógica *fuzzy* é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle e dessa forma pode controlar variáveis imprecisas”.

É necessário encontrar um valor de referência para a pressão em diversos horários, nos dias da semana e nas condições climáticas, períodos de sol e chuva, de forma que esse referencial forneça as condições para se antecipar as ações de controle, dessa forma o controle passa a ser denominado “controle inteligente”.

O estudo sobre o controle da pressão na rede de distribuição de água foi realizada a partir da coleta dos dados hidráulicos (pressão e vazão) e elétricos (tensão, correntes e potência ativa) no sistema de abastecimento de água do condomínio *Green Club II*, localizado na cidade de Parnamirim - RN, no período de junho a agosto do ano de 2011.

A proposta desta pesquisa consiste em buscar soluções mais econômicas para o problema do descontrole da pressão na rede de abastecimento de água, para isso utilizou-se um controlador *fuzzy* Proporcional e Integral (*fuzzy*+PI) para manter a pressão controlada dentro de uma faixa de valores, otimizando a distribuição de água pela rede.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O sistema de abastecimento de água sem o reservatório de distribuição pode funcionar adequadamente e atender a população sem causar problemas no abastecimento, desde que seja feito um controle da pressão.

### 2.1 SISTEMA

O condomínio *Green Club II* tem 312 lotes de terrenos, mas até o presente só 117 foram ocupados. O sistema de abastecimento de água do condomínio é composto por quatro partes:

- ✓ Um poço artesiano, utilizado como manancial de exploração;
- ✓ Um conjunto motobomba submerso, usado para recalcar a água do poço até as residências, acionado por um inversor de frequência;
- ✓ A rede de distribuição, composta por tubulações distribuídas ao longo das avenidas que complementa o processo de abastecimento e os ramais, que interligam a rede aos reservatórios das residências.

A água que abastece o condomínio vem de um poço artesiano, perfurado com uma profundidade de 75 metros, no diâmetro de 250 mm, tem paredes revestidas com tubos de PVC.

A rede de distribuição projetada para o condomínio tem um comprimento total de 4.725 metros, sendo 330m no diâmetro de 100 mm, 486 metros no diâmetro de 75 mm e 3.909 m de 50 mm. O projeto atende seus condôminos com a rede de distribuição passando na calçada de cada lote



Os gastos com o sistema foram:

- ✓ Poço equipado com bomba R\$ 30.169,93;
- ✓ Pannel com inversor de frequência R\$ 5.800,00;
- ✓ Rede de distribuição R\$ 107.068,50;
- ✓ Ramais de ligações R\$ 56.160,00;
- ✓ Estimativa para construção do reservatório é de R\$ **92.318,90**, valores corrigidos em março de 2010 e que representa 31,7% (trinta e um vírgula sete por cento) do custo total da obra.

## 2.2 CONTROLE

O controle da pressão na rede de distribuição poderá ser feito de duas formas, a primeira através da hidráulica onde se utiliza de tubulações de derivações que aliviam a pressão na rede quando esta sofre a diminuição do consumo de água retornando assim, com a água excedente de volta para dentro do poço. Essa forma gera grande desperdício de energia elétrica uma vez que a água bombeada de dentro para fora do poço quando não utilizada retorna para o poço.

A segunda maneira de controle é o elétrico, onde a velocidade do motor é reduzida através do inversor de frequência. Essa forma de controle se apresenta como uma maneira racional de economizar energia elétrica, por relacionar a pressão do sistema ao inversor, de maneira que um valor de referência para a pressão (*set point*) é informado ao inversor que persegue a referência ajustando a velocidade do motor.

Segundo, Gomes *et al.* (2007), em certos casos particulares a aplicação de bombas operando com variação da velocidade de rotação oferece grande potencial para a redução do consumo de energia. Os resultados vão, frequentemente, bem além do ganho quantitativo de energia e pode incluir aumento do desempenho e confiabilidade no sistema de distribuição de água.

Foram estudados os valores da pressão em certos horários, durante todos os dias da semana para obtenção de um valor de referência. Esse referencial de pressão fornece as condições ideais para aplicação de um controle clássico proporcional e integral (PI) e para o controle fuzzy associado com PI.

Para realizar o estudo sobre o controle da pressão na rede de distribuição de água realizou-se o monitoramento do sistema no período de junho a agosto do ano de 2011 na saída do poço e na residência nº 216 que fica no ponto mais alto do terreno. Para isso, utilizou-se um Data *Logger* de dois canais (vazão e pressão), no poço, e um manômetro registrador na residência. Os dados hidráulicos (pressão e vazão) coletados serviram para mostrar o quão importante é a realização desse controle.

Na Figura 01 é possível observar que a vazão no início da operação apresenta valores com o dobro do projetado, ou seja, 12,44 l/s, enquanto o valor de projeto é de 6,35 l/s e a pressão de 0,1 kg/cm<sup>2</sup>. Esses valores mostram o comportamento descontrolado da vazão e da pressão simultaneamente na saída do poço.

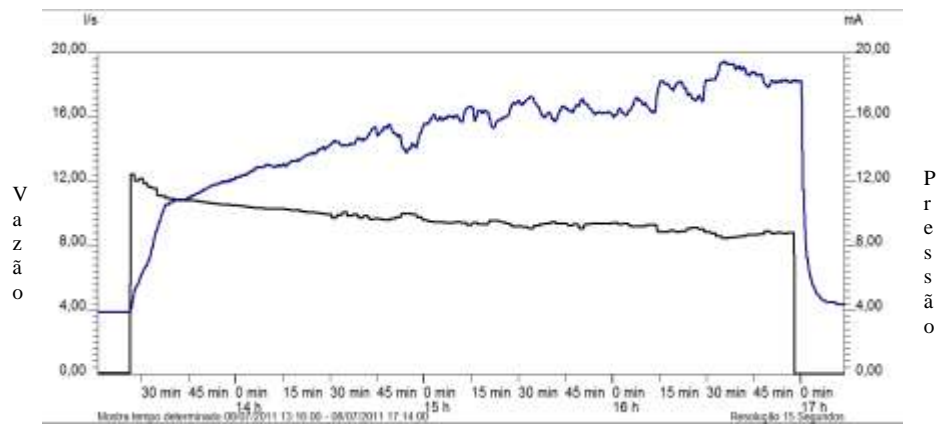


Figura 01 – Gráfico da vazão e pressão, sistema operando sem controle, saída do poço.

Após 3 horas de funcionamento a vazão diminuiu para 8,28 l/s, ainda superior a de projeto, e a pressão alcançou 3,88 kg/cm<sup>2</sup> na saída do poço e 2,85 kg/cm<sup>2</sup> na residência nº 216. Esses dados refletem o descontrole operacional do sistema quando operando em malha aberta, pois o conjunto motobomba demanda uma potência de 12,8 kW quando deveria ser apenas 11,1 kW.

### 2.2.1 CONTROLE PROPORCIONAL E INTEGRAL – PI

A implantação do controle Proporcional e Integral – PI, utilizou um transdutor de pressão na saída do poço para converter o sinal da pressão em corrente de 4 a 20 mA, fechando a malha. O set point (SP) considerado foi de 12,0 mA que equivale em pressão a 2,0 kg/cm<sup>2</sup>. Esse sistema de controle está representado no diagrama de bloco Figura 02.



Figura 02 – diagrama de bloco do controle PI

Com a aplicação do controle PI coletou-se novos valores para a pressão e vazão. Assim, obteve-se a vazão inicial com os mesmos 12,44 l/s, mas ao término das três horas de operação estava com 7,88 l/s, menor que o valor com a malha aberta que foi de 8,28 l/s. A pressão que se inicia sempre com um valor baixo 0,1 kg/cm<sup>2</sup> após uma hora de operação alcançou o valor de referência (SP) e manteve-se neste patamar durante o tempo restante da operação do sistema, conforme visto na Figura 03.





Figura 03 – Gráfico da vazão e pressão, sistema operando com controle.

Ao atingir a referência, a pressão demandou uma potência requerida pelo conjunto motobomba de 11,1 kW menor em 1,7 kW se comparado com a potência requerida do regime anterior. Essa diferença na potência leva o sistema a economizar energia elétrica.

### 2.2.2 CONTROLE FUZZY + PI

A associação do sistema *fuzzy* com o controlador PI deverá propiciar o controle da pressão na rede através do ajuste da velocidade do motor que aciona a bomba centrífuga. O sistema *fuzzy*, não requer um profundo conhecimento matemático, mas o projetista necessita, entretanto, de uma grande compreensão das incertezas e imprecisões dos processos nas plantas, abordando as características de manuseio de informações imprecisas de forma muito distinta da teoria da probabilidade. Nesse sistema foi estudada uma faixa referencial de pressão para regulação desta. Essa faixa poderá variar de acordo com os dias da semana e as condições climáticas de sol e chuva. O uso da faixa otimiza o sistema quanto a distribuição de água e economia de energia elétrica.

Uma comparação entre as maneiras de operação anteriores e esta, é que na primeira não existe nenhum controle, logo o sistema funciona com um alto índice de desperdício.

Na segunda maneira o controle PI já garante uma economia de energia e minimiza o desperdício. Por último, no controle *fuzzy* o sistema passa a operar com uma eficiência maior frente aos modelos anteriores, pois flexibiliza o ponto de operação da bomba para situações de menor demanda de água. Isto torna o sistema mais eficiente e otimizado quanto ao atendimento para demanda de água.

O controle *fuzzy* projetado modificou a estrutura do diagrama de bloco apresentado no controle PI, neste controle o bloco *fuzzy* passa a gerar um sinal de referência (*set point*) para o controlador PI, conforme Figura 04. Esse sinal vai variar de acordo com os dias da semana e as condições do clima (sol e chuva) diferente do anterior (PI) que é sempre constante, por isso ele consegue antecipar as ações de controle, mudando o referencial de pressão e tornando o sistema mais adaptado as variações comportamentais.

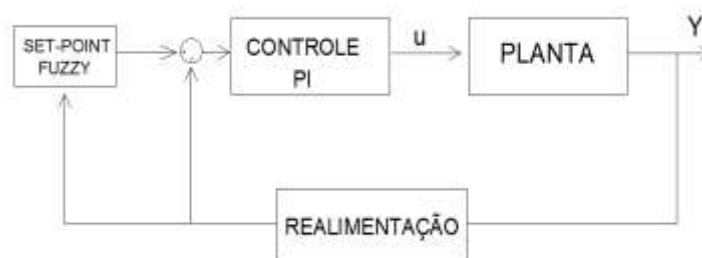


Figura 04 – diagrama de bloco do controlador *fuzzy* + PI

O controlador *fuzzy* foi projetado para ser utilizado no *Sun Spot*, um dispositivo que incorpora a lógica *fuzzy*. Sua unidade básica inclui um acelerômetro e sensores de luz e de temperatura, oito LEDs multicoloridos, dois interruptores de controle, 05 entradas digitais, entradas e saídas analógicas e uma bateria recarregável.

O projeto desenvolvido com a lógica *fuzzy* possui duas entradas. A primeira denominada erro e a outra entrada denominada tempo (condições climáticas: sol e chuva), ambas integradas ao calendário (dias da semana). Essa integração forma a base de regras para gerar os sinais de saída.



A variável erro, apresenta 05 funções de pertinência com as seguintes denominações: pressão baixa, pressão média, *set point*, pressão média alta e pressão alta, todas variando no universo de discurso de -2,0 a 2,0 kg/cm<sup>2</sup>. A entrada da variável tempo apresenta apenas duas funções de pertinência (sol e chuva) no universo de discurso de 0 a 1.

Finalmente os dias da semana foram divididos em dois períodos, o primeiro denominado de semana, contempla os dias da segunda a sexta-feira e o outro denominado de final de semana, contemplando o sábado e domingo. Essa contemplação, juntamente com as entradas, deram origem a 20 (vinte) regras para gerar os três sinais de saídas, velocidade alta, média e baixa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta pesquisa contemplou o monitoramento de dados elétricos (potência) e hidráulicos (vazão e pressão) no sistema de abastecimento de água do condomínio Green Club II durante um período de três meses. Na primeira semana de monitoramento que compreendeu os dias de 04 a 10 de Julho, ocasião em que o sistema operou sem nenhuma estratégia de controle, os volumes produzidos, diariamente, podem ser visto na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Monitoramento do volume produzido na semana de 04 a 10 de julho.

Volumes produzidos (m <sup>3</sup> ) por dia - semana de 4 a 10 de jul.							
Sem cont.	Dias						
	Seg.	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sáb.	Dom.
	199,04	204,96	211,51	194,51	198,09	190,77	185,81

Esse sistema foi projetado para funcionar durante 24 horas com a vazão de 23,5 m<sup>3</sup>/h, que produzirá um volume de 564 m<sup>3</sup> por dia, quando o condomínio estiver totalmente ocupado. No período da pesquisa, a taxa de ocupação era de apenas 1/3 da capacidade do condomínio, com 80 (oitenta) residências habitadas e 37 (trinta e sete) em construção. Desta forma, o tempo de funcionamento do sistema foi reduzido para 08 horas diárias. Com o tempo de 08 horas se produzia um volume de 188 m<sup>3</sup>/dia. Contudo, a vazão média diária registrada no sistema foi de 32,25 m<sup>3</sup>/h valor superior a de projeto 23,5 m<sup>3</sup>/h, logo, foi possível reduzir o tempo de 08 para 06 horas de bombeamento por dia sem diminuição do volume produzido diariamente, e sem causar problemas de desabastecimento em alguma residência.

Quanto ao comportamento da pressão no sistema operando sem controle observou-se que durante os dias da semana não ocorreram grandes variações entre seus valores como visto no comportamento da vazão. Contudo, ela alcançou valores de 3,8 kg/cm<sup>2</sup> próximos da pressão de *shut off* da bomba, como constatado no gráfico de pressão da Figura 01.

O sistema operando sem controle sob essas condições de vazão e pressão apresentou o valor de potência requerida pela bomba ao motor de 12,8 kW. Uma vez, operando sem controle, o sistema se torna desvantajoso em virtude do aumento da potência, do desperdício de produto químico e de água em consequência dos vazamentos, o que encarece sua operação.

A implantação da estratégia do controle clássico Proporcional e Integral – PI que manteve a pressão controlada no sistema propiciou a diminuição da potência requerida pela bomba de 12,8 kW para 11,1 kW, acarretando uma diminuição de 1,7 kW na potência, o que representa uma economia no consumo de energia elétrica de aproximadamente 13,7%. Ocorreu também, redução do número de vazamentos de 07 para 01 por semana e, conseqüentemente, a diminuição do desperdício de água e de produto químico.



Na residência de nº 216, citada anteriormente, a pressão com o uso do controle PI ficou em 1,7 kg/cm<sup>2</sup>, portanto, ainda superior a 1,0 kg/cm<sup>2</sup> que é o valor mínimo exigido para atender ao imóvel, segundo a NBR 12218 -1994.

A implantação da estratégia do controle *fuzzy* associado ao controle PI melhorou ainda mais o equilíbrio entre os valores do volume produzido durante os dias da semana, na tabela 3.3 é possível observar a comparação feita entre os volumes produzidos nos dias de Sábado, com o sistema operando sem controle, com controle PI e com o controle *fuzzy* associado ao PI. Os dias escolhidos foram dois de cada modo de operação do sistema, sendo 02 e 09 de Julho com o sistema operando sem nenhuma estratégia de controle, 16 e 23 de Julho quando o sistema operou sob a ação o controle PI e os dias 03 e 10 de Setembro sob a ação do controle *fuzzy* + PI. É importante lembrar que na manhã do Sábado 03 de Setembro, ocorreu uma chuva no condomínio, fato que associado ao controle *fuzzy* + PI provocou uma redução no consumo de água do poço pelos moradores que não a utilizaram para a irrigação dos jardins, limpeza de calçadas e outras atividades.

A diminuição pode ser observada na diferença entre os valores dos consumos apresentados na tabela 3.2

Tabela 3.2 – Volumes produzidos nos sábados em (m<sup>3</sup>) comparado com dia da chuva.

Produção m <sup>3</sup> dos sábados - comparação						
Data	02/jul	09/jul	16/jul	23/jul	03/set	10/set
Volumes	95,89	88,66	95,63	89,98	68,46	97,34
Percentual	28,61	22,78	28,42	23,92	0	29,67

Na aplicação do controle *fuzzy* associado ao PI, a pressão do sistema ficou limitada a uma faixa de atuação entre 1,5 a 2,0 kg/cm<sup>2</sup>. Esta faixa atua em sintonia com as condições climáticas de sol e chuva e com os períodos dos dias da semana, assim como os fins de semana influenciando, diretamente, na demanda de água do condomínio. Desta forma, é possível diminuir ainda mais a pressão de referência do valor do ponto de projeto que é de 2,0 kg/cm<sup>2</sup> para até 1,5 kg/cm<sup>2</sup>. Com isso, constataram-se os mesmos ganhos do controle PI quando o sistema operava sem a presença de chuvas.

No Sábado, 03 de Setembro quando o sistema encontrava-se sob a ação do controle *fuzzy* associado ao PI, a potência registrada no sistema foi 9,2 kW ficando abaixo dos 11,1 kW quando o sistema operava com o controle PI e dos 12,8 kW quando operava sem controle. Este valor de potência apresentou uma redução de 28,13% se comparada a do sistema sem controle nenhuma estratégia de controle e posteriormente com a aplicação de dois tipos de controle: o clássico PI no final do primeiro mês e o *fuzzy* associado ao PI nos outros dois meses. Ambos se mostraram muito eficientes se comparados à operação sem controle.

## 6. CONCLUSÕES

Como foi visto o sistema de abastecimento de água do condomínio Green Club II foi monitorado durante três meses, no período de Julho a Setembro de 2011. Neste período foi possível observar o comportamento do sistema sem a aplicação de nenhuma estratégia de controle e posteriormente com a aplicação de dois tipos de controle: o clássico PI no final do primeiro mês e o *fuzzy* associado ao PI nos outros dois meses. Ambos se mostraram muito eficientes se comparados à operação sem controle.

É importante lembrar que as análises feitas para comparar as produções diárias do sistema sem controle e quando este sistema encontrava-se sob a ação dos controles PI e fuzzy associado ao PI, ocorreram em diferentes dias, portanto em diferentes condições das variáveis: demanda de água e clima. Mesmo assim, o consumo e as condições climáticas permaneceram semelhantes.



Como foi visto, aplicando-se o controle PI é possível reduzir o consumo de energia elétrica em aproximadamente 13,7%. Observou-se, também, a diminuição do consumo de produto químico e o número de vazamentos do sistema que era de 07 (sete) por semana passando para 01 (um), valores médios, todos em função da diminuição da pressão.

Na aplicação do controle *fuzzy* associado ao PI, a redução do consumo de energia elétrica também sofreu redução de 13,7% operando na velocidade alta e sem a presença de chuva e alcançou 28,13% quando o sistema operou na velocidade baixa, especificamente, no Sábado que choveu como pode ser visto na tabela 4.1. É preciso lembrar ainda, que na aplicação dos dois tipos de controle, os imóveis do condomínio receberam água na pressão mínima recomendável por norma e na quantidade necessária para seu abastecimento. A redução na pressão fez aumentar a vida útil da tubulação, principalmente pela fadiga do material provocada pelo ciclo de altas e baixas pressões.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE FILHO, L. S.; SISTEMA DE BOMBEAMENTO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 1ª Edição, Editora Universitária da UFPB, João Pessoa – PB, 2009.

BOLTON, W. – ENGENHARIA DE CONTROLE; tradução Valcere Vieira Rocha e Silva; revisão técnica Antônio Pertence Junior, editora Makron Books, São Paulo – SP, 1995.

CARRIJO, I. B.; Reis, L. F. R.; Cheung, P. B.; Soares, A. K.; Silva, F. das G. B. da - OTIMIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS MULTI OBJETIVO, disponível em: [http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea\\_publicacoes18.pdf](http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea_publicacoes18.pdf). Acesso em: 18 de janeiro de 2011.

DE-BIAO, W.; Le-peng, S.; Da-yong, H. e Yong-gang, C. - THE PUMP HOUSE CONSTANT PRESSURE FUZZY SELF-TUNING PID

EUROPUMP, Hydraulic Institute; VARIABLE SPEED PUMPING - A GUIDE TO SUCCESSFUL APPLICATIONS, Elsevier Ltd. Cornwall, Great Britain, 2004.

GOMES, H. P.; Garcia, R. P.; Rey, P. L. I. – ABASTECIMENTO DE ÁGUA, O ESTADO DA ARTE E TÉCNICAS AVANÇADAS – 1ª Edição, editora Universitária – UFPB, João Pessoa – PB, 2007.

SANDRA, S. e Correa, C. LÓGICA NEBULOSA - ANAIS DA V ESCOLA DE REDES NEURAIAS. São José dos Campos, 1999.

SIMÕES, M. G.; Shaw, I. S. – CONTROLE E MODELAGEM FUZZY, 2ª edição, editora Blucher, São Paulo – SP, 2007.

YASSUDA, E. R.; Nogami, P. S. – CONSUMO DE ÁGUA, CAPÍTULO 4. IN: TÉCNICA DE ABASTECIMENTO E TRATAMENTO DE ÁGUA. Vol. 1. CETESB. São Paulo-SP, 1976.

ZADEH, L.A. FUZZY SETS. ON FORMATION AND CONTROL. 1965. V.8, p.338-353, 1965.