

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY
PARA O CONTROLE DE NÍVEL DE ÁGUA DE UM
PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR**

THIAGO SOUZA PEREIRA DE BRITO

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

AGOSTO, 2015

THIAGO SOUZA PEREIRA DE BRITO

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY
PARA O CONTROLE DE NÍVEL DE ÁGUA DE UM
PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Engenharia de Reatores.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-Orientador: Prof. Dr. Wagner Eustáquio de Vasconcelos

RECIFE

2015

Catálogo na fonte

Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

B862d Brito, Thiago Souza Pereira de.
Desenvolvimento de um controlador PID-Fuzzy para o controle de nível de água de um pressurizador de um reator nuclear. / Thiago Souza Pereira de Brito. - Recife: O Autor, 2015.
91 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira.
Coorientador: Prof. Dr. Wagner Eustáquio de Vasconcelos.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2015.
Inclui referências bibliográficas.

1. Reator. 2. Fuzzy. 3. Pressurizador. 4. Controle. I. Lira, Carlos Alberto Brayner de Oliveira, orientador. II. Vasconcelos, Wagner Eustáquio de, coorientador. III. Título.

CDD 621.483 (21. ed.)

UFPE
BDEN/2015-24

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY PARA O CONTROLE DE NÍVEL DE ÁGUA DE UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR

Thiago Souza Pereira de Brito

APROVADA EM: 31.08.2015

ORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Wagner Eustáquio de Vasconcelos

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima – CRCN-NE/CNEN

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino – Dept. Eng. Elétrica/UFPE

Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra – DEN/UFPE

Visto e permitida à impressão

Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE

À minha avó Iraci Izidora de Souza (*in memoriam*), pelo exemplo de vida, superação e sabedoria.

Aos meus pais Edvaldo Pereira de Brito e Maria Izidora Souza de Brito, pela paciência, incentivo e apoio.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as coisas e oportunidades que me foram concebidas, pela sua palavra que sempre me direciona para o caminho certo a ser percorrido, pela graça concedida e as incontáveis bençãos recebidas.

A minha mãe, Maria Izidora, que sempre me observa, critica, dialoga, orienta e apoia para que eu cresça cada dia mais na vida em caráter e cidadania.

Ao meu pai, Edvaldo Brito, que em meio a tantas adversidades tem se erguido dia após dia, lutando e liderando a família, dando um exemplo de vida, perseverança e determinação.

Aos meus irmãos, Edvaldo Jr., Edson, Isaac, Niedja Sarah, André Felipe e Joel, que me apoiam sempre que preciso.

A Profa. Helen Khoury, pela oportunidade.

Ao meu Orientador Prof. Carlos Brayner, por ter me aceito, pela paciência, confiança, por mostrar o melhor caminho para atingir os objetivos. Um dos grandes responsáveis pelo meu desenvolvimento acadêmico, e, pelo fazer acontecer neste trabalho. Não tenho palavras para descrever a imensa gratidão.

Ao meu co-orientador Prof. Wagner Eustáquio, pelas dicas, orientações, perspectivas e as experiências de vida e acadêmicas a mim compartilhadas.

Aos Professores Mário Bezerra, Jair Bezerra, Vinícius Saito e José Wilson por contribuir no meu desenvolvimento, esclarecendo dúvidas, orientando e apoiando sempre que precisei.

A todos meus amigos que me ajudaram direta e indiretamente na construção desta dissertação.

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe.”

(Aldous Huxley)

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

(Filipenses 4:13)

DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID-FUZZY PARA O CONTROLE DE NÍVEL DE ÁGUA DE UM PRESSURIZADOR DE UM REATOR NUCLEAR

Autor: Thiago Souza Pereira de Brito

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-orientador: Prof. Dr. Wagner Eustaquio de Vasconcelos

RESUMO

Usinas nucleares são sistemas físicos de natureza não-linear. E, devido as grandes variações de potência no regime de trabalho, um regime transitório se desenvolverá onde a pressão e a temperatura média do circuito primário irão sofrer variações significativas. Com a finalidade de inibir variações de pressão e manter o sistema pressurizado, o Pressurizador tem a função de controlar as variações que ocorrem no sistema primário do reator. Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um Controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) baseado em lógica Fuzzy para atuação em um Pressurizador de um Reator Nuclear de Água Pressurizada. Um Controlador Fuzzy foi desenvolvido através do processo de fuzzificação, inferência e defuzzificação das variáveis de interesse para um Pressurizador, em seguida este controlador foi acoplado a um Controlador PID formando um Controlador PID regido pela lógica Fuzzy, ou seja, um Controlador PID-Fuzzy. Este foi, validado experimentalmente em uma Planta de Simulações no qual foram atribuídos transitórios semelhantes à um Pressurizador de um Reator Nuclear, observado e ajustado para melhores respostas e resultados. Os resultados desta validação foram comparados com Controladores Simples (on/off) e PID, também de forma experimental. Após a validação o Controlador PID-Fuzzy foi desenvolvido para atuar no Código MODPRESS, que simula matematicamente o Pressurizador NEPTUNUS de um Reator. Neste Código também foi feita uma comparação entre os Controladores PID e o Controlador PID-Fuzzy. Os resultados obtidos demonstraram que o Controlador PID-Fuzzy apresentou melhor desempenho e precisão, com respostas suaves, o que representa menor stress mecânico, agregando maior robustez na condução e controle do Pressurizador, dando mais confiabilidade e segurança no Reator Nuclear.

Palavras Chave: Controle; Fuzzy; Pressurizador; Reator.

DEVELOPMENT OF A PID-FUZZY CONTROLLER FOR WATER LEVEL CONTROL OF A PRESSURIZER OF A NUCLEAR REACTOR

Author: Thiago Souza Pereira de Brito

Adviser: Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira

Co-adviser: Prof. Dr. Wagner Eustaquio de Vasconcelos

ABSTRACT

Nuclear power plants are physical systems of nonlinear nature. Because of large power variations in operational conditions, transient situations will develop where the pressure and temperature average of the primary circuit coolant will undergo significant variations. In order to inhibit pressure fluctuations and maintain the pressurized system, the Pressurizer has the function of controlling the variations that occur in the primary reactor system coolant. This work aims at the development of a PID controller (Proportional Integral Derivative) based on fuzzy logic to operate in a Pressurizer of a Nuclear Pressurized Water Reactor. A fuzzy controller was developed using the process of fuzzification, inference and defuzzification of the variables of interest for a Pressurizer then this controller was connected to a PID controller forming a PID controller, but driven by fuzzy logic, that is, a PID-Fuzzy controller. This was validated experimentally on a plant simulations in which transients were assigned similar to the one Pressurizer of a Nuclear Reactor, observed and adjusted for best results. The results of this validation were compared with Simple Controllers (on/off) and PID also on an experimental basis. After validation the PID-Fuzzy Controller is designed to operate in MODPRESS Code, which mathematically simulates a Pressurizer NEPTUNUS of a reactor. In this code a comparison between PID and PID-Fuzzy Controllers was also made. The results showed that the PID-Fuzzy Controller demonstrated better performance and accuracy, with smooth responses, which means less mechanical stress, adding more robustness in the conduction and control of Pressurizer, giving more reliability and safety in Nuclear Reactor.

Keywords: Control; Fuzzy; Pressurizer; Reactor.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Diagrama de uma central nuclear PWR</i>	19
<i>Figura 2 Função característica do conjunto “crisp” adolescente.</i>	22
<i>Figura 3 Função trapezoidal característica do conjunto fuzzy adolescente.</i>	22
<i>Figura 4 Funções de pertinência para a variável temperatura.</i>	25
<i>Figura 5 Funções de pertinência para a variável estatura.</i>	27
<i>Figura 6 Estrutura de um Controlador Fuzzy.</i>	28
<i>Figura 7 Inferência máximo-mínimo para o modelo de Mamdani.</i>	32
<i>Figura 8 Defuzzificação utilizando o método do Centro de Gravidade (COG).</i>	33
<i>Figura 9 Representação no Software e Fluxograma da Planta 1.</i>	39
<i>Figura 10 Legenda do Sistema Planta 1.</i>	40
<i>Figura 11 Representação do Cilindro no Software e Imagem Real.</i>	40
<i>Figura 12 Transmissor de Nível.</i>	41
<i>Figura 13 Resistência de Aquecimento</i>	41
<i>Figura 14 Termopar.</i>	42
<i>Figura 15 Transmissor de Pressão.</i>	42
<i>Figura 16 Válvula de Alívio de Pressão.</i>	43
<i>Figura 17 Moto-bomba.</i>	43
<i>Figura 18 Medidor de Vazão.</i>	44
<i>Figura 19 Válvula de Controle.</i>	44
<i>Figura 20 Conversor ou Transdutor para Válvulas.</i>	45
<i>Figura 21 Regulador de Ar.</i>	45
<i>Figura 22 Painel de Controle do Software.</i>	46
<i>Figura 23 Tags.</i>	47
<i>Figura 24 Controle PID-Fuzzy do nível de água no pressurizador.</i>	51
<i>Figura 25 Fluxograma da Metodologia.</i>	53
<i>Figura 26 Controlador PID</i>	54
<i>Figura 27 Definição dos Erros</i>	55
<i>Figura 28 Saída da Constante K_p.</i>	56
<i>Figura 29 Saída da Constante K_i.</i>	56
<i>Figura 30 Saída da Constante K_d.</i>	56
<i>Figura 31 Comportamento da Constante K_p.</i>	57
<i>Figura 32 Comportamento da Constante K_i.</i>	58
<i>Figura 33 Comportamento da Constante K_d.</i>	58
<i>Figura 34 Comportamento da vazão mássica em um outsurge.</i>	60

<i>Figura 35 Queda do volume no momento do outsurge.</i>	60
<i>Figura 36 Sistema de controle simulado para o código MODPRESS.</i>	61
<i>Figura 37 Controlador PID-Fuzzy desenvolvido: 2 variáveis de entrada, 10 regras e 3 variáveis de saída.</i>	62
<i>Figura 38 Variável de entrada do controlador correspondente ao erro com 5 (cinco) funções de pertinência.</i>	64
<i>Figura 39 Variável de entrada do controlador correspondente a de/dt com 5 (cinco) funções de pertinência.</i>	64
<i>Figura 40 Variável de entrada do controlador correspondente a Kp com 4 (quatro) funções de pertinência.</i>	65
<i>Figura 41 Variável de entrada do controlador correspondente a KI com 4 (quatro) funções de pertinência.</i>	65
<i>Figura 42 Variável de entrada do controlador correspondente a Kd com 4 (quatro) funções de pertinência.</i>	66
<i>Figura 43 Superfície de resposta de saída do Kp em relação aos valores do erro e do de/dt.</i>	66
<i>Figura 44 Superfície de resposta de saída do Ki em relação aos valores do erro e do de/dt.</i>	67
<i>Figura 45 Superfície de resposta de saída do Kd em relação aos valores do erro e do de/dt.</i>	67
<i>Figura 46 Controlador Simples.</i>	69
<i>Figura 47 Controlador PID.</i>	69
<i>Figura 48 Controlador PID-Fuzzy.</i>	70
<i>Figura 49 Controlador Simples (outsurge 2,68 L/min).</i>	71
<i>Figura 50 Controlador Simples (outsurge 5,62 L/min).</i>	71
<i>Figura 51 Controlador Simples (outsurge 7,99 L/min).</i>	72
<i>Figura 52 Controlador PID (outsurge 2,68 L/min).</i>	73
<i>Figura 53 Controlador PID (outsurge 5,62 L/min).</i>	73
<i>Figura 54 Controlador PID (outsurge 7,99 L/min).</i>	74
<i>Figura 55 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 2,68 L/min).</i>	75
<i>Figura 56 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 5,62 L/min).</i>	75
<i>Figura 57 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 7,99 L/min).</i>	76
<i>Figura 58 Controlador Simples (insurge 2,27 L/min).</i>	77
<i>Figura 59 Controlador Simples (insurge 5,36 L/min).</i>	77
<i>Figura 60 Controlador Simples (insurge 8,97 L/min).</i>	78
<i>Figura 61 Controlador PID (insurge 2,27 L/min).</i>	79
<i>Figura 62 Controlador PID (insurge 5,36 L/min).</i>	79
<i>Figura 63 Controlador PID (insurge 8,97 L/min).</i>	80
<i>Figura 64 Controlador PID-Fuzzy (insurge 2,27 L/min).</i>	81

<i>Figura 65 Controlador PID-Fuzzy (insurge 5,36 L/min).....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 66 Controlador PID-Fuzzy (insurge 8,97 L/min).....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 67 Resposta dos Controladores PID e PID-Fuzzy no início da operação do pressurizador....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 68 Simulação da resposta do controlador a um transiente simulado.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 69 Resposta dos controladores a uma queda de volume de água correspondente a 5%.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 70 Resposta dos controladores a uma queda de volume de água correspondente a 50%.....</i>	<i>86</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Geral.....	17
1.1.2 Específicos.....	17
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1 Sistema Pressurizador.....	18
2.2 Fuzzy.....	21
2.2.1 Conjuntos <i>fuzzy</i> - Conceitos básicos.....	21
2.2.2 Operações em conjuntos <i>fuzzy</i>	23
2.2.3 Propriedades dos conjuntos <i>fuzzy</i>	24
2.2.4 Variáveis linguísticas.....	25
2.2.5 Funções de pertinência.....	26
2.2.6 Controladores <i>fuzzy</i>	27
2.3 Controladores PID.....	34
2.3.1 Problemas com controle PID e com modelagem de processos em geral.....	35
2.3.2 Vantagens de controladores industriais <i>fuzzy</i> baseados em regras.....	36
3 PLANTA DE SIMULAÇÃO DE PROCESSOS.....	38
3.1 Sistema Planta 1.....	38
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
4.1 Modelo Matemático do Pressurizador.....	48
4.2 Código MODPRESS.....	48
4.3 Determinação do estado termodinâmico de um pressurizador.....	49
4.4 Controlador <i>Fuzzy</i>	51
4.5 Metodologia Aplicada.....	52
4.6 Controlador PID no SP1.....	53
4.7 Controlador Fuzzy e Controlador PID-Fuzzy no SP1.....	55
4.8 Controlador Fuzzy e Controlador PID-Fuzzy no MODPRESS.....	59
4.9 Desenvolvimento do Controlador PID-FUZZY.....	61
5 RESULTADOS.....	68
5.1 Validação do Controlador PID-Fuzzy no SP1.....	68
5.3 Resultados da Aplicação do Controlador PID-Fuzzy ao Código MODPRESS.....	84

5.4 Análise do Controlador PID-Fuzzy no Código MODPRESS	86
6 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

Os reatores nucleares são sistemas físicos que tem comportamento de natureza não-linear e suas variáveis operacionais variam com o tempo como uma função do nível de potência. Estas características devem ser consideradas se ocorrerem grandes variações de potência no regime de trabalho de uma usina nuclear. Em consequência disto, um regime transitório se desenvolverá onde a pressão e a temperatura média do circuito primário irão sofrer variações significativas. Com a finalidade de inibir variações de pressão e manter o sistema pressurizado, adaptou-se ao sistema de refrigeração de um reator PWR (Pressurized Water Reactor) um componente denominado de pressurizador.

O pressurizador é um tanque fechado, isolado termicamente do exterior e preenchido com água em estado líquido e vapor saturado. Sua função é controlar as variações de pressões que ocorrem no sistema primário do reator. Ele é composto basicamente de uma linha de alimentação chamada de linha de compensação volumétrica ou linha de surto, que está ligada diretamente ao sistema de refrigeração (perna quente) do circuito primário; um aspersor, responsável por borrifar água (*spray* de água) da perna fria do reator para auxiliar na condensação do vapor; e, aquecedores, responsáveis por fornecer calor à água para auxiliar na formação de vapor.

Em condições de aumento de pressão haverá um fluxo de entrada de água do circuito primário para o pressurizador através da linha de surto, que tenderá a condensar o vapor impedindo dessa forma que a pressão aumente indevidamente. Para acelerar a condensação os aspersores de fluxo controlado atuam no topo do tanque.

Já em condições de queda de pressão, haverá refluxo de água do pressurizador para o circuito primário. A queda de pressão provocará o aparecimento de bolhas no seio do líquido, que está agora superaquecido, por ebulição rápida (*flashing*) e evaporação na interface líquido-vapor, produzindo vapor e impedindo assim que a pressão diminua demasiadamente. Para tornar mais rápidas as ebulições os aquecedores elétricos imersos fornecem calor à água. Se o aumento de pressão exceder a capacidade do pressurizador existem no seu topo válvulas de alívio que descarregam o vapor do pressurizador para o interior de um tanque de alívio.

Tendo em vista a importante função desempenhada por este componente, torna-se necessário o desenvolvimento de um controlador de nível de água no pressurizador, visando cada vez mais à segurança e inibindo ocorrência de possíveis acidentes. O desenvolvimento

do sistema de controle é de fundamental importância para reduzir as variações rápidas das variáveis operacionais e para manter a estabilidade do sistema.

O controle de potência do reator tem sido utilizado em condições de funcionamento tradicionais. Mas com a crescente quota das usinas de geração de eletricidade, isto é, como a crescente demanda de geração energia elétrica, o aumento nas operações de controle em reatores nucleares será inevitável no futuro, sendo difícil obter desempenho satisfatório com a estratégia de controle clássico para controlar a potência de um reator nuclear (LIU et al., 2009).

O controle de multi-modelos é um tipo relativamente eficaz na estratégia de controle não-linear dependente do tempo (LUPU et al., 2008; KOLAVENNU et al., 2001), mas muitas vezes traz erros inaceitáveis (LUO et al., 2008; ZOU et al., 2007). Estes erros têm sido minimizados com os sistemas de controle avançados sendo que estes sistemas inteligentes possibilitam o controle de sistemas não-lineares dependentes do tempo.

O controlador baseado em lógica *fuzzy* (CLF) é um bom representante dessa nova geração de controladores inteligentes (ISMAEL; YU, 2006), mas quando utilizado em sistema de controle de níveis de potência em reatores nucleares, não é fácil lidar com o problema de imprecisão em comparação com controladores clássicos como o proporcional-integral-derivativo (PID).

Os controladores mais conhecidos e utilizados no controle de processo industriais são os controladores proporcional-integral-derivativo (PID), devido a sua estrutura simples e desempenho robusto em uma ampla gama de condições operacionais. A incorporação de CLF e PID, conhecidos como PID-Fuzzy, traz bons resultados e suas excelentes propriedades estão bem comprovadas (RUBAAI et al., 2007, 2008).

A principal característica da lógica *fuzzy* é sua representação em forma de funções de pertinência (FP) em uma base de regras especificada. Portanto, se a forma e o tipo da função de pertinência são devidamente selecionados por algum algoritmo de otimização, seu desempenho pode ser significativamente melhorado.

Ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático, no controle *fuzzy* utilizam-se regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, sua intuição e heurística para controlar um processo (ZADEH, 1965).

Os controladores *fuzzy* são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar (GUERRA, 1998). Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática. Além disso, mesmo em sistemas onde a incerteza se faz presente de maneira intrínseca, são capazes de agregar a robustez característica do método.

A inserção de novos processos e técnicas na rotina de funcionamento de uma planta nuclear deve ser sempre precedida de uma rigorosa comprovação teórica e experimental de todos os parâmetros e processos envolvidos na operação e na segurança da planta. Por razões óbvias, os níveis de segurança nos reatores nucleares são elevados, exigindo assim estudos aprofundados de comprovação. Vários trabalhos sobre o uso de controladores fuzzy em usinas nucleares já foram publicados, entretanto, os modelos utilizados geralmente limitam-se a simulações teóricas sem a necessária validação por experimentos similares. É, portanto, de suma importância a simulação destes controladores em um sistema experimental, como será realizado neste trabalho. Este fornecerá dados concretos, situações e condições que nem sempre um código, programa ou previsão teórica, mesmo com muita aproximação, pode oferecer. Uma validação experimental é um avanço na elaboração e construção de um Controlador PID-Fuzzy para um Pressurizador de um Reator PWR, dando-lhe mais confiabilidade e segurança.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador PID-Fuzzy (Proporcional Integral Derivativo) para controlar o nível de água no pressurizador de um reator PWR.

1.1.2 Específicos

- Desenvolver um controlador PID;
- Desenvolver um sistema de controle baseado em lógica *fuzzy*;
- Acoplar o controlador PID ao sistema *fuzzy*;
- Validar o controlador PID-Fuzzy com dados experimentais;
- Aplicar o sistema de controle desenvolvido ao código MODPRESS.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sistema Pressurizador

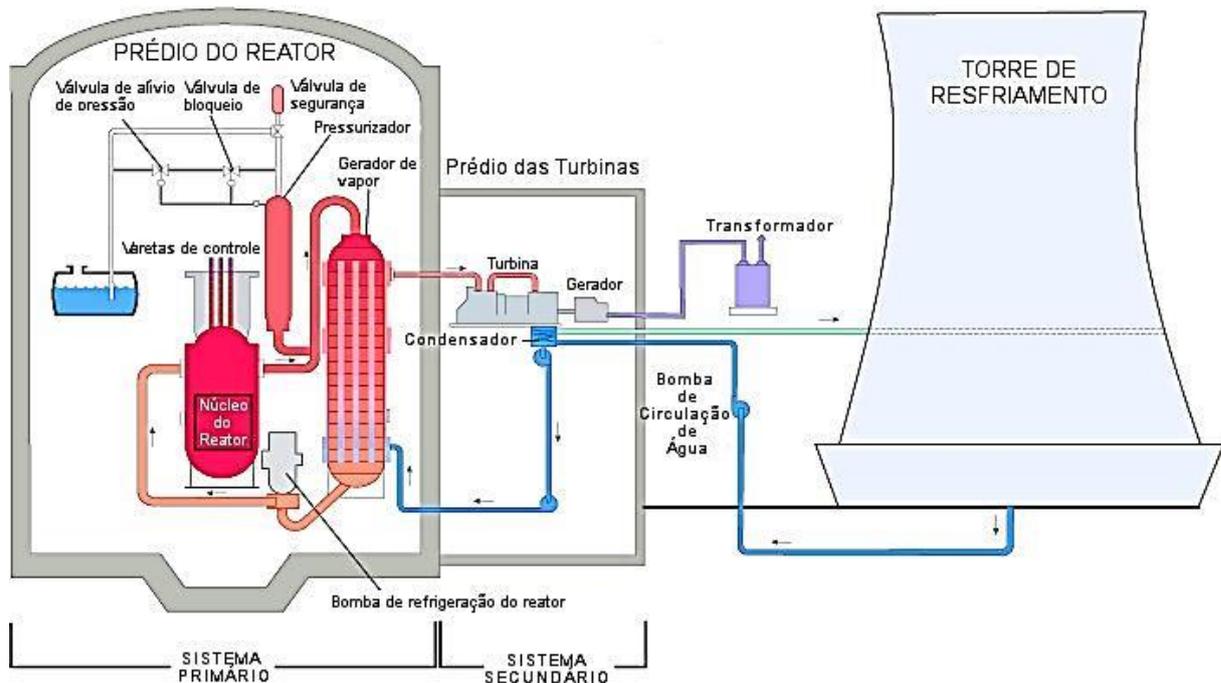
O pressurizador é uma câmara bifásica, onde a fase vapor ocupa a parte superior, enquanto que a fase líquida ocupa a parte inferior. Como o pressurizador é conectado a parte quente do circuito primário por meio de um conduto de compensação, chamado de linha de surto, o pressurizador pode então desempenhar uma de suas funções que é a de amortecer variações de volume do refrigerante no circuito primário.

Quando a temperatura média aumenta, o fluido se expande e penetra no pressurizador pela linha de surto, sendo o aumento de pressão ali absorvido pela condensação espontânea, nas paredes do pressurizador, e condensação nas gotículas do borrifo de água retirada da perna fria. Isso faz com que a pressão não mais aumente, permanecendo dentro de um limite superior aceitável. Caso o circuito primário fosse um sistema hermeticamente fechado, pressões intensas se desenvolveriam em todos os componentes deste circuito, colocando em risco a sua integridade. Entretanto, se o transitório for severo, outros dispositivos do pressurizador como válvulas de segurança e alívio são acionadas. Além disso, outras medidas podem ser tomadas como o aumento da concentração de Boro, acionamento das barras de controle e, em última instância, desligamento do reator. O conjunto dessas medidas garante a necessária despressurização do sistema (BRUEL, 1997 ; WOISKI ; 1981).

No sentido oposto, uma diminuição da temperatura média do refrigerante conduz a uma contração de volume da água do primário, provocando a saída de água do pressurizador pela linha de surto com a conseqüente redução da pressão do primário, provocando alterações nas condições de transferência de calor do núcleo do reator para o refrigerante. Portanto, um limite inferior de pressão deve ser observado. Isso é conseguido no pressurizador pelo acionamento de aquecedores elétricos que produzem mais vapor, até que a pressão para de decrescer.

Em linhas gerais, a água do circuito primário é aquecida no núcleo do reator e flui através do gerador de vapor, de onde sai o vapor que alimenta o conjunto de turbinas. A água retorna ao reator, vindo do gerador de vapor, através de bombas de circulação, como mostra a Figura 1.

Figura 1 Diagrama de uma central nuclear PWR



Fonte: (U.S.NRC, 2013) [Adaptado]

Para Woiski (1981) e Bruel (1997), dois tipos de transitórios podem ser observados em um reator: transitórios decorrentes de variações de cargas e aqueles oriundos de acidentes ou condições anormais.

Tendo em vista o grande papel desempenhado por um pressurizador, no que tange ao funcionamento de um reator de potência, muitos pesquisadores ligados à área desenvolveram vários modelos para simular o comportamento dinâmico desse componente e assim desencadearam-se muitas pesquisas inerentes a este assunto (BRUEL, 1997; WOISKI, 1981). Para estes autores, qualquer modelo teórico de um pressurizador toma como base a análise de seu comportamento dinâmico. Para tanto, divide-se o pressurizador em regiões chamadas de volumes de controle. O número de regiões e suas características físicas dependem do modelo estabelecido. A análise do comportamento dinâmico apoia-se, fundamentalmente, nas equações de balanço de massa e energia entre os volumes de controle. O balanço de energia está ligado à 1ª lei da termodinâmica e a análise do modelo deve considerar:

1. Parâmetros geométricos, volume inicial de vapor, volume inicial do líquido.
2. Mecanismo de liquefação do vapor por condensação.
3. Condensação nas gotas do aspersor (*spray*).

4. Transferência de calor entre a interface vapor-água.
5. Transferência de calor por condensação com as paredes do pressurizador.
6. Transferência de calor por ebulição com as paredes do pressurizador.
7. Transferência de calor entre o vapor e a parede por circulação natural.
8. Transferência de calor entre o líquido e a parede por circulação natural.
9. Transferência de calor através das paredes do pressurizador.
10. *Flashing* no seio do líquido num *outsurge* rápido.
11. Taxas de ebulição e condensação da água.
12. Transferência de calor gerada pelos aquecedores.
13. Gases não condensáveis e eliminação de gases.
14. Abertura e fechamento das válvulas de segurança e alívio.

Incorporar todos estes fenômenos dentro de um modelo levaria a grandes complicações e, por esta razão, muitas vezes algumas hipóteses simplificadoras são consideradas. Todavia, o fluxo de massa e calor que cruzam as fronteiras dos volumes de controle têm sido os pontos críticos de cada análise. A literatura referente ao assunto mostra a quase unanimidade dos autores a respeito do uso de dois tipos de modelos:

- Modelo de equilíbrio termodinâmico

As equações fundamentais são aplicadas a um único volume de controle representado pelas fases líquida e vapor. Neste modelo, o líquido pressurizado e o vapor são tratados como uma mistura saturada à mesma temperatura. Chang (1977) foi um dos primeiros pesquisadores a utilizar este tipo de modelagem no código SOFTH.

- Modelo de não-equilíbrio termodinâmico

Este modelo foi utilizado pela maioria dos autores. As equações de conservação de massa e energia são aplicadas para as fases de vapor e de líquido separadamente, considerando volumes e temperaturas distintas para cada uma das fases. Foi comprovado que este modelo era mais realista que o modelo saturado em todos os instantes (NAVAHANDI et al., 1967). (Navahandi et al., 1967) comprovaram ainda nas suas pesquisas

que a curva teórica do aumento da pressão deste modelo era exatamente sensível a certo coeficiente de condensação ou evaporação ocorrendo na interface líquido-vapor.

2.2 Fuzzy

2.2.1 Conjuntos *fuzzy* - Conceitos básicos

Na teoria clássica dos conjuntos, um elemento pertence ou não a um determinado conjunto. Assim, pode-se definir a pertinência de um elemento particular x de um conjunto A em um determinado universo U através da função característica:

$$\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\} \quad (1)$$

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

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo U é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$, e representado por um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (2)$$

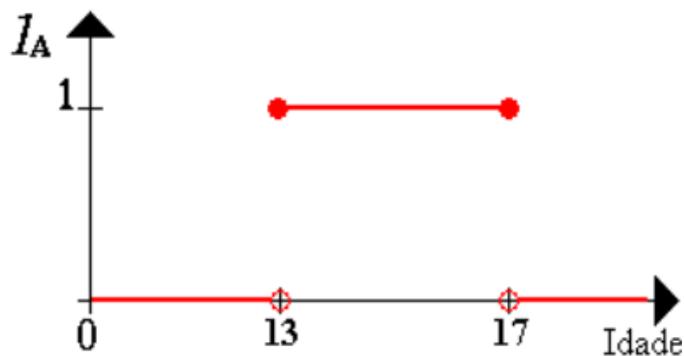
Onde a função de pertinência $\mu_A(x)$ indica o grau de compatibilidade entre x e o conceito expresso por A :

- $\mu_A(x) = 1$ indica que x é completamente compatível com A ;
- $\mu_A(x) = 0$ indica que x é completamente incompatível com A ;
- $0 < \mu_A(x) < 1$ indica que x é parcialmente compatível com A , com grau $\mu_A(x)$.

A diferença entre estes conceitos em relação à variável idade é ilustrada na Figura 2 e na Figura 3, que descrevem respectivamente a representação do conceito “adolescente” através de um conjunto “crisp” (conjunto da teoria clássica visto como um conjunto *fuzzy* específico) e de um conjunto *fuzzy*.

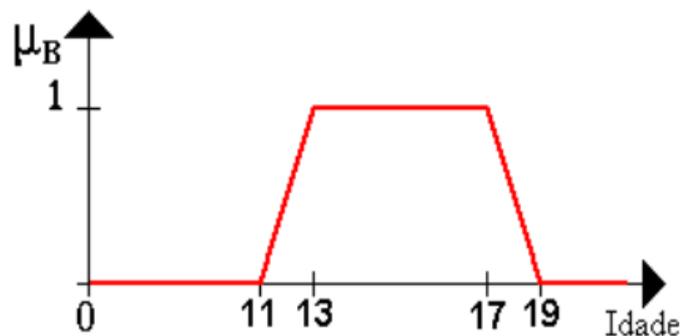
O conjunto “crisp” A (Figura 2) não exprime completamente o conceito de “adolescente”, pois uma pessoa com 12 anos e 11 meses seria considerada completamente incompatível com este conceito. Na verdade, qualquer intervalo “crisp” que se tome para representar este conceito é arbitrário. Já o conjunto *fuzzy* B (Figura 3) permite exprimir que qualquer pessoa com idade entre 13 e 17 anos é um adolescente, acima de 19 ou abaixo de 11 não é considerado um adolescente, e nos intervalos $[11; 13]$ e $[17; 19]$ é considerado tanto mais adolescente quanto mais próxima de 13 e 17, respectivamente, é sua idade.

Figura 2 Função característica do conjunto “crisp” adolescente.



Fonte: (SANDRI; CORREA, 1999).

Figura 3 Função trapezoidal característica do conjunto *fuzzy* adolescente.



Fonte: (SANDRI; CORREA, 1999).

2.2.2 Operações em conjuntos *fuzzy*

A exemplo do que ocorre com conjuntos ordinários, há uma série de definições e operações envolvendo conjuntos *fuzzy*. Apresentam-se aqui as mais relevantes para uma abordagem inicial do assunto.

- Um conjunto *fuzzy* A em U é vazio se e somente se sua função de pertinência é igual a zero sobre todo U :

$$A = \emptyset \text{ se e somente se } \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in U \quad (3)$$

- O complemento A' de um conjunto *fuzzy* A é normalmente dado por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \quad (4)$$

- Dois conjuntos *fuzzy* A e B em U são iguais se suas funções de pertinência forem iguais sobre todo U :

$$A = B \quad \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (5)$$

- Um conjunto *fuzzy* A é um subconjunto de B se sua função de pertinência for menor ou igual à de B sobre todo U :

$$A \subset B \text{ se } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (6)$$

- Sejam A e B conjuntos nebulosos definidos em U . Pode-se expressar a interseção destes conjuntos, como um outro conjunto $C = A \cap B$. Da mesma forma, pode-se expressar a união como um conjunto $D = A \cup B$. Embora a união e a interseção possam ser descritas também por meio de outros operadores, Zadeh (1965) estendeu a descrição anterior com os operadores minimum (*min*) e maximum (*max*), representados por (\wedge) e (\vee) , respectivamente, para a representação de interseção e união *fuzzy*, de modo que:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (7)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (8)$$

2.2.3 Propriedades dos conjuntos *fuzzy*

Utilizando-se os operadores *max* e *min* para a descrição da união e interseção *fuzzy*, respectivamente, é fácil verificar que as seguintes propriedades algébricas de conjuntos ordinários também valem para conjuntos *fuzzy*:

- Involução: $(A')' = A$
- Idempotência: $\begin{cases} A \cap A = A \\ A \cup A = A \end{cases}$
- Comutatividade: $\begin{cases} A \cap B = B \cap A \\ A \cup B = B \cup A \end{cases}$
- Associatividade: $\begin{cases} (A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \\ (A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C) \end{cases}$
- Distributividade: $\begin{cases} A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C) \\ A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C) \end{cases}$
- Absorção: $\begin{cases} A \cap (A \cup B) = A \\ A \cup (A \cap B) = A \end{cases}$
- Lei transitiva: se $A \subset B$ e $B \subset C \Rightarrow A \subset C$
- Leis de De Morgan: $\begin{cases} (A \cap B)' = A' \cup B' \\ (A \cup B)' = A' \cap B' \end{cases}$

Observando que as funções de pertinência dos conjuntos vazio (\emptyset) e universo (U) são definidas como sendo 0 e 1, respectivamente, verificam-se também as seguintes propriedades:

$$\begin{cases} A \cap \emptyset = \emptyset \\ A \cup \emptyset = A \end{cases} \quad \begin{cases} A \cap U = A \\ A \cup U = U \end{cases}$$

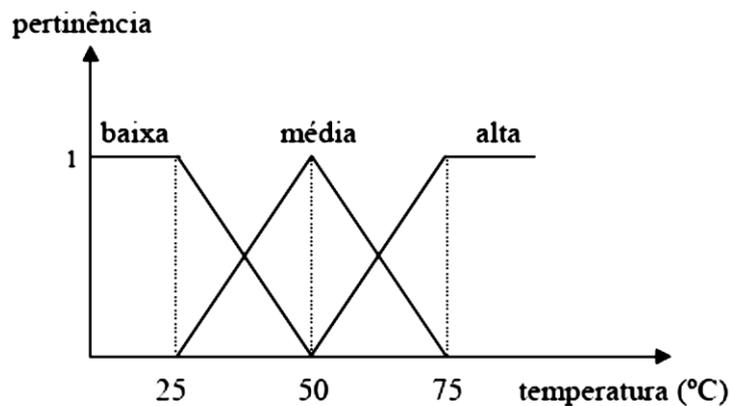
As propriedades de conjuntos clássicos $A \cap A' = \emptyset$ e $A \cup A' = U$ não se verificam para conjuntos *fuzzy* quando os operadores *max* e *min* são utilizados:

$$\begin{aligned}\mu_{A \cap A'}(x) &= \mu_A(x) \wedge (1 - \mu_A(x)) \neq 0 \Rightarrow A \cap A' \neq \emptyset \\ \mu_{A \cup A'}(x) &= \mu_A(x) \vee (1 - \mu_A(x)) \neq 1 \Rightarrow A \cup A' \neq U\end{aligned}\tag{9) e (10)}$$

2.2.4 Variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a *temperatura* de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores *baixa*, *média* e *alta*. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 Funções de pertinência para a variável temperatura.



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais (TANSCHKEIT, 2003).

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

Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(N, T(N), U, G, M)$, onde:

- N : nome da variável
- $T(N)$: conjunto de termos de N , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de N
- U : universo de discurso
- G : regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de $T(N)$, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores
- M : regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto *fuzzy* em U .

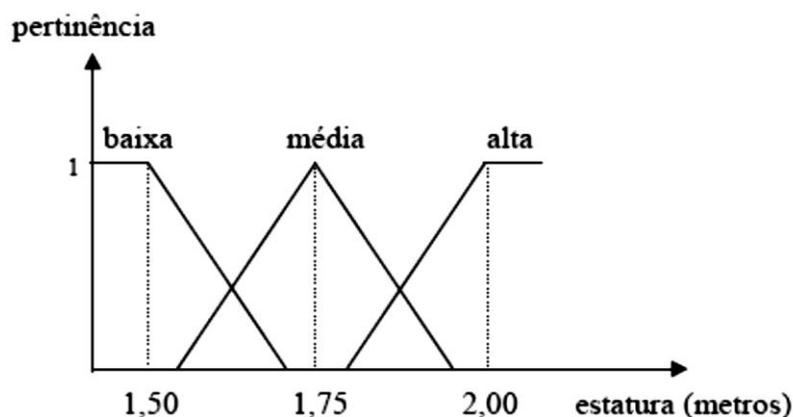
No caso da variável temperatura da Figura 4, fica assim:

- N : *temperatura*
- $T(N)$: $\{baixa, média, alta\}$
- U : 0 a 100 °C (por exemplo)
- G : *temperatura não baixa e não muito alta*, por exemplo
- M : associa o valor acima a um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência exprime o seu significado

2.2.5 Funções de pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. Para exemplificar o quanto o contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo, considere-se a variável linguística *estatura* (de pessoas) constituída dos seguintes termos: $T(estatura) = \{baixa, média, alta\}$. A esses se faz corresponder conjuntos *fuzzy* A , B e C , respectivamente, definidos por suas funções de pertinência. Uma escolha possível de funções de pertinência seria:

Figura 5 Funções de pertinência para a variável estatura.



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003).

Na definição anterior, estaturas de até 1,5 metros apresentam grau de pertinência igual a 1 no conjunto A ; o grau de pertinência neste conjunto decresce à medida que a estatura aumenta. Considera-se que uma estatura de 1,75 metros é "totalmente compatível" com o conjunto B , ao passo que estaturas acima de 1,8 metros (aproximadamente) apresentam grau de pertinência diferente de zero em C . Pessoas com estatura acima de 2 metros são "definitivamente" altas. Observe-se que, nesta definição das funções de pertinência, estaturas em torno de 1,75 metros têm grau de pertinência diferente de zero somente no conjunto B , o que poderia parecer inadequado para alguns observadores. Estes prefeririam que as funções de pertinência de A e B se interceptassem em 1,75 metros (com graus de pertinência nulos, a exemplo daquela da Figura 4), por exemplo, onde, de acordo com esta Figura, quanto mais próximo dos 50 °C, menor o valor do grau de pertinência associado.

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e gaussiana. Em aplicações práticas, as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados (TANSCHKEIT, 2003).

2.2.6 Controladores *fuzzy*

As técnicas de controle *fuzzy* originaram-se com as pesquisas e projetos de Mamdani e Assilian (1975) e ganharam espaço como área de estudo em diversas instituições

de ensino, pesquisa e desenvolvimento do mundo, sendo até hoje uma importante aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy*.

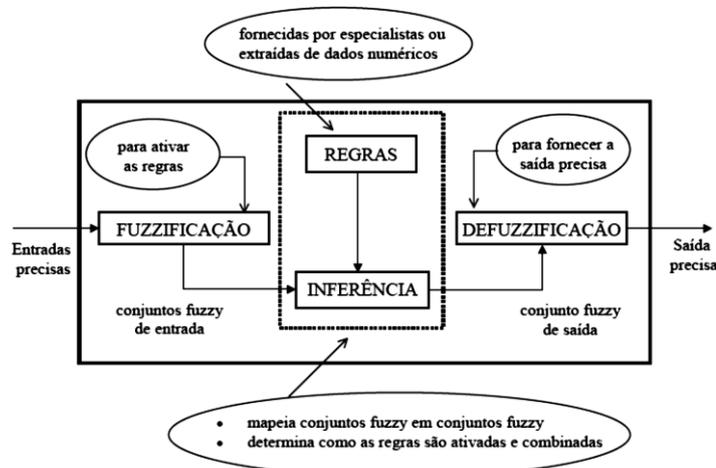
Ao contrário dos controladores convencionais em que o algoritmo de controle é descrito analiticamente por equações algébricas ou diferenciais, através de um modelo matemático, no controle *fuzzy* utilizam-se regras lógicas no algoritmo de controle, com a intenção de descrever numa rotina a experiência humana, intuição e heurística para controlar um processo (ZADEH, 1965).

O processo em geral segue os seguintes passos: Especificam-se as variáveis de entrada e saída utilizadas; define-se o conjunto de regras; determina-se o método de defuzzificação e são realizados testes para a verificação do sistema, ajustando os detalhes conforme o propósito inicial.

Os controladores *fuzzy* são robustos e de grande adaptabilidade, incorporando conhecimento que outros sistemas nem sempre conseguem acomodar (GUERRA, 1998). Também são versáteis, principalmente quando o modelo físico é complexo e de difícil representação matemática. Além disso, mesmo em sistemas onde a incerteza se faz presente de maneira intrínseca, agregam uma robustez característica.

Um controlador *fuzzy* é mostrado na Figura 6, onde estão identificadas as funções de cada bloco.

Figura 6 Estrutura de um Controlador *Fuzzy*.



Fonte: (TANSCHKEIT, 2003).

Neste sistema de inferência *fuzzy*, consideram-se entradas não-*fuzzy*, ou precisas – resultantes de medições ou observações (conjuntos de dados, por exemplo), – que é o caso da grande maioria das aplicações práticas. Em virtude disto, é necessário efetuar um mapeamento destes dados precisos para os conjuntos *fuzzy* (de entrada) relevantes, o que é realizado no estágio de fuzzificação. Neste estágio ocorre também a ativação das regras relevantes para uma dada situação (TANSCHKEIT, 2003).

A interface de fuzzificação faz a identificação dos valores das variáveis de entrada, as quais caracterizam o estado do sistema (variáveis de estado), e as normaliza em um universo de discurso padronizado. Estes valores são então fuzzificados, com a transformação da entrada “crisp” em conjuntos *fuzzy* para que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas (SANDRI; CORREA, 1999).

No estágio de inferência ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas. Os conjuntos *fuzzy* de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou, alternativamente, gerados automaticamente a partir dos dados. Um aspecto importante é a definição dos conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada (antecedentes) e à(s) de saída (consequente(s)), pois o desempenho do controlador *fuzzy* dependerá do número de conjuntos e de sua forma (TANSCHKEIT, 2003).

A base de conhecimento consiste de uma base de dados e uma base de regras, de maneira a caracterizar a estratégia de controle e as suas metas. As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*. A base de regras é formada por estruturas do tipo:

Se <premissa> **Então** <conclusão>.

Como por exemplo:

Se Erro é Negativo Grande e Δ Erro é Positivo Pequeno

Então Velocidade é Positiva Pequena.

Em um dado controlador *fuzzy*, é importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, isto é, que a base seja completa, garantindo que exista sempre ao menos uma regra a ser disparada para qualquer entrada. As premissas são relacionadas pelos conectivos lógicos, dados pelo operador de conjunção (**e**) e o operador de disjunção (**ou**). Em geral, as regras têm a forma de um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), mas que podem ser transformadas em vários sistemas com múltiplas entradas e uma saída (MISO). Por exemplo, a regra MIMO:

Se x_1 *é* A_1 **e** . . . **e** x_n *é* A_n **Então** y_1 *é* C_1 **e** . . . **e** y_m *é* C_m

é equivalente a m regras MISO:

Se x_1 *é* A_1 **e** . . . **e** x_n *é* A_n **Então** y_j *é* C_j .

Em geral não se aceitam conectivos “**ou**” na conclusão (SANDRI; CORREA, 1999).

Um controlador *fuzzy* só terá um bom desempenho se as regras que definem a estratégia de controle forem consistentes. Extrair regras de especialistas na forma de sentenças do tipo “SE ... ENTÃO” pode não ser uma tarefa fácil, por mais conhecedores que eles sejam do problema em questão. Alternativamente ao uso de especialistas para a definição da base de regras, existem métodos de extração de regras de dados numéricos. Estes métodos são particularmente úteis em problemas de classificação e previsão de séries temporais.

Os tipos de controladores *fuzzy* encontrados na literatura são os modelos clássicos, compreendendo o modelo de Mamdani e o de Larsen, e os modelos de interpolação, compreendendo o modelo de Takagi-Sugeno e o de Tsukamoto (LEE, 1990; DRIANKOV et al., 1993). Os modelos diferem quanto à forma de representação dos termos na premissa, quanto à representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados para implementação do sistema.

Mamdani propôs, na década de 1970, um método de inferência *fuzzy* que foi por muitos anos um padrão para a utilização dos conceitos da lógica *fuzzy* em processamento de

conhecimento. As regras de produção em modelo de Mamdani possuem relações *fuzzy* tanto em seus antecedentes como em seus consequentes. A regra semântica tradicionalmente utilizada para o processamento de inferências com o modelo de Mamdani é chamada de inferência máximo-mínimo.

Para modelar matematicamente a base de regras, Mamdani e Assilian (1975) propuseram uma relação *fuzzy* binária M entre as entradas x e as saídas u , cuja função de pertinência está descrita como segue: em cada uma das regras da base de regras *fuzzy*, adota-se o operador matemático mínimo para o conectivo lógico “e” e o operador máximo para o conectivo lógico “ou”. Sendo que as sentenças “SE ... ENTÃO ...” são modeladas pela aplicação do operador mínimo.

Formalmente, a relação *fuzzy* M é o subconjunto *fuzzy* $x \in U$ cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi_M(x, u) = \text{máximo}_{1 \leq j \leq n} \{ \text{mínimo}[\varphi_{A_j}(x), \varphi_{B_j}(u)] \} \quad (11)$$

Na qual n é o número de regras que compõem a base de regras, e $\varphi_{A_j}(x)$ e $\varphi_{B_j}(u)$ são os graus com que x e u pertencem aos conjuntos *fuzzy* A_j e B_j , respectivamente.

Desta forma, de maneira genérica, para um conjunto de n regras, o modelo de Mamdani é representado assim:

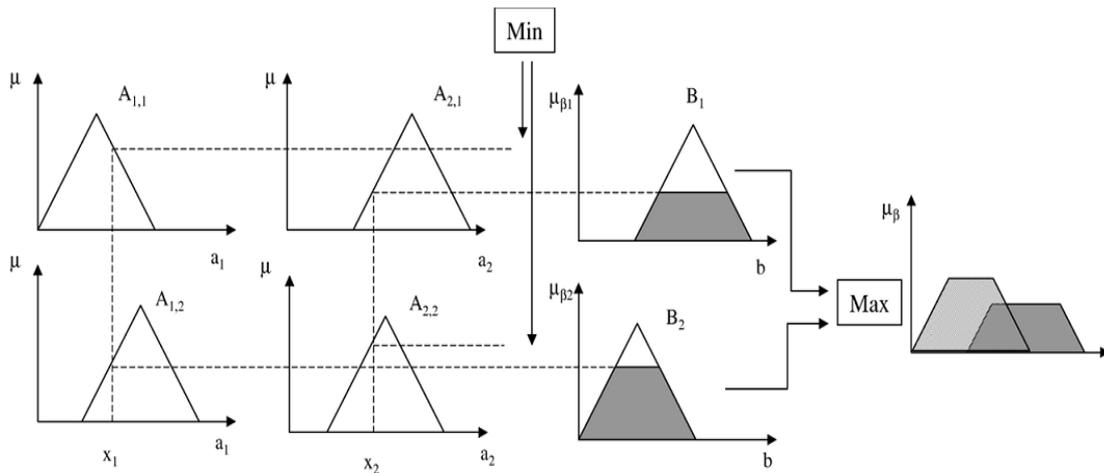
$$R_j: \text{SE } x_1 \text{ é } A_{1j} \text{ e } x_2 \text{ é } A_{2j} \text{ e } \dots \text{ e } x_k \text{ é } A_{kj} \text{ ENTÃO } u \text{ é } B_j \quad (12)$$

$j = 1, 2, \dots, n$

Onde R_j é a j -ésima regra, x_1, x_2, \dots, x_k são as variáveis de entrada, $A_{1j}, A_{2j}, \dots, A_{kj}$ são os conjuntos *fuzzy* correspondentes às variáveis de entrada, u é a variável de saída e B_j é o conjunto *fuzzy* correspondente à variável de saída.

Para uma visualização da metodologia, o leitor pode acompanhar graficamente o método de Mamdani segundo o esquema da Figura 7 que ilustra a inferência *máximo-mínimo* com apenas duas regras genéricas.

Figura 7 Inferência *máximo-mínimo* para o modelo de Mamdani.



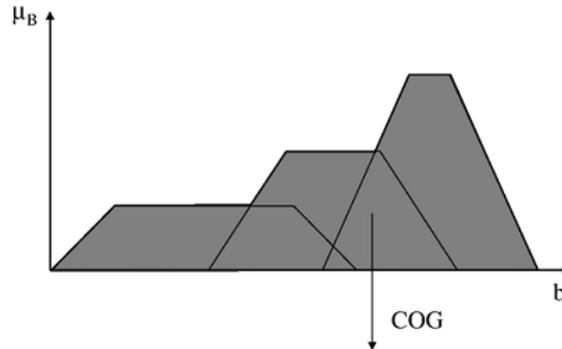
Fonte: (SABOYA Jr. et al., 2006).

Pode ser visto através do exemplo anterior que a saída do controlador *fuzzy*, dada pelo método de inferência de Mamdani, é um conjunto *fuzzy* mesmo para o caso de uma entrada crisp. Este fato é que sugere a defuzzificação do conjunto *fuzzy* de saída para se obter um valor crisp que o represente (AMENDOLA et al., 2005). As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*.

Uma vez obtido o conjunto *fuzzy* de saída através do processo de inferência, no estágio de defuzzificação é efetuada uma interpretação dessa informação. Isto se faz necessário, pois, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. No caso de um sistema de controle, por exemplo, em que o controle é efetuado por um sistema de inferência *fuzzy* (ou controlador *fuzzy*), este deve fornecer à planta dados ou sinais precisos, já que a "apresentação" de um conjunto *fuzzy* à entrada da planta não teria significado algum. Existem vários métodos de defuzzificação na literatura, onde dois dos mais empregados são o centro de gravidade e a média dos máximos. Neste, a saída precisa é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do consequente.

Com o centro de gravidade, a saída é o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais (TANSCHKEIT, 2003). Um exemplo de defuzzificação adotando o Centro de Gravidade pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 Defuzzificação utilizando o método do Centro de Gravidade (COG).



Fonte: (SABOYA Jr. et al., 2006).

O método do centro de gravidade é semelhante à média aritmética para uma distribuição de dados, com a diferença que os pesos são valores $\varphi_B(u_i)$ que indicam o grau de compatibilidade do valor u_i com o conceito modelado pelo conjunto *fuzzy* de saída B . A defuzzificação de B para um domínio discreto é dada por:

$$D(B) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \varphi_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n \varphi_B(u_i)} \quad (13)$$

E para um domínio contínuo:

$$D(B) = \frac{\int_R u_i \varphi_B(u_i) du}{\int_R \varphi_B(u_i) du} \quad (14)$$

Segundo SANDRI; CORREA (1999), a seleção do método de defuzzificação está relacionada diretamente com as características do processo controlado e o comportamento de controle necessário.

2.3 Controladores PID

A maior parte dos controladores industriais são do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID), implementado basicamente pela programação de um Controlador Lógico Programável (CLP), às vezes também chamado por PLC. A flexibilidade, o baixo custo e a robustez dos CLPs e a disponibilidade de blocos funcionais de hardware, tais como, por exemplo, unidades centrais de processamento (CPU), contadores, temporizadores, unidades aritméticas, escalonadores, comparadores, entrada digitais e analógicas, “drivers” de relés e motores de passo, módulo de comunicação, módulos de interfaceamento paralelo e serial, integradores e diferenciadores tornam possível programar um CLP de várias maneiras diferentes. O programa é armazenado na memória na forma de uma lista de expressões individuais, um fluxograma do sistema de controle que lembra um diagrama de blocos lógicos, ou um “ladder diagram” que se assemelha a uma rede de contatos de relés. Os padrões ISO 9000 possibilitam a programação de CLP’s em linguagem comuns de computação, tais como C/C++, Pascal, etc...desenvolvidas em PCs trabalhando “off-line”. A presença massiva de tecnologia computacionais sugere o uso de controladores PID digitais discretos, e com isso um controlador PID se transforma em apenas mais um programa na memória de um computador. O sinal contínuo de erro na entrada do controlador é amostrado e convertido em sinais digitais, enquanto a saída digital do controlador é reconvertida num sinal analógico contínuo alimentado ao processo controlado.

O controlador PID é um controlador temporal cuja função contínua de entrada e saída para controle de posição é:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

e em sua forma discreta:

$$u(k) = K_p \cdot \left\{ e(k) + \frac{T}{\tau_i} \cdot \sum_{k=0}^n e(k) + \frac{\tau_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (16)$$

Onde

$u(t)$, $u(k)$ = sinal de saída

$e(t)$ = erro

K_p = ganho proporcional

K_i = ganho integral

K_D = ganho derivativo

τ_i = tempo integrativo

τ_d = tempo derivativo

T = constante de tempo

2.3.1 Problemas com controle PID e com modelagem de processos em geral

Controladores PID são controladores automáticos que trabalham bem se o processo é razoavelmente linear, onde uma mudança na entrada do processo gera uma mudança proporcional na saída do processo. Se a relação de entrada e saída do processo for levemente não-linear, ajustes periódicos dos parâmetros do controlador são necessários. Há diversos métodos de ajuste PID como Ziegler-Nichols e Cohen-Coon, dentre outros. Entretanto, no caso de processos altamente não-lineares, ou quando são usados na malha de realimentação elementos de controle ou atuadores substancialmente não-lineares (como por exemplo, válvula de controle), ou quando a modelagem matemática do processo encontra dificuldade devido ao conhecimento insuficiente ou complexidade da planta em geral, controladores PID têm um desempenho pobre. Nesses casos, o único recurso é continuar utilizando operadores humanos especializados.

As dificuldades encontradas na modelagem matemática de um processo podem ser classificadas como a seguir:

- Processos químicos ou físicos pouco conhecidos
- Para uma modelagem precisa, certas informações sobre o processo são necessárias, o que não apenas gera dificuldades, mas também pode criar requisitos contraditórios.
- Parâmetros desconhecidos
- Os parâmetros, assim como sua evolução no tempo, são necessários.
- Tempo morto
- Um parâmetro crítico, que é em geral pouco conhecido ou muda com o tempo. Conhecimento insuficiente do tempo morto pode levar a sérios problemas de estabilidade em malha fechada

- Tamanho e complexidade do modelo
- Modelos matemáticos de sistemas complexos são difíceis de lidar. Além de um certo grau de dificuldade, os modelos perdem seu valor e se tornam pouco atraente para um certo grau médio de conhecimento matemático.
- Não-linearidades

Um sistema linear obedece o princípio da superposição, pelo qual se $C_1(t)$ é a resposta do sistema a $r_1(t)$, e $C_2(t)$ é a resposta a $r_2(t)$, então a resposta do sistema a $a_1 r_1(t) + a_2 r_2(t)$ é $a_1 C_1(t) + a_2 C_2(t)$. Contudo, o princípio da superposição não se aplica a sistemas não-lineares e as operações matemáticas usadas na análise de sistemas lineares não são aplicáveis a sistemas não-lineares. Sistemas quase-lineares onde o desvio da linearidade não é tão grande, ou onde a função não-linear de entrada e saída é suave e livre de saltos súbitos, dentro de uma pequena região na vizinhança do ponto de operação, podem ser considerados lineares. Processos não-lineares, por definição, têm um ganho de entrada dependente da amplitude. Em malha fechada, se o ganho aumenta com a amplitude de entrada, perturbações podem induzir instabilidade. Não-linearidades que aumentam o ganho da malha em baixas amplitudes tendem a causar oscilações senoidais contínuas (ciclos-limite) de amplitude e período fixos. Ciclos-limites podem ser estáveis ou instáveis, e podem ser levados a oscilar apenas com sinais muito baixos ou muito altos.

Em controle industrial, o controlador aciona um elemento final de controle, como por exemplo, uma válvula de atuação cuja função de entrada e saída (o sinal do controlador versus a vazão de saída) pode ser não-linear. De fato, válvulas de controle são disponíveis com uma série de características opcionais de entrada e saída não-lineares.

2.3.2 Vantagens de controladores industriais *fuzzy* baseados em regras

- Regras de controle *fuzzy* são de fácil compreensão pelo pessoal de manutenção, na medida em que são baseadas no senso comum, e o efeito ou resultado de cada regra pode ser facilmente interpretado.
- Todas as funções de controle associadas com uma regra podem ser testadas individualmente. Isso aumenta a facilidade de manutenção, porque a simplicidade das regras permite o uso de pessoal menos treinado.

- Regras individuais combinam-se para formar uma estrutura de onde se executa um controle complexo. Essa cooperação de regras, oriunda do processamento paralelo, permite à lógica *fuzzy* controlar sistemas complexos usando expressões simples. Adicionalmente, podem-se acrescentar regras para condições de alarme que disparam raramente e aumentam muito pouco o tempo de processamento do ciclo de controle, mesmo tendo um papel importantíssimo na ocasião adequada. Tanto funções de controle lineares quanto não-lineares podem ser implementadas por um sistema baseado em regras, usando o conhecimento de um especialista formulado em termos linguísticos.
- Processamento paralelo é veloz. O controlador *fuzzy* completa a tarefa de processamento sem envolver muitos cálculos, e com isso a velocidade de processamento é aumentada. Pode-se conseguir processamento ultra-rápido, se necessário (embora raramente precise-se disto em aplicações industriais) usando controladores baseados em hardware, tais como “transputers”, que levam o potencial do processamento paralelo ao máximo. Contudo, na maioria das aplicações industriais, controladores *fuzzy* baseados em software são decididamente rápidos o bastante para gerenciar as tarefas, e ainda permanecer flexível e transparente ao projetista. Transparência refere-se a um atributo importante dos sistemas modernos de desenvolvimento de lógica *fuzzy*, pelo qual o projetista não faz nenhuma atividade de programação propriamente dita; ele(a) apenas manipula objetos gráficos na tela do computador e, ao terminar, o programa de controle é escrito automaticamente na linguagem requerida pela plataforma usada.
- Controladores *fuzzy* são inerentemente confiáveis e robustos, resistentes a perturbações externas e desgastes ao envelhecimento de componentes internos. Sistemas convencionais processam equações complexas em sequência, e se houver um erro em uma delas sequer, o resultado final é totalmente questionável. Num controlador *fuzzy* cada regra é processada independentemente, e com isso seu efeito no resultado final é mínimo. Isso significa que uma falha parcial do sistema pode não deteriorar significativamente a *performance* do controlador.

3 PLANTA DE SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

Nesta seção será apresentado o Sistema Planta 1, onde toda parte experimental de simulação e controle de nível do pressurizador de um reator será feito. O Sistema Planta 1 é operado por um software de propriedade particular, isto é, um programa desenvolvido exclusivamente para sua operação. Este que controla os processos desta planta, no qual pode-se simular situações em um sistema fechado, ou seja, variar as grandezas internas no sistema, como: vazão, pressão, nível e temperatura.

3.1 Sistema Planta 1

Primeiramente uma abordagem e descrição do sistema eletromecânico e sensores da Planta 1 será feito, e, em seguida, noções básicas da parte lógica, ou seja, noções básicas do software que opera e manipula as variáveis do Sistema Planta 1; que doravante passará a ser denominado SP1.

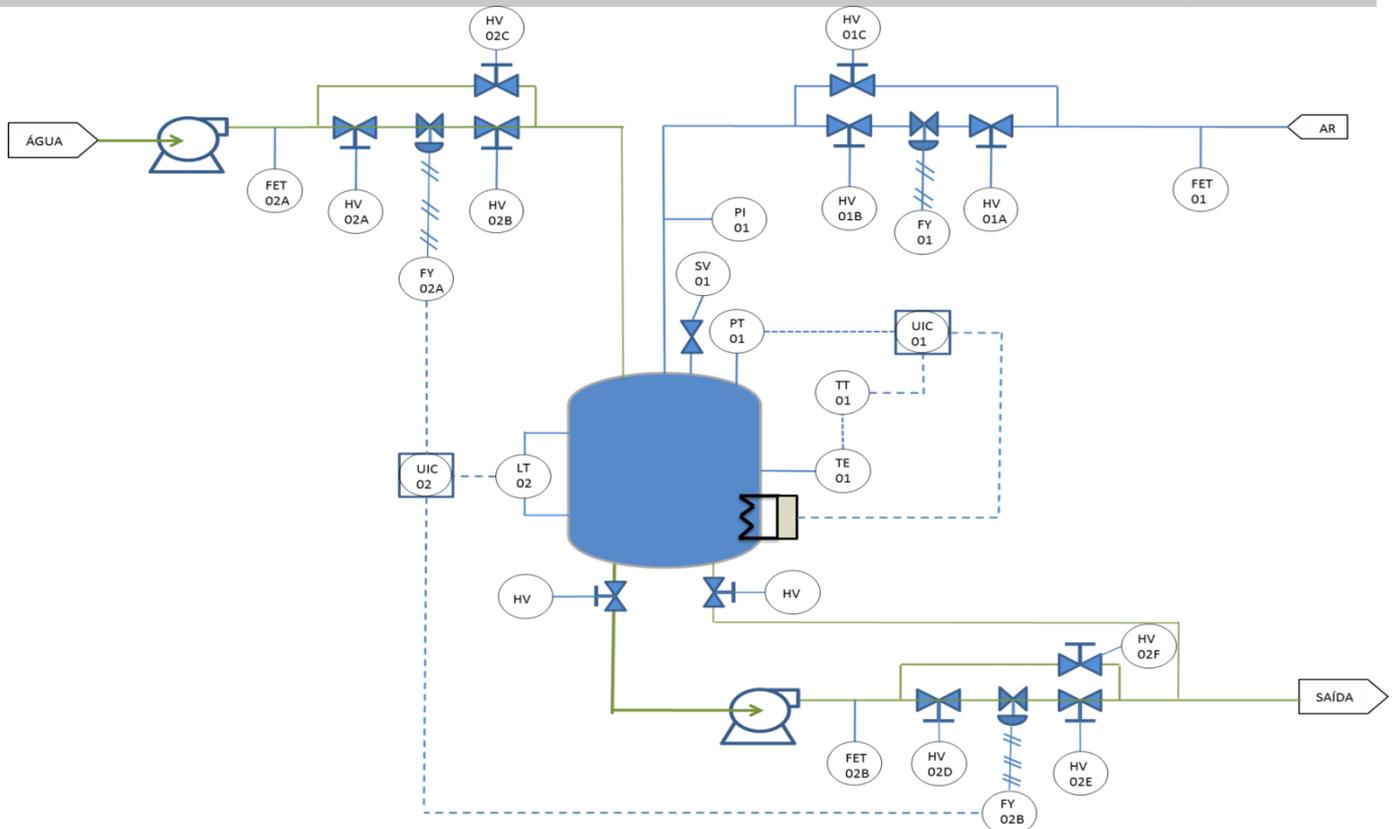
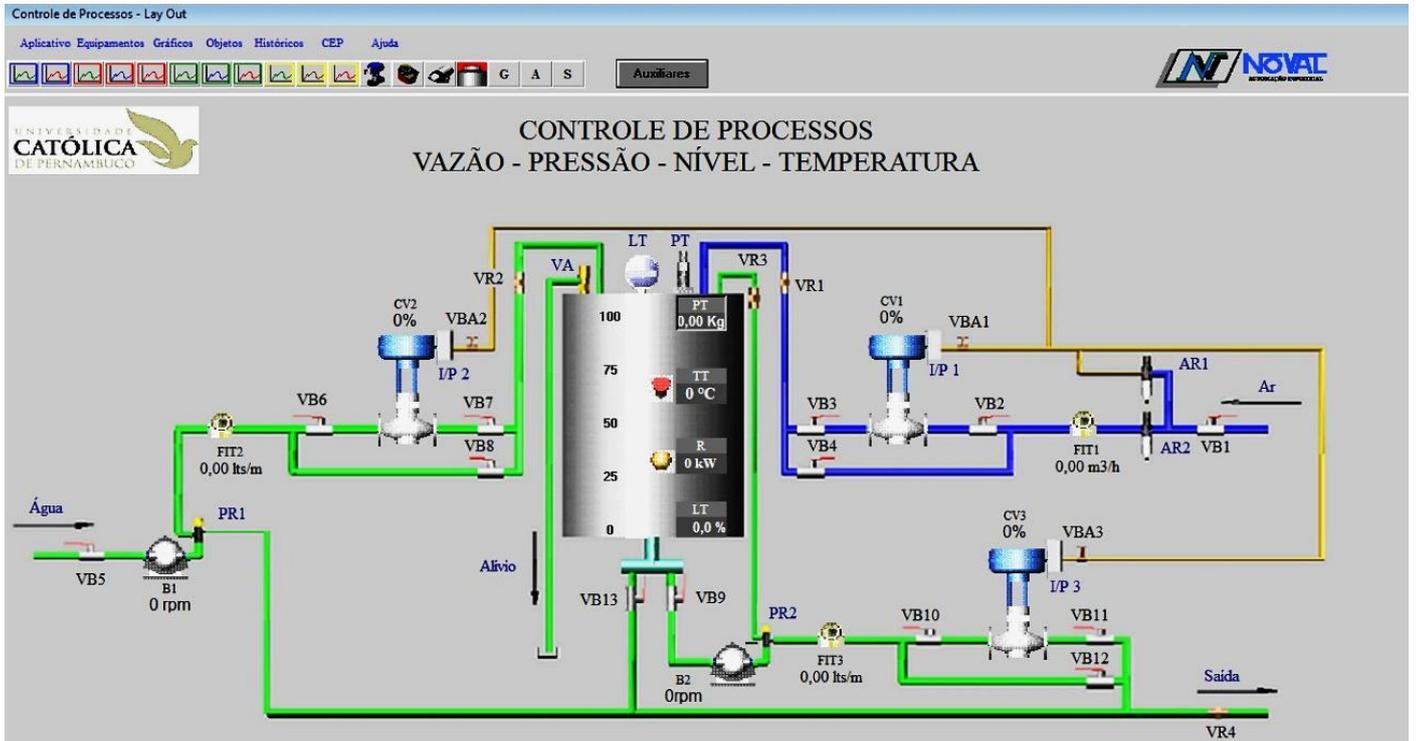
Basicamente o SP1 consiste de um vaso cilíndrico hermeticamente fechado onde o controle da entrada e saída de fluídos são automatizados, com exceção da saída de ar comprimido. Particularmente neste Sistema, SP1, o controle de entrada de ar comprimido é automatizado, porém sua saída é feita de forma manual. Internamente possui um resistor elétrico e sensores de temperatura, o qual é monitorado de forma a controlar a temperatura do sistema, também sensor de nível para aferição da quantidade de fluído na forma líquida dentro do cilindro, sensor de pressão e outros; os quais serão descritos posteriormente.

No SP1 é onde os processos do pressurizador de um Reator PWR são simulados com o objetivo de aplicar um controle PID e depois acoplar um controle PID-Fuzzy para testá-lo e validá-lo.

Passaremos agora por um breve detalhamento dos componentes eletromecânicos e sensores do SP1, onde será descrito a função de cada um no sistema, suas características inerentes e faixas de operação.

Abaixo na Figura 9 está a imagem do software que controla o SP1 e onde estão representados vários elementos manuais e automatizados constituintes do circuito. Também,

Figura 9 Representação no Software e Fluxograma da Planta 1



Fonte: print screen do software e autor.

pode-se observar o fluxograma do Sistema e onde se encontra cada componente.

Na Figura 10 encontram-se as legendas do SP1:

Figura 10 Legenda do Sistema Planta 1.

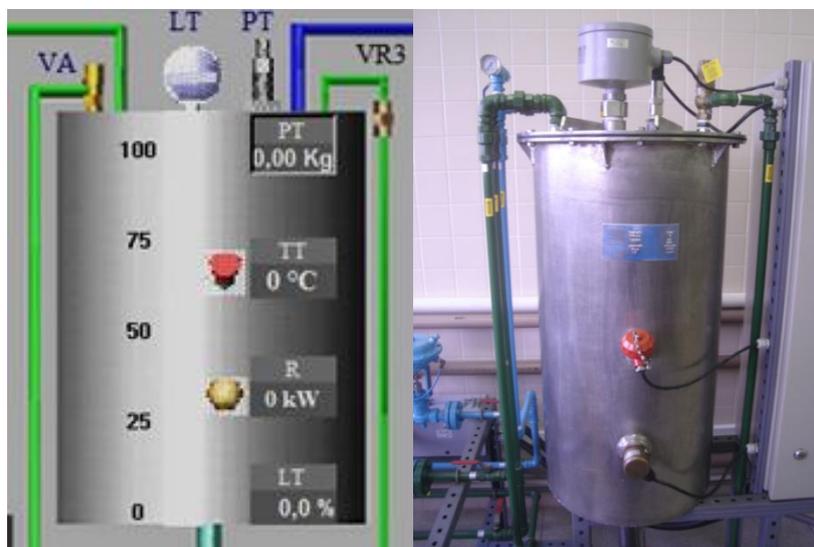
Nome	Função
FIT1	Medidor de vazão - entrada de ar
FIT2	Medidor de vazão - entrada de água - 0 a 14 lts/m
FIT3	Medidor de vazão - esvaziamento do tanque - 0 a 14 lts/m
CV1	Válvula de controle - entrada de ar - obturador proporcional - sinal 3 a 15 psi
CV2	Válvula de controle - entrada de água - obturador proporcional - sinal 3 a 15 psi
CV3	Válvula de controle - esvaziamento do tanque - obturador proporcional - sinal 3 a 15 psi
B1 M1	Motobomba 1/8 cv - 220vac - 1710rpm - accionada por inversor de frequência
B2 M2	Motobomba 1/8 cv - 220vac - 1710rpm - accionada por inversor de frequência
LP	1,2e3 Conversor - entrada: 4 a 20ma, saída 3 a 15psi
PR	1e2 Regulador de pressão ajustado para 2 kg/cm2
VA	Válvula de alívio da pressão do tanque - ajuste 2 kg/cm2
LT	Transmissor de nível - faixa de 0 a 100% - saída 4 a 20ma
PT	Transmissor de pressão - faixa de 0 a 2kg/cm2 - saída 4 a 20ma
TT	Transmissor de temperatura PT100 - faixa 0 a 80 oC - saída 100 a 130,89 ohms
R	Resistência para aquecimento - entrada 4 a 20ma - saída 0 a 1500W
AR1	Regulador de ar para instrumentos - ajuste 30psi
AR2	Regulador de ar para processo - ajuste 2kg/cm2
VR	1 a 4 Válvula de retenção
VBA	1 a 3 Válvula de bloqueio para ar comprimido
VB	1 a 13 Válvula esfera para bloqueio

Fonte: Print screen do software.

Cada componente terá uma breve descrição sobre suas características básicas de operação:

VASO CILÍNDRICO: Sistema hermeticamente fechado (Figura 11) onde todo processo de simulação ocorre. Tem capacidade aproximadamente de 100 litros, feito de aço carbono de espessura média de 6 milímetros. (Fabricante: CODISTIL; Modelo: TV250)

Figura 11 Representação do Cilindro no Software e Imagem Real.



Fonte: Print screen do software e autor.

No corpo do Cilindro existem outros componentes que abaixo estão descritos.

LT – Transmissor de Nível Capacitivo (Fabricante: NIVETEC; SÉRIE: 800 - V02): Desenvolvido para a medição contínua do nível de líquidos condutivos ou não, bem como de materiais sólidos que se encontram armazenados em tanques, reservatórios ou silos. Afere o nível de fluido líquido interno do Cilindro (Figura 12).

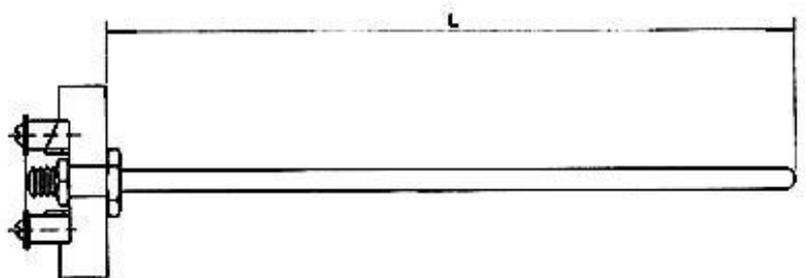
Figura 12 Transmissor de Nível.



Fonte: Autor.

R – Resistência de Aquecimento: Fornece energia térmica para o Sistema, com entrada de 4 a 20 mA, saída de 0 a 1500 W (Figura 13).

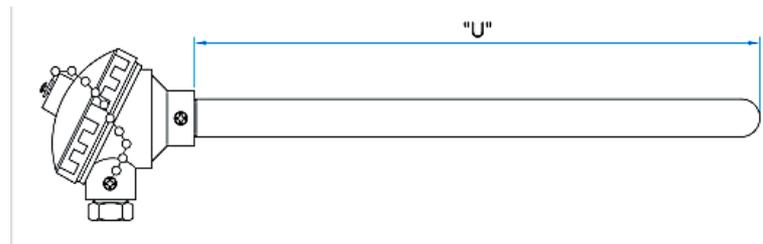
Figura 13 Resistência de Aquecimento



Fonte: Autor.

TT – Transmissor de Temperatura (PT100): Termopar utilizado para fazer a leitura da temperatura interna do Sistema (Figura 14).

Figura 14 Termopar.



Fonte: Autor.

PT – Transmissor de Pressão (Fabricante: ZURICH; Modelo: PSI – 420): Transmissor de pressão relativa ou absoluta interna do Sistema, entrada de 0 a 2 kgf/cm², saída de 4 a 20 mA. Compatível com a grande parte dos fluídos industriais em processos pneumáticos, hidráulicos, gases corrosivos. (Figura 15).

Figura 15 Transmissor de Pressão.



Fonte: Autor

VA – Válvula de Alívio de Pressão: Dispositivo de segurança que é ativado quando o Sistema atinge alta pressão que ultrapassa os limites toleráveis de operação. Calibrada para 1,80 Kgf/cm² (Figura 16).

Figura 16 Válvula de Alívio de Pressão.



Fonte: Autor.

Detalhamento dos componentes que não estão ligados diretamente ao corpo do Cilindro.

B1 M1 e **B2 M2** – Moto-bombas(Fabricante: EBERLE): Bombeiam o fluido líquido para entrada e saída do Sistema, potência de 1/8 de CV, tensão de funcionamento 220 V, 60 Hz, 1710 rpm, acionada por inversor de frequência(Figura 17).

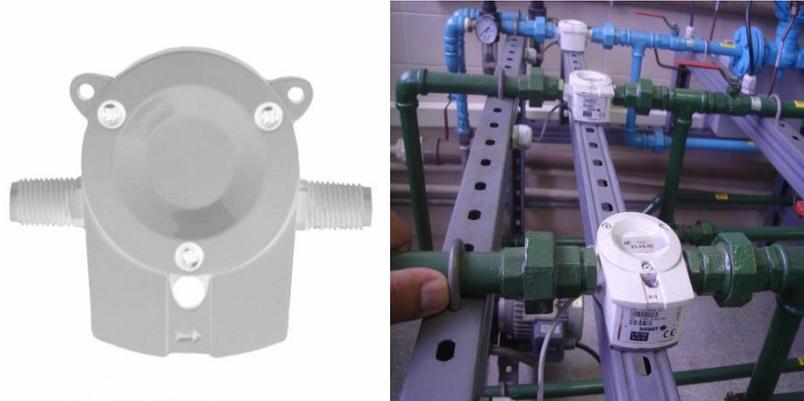
Figura 17 Moto-bomba.



Fonte: Autor.

FIT (1,2 e 3) – Medidores de Vazão (Fabricante: GEORG FISCHER; Modelo: 2000-21): Do tipo rotor para micro vazões, para líquidos limpos, faixa de medição de 0 a 14 litros por minuto (L/min), fonte de alimentação de 5 a 24 VDC (10mA), pressão máxima de funcionamento 5,5 Bar, de 0 a 80 °C (Figura 18).

Figura 18 Medidor de Vazão.



Fonte: Autor.

CV (1,2 e 3) – Válvula de Controle (Fabricante: INAVE; Série: VC10/VC20): Válvula do tipo gaiola, controla o fluxo de fluidos, líquido ou gás, neste Sistema CV1 controla gás, CV2 e CV3 controlam líquido. Seu acionamento é pneumático e controlado pelo software através do transdutor para válvulas (Figura 19).

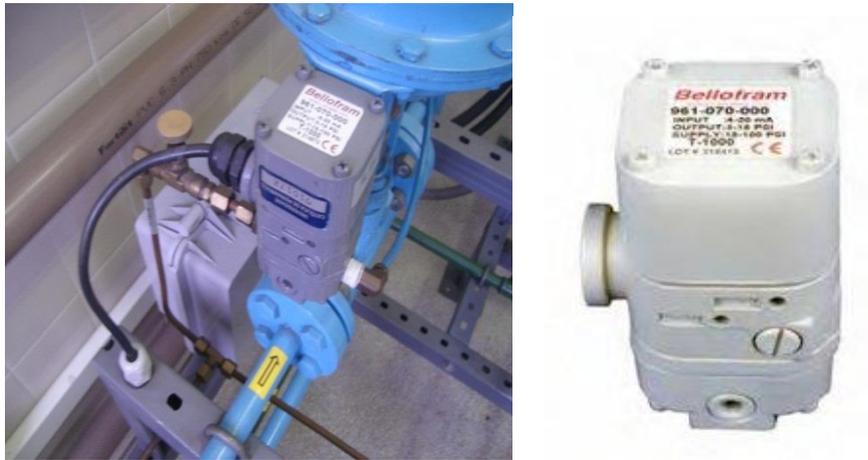
Figura 19 Válvula de Controle.



Fonte: Autor.

I/P(1,2 e 3) – Transdutor para Válvulas (Fabricante: MARSH BELLOFRAM; Modelo: T-1000): é um transdutor eletropneumático, que reduz uma pressão de alimentação a uma pressão de saída regulada diretamente proporcional ao sinal elétrico de entrada. Controla a abertura da válvula de controle; sinal de entrada de 4 a 20 mA e sinal de saída de 3 a 15 psi (Figura 20).

Figura 20 Conversor ou Transdutor para Válvulas.



Fonte: Autor.

AR (1 e 2) – Regulador de Ar (Fabricante: PARKER; Série: P3A): São reguladores da pressão de ar ajustados para faixa de operação dos componentes pneumáticos (Figura 21).

Figura 21 Regulador de Ar.

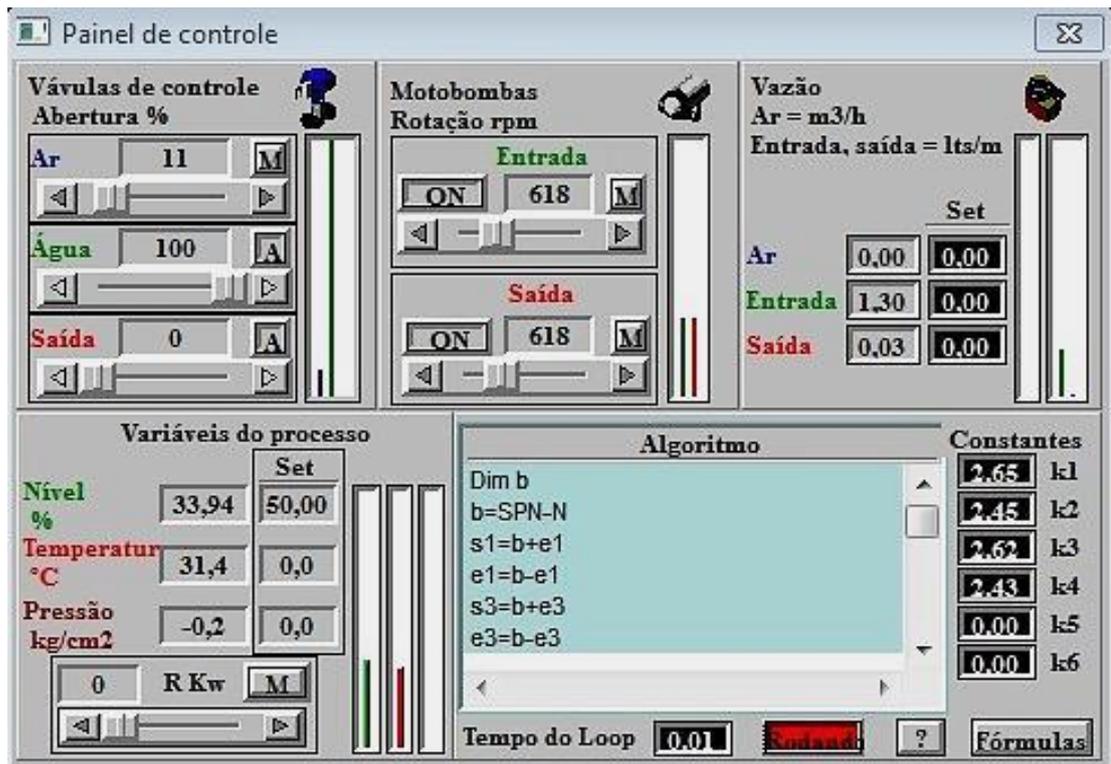


Fonte: Autor.

No software que opera o SP1 existe uma gama de operações e características que podem ser realizadas, ou mesmo personalizadas para manipular um controle ou simulação de processos, mas pela objetividade desta descrição o foco será de forma básica e direta de como este funciona.

Como se pode observar a Figura 9 é a tela de interface do software com o usuário. Nela estão representados os componentes do SP1 além de menus e funções. O Painel de Controle é onde se pode controlar, manipular e monitorar as funções principais do programa. Existem várias maneiras de se chegar ao Painel de Controle, porém a mais simples é clicando em Equipamentos e em seguida em qualquer subitem desta guia. Feito isso a janela da Figura 22 é aberta.

Figura 22 Painel de Controle do Software.

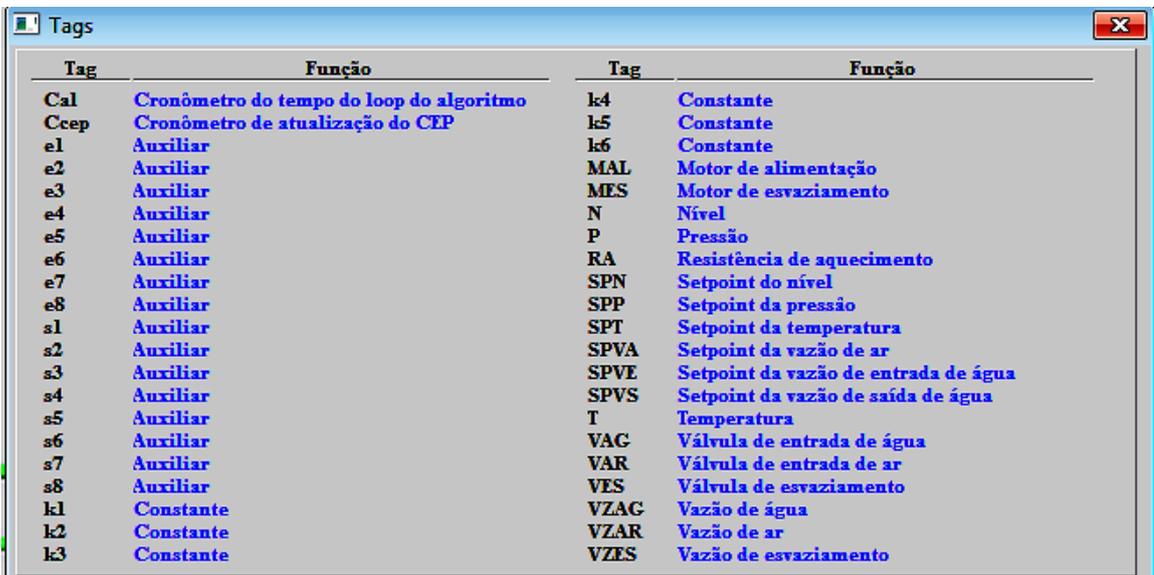


Fonte: Print screen do software.

Como se pode notar é no Painel de Controle onde se controla a abertura de Válvulas, rotação de Moto-bombas, vazão de Ar comprimido e potência do Resistor. É importante frisar que todos estes equipamentos citados podem ser controlados de forma manual ou automática, ou seja, pelo usuário ou pelo algoritmo aplicado na área reservada.

Para que o SP1 opere qualquer dispositivo automaticamente é necessário que o usuário escreva algum algoritmo fazendo menção ao equipamento que deseja controlar de acordo com a própria referência do software, isto é, seus Tags (Figura 23). De forma detalhada, se deseja controlar a abertura de umas das Válvulas, ao se escrever o algoritmo, a nomenclatura deve ser respeitada, ou seja, não é necessário atribuir um nome a esta variável, pois já possui um no software. Também (Figura 22), existem locais onde podem ser inseridos os valores de referência do algoritmo, isto é, seus *setpoints*. Nível, Pressão e Temperatura são as principais grandezas no qual podemos atribuir *setpoints* nos algoritmos.

Figura 23 Tags.



Tag	Função	Tag	Função
Cal	Cronômetro do tempo do loop do algoritmo	k4	Constante
Ccep	Cronômetro de atualização do CEP	k5	Constante
e1	Auxiliar	k6	Constante
e2	Auxiliar	MAL	Motor de alimentação
e3	Auxiliar	MES	Motor de esvaziamento
e4	Auxiliar	N	Nível
e5	Auxiliar	P	Pressão
e6	Auxiliar	RA	Resistência de aquecimento
e7	Auxiliar	SPN	Setpoint do nível
e8	Auxiliar	SPP	Setpoint da pressão
s1	Auxiliar	SPT	Setpoint da temperatura
s2	Auxiliar	SPVA	Setpoint da vazão de ar
s3	Auxiliar	SPVE	Setpoint da vazão de entrada de água
s4	Auxiliar	SPVS	Setpoint da vazão de saída de água
s5	Auxiliar	T	Temperatura
s6	Auxiliar	VAG	Válvula de entrada de água
s7	Auxiliar	VAR	Válvula de entrada de ar
s8	Auxiliar	VES	Válvula de esvaziamento
k1	Constante	VZAG	Vazão de água
k2	Constante	VZAR	Vazão de ar
k3	Constante	VZES	Vazão de esvaziamento

Fonte: Print screen do software.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Modelo Matemático do Pressurizador

O presente trabalho será realizado utilizando a teoria geral de controle baseada em técnicas de inteligência artificial e na descrição do modelo do NEPTUNUS utilizado por Silva (2007).

Este modelo em questão utiliza, para sua formulação, as hipóteses adotadas por Goemans (1987) notadamente nas equações de conservação de massa e de energia para os volumes de controle da água e do vapor, assim como para os modelos de transferência de massa e calor. Este procedimento deve-se aos bons resultados obtidos pelo referido autor no estudo experimental de pressurizador realizado durante o projeto do pressurizador NEPTUNUS. As principais considerações relacionadas à modelagem teórica foram corroboradas através de testes experimentais executados por ele no circuito experimental NEPTUNUS.

4.2 Código MODPRESS

O modelo de pressurizador chamado código MODPRESS foi montado por meio do uso do método numérico de Euler no sistema de equações de diferenças obtido através da discretização do modelo simplificado (SILVA, 2007), e da incorporação da linguagem computacional MATLAB para resolver de forma aproximada às equações do modelo físico (BARROSO, 2004).

Este código tem-se mostrado uma ferramenta poderosa e de excelente aproximação para a instalação experimental NEPTUNUS que representa em escala reduzida um pressurizador de Reatores PWR. Vários outros trabalhos e publicações produzidos através do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares (PROTEN – DEN/UFPE) utilizaram este código e obtiveram ótimos resultados. Dentre estes estão os trabalhos de Silva (2007) e Costa (2010).

4.3 Determinação do estado termodinâmico de um pressurizador

No código MODPRESS, o volume superior, na forma gasosa, pode se encontrar no estado de vapor saturado ou vapor superaquecido, enquanto que o volume inferior, na forma líquida, pode se encontrar no estado saturado ou comprimido. A determinação desses estados é de fundamental importância para que os elementos procurados sejam determinados corretamente. O estado termodinâmico de um sistema pode ser determinado por meio do título termodinâmico de vapor que está definido neste trabalho da seguinte maneira:

A expressão do título termodinâmico é obtida por meio da determinação das frações de vapor e líquido saturado. A fração volumétrica de vapor para um volume de controle específico é dada pela expressão:

$$\alpha_i = \frac{V_g}{V_i} = \frac{m_g}{m_i} \cdot \frac{v_g}{v_i} \quad (17)$$

onde:

V_g : volume de vapor.

V_i : volume de controle i.

m_g : massa de vapor no volume de controle g.

m_f : massa de fluido líquido saturado.

m_i : massa do fluido em um volume de controle i.

v_g : volume específico do vapor no volume de controle g.

v_i : volume específico do fluido no volume de controle i.

A expressão $\frac{m_g}{m_i}$, correspondente ao título termodinâmico de vapor do volume de controle em estudo e será aqui denotado por (x_i) .

$$x_i = \frac{m_g}{m_i} \rightarrow \alpha_i = x_i \frac{v_g}{v_i} \quad (18)$$

$$\text{Como: } \frac{m_f}{m_i} + \frac{m_g}{m_i} = 1$$

Para a fase líquida tem-se:

$$1 - \alpha_1 = \frac{V_f}{V_i} = \frac{m_f}{m_i} \cdot \frac{v_f}{v_i}, \rightarrow 1 - \alpha_i = (1 - x_i) \frac{v_f}{v_i} \rightarrow v_i = \frac{(1-x_i)v_f}{1-\alpha_i} \quad (19)$$

Substituindo-se a equação (18) na equação (19), vem:

$$v_i = (1 - x_i) \frac{v_f}{1-x_i \frac{v_g}{v_i}} \rightarrow v_i \left(1 - x_i \frac{v_g}{v_i}\right) = (1 - x_i)v_f \quad (20)$$

daí tem-se:

$$v_i - x_i v_g = v_f - x_i v_f \rightarrow v_i = x_i v_g + v_f - x_i v_f \rightarrow v_i = v_f + x_i v_{fg} \quad (21)$$

$$x_i = \frac{v_i - v_f}{v_{fg}} \quad (22)$$

Expressando x_i em função de alguma variável do sistema bifásico que seja conhecida, por exemplo, a entalpia h , vem:

$$x_i = \frac{h_i - h_f}{h_{fg}} \quad (23)$$

O conceito de título termodinâmico pode ser generalizado para identificar os demais estados termodinâmicos possíveis dos volumes de controle, como mostrado a seguir:

- Líquido resfriado ou comprimido

$$h_i < h_f \rightarrow x_i < 0 \quad (24)$$

- Líquido saturado

$$h_i = h_f \rightarrow x_i = 0 \quad (25)$$

- Vapor saturado

$$h_i = h_g \rightarrow x_i = 1 \quad (26)$$

- Vapor superaquecido

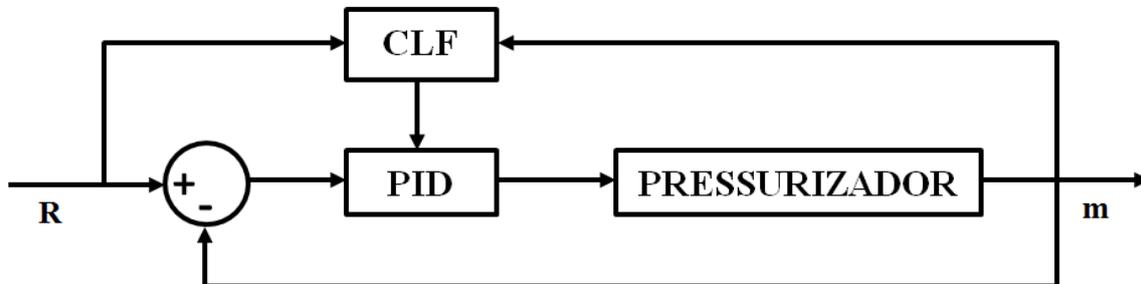
$$h_i > h_g \rightarrow x_i > 1 \quad (27)$$

Caso as fases do volume de controle em estudo estejam em equilíbrio termodinâmico, o título termodinâmico sempre estará contido no intervalo [0,1].

4.4 Controlador *Fuzzy*

Na estratégia de controle PID-Fuzzy do nível de água de um pressurizador nuclear, primeiro são concebidos ganhos PID e em seguida o CLF (controlador baseado em lógica *fuzzy*) é explorado para estender a conjuntos finitos de PID ganhos para as possíveis combinações de ganhos do PID na região estável. Assim o ganho PID adapta o modelo para corrigir o nível de água no pressurizador, Figura 24.

Figura 24 Controle PID-Fuzzy do nível de água no pressurizador.



Fonte: Autor

Na Figura 24, o CLF utiliza o ajuste dos ganhos do PID baseado no mapeamento dos níveis de água para controle do pressurizador. Este mapeamento pode ser construído a partir das seguintes etapas:

- Definição dos ganhos dos controladores PID de acordo com as demandas reais;
- Relacionar, pelo CLF, a correspondência entre os níveis de água e os ganhos do

PID.

O sistema fuzzy é baseado em fuzzificação, base de regras e defuzzificação. A base de regras que será utilizada neste trabalho tem uma forma semelhantes ao do trabalho de Liu et al.(2009).

O valor defuzzificado é obtido por vários métodos, onde um dos mais comuns é método de centro de massa (LIU et al., 2009) e implementado por (RUBAAI et al., 2008) como pode ser observado as equações abaixo:

$$K_p(m) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_{Bi} \mu_{Ai}}{\sum_{i=1}^3 \mu_{Ai}} \quad (28)$$

$$K_i(m) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_{ci} \mu_{Ai}}{\sum_{i=1}^3 \mu_{Ai}} \quad (29)$$

$$K_D(m) = \frac{\sum_{i=1}^3 \mu_{Di} \mu_{Ai}}{\sum_{i=1}^3 \mu_{Ai}} \quad (30)$$

A saída composta de PID-Fuzzy foi derivada da equação (31)

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (31)$$

Onde

K_p = ganho proporcional

K_i = ganho integral

K_D = ganho derivativo

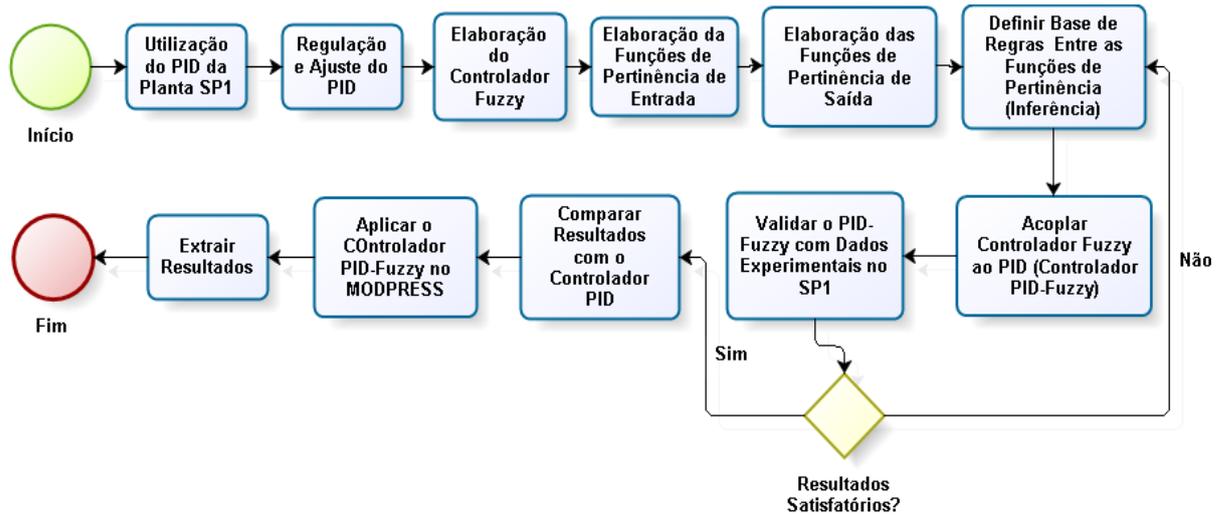
Uma vez que o sistema foi descrito por um diagrama de blocos (Figura 24), o passo seguinte consiste na determinação da função transferência que relaciona a variável controlada m com o ponto de referência ou valor desejado R . Isto é, no estágio de defuzzificação, a variável difusa produzida pela inferência é transformada em variável numérica que atuará no processo de forma a regulá-lo. E, equivale à transformação *fuzzy*-escalar, correspondendo a um mapeamento do espaço de ações de controle *fuzzy* e definido sobre o universo de discurso para o espaço de ações não *fuzzy* ou escalares. Desta forma, produzirá um valor numérico para aplicação ao processo.

4.5 Metodologia Aplicada

Nesta etapa serão descritas as aplicações e estratégias na elaboração da parte experimental, como também o desenvolvimento dos controladores e suas comparações;

valores de referência adotados tanto nos componentes do SP1 quanto nos controladores em geral. A Figura 25 ilustra através de um fluxograma os processos realizados neste trabalho, desde o ajuste do Controlador PID até a extração dos resultados do Controlador PID-Fuzzy aplicado ao MODPRESS.

Figura 25 Fluxograma da Metodologia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Controlador PID no SP1

O controlador PID aplicado no SP1 foi o já utilizado em seu sistema, ou seja, no SP1 já existe um controlador intrínseco de fábrica, que apenas foi ajustado para atuar na situação de interesse.

Os componentes sob o controle PID são os dois motores do SP1, o motor de alimentação e o outro de esvaziamento, que são responsáveis pelo deslocamento da massa de água e consequentemente atuarão na correção do nível do Vaso Cilíndrico. As constantes do controle PID de cada motor, ou seja, as constantes proporcional, integral e derivativa destes são respectivamente:

Motor de Alimentação

$$Kp = 2,65$$

$$Ki = 2,50$$

$$Kd = 2,45$$

Motor de Esvaziamento

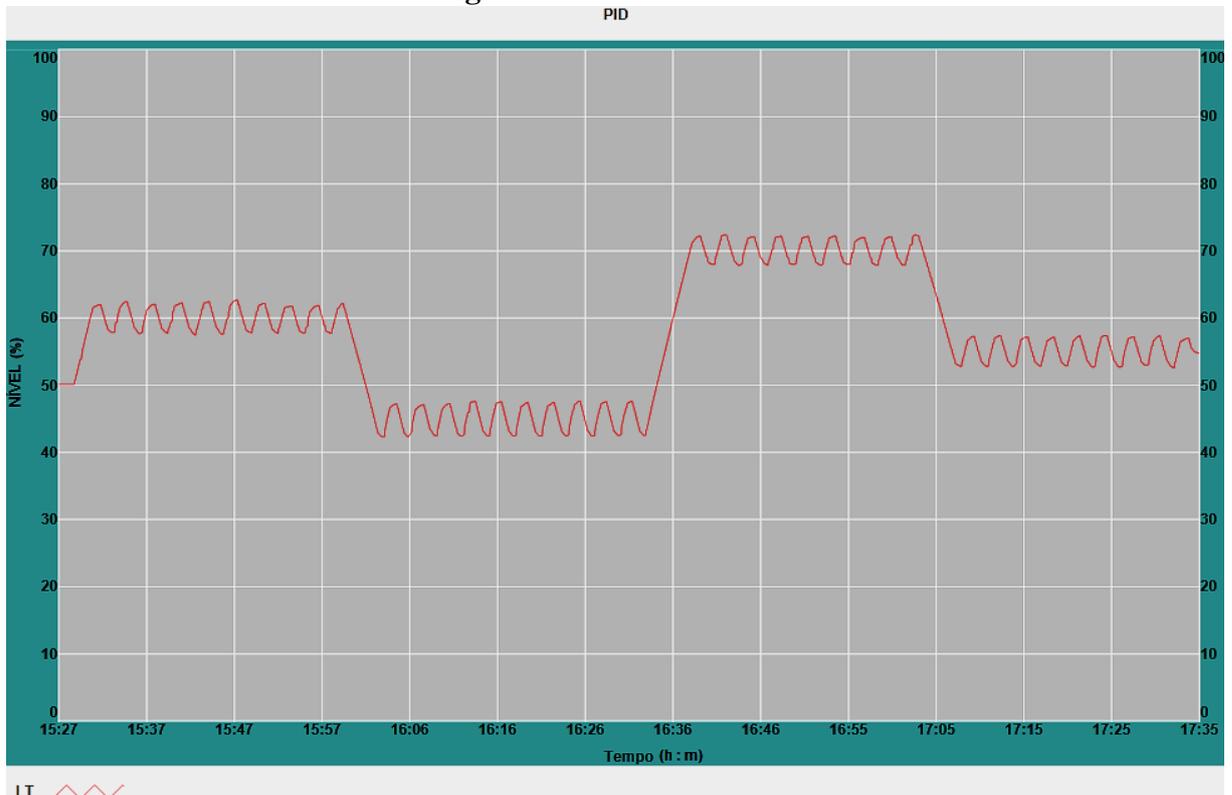
$$Kp = 2,62$$

$$Ki = 2,50$$

$$Kd = 2,43$$

A Figura 26 mostra um gráfico do Nível *versus* Tempo do nível de água no Vaso Cilíndrico do SP1 com o Controlador PID atuando em *setpoints* estabelecidos em 60%, 45%, 70% e 55%. Esta, mostra o comportamento do nível de água no tempo, como se pode notar, partindo de um nível estacionário em 50% o primeiro *setpoint* é em 60%. O Controlador PID atinge certa estabilidade de forma a manter uma oscilação em torno deste ponto de referência. Transcorrido cerca de 30 minutos um segundo *setpoint* em 45% é aplicado, e, novamente o PID atinge sua estabilidade. Cerca de mais 30 minutos depois o setpoint é alterado mais uma vez para 70%, e, por último, para 55%. Estes também com estabilidade semelhante aos demais.

Figura 26 Controlador PID

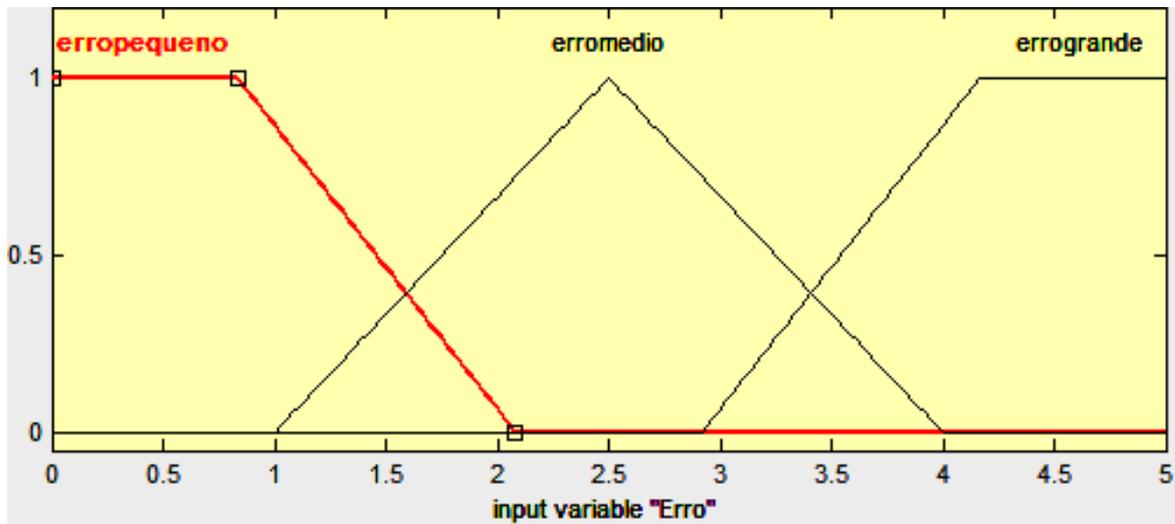


Fonte: Autor.

4.7 Controlador Fuzzy e Controlador PID-Fuzzy no SP1

A estratégia para determinar o Controlador Fuzzy foi determinar, na ótica nebulosa, ou seja, sob a lógica *fuzzy*, a definição dos erros. Tratando como o grau do erro se relacionaria com a saída de cada constante do controlador PID. A Figura 27 mostra como foi definido os erros pequeno, médio e grande no MATLAB.

Figura 27 Definição dos Erros

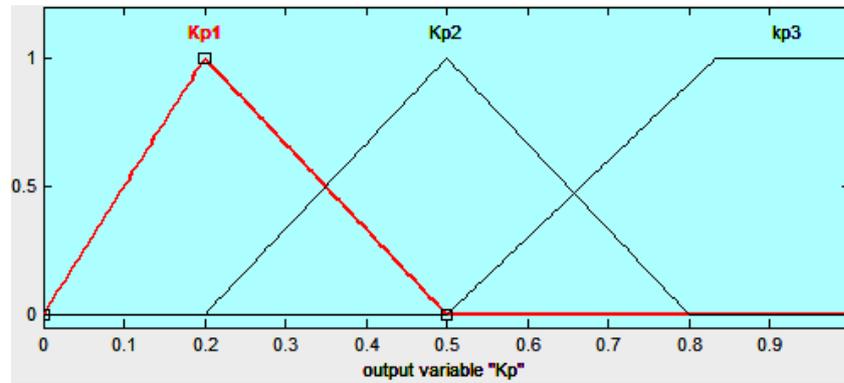


Fonte: Autor.

Em outras palavras foi definido que o erro em relação ao *setpoint* for de até 1% é considerado um erro pequeno. Se o erro for igual a 2,5% o erro é médio. E, se for maior ou igual a 5% o erro é grande. Entre esses valores o erro é relacionado com os graus de pertinência apresentado na Figura 27.

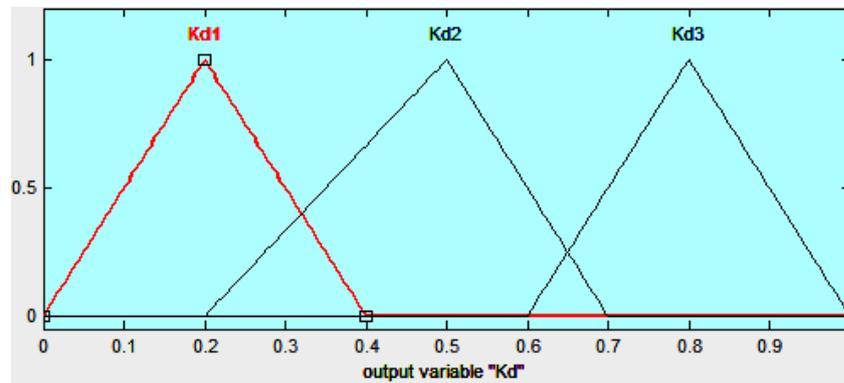
Depois da classificação dos erros o próximo passo é como as saídas, de cada constante do Controlador PID, deverão ser na classificação da lógica *fuzzy* e na experiência de um especialista no SP1 para relacioná-las através das regras linguísticas no processo de fuzzificação. O comportamento de cada uma das constantes K_p , K_i e K_d é mostrado respectivamente na Figura 28, 29 e 30 abaixo.

Figura 28 Saída da Constante Kp



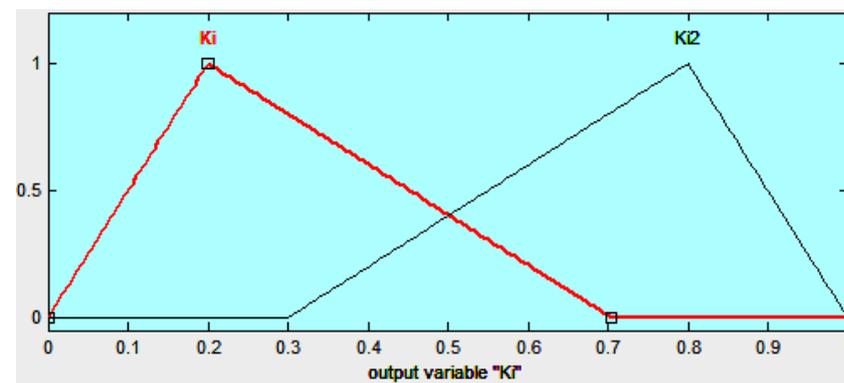
Fonte: Autor.

Figura 29 Saída da Constante Ki



Fonte: Autor.

Figura 30 Saída da Constante Kd



Fonte: Autor.

Definido os erros (entrada), assim como cada constante do controlador PID (saídas), foram definidas as regras linguísticas para que cada constante Kp, Ki e Kd se

relacionasse com os erros pequeno, médio e grande. A base de regras linguísticas aplicada está descrita abaixo:

Para a constante K_p tem-se:

Se Erro é erropequeno Então K_p é K_{p1}
Se Erro é erromedio Então K_p é K_{p2}
Se Erro é errogrande Então K_p é K_{p3}
Se Erro é errogrande Então K_p não é K_{p1}

Para a constante K_i tem-se:

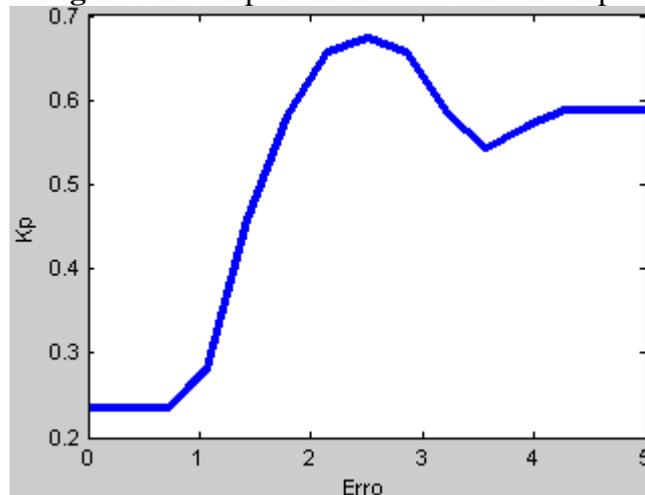
Se Erro é erropequeno Então K_i é K_{i1}
Se Erro é erromedio Então K_i não é K_{i1}
Se Erro é errogrande Então K_i é K_{i1}

Para a constante K_d tem-se:

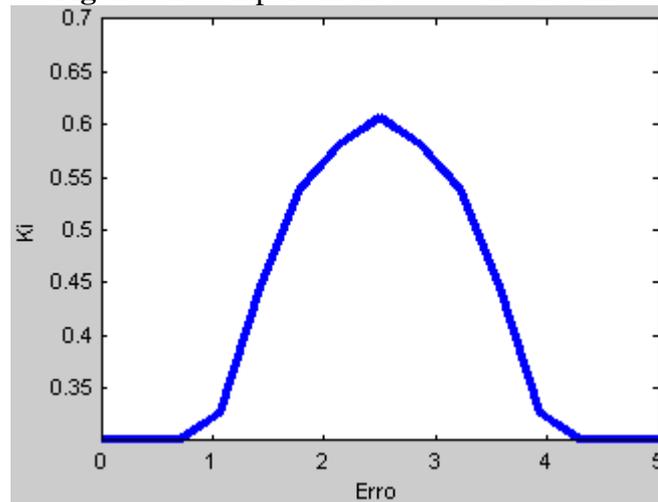
Se Erro é erropequeno Então K_d é K_{d1}
Se Erro é erromedio Então K_d é K_{d2}
Se Erro é errogrande Então K_d não é K_{d1}

Após as regras linguísticas segue-se com o processo de defuzzificação. E, neste caso o método de defuzzificação escolhido foi o do Centróide. O comportamento de cada constante K_p , K_i e K_d depois deste processo é representado respectivamente nas Figura 31, 32 e 33:

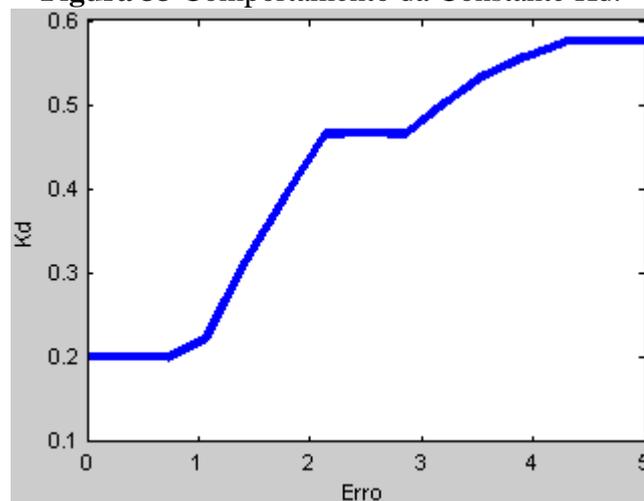
Figura 31 Comportamento da Constante K_p .



Fonte: Autor.

Figura 32 Comportamento da Constante Ki.

Fonte: Autor.

Figura 33 Comportamento da Constante Kd.

Fonte: Autor.

Isto é, as Figura 31, 32 e 33, mostram como cada constante vai se comportar no Controlador PID, variando o seu valor de acordo com erro em relação ao *setpoint* estabelecido. Por exemplo, observando a Equação 31 do Controlador PID, nota-se que se estivesse atuando no Motor de Alimentação do SP1 esta ficaria na seguinte forma genérica:

$$u(t) = 2,65 \cdot e(t) + 2,50 \cdot \int e(t)dt + 2,45 \frac{de(t)}{dt} \quad (32)$$

Onde:

$$Kp = 2,65$$

$$Ki = 2,50$$

$$Kd = 2,45$$

Este é o Controlador PID puro. Mas, com a determinação de como as constantes devem variar, ou melhor, como o comportamento das constantes estão atreladas em relação ao grau de erro é atuação do Controlador Fuzzy. A este acoplamento da relação entre a variação das constantes em relação ao erro e comandadas sob a lógica fuzzy que chamamos de Controlador PID-Fuzzy.

Então, um Controlador PID-Fuzzy é um Controlador PID que tem suas constantes Proporcional (**Kp**), Integral (**Ki**) e Derivativa (**Kd**) reguladas por um Controlador Fuzzy.

Como se pode notar e de acordo com o erro, a variação máxima do comportamento das constantes no Controlador Fuzzy podem adotar valores que vão de 0 (zero) a 1 (um), isto significa que se o valor é zero a constante também tem valor zero e se o valor for 1 a constante terá seu valor integral. Assim se em algum momento o Controlador Fuzzy atribuir um valor 1 para constante Kp do Motor de Alimentação, esta terá o valor 2,65; para um valor 0,50, Kp terá um valor de 1,325; para um valor de 0,30, Kp terá um valor de 0,795 e assim sucessivamente.

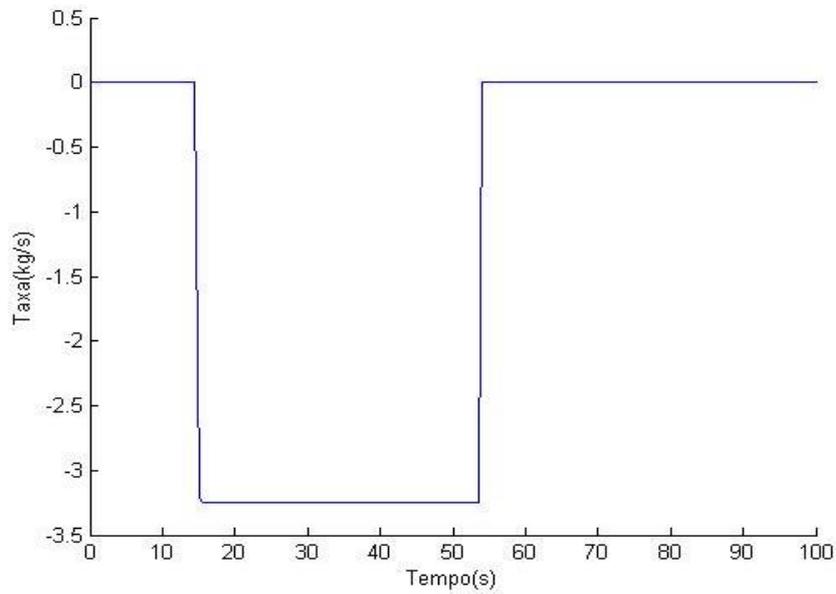
Desta forma existe no Controlador Fuzzy um Fuzzy Proporcional (**Fp**), Fuzzy Integral (**Fi**) e Fuzzy Derivativo (**Fd**), atuando em cada constante do Controlador PID e Equação 31 pode ser escrita na forma:

$$u(t) = F_p K_p \cdot e(t) + F_i K_i \cdot \int e(t) dt + F_d K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (34)$$

4.8 Controlador Fuzzy e Controlador PID-Fuzzy no MODPRESS

A proposta do controlador desenvolvido é resolver o problema da queda de água característica em um transiente que ocorre normalmente em pressurizador (*outsurge*), isto é, saída de água do Pressurizador; na Figura 34 pode ser observado a vazão desta saída, conforme resultados expressos do código MODPRESS.

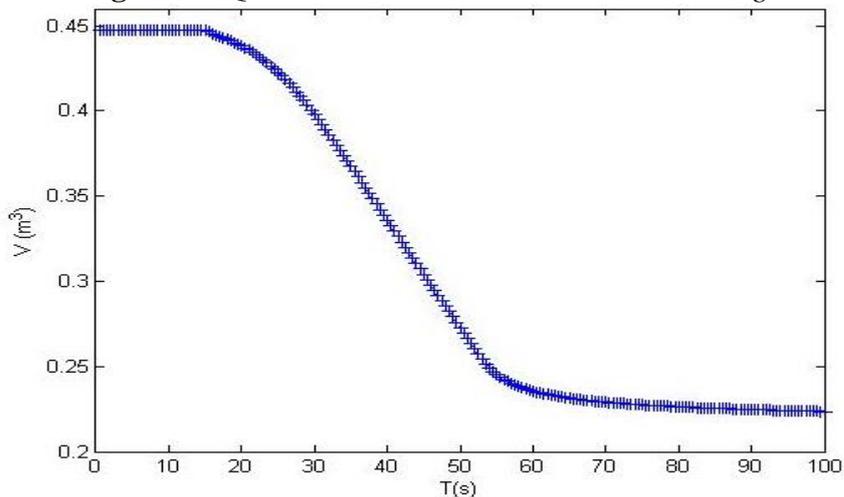
Figura 34 Comportamento da vazão mássica em um *outsurge*.



Fonte: Autor.

A Figura 35 mostra a queda do volume de água no momento do *outsurge*. O volume inicial que varia em torno de aproximadamente $0,447626 \text{ m}^3$, tomado como nível de referência (*setpoint*), decresce até um patamar de aproximadamente $0,22344 \text{ m}^3$.

Figura 35 Queda do volume no momento do *outsurge*.



Fonte: Autor.

Um erro entre o nível real, que está sendo medido no pressurizador, e o nível de referência, segundo o CFOL (1999) é direcionado para 2 (dois) circuitos:

- Circuito de alarmes de desvio de nível ($\pm 5\%$) e energização automática dos aquecedores de retaguarda, em $\pm 5\%$;
- Circuito PID que proporciona um melhor controle de nível do pressurizador. O PID também recebe um sinal de correção (realimentação) que vem do fluxômetro de carregamento. Do circuito PID, o sinal do erro atua numa estação controladora AUTO/MANUAL corrigindo, quando em AUTO, o nível do pressurizador por meio da válvula (controladora de nível do pressurizador).

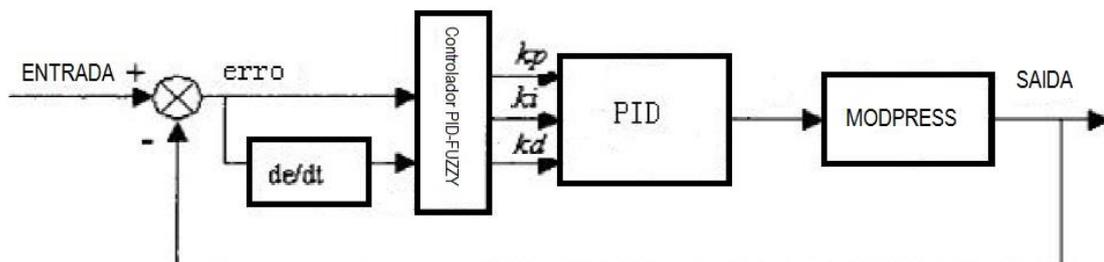
Segundo os níveis observados da Figura 35, observa-se uma queda de 50% no nível do pressurizador o que já estaria muito além do nível de alarme mencionado acima. Portanto, fora da faixa de operação, e conseqüentemente, ocasionar problemas em diversas variáveis do processo e dificuldades no controle do sistema.

Além do mencionado o acionamento do controlador PID é ação lógica a ser tomada, no entanto a uma queda nesse nível, um controlador PID pode ter uma resposta lenta (FERRARIN et al., 2001) e oscilações não desejáveis a um sistema multivariáveis (ARRUDA et al., 2008). Portanto, existe a necessidade de utilização de controladores de alta performance e de fácil adaptabilidade, além de ter resultados comprovadamente melhores do que o PID convencional (TEIXEIRA, 2014) como é o caso do controlador PID-fuzzy.

4.9 Desenvolvimento do Controlador PID-FUZZY

O sistema de controle será baseado no controle da válvula responsável pela entrada de água no pressurizador evitando assim a queda repentina mostrada na Figura 35. O sistema de controle foi desenvolvido seguindo o fluxograma da Figura 36.

Figura 36 Sistema de controle simulado para o código MODPRESS.



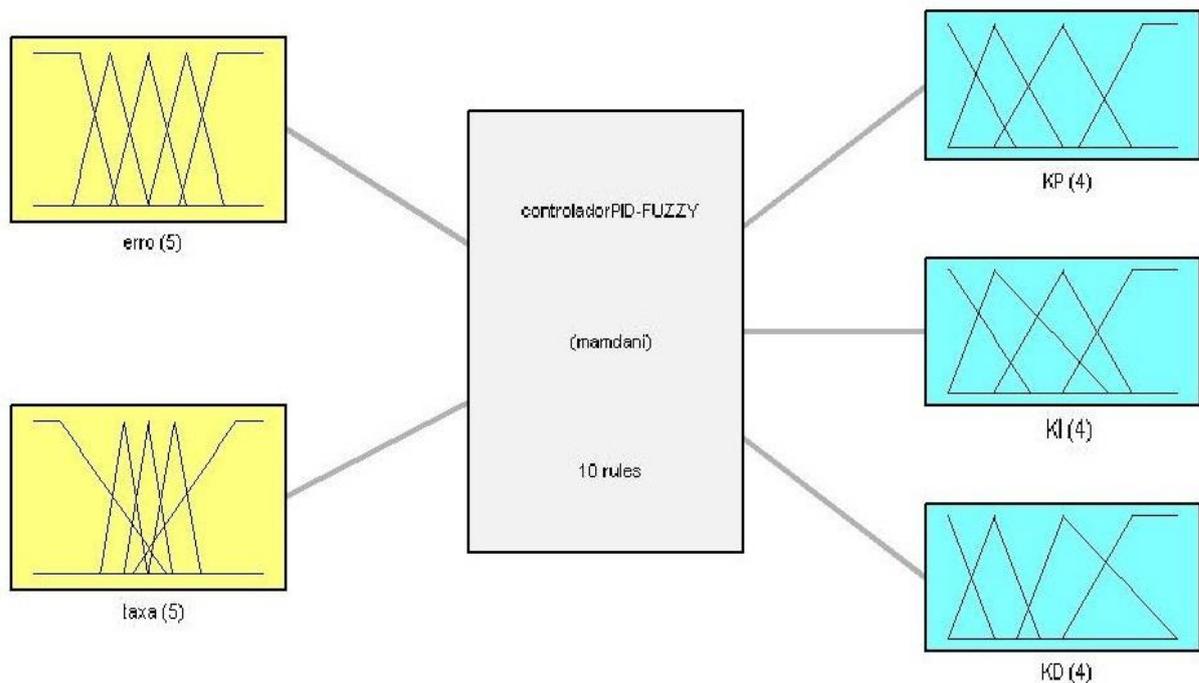
Fonte: Autor.

O controlador desenvolvido foi inspirado pelo controlador desenvolvido por LIU et al.(2009) que trabalha com controle de potência de um reator nuclear.

O sistema foi acoplado ao código MODPRESS de forma a responder a qualquer variação simulada. Para isso foi necessário estabelecer as variáveis de entrada e saída que teriam influência na resposta do controlador a um transiente.

O controlador PID-FUZZY teve como entrada duas variáveis: o erro e de/dt , sendo cada uma delas composta por 5 (cinco) funções de pertinência. No caso das variáveis de saída tem-se 3 (três) são elas: K_p , K_i e K_d , sendo cada uma composta de 4 (quatro) funções de pertinência (Figura 37).

Figura 37 Controlador PID-Fuzzy desenvolvido: 2 variáveis de entrada, 10 regras e 3 variáveis de saída.



Fonte: Autor.

A combinação do número de variáveis e funções de pertinência poderia gerar ao menos 120 regras diferentes que poderia deixar o sistema complexo, apesar da simplicidade inerente a qualquer sistema fuzzy.

No entanto o controlador desenvolvido teve apenas 10 (dez) regras trazendo a simplicidade e sensibilidade necessárias para prover os dados simulados pelo código (Quadro I), além de ser um sistema do Mamdani.

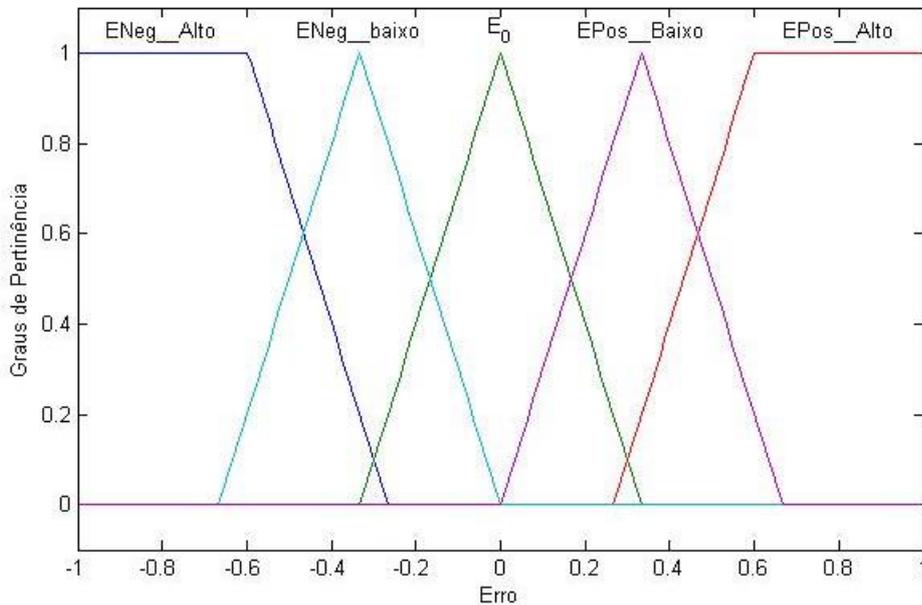
Quadro I – Base de regras desenvolvidas neste trabalho.

1	SE (erro É EPos__Alto) E (taxa É DE__Pos__alto) ENTÃO (KP É KPmuitoalto_)(KI É KIpequeno)(KD É KDbaixo) (1)
2	SE (erro É ENeg__Alto) E (taxa É DE__Neg__alto) ENTÃO (KP É KPmuitoalto_)(KI É KIpequeno)(KD É KDbaixo) (1)
3	SE (erro É ENeg__Alto) E (taxa É DE__Pos__alto) ENTÃO (KP É KPmuitoalto_)(KI É KIpequeno)(KD É KDbaixo) (1)
4	SE (erro É EPos__Alto) E (taxa É DE__Neg__alto) ENTÃO (KP É KPmuitoalto_)(KI É KIpequeno)(KD É KDbaixo) (1)
5	SE (erro É ENeg__baixo) E (taxa É DE__Neg__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDalto_) (1)
6	SE (erro É ENeg__baixo) E (taxa É DE__Pos__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDalto_) (1)
7	SE (erro É EPos__Baixo) E (taxa É DE__Pos__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDalto_) (1)
8	SE (erro É EPos__Baixo) E (taxa É DE__Neg__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDalto_) (1)
9	SE (erro É E_0) E (taxa É DE__Neg__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDmuitoalto) (1)
10	SE (erro É E_0) E (taxa É DE__Pos__alto) ENTÃO (KP É KPalto)(KI É KIalto)(KD É KDmuitoalto) (1)

As funções de pertinência das variáveis de entrada foram baseadas nos resultados obtidos experimentalmente no SP1 que é um sistema análogo ao pressurizador simulado.

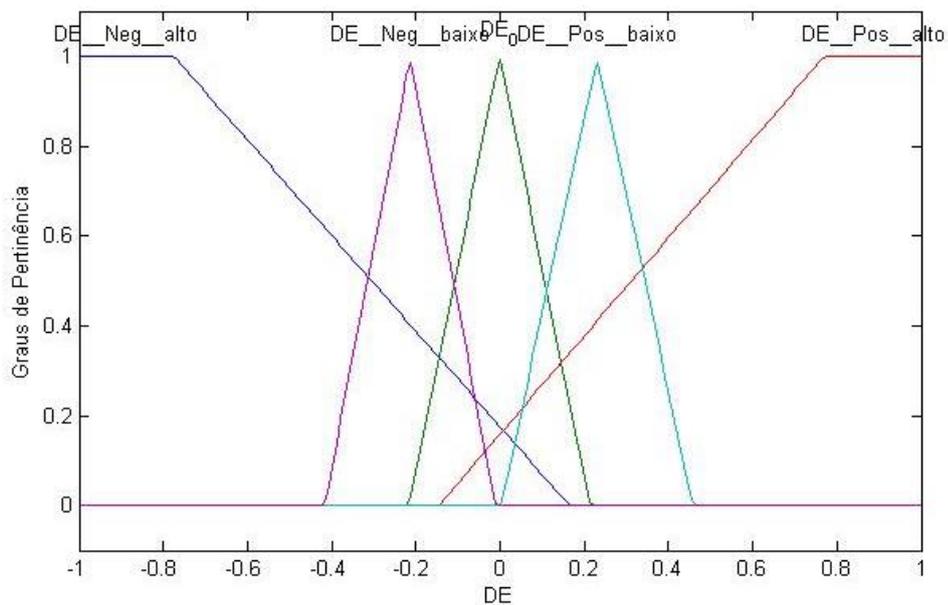
O comportamento obtido foi fundamental para desenvolver as funções de pertinência mostradas nas Figura 38 e 39:

Figura 38 Variável de entrada do controlador correspondente ao erro com 5 (cinco) funções de pertinência.



Fonte: Autor.

Figura 39 Variável de entrada do controlador correspondente a $\frac{de}{dt}$ com 5 (cinco) funções de pertinência.



Fonte: Autor.

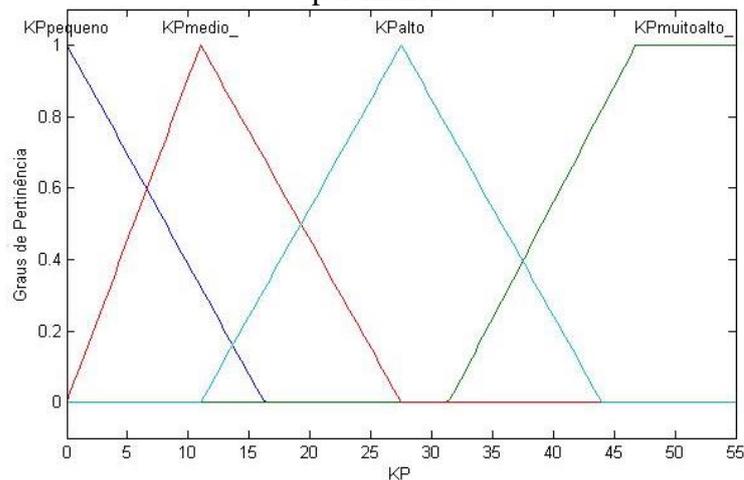
A sensibilidade inerente a qualquer sistema fuzzy esta baseado no conhecimento do especialista. Os dados experimentais foram utilizados também para construir a experiência

e conhecimentos necessários para entender o comportamento da ação de um controlador a um transiente ocorrido a um pressurizador.

Sem esse conhecimento ou sensibilidade do operador a ação de controle não seria possível. As funções de pertinência utilizadas no sistema experimental foram utilizadas no código MODPRESS para se ter um controlador confiável e que de fato pode responder a um transiente real em um pressurizador de um PWR apenas com algumas adaptações necessárias relativas à faixa de operação que se deseja trabalhar.

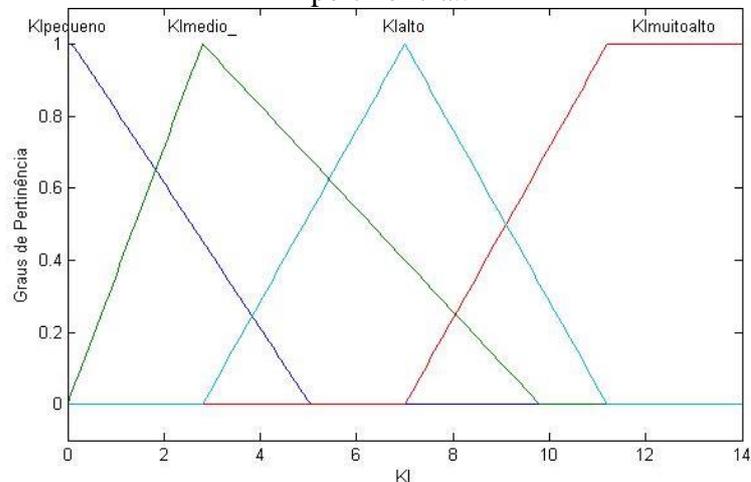
As funções de pertinência das variáveis de saída (Figura 40, 41 e 42) tiveram um acréscimo de funções comparados com as variáveis de entrada e saída no objetivo de ser ter uma maior sensibilidade a faixa de operação do pressurizador simulado no código.

Figura 40 Variável de entrada do controlador correspondente a K_p com 4 (quatro) funções de pertinência



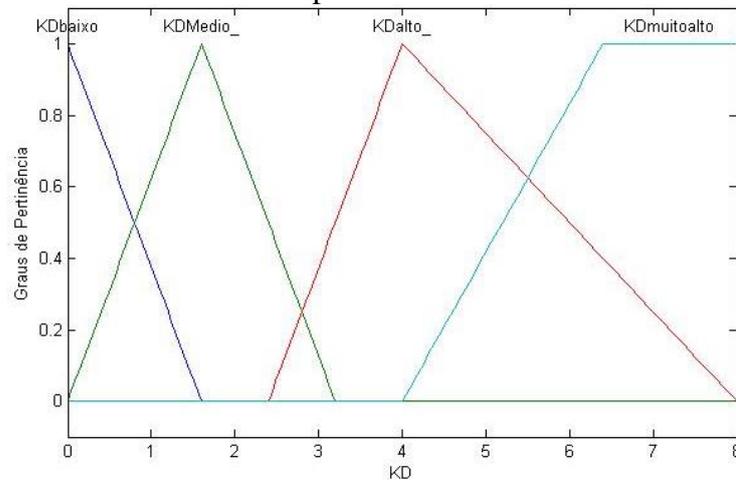
Fonte: Autor.

Figura 41 Variável de entrada do controlador correspondente a K_I com 4 (quatro) funções de pertinência..



Fonte: Autor.

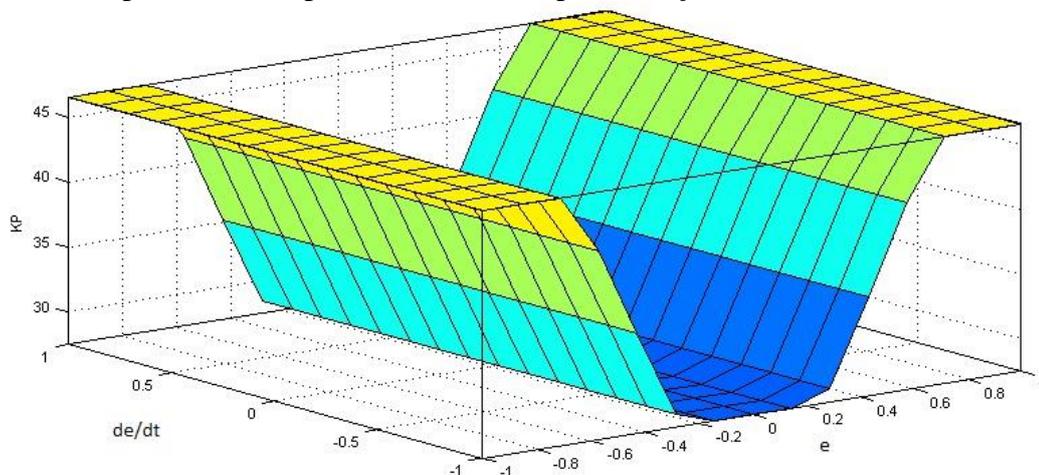
Figura 42 Variável de entrada do controlador correspondente a Kd com 4 (quatro) funções de pertinência.



Fonte: Autor.

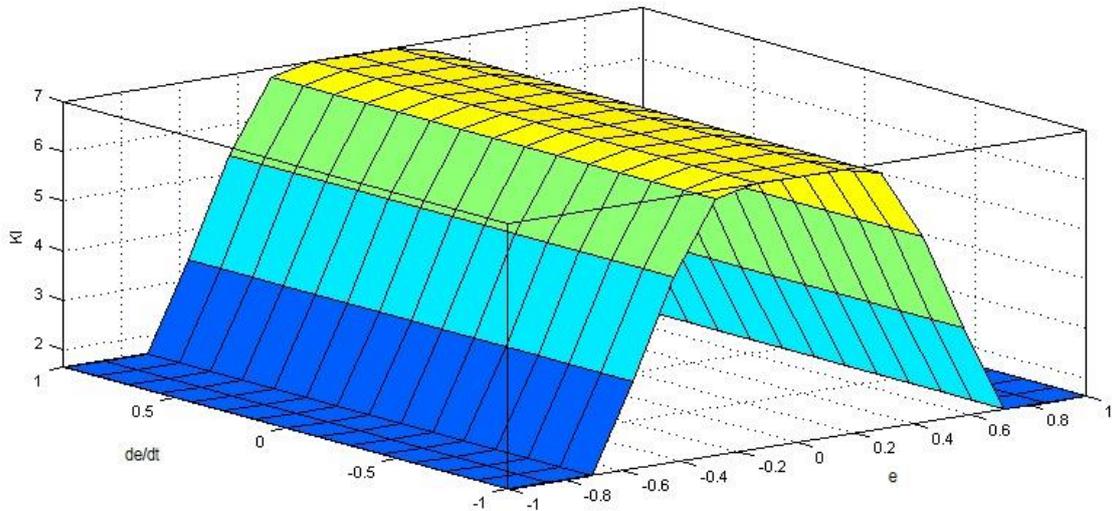
Com as duas entradas (Erro, DE) e as três saídas (KP, KI, KD) foi feita a inferência com as 10 regras citadas no Quadro I. Então, a superfície de resposta obtida para cada constante (proporcional, integral, derivativa), em relação ao Erro e a taxa de variação do erro (DE), para o sistema fuzzy dentro do Controlador PID são mostradas nas Figura 43, 44 e 45, respectivamente. A vantagem desta superfície obtida é que torna o sistema adaptativo, ou seja, independente de qualquer valor inicial para Kp, Ki e Kd o controlador consegue se adaptar e reduzir o erro ao longo do tempo. No entanto, como mencionado anteriormente, o sistema responde e se adapta rapidamente a valores que estão dentro do domínio ou faixa de operação previamente estabelecida, Figura 40, 41 e 42.

Figura 43 Superfície de resposta de saída do Kp em relação aos valores do erro e do de/dt.



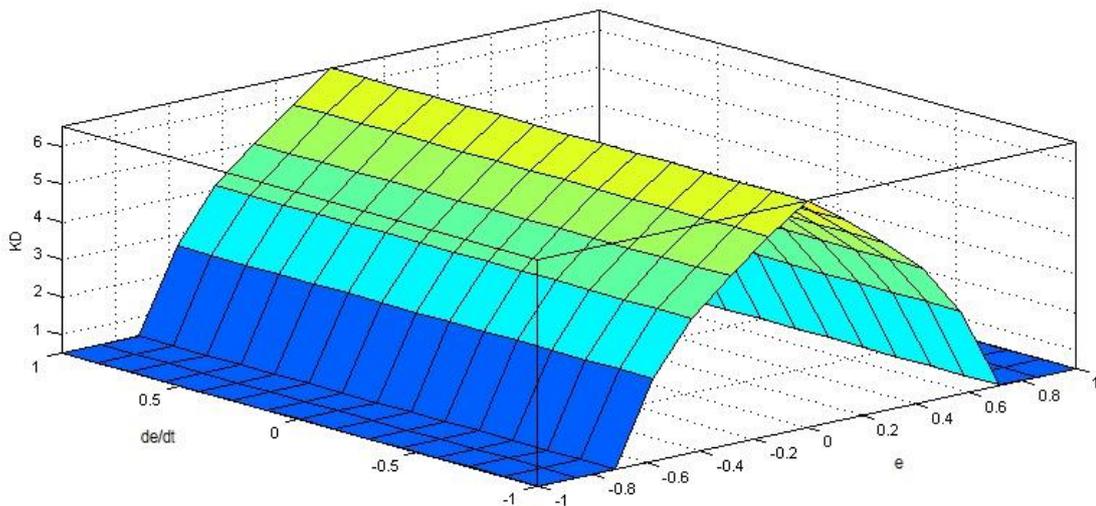
Fonte: Autor.

Figura 44 Superfície de resposta de saída do K_i em relação aos valores do erro e do de/dt .



Fonte: Autor.

Figura 45 Superfície de resposta de saída do K_d em relação aos valores do erro e do de/dt .



Fonte: Autor.

As superfícies mostram como cada constante deve se comportar em função do Erro e também da variação deste (DE), como pode-se observar na Figura 43 a constante K_p pode apresentar valores de 1 à aproximadamente 48. Na constante K_i , Figura 44, estes valores podem ser de 1 à 7. E, na constante K_d , Figura 45, de 1 até aproximadamente 6,5.

5 RESULTADOS

5.1 Validação do Controlador PID-Fuzzy no SP1

Com as definições já estabelecidas, o SP1 foi acionado com o Controlador PID-Fuzzy. E para comparação dos dados obtidos, o SP1 também foi usado com um Controlador Simples, ou seja, um controlador on/off, e com o Controlador PID puro.

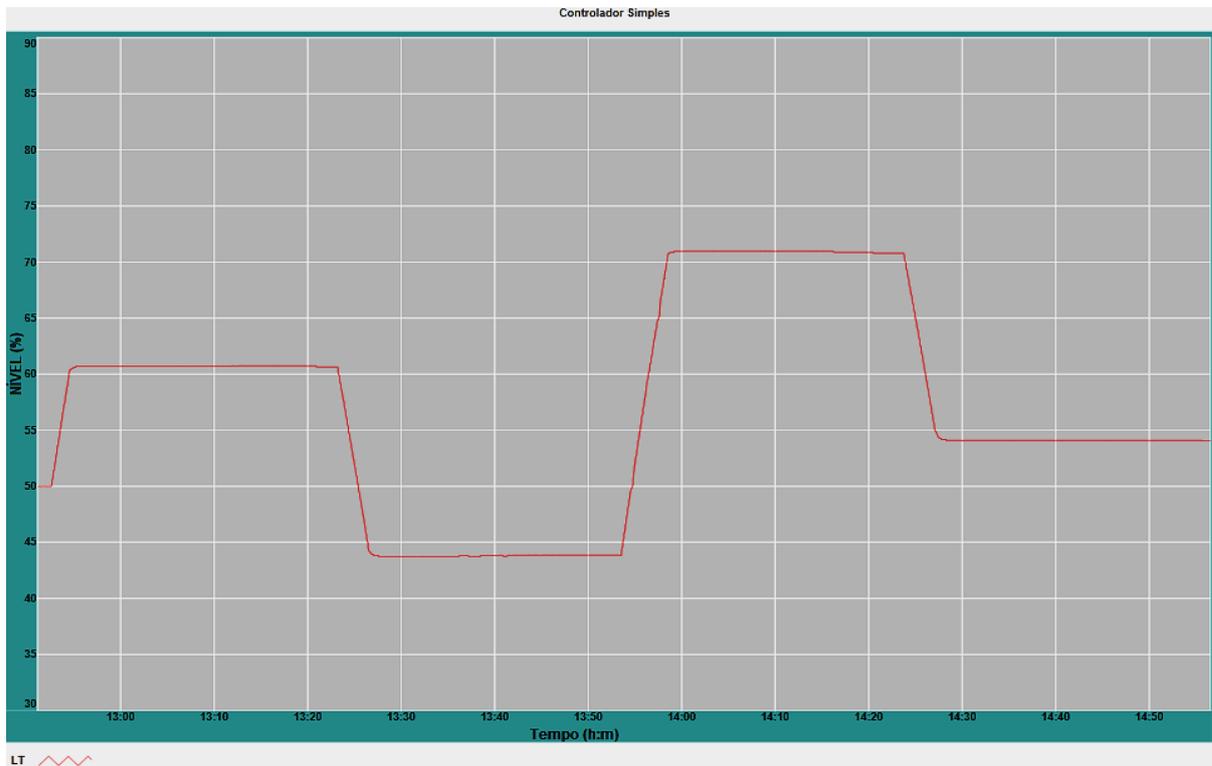
Para esta validação, tanto o Motor de Alimentação quanto o Motor de Esvaziamento do SP1 funcionaram variando de 0 (zero) a 1000 (mil) r.p.m. (rotações por minuto), exceto para o Controlador Simples por se tratar de um on/off.

Então, para cada tipo de controlador, o SP1 partiu do nível de água no Vaso Cilíndrico em 50% para atingir, intercalados em tempos de aproximadamente 30 minutos, os novos *setpoints* em 60%, 45%, 70% e 55%.

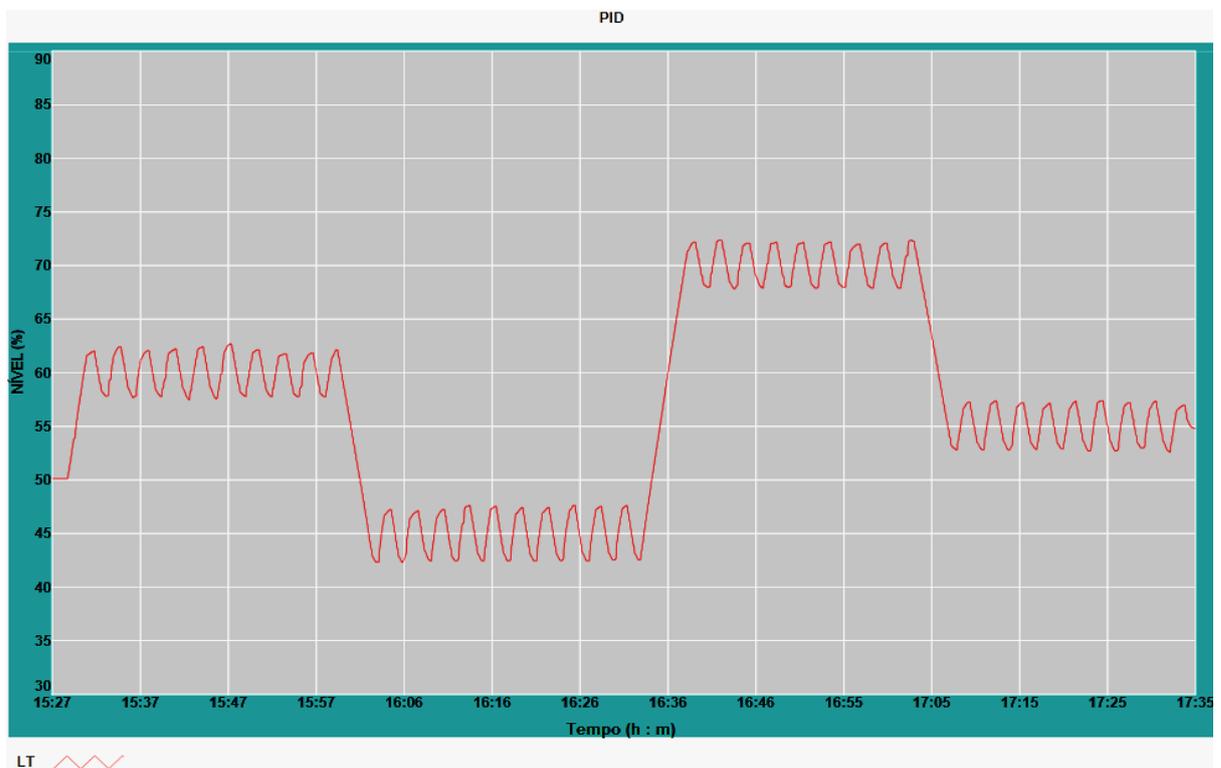
As Figura 46, 47 e 48 mostram como o Controlador Simples, o Controlador PID e o Controlador PID-Fuzzy, respectivamente, se comportaram. No tocante à estabilidade, diferenças significativas são evidentes. O Controlador Simples apresenta comportamento com amortecimento subcrítico, alcançando rapidamente um nível estável.

Na análise destas figuras e também nas próximas obtidas do SP1, na abscissa “Tempo” entenda-se que está em horas e minutos, isto é, no software do SP1 o tempo é registrado na hora corrente, no momento em que o experimento está sendo realizado, e, por este motivo os dois primeiros algarismos registram a hora e os dois últimos os minutos. E, na ordenada “Nível” representa em porcentagem (%) o nível do Vaso do SP1.

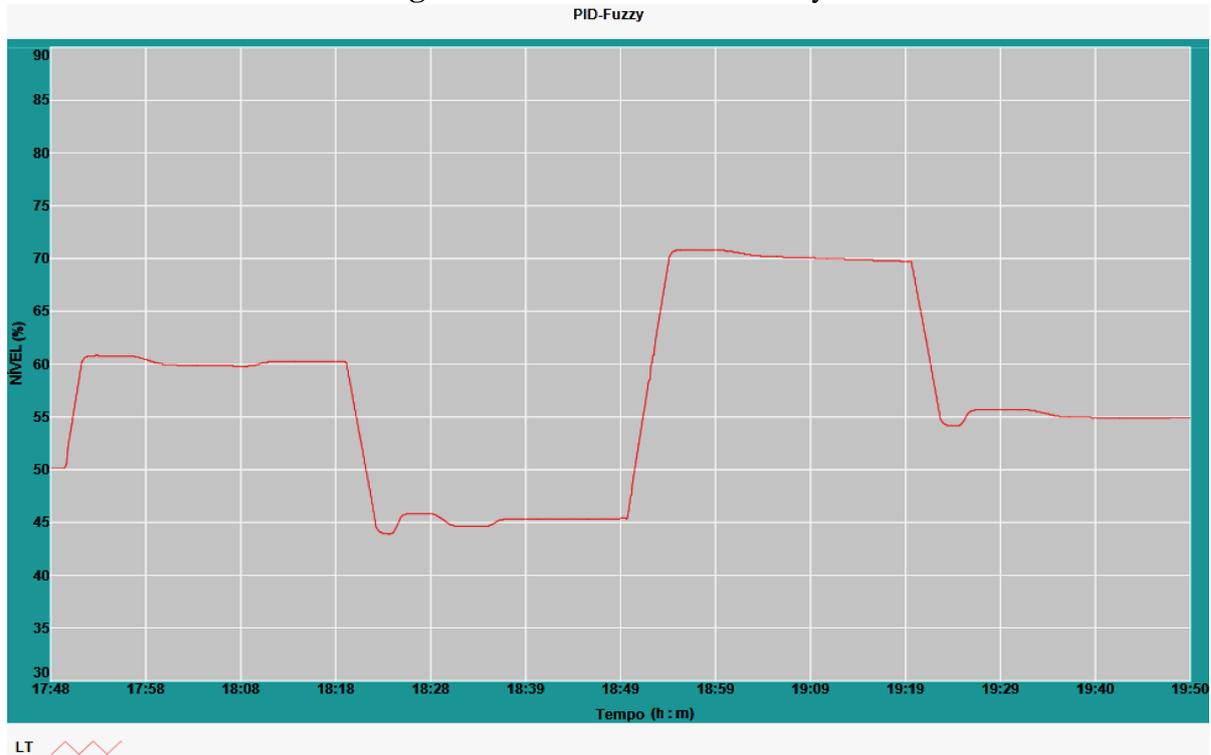
O Controlador PID se mostra oscilatório em torno do valor do *setpoint*. No caso do Controlador PID-Fuzzy, verifica-se o surgimento de *overshoots* e *undershoots* de baixa amplitude, com rápida recuperação para um nível estável.

Figura 46 Controlador Simples.

Fonte: Autor.

Figura 47 Controlador PID.

Fonte: Autor.

Figura 48 Controlador PID-Fuzzy.

Fonte: Autor.

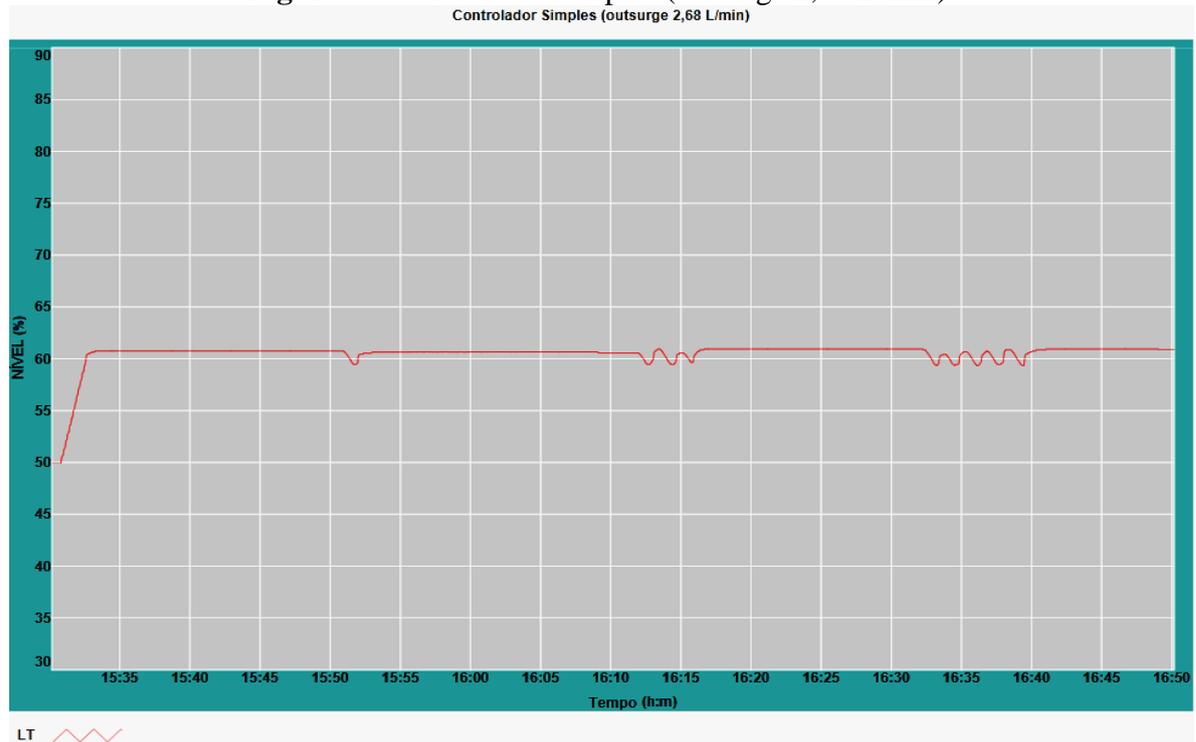
Nota-se ainda que o Controlador PID-Fuzzy responde bem as mudanças de *setpoint* no que se refere ao valor final estabelecido como novo nível de água desejado. Ele é o que melhor se aproxima do valor determinado, isto é, o que mantém o menor erro em relação ao *setpoint* e alcança também com rapidez o novo nível desejado com picos de baixa amplitude.

Em seguida estes mesmos controladores foram submetidos a condições semelhantes àquelas que poderiam ocorrer em um pressurizador de reator PWR, ou seja, considerando o Vaso Cilíndrico do SP1 como um pressurizador, verificou-se como cada controlador responde às situações de *insurge* e *outsurge*. Portanto, ao Vaso foram atribuídas uma saída de água (*outsurge*) e uma entrada de água (*insurge*) durante certo tempo.

A primeira situação aplicada foi ao Controlador Simples, partindo do nível de água em 50% foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingida a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *outsurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 2,68 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 49.

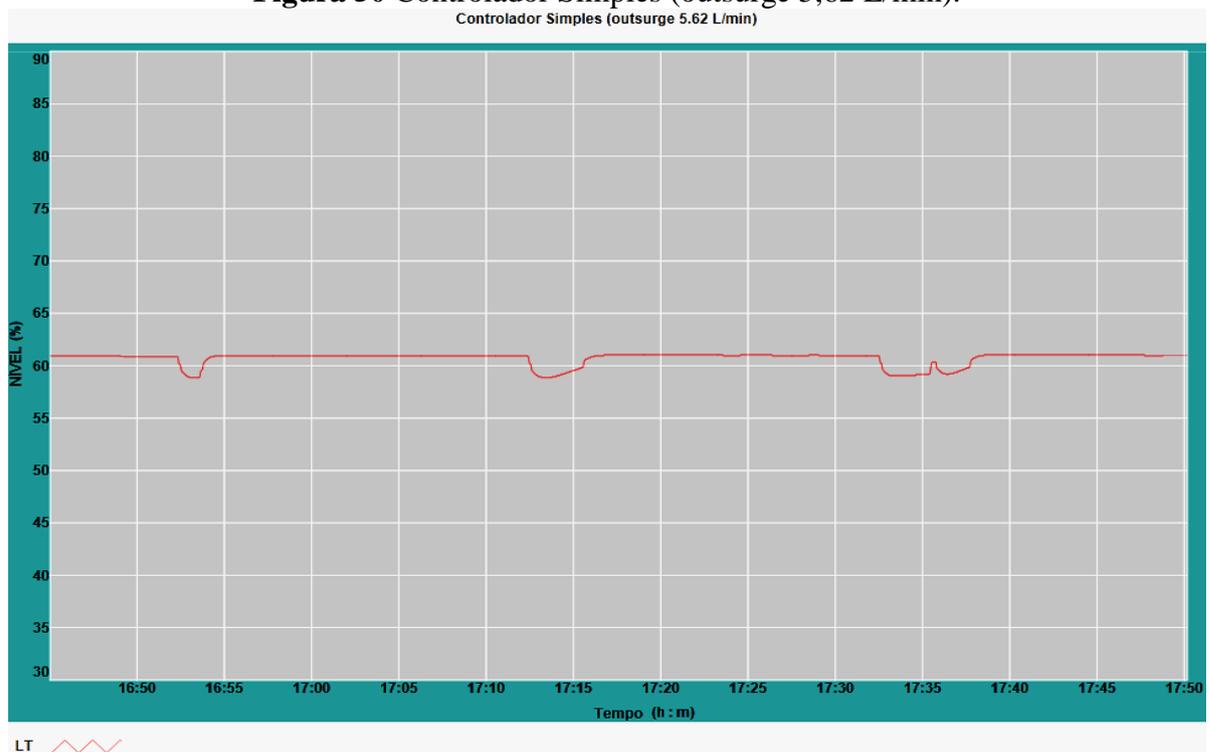
Figura 49 Controlador Simples (outsurge 2,68 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 outros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 5,62 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 50.

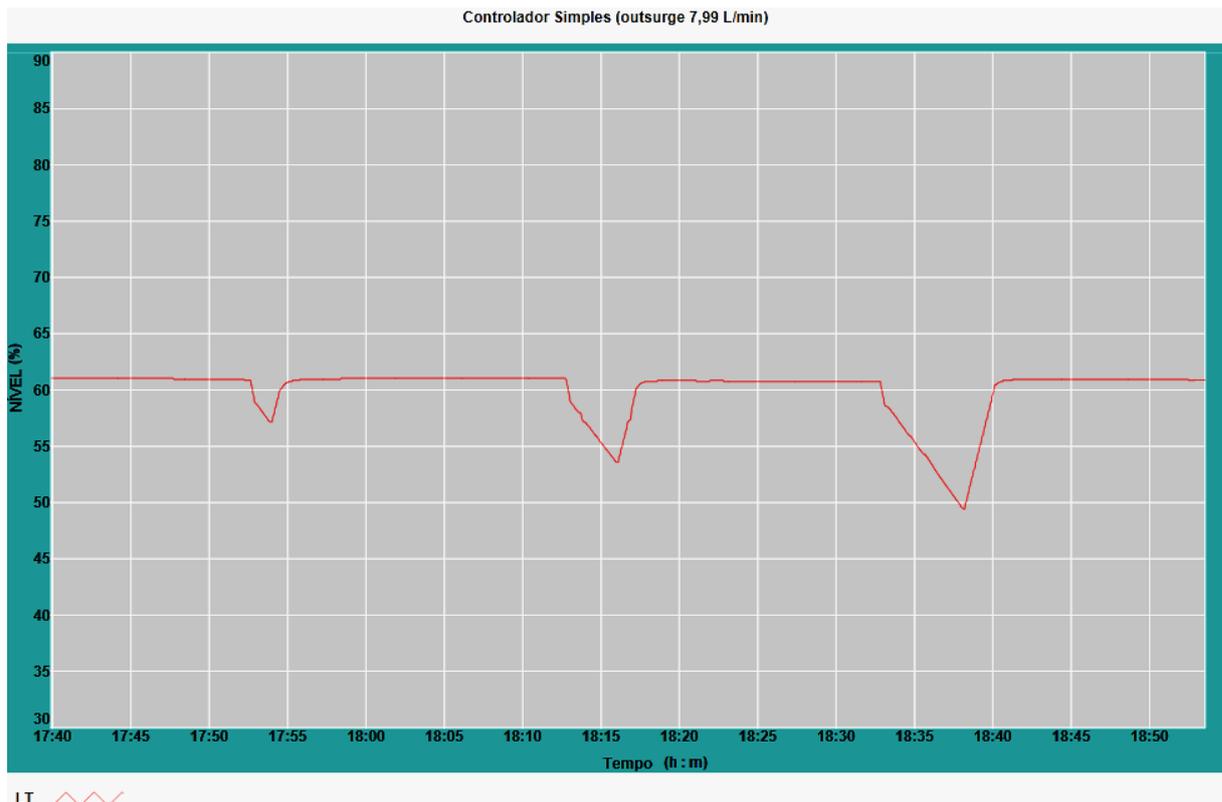
Figura 50 Controlador Simples (outsurge 5,62 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 *outsurges* finais, aplicado ao Controlador Simples, com uma vazão de aproximadamente 7,99 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 51.

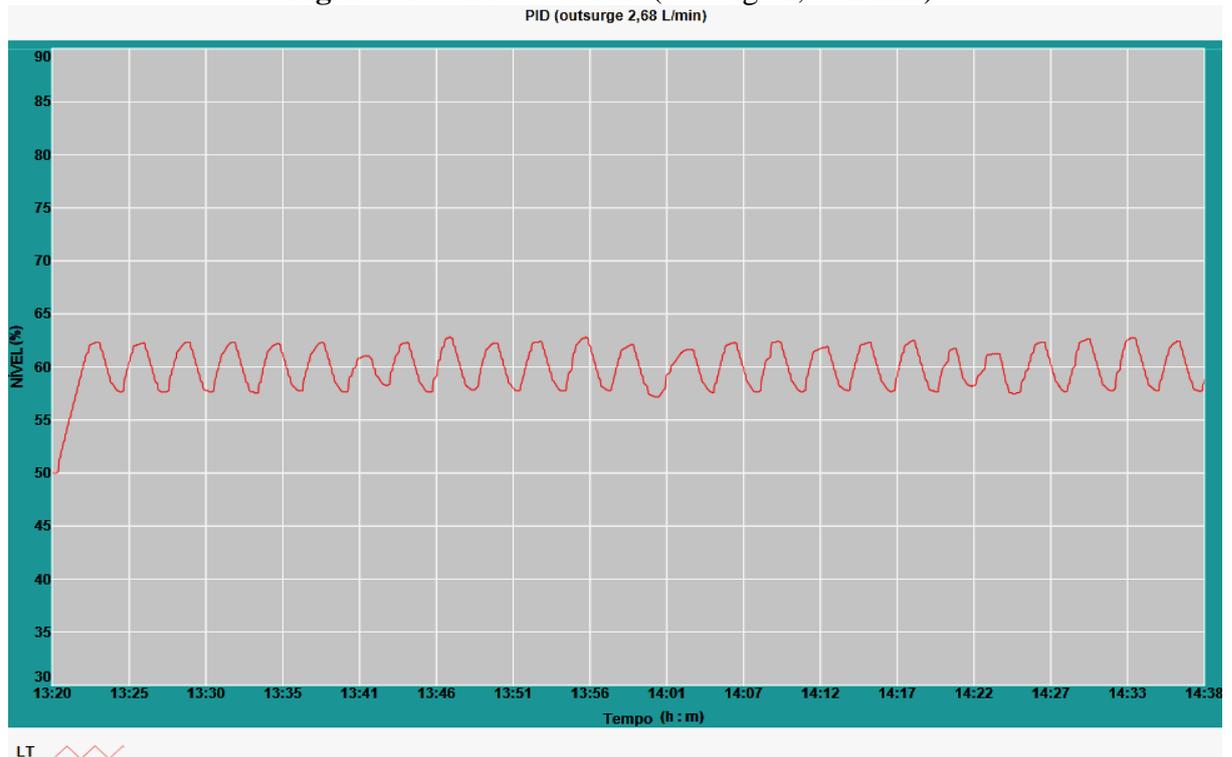
Figura 51 Controlador Simples (outsurge 7,99 L/min).



Fonte: Autor.

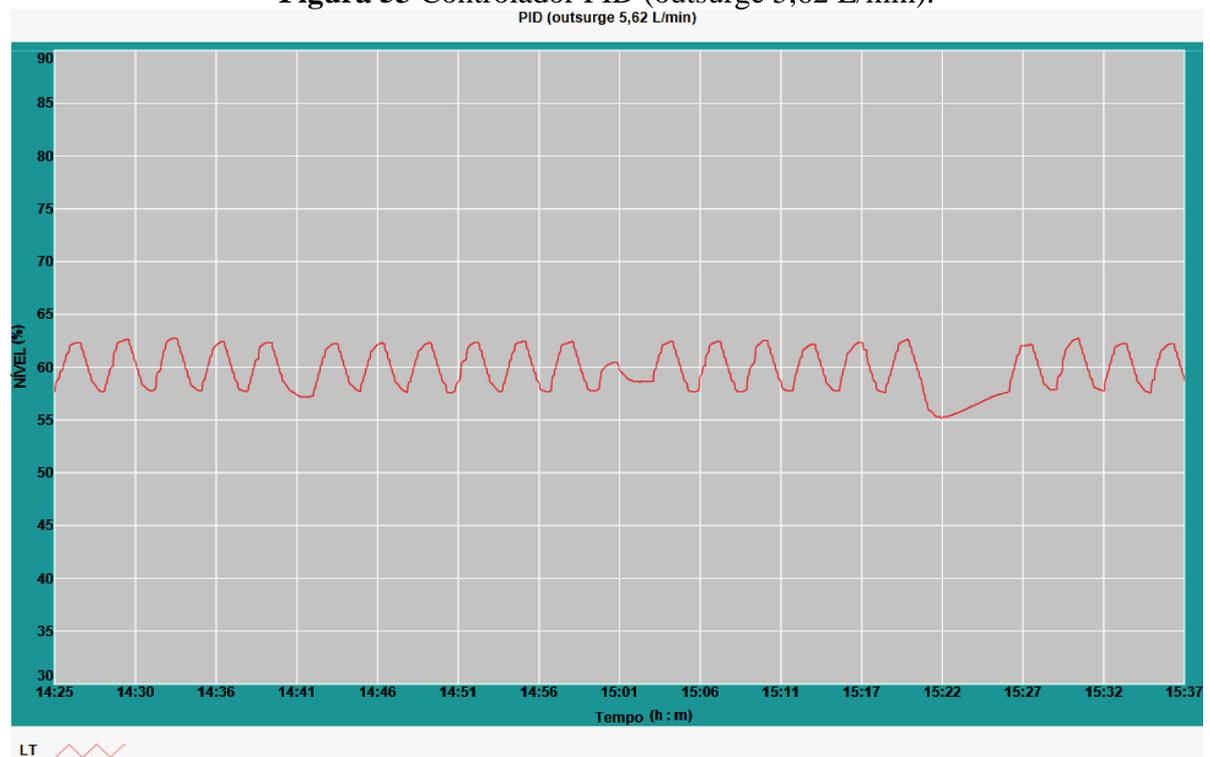
Semelhante à situação que fora imposta ao Controlador Simples, também foi aplicada ao Controlador PID, partindo do nível de água em 50% foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingido a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *outsurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 2,68 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 52.

Figura 52 Controlador PID (outsurge 2,68 L/min).

Fonte: Autor.

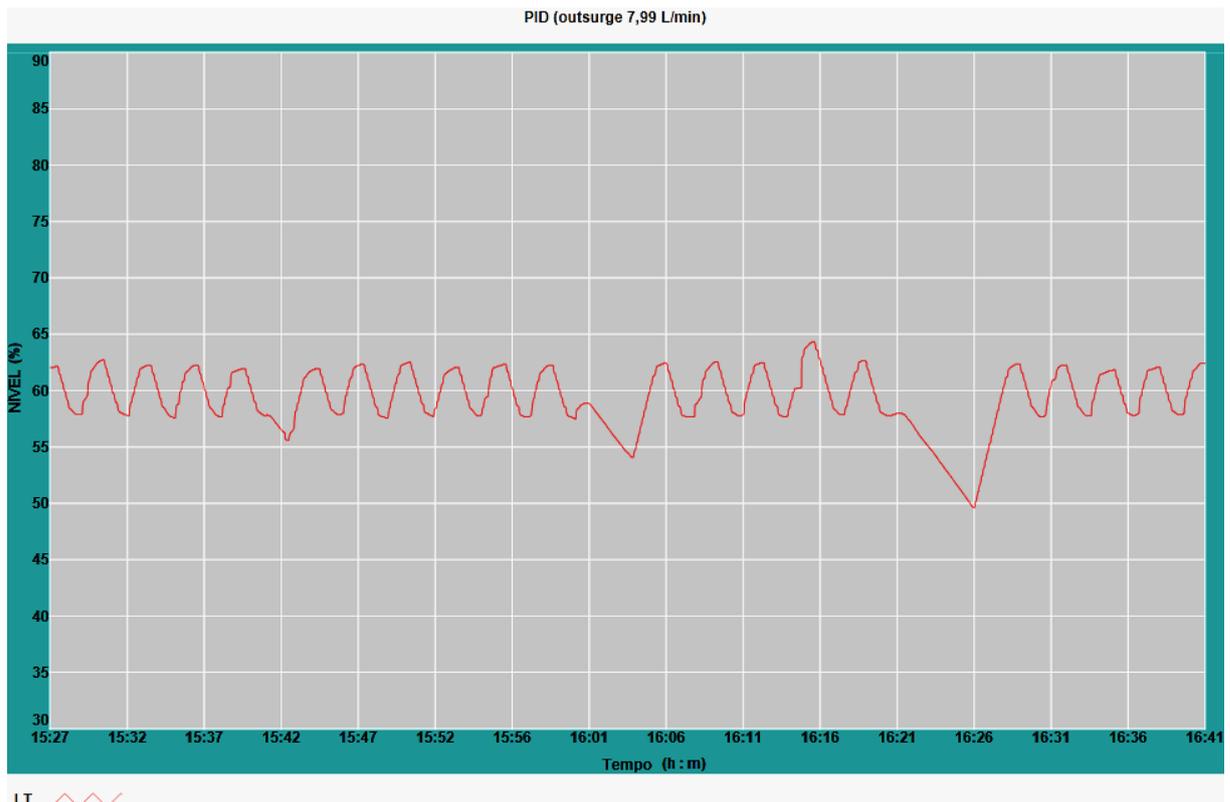
Os 3 outros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 5,62 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 53.

Figura 53 Controlador PID (outsurge 5,62 L/min).

Fonte: Autor.

Os 3 *outsurges* finais, aplicado ao Controlador PID, com uma vazão de aproximadamente 7,99 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra Figura 54.

Figura 54 Controlador PID (outsurge 7,99 L/min).

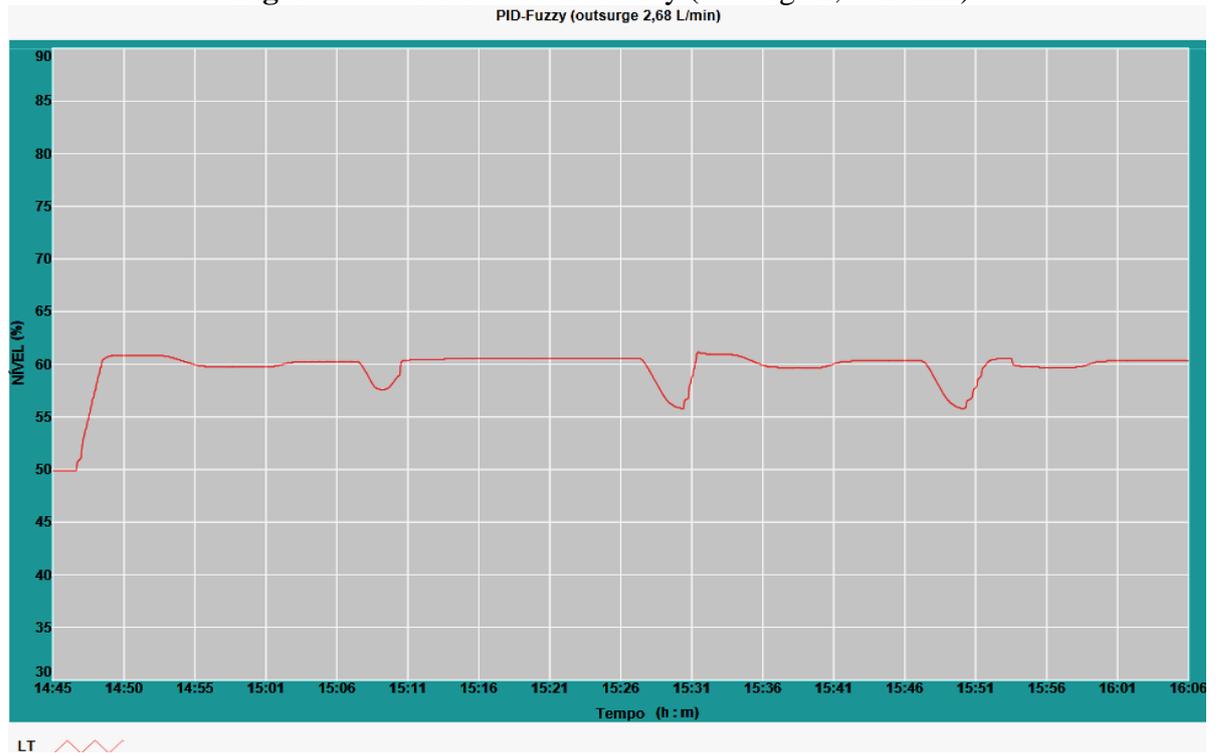


Fonte: Autor.

Semelhante à situação que fora imposta ao Controlador Simples e ao Controlador PID, também foi aplicada ao Controlador PID-Fuzzy, partindo do nível de água em 50%, foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingida a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *outsurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 2,68 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 55.

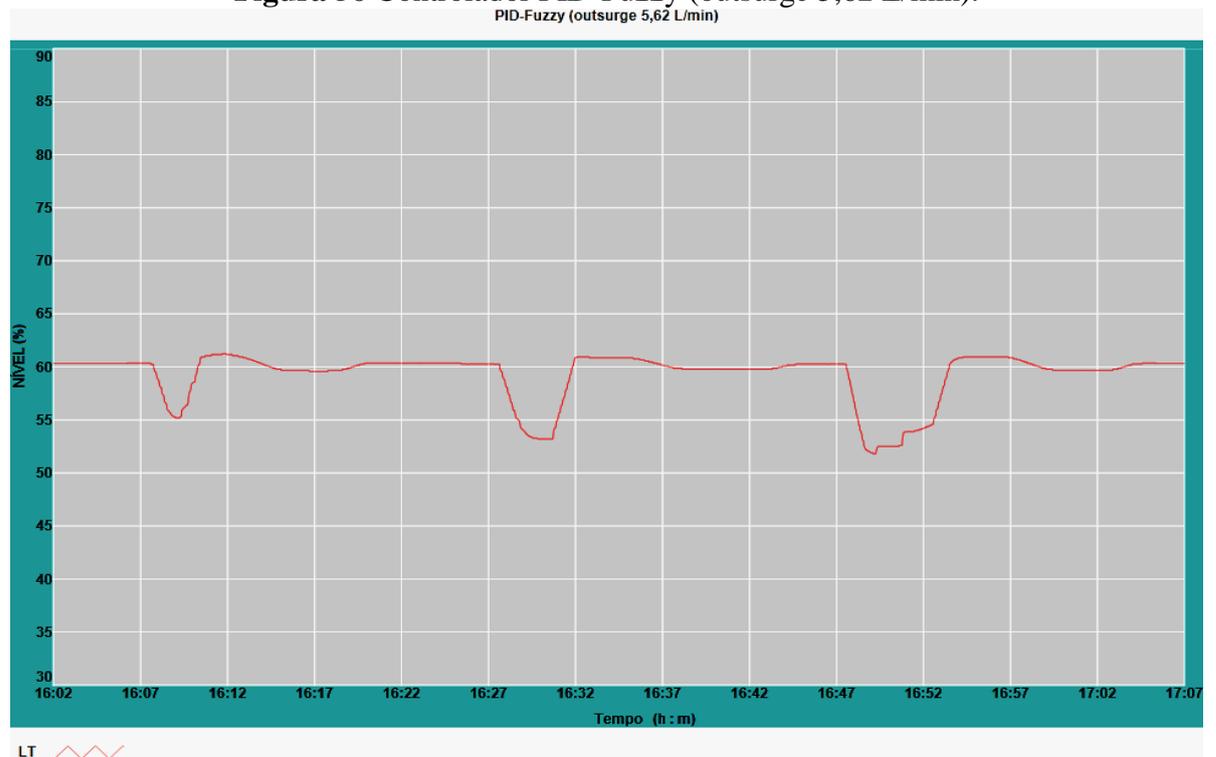
Figura 55 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 2,68 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 outros *outsurges* com uma vazão de aproximadamente 5,62 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 56.

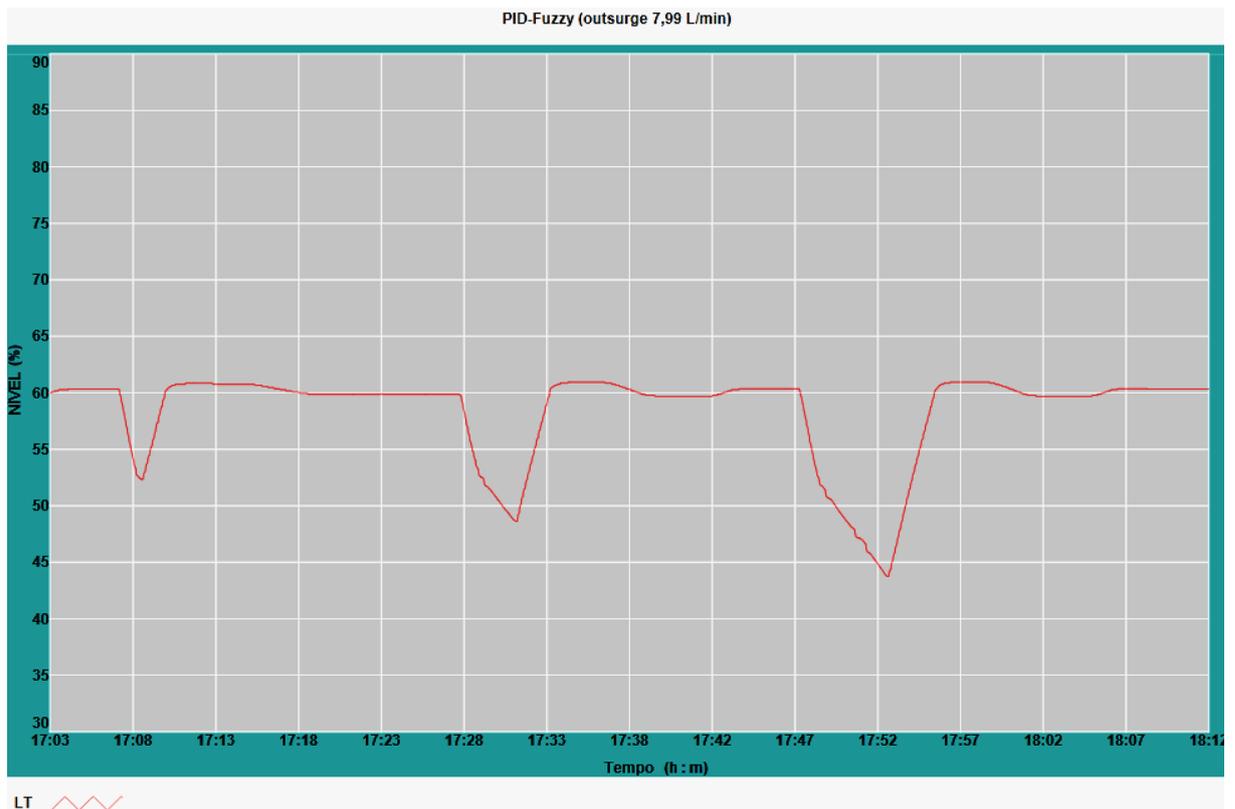
Figura 56 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 5,62 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 *outsurges* finais aplicados ao Controlador PID-Fuzzy, com uma vazão de aproximadamente 7,99 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 57.

Figura 57 Controlador PID-Fuzzy (outsurge 7,99 L/min).

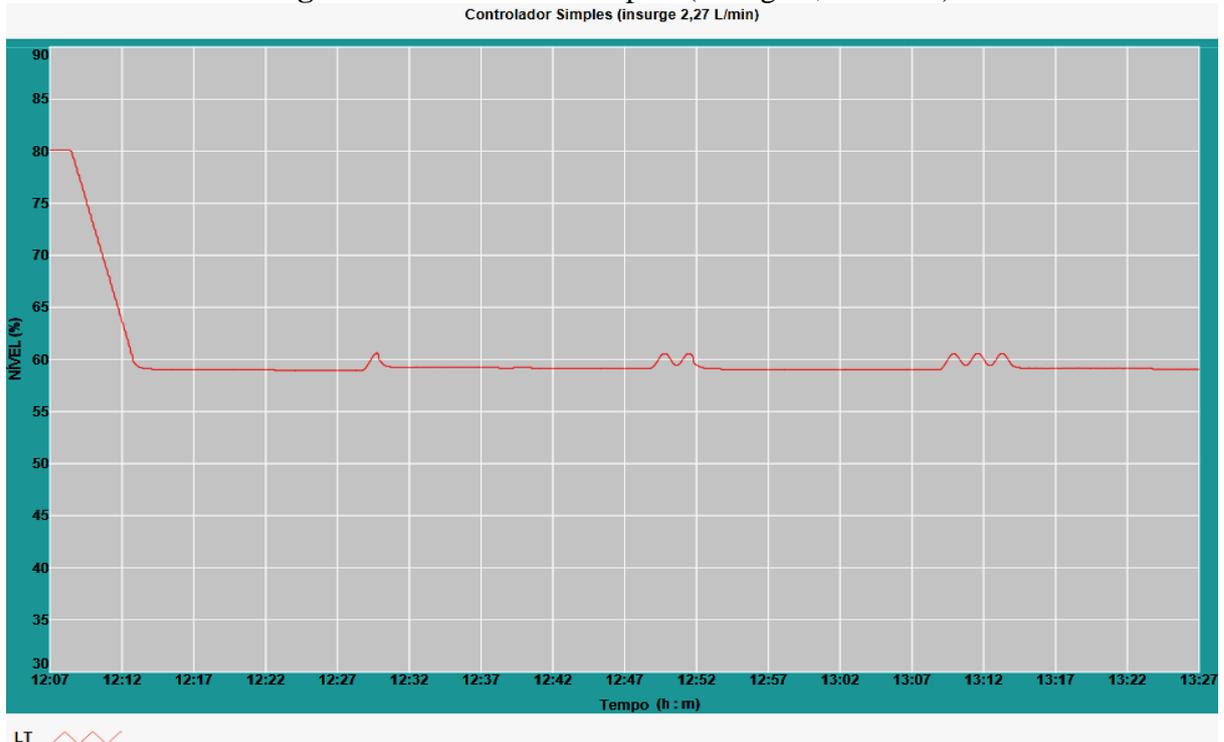


Fonte: Autor.

Depois do *outsurge*, foram aplicados de forma semelhante os *insurges*. Primeiramente ao Controlador Simples, partindo do nível de água em 80%, foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingida a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *insurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 2,27 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 58.

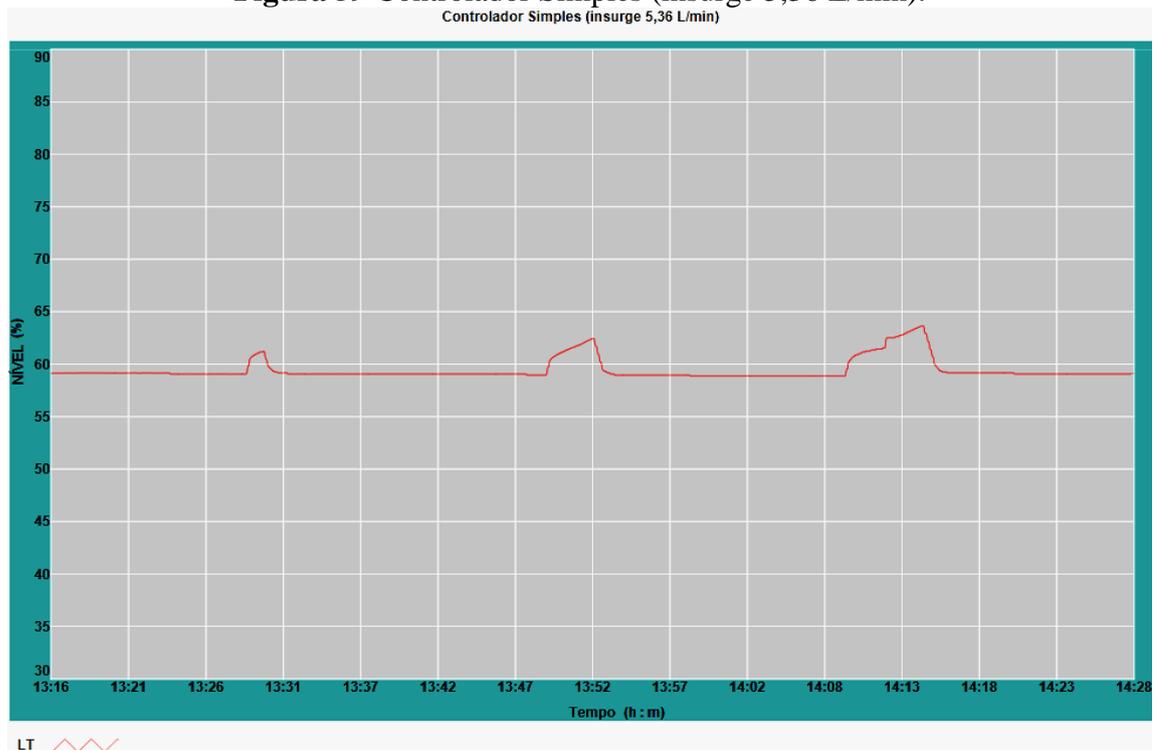
Figura 58 Controlador Simples (insurge 2,27 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 outros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 5,36 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 59.

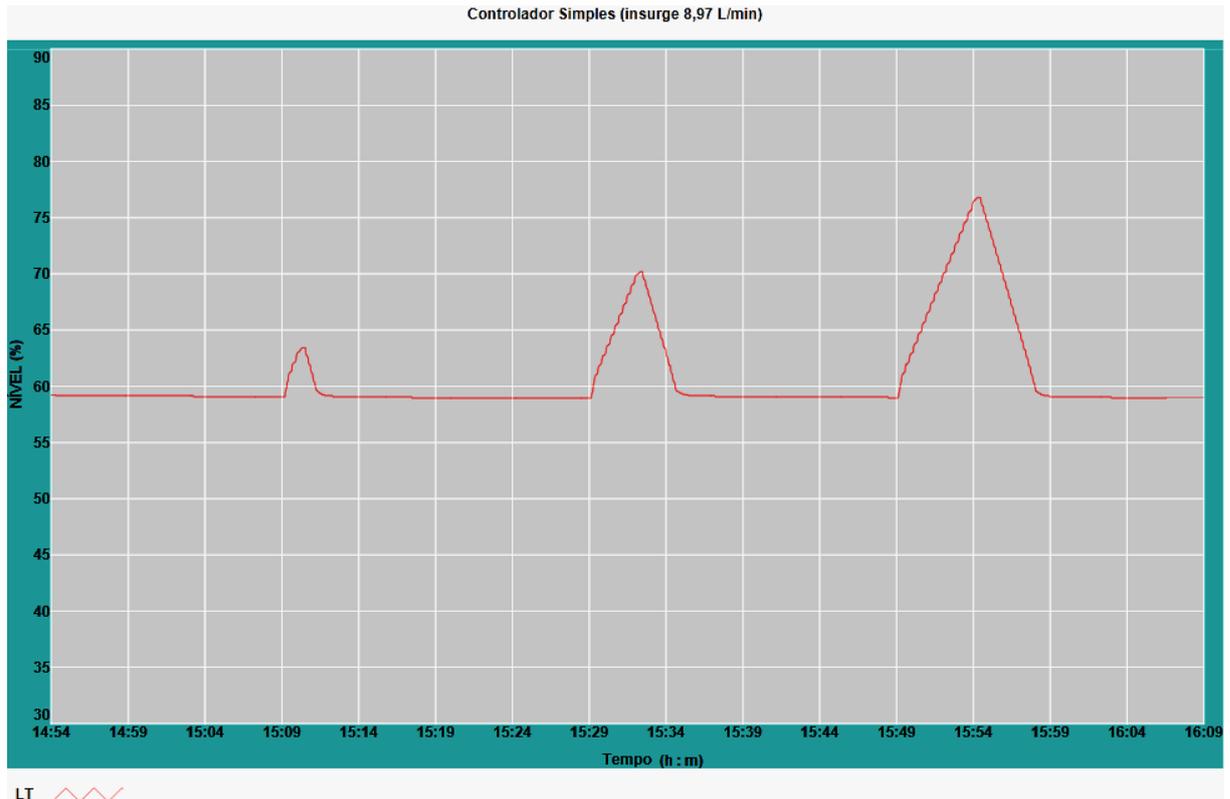
Figura 59 Controlador Simples (insurge 5,36 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 *insurges* finais aplicados ao Controlador Simples, com uma vazão de aproximadamente 8,97 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 60.

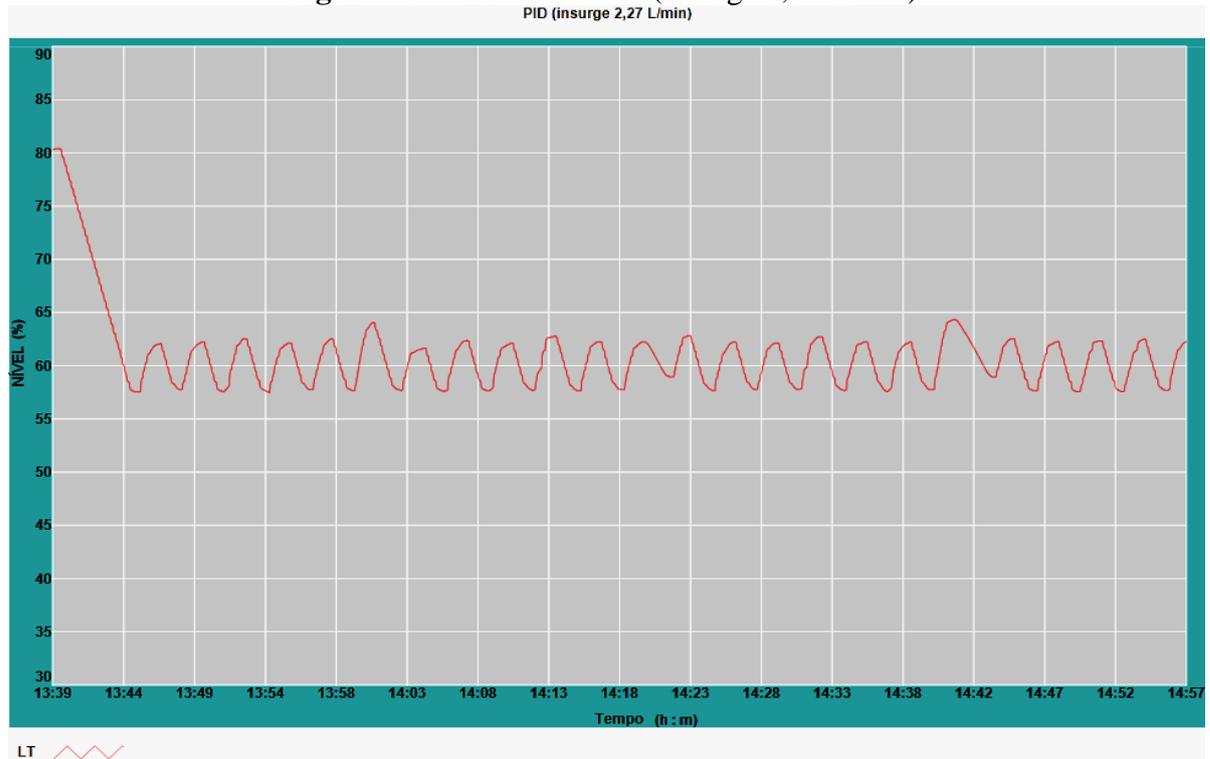
Figura 60 Controlador Simples (insurge 8,97 L/min).



Fonte: Autor.

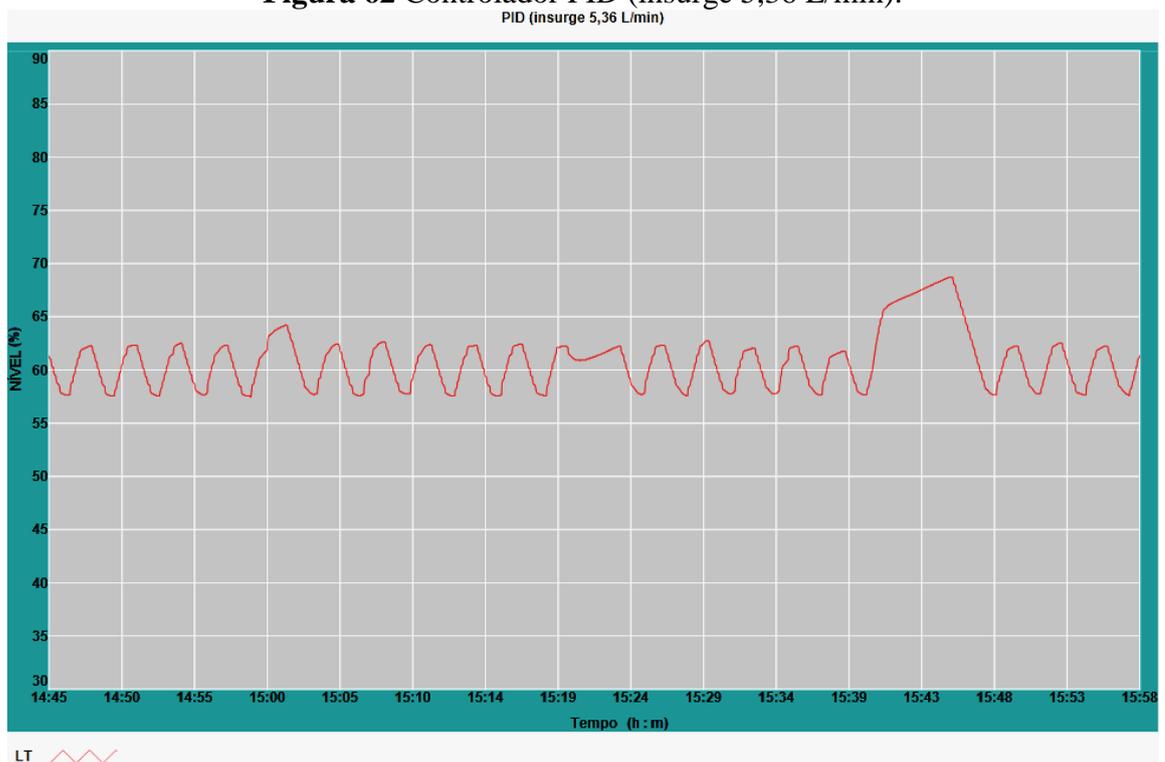
Semelhante à situação que fora imposta ao Controlador Simples, as mesmas condições foram aplicadas ao Controlador PID, partindo do nível de água em 80%, foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingida a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *insurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 2,27 L/min, atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 61.

Figura 61 Controlador PID (insurge 2,27 L/min).

Fonte: Autor.

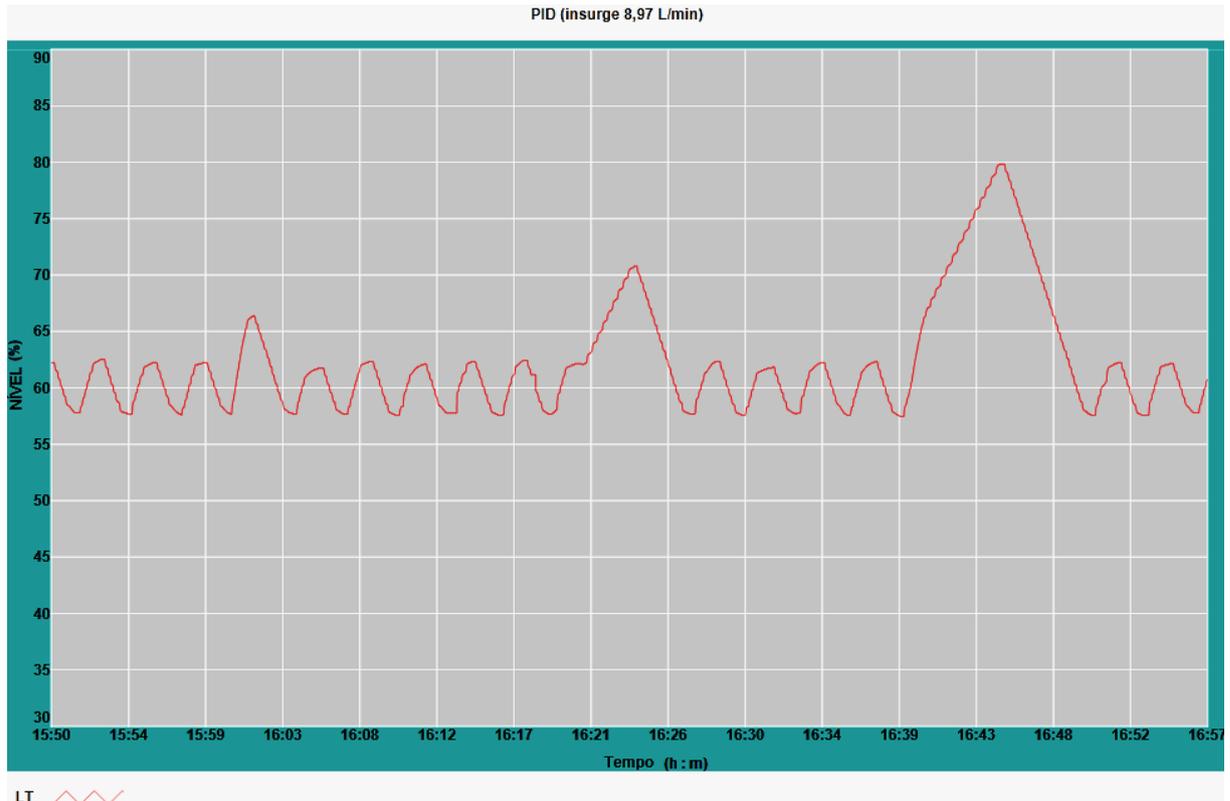
Os 3 outros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 5,36 L/min, atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 62.

Figura 62 Controlador PID (insurge 5,36 L/min).

Fonte: Autor.

Os 3 *insurges* finais aplicados ao Controlador PID, com uma vazão de aproximadamente 8,97 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 63.

Figura 63 Controlador PID (insurge 8,97 L/min).

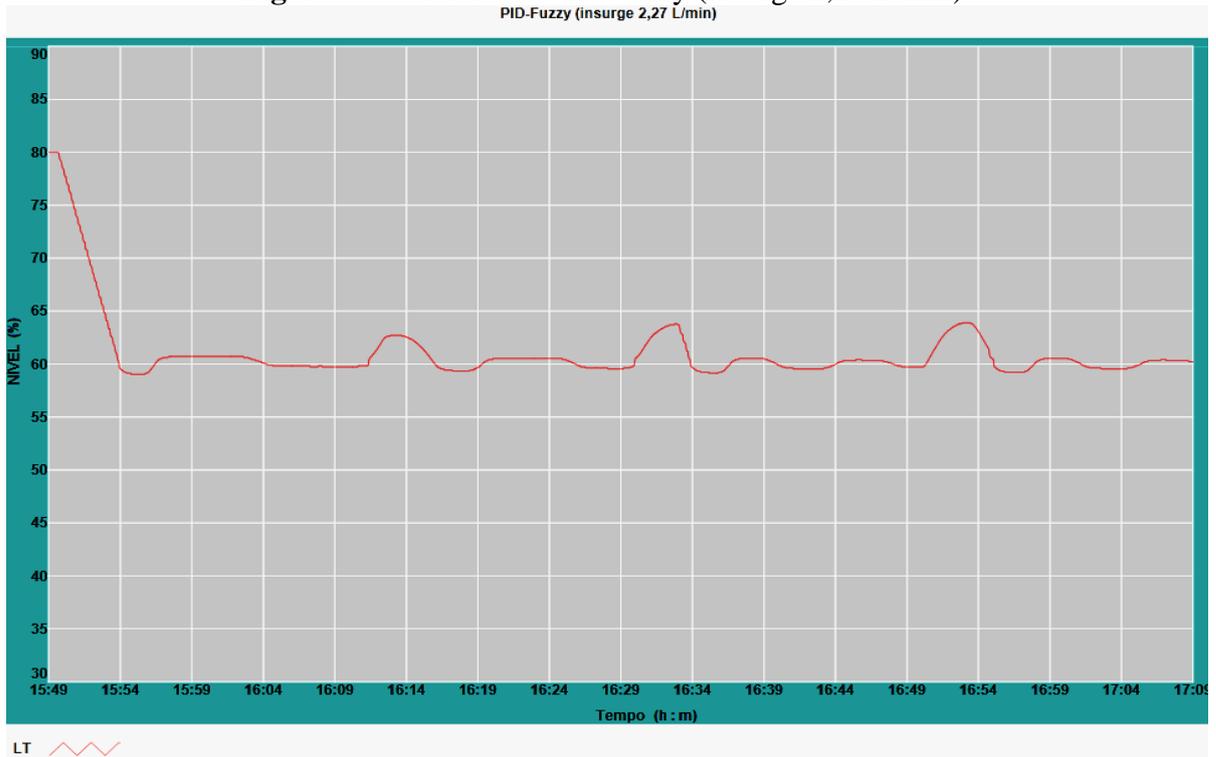


Fonte: Autor.

Semelhante situação que fora imposta ao Controlador Simples e ao Controlador PID, também foi aplicada ao Controlador PID-Fuzzy, partindo do nível de água em 80%, foi definido um *setpoint* em 60%, depois de atingida a estabilidade por cerca de 20 minutos, 9 *insurges*, intercalados também de 20 minutos de estabilidade, foram provocados.

Os 3 primeiros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 2,27 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 64.

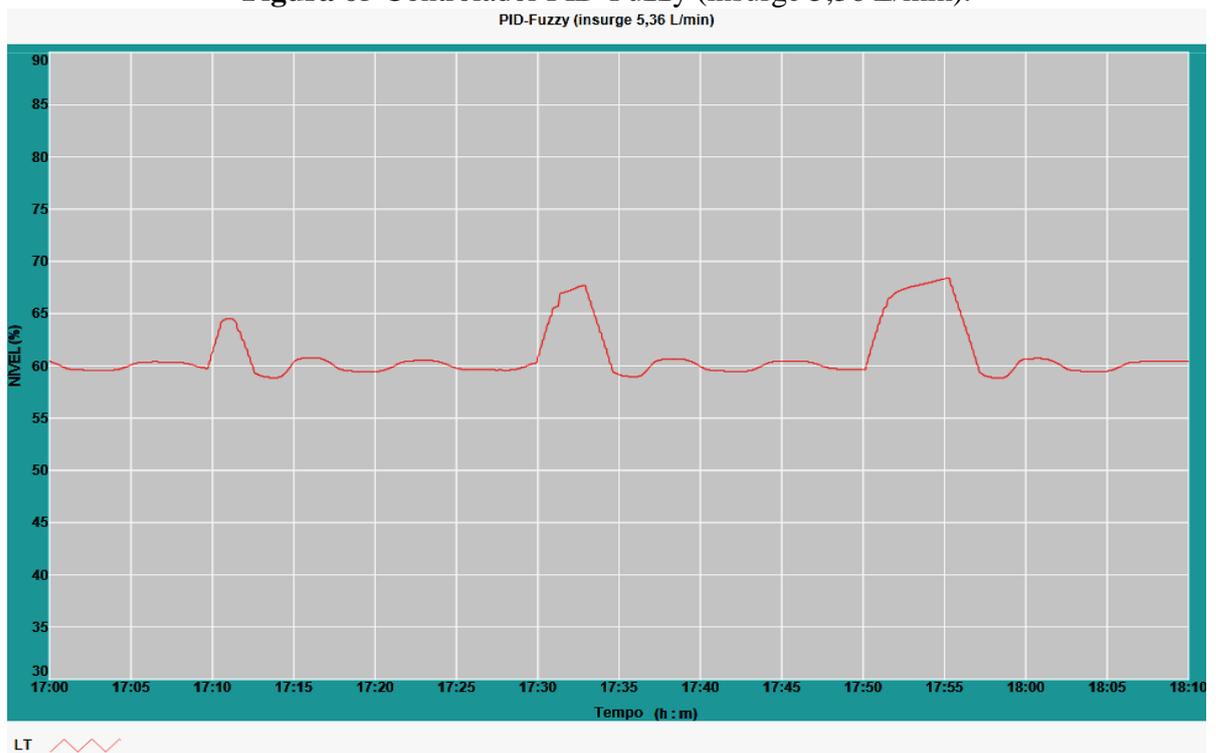
Figura 64 Controlador PID-Fuzzy (insurge 2,27 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 outros *insurges* com uma vazão de aproximadamente 5,36 L/min, atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 65.

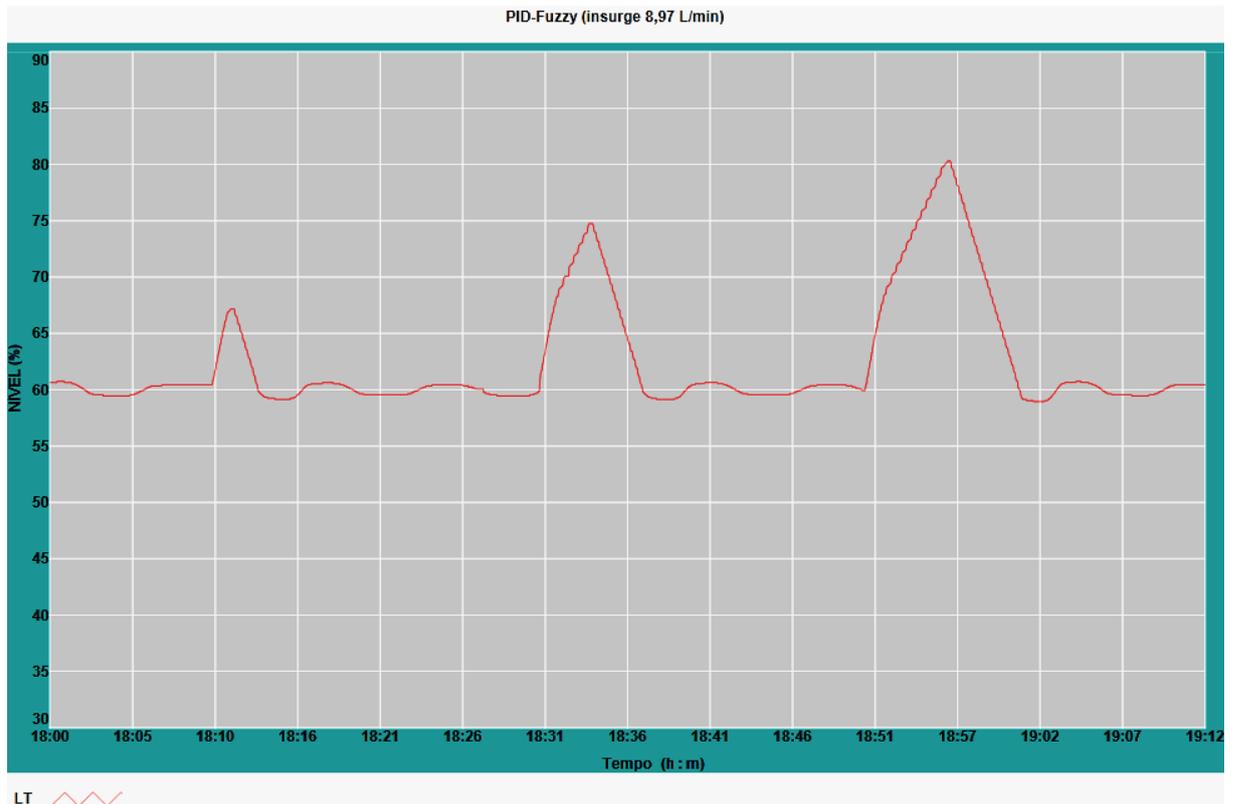
Figura 65 Controlador PID-Fuzzy (insurge 5,36 L/min).



Fonte: Autor.

Os 3 *insurges* finais aplicados ao Controlador PID, com uma vazão de aproximadamente 8,97 L/min atuaram com uma duração de 1min, 3min e 5min, intercalados como mostra a Figura 66.

Figura 66 Controlador PID-Fuzzy (insurge 8,97 L/min).



Fonte: Autor.

De um modo geral, observa-se que a resposta do SP1 corresponde bem ao que se espera em um pressurizador de um PWR convencional. O comportamento dos vários controladores são também semelhantes aos obtidos nos testes dos *setpoints*. Em seguida, estes resultados serão comentados em mais detalhes.

5.2 Análise do Controlador PID-Fuzzy no Sistema Planta 1 (SP1)

Analisando da Figura 49 a 66 dos resultados da validação experimental e comparando-as, pode-se afirmar que o Controlador Simples, dentre os 3 controladores, é o que atinge a estabilidade mais rápido quando o *outsurge* é 2,68 L/min (Figura 49), e, o *insurge* é 2,27 L/min (Figura 58). Mas a precisão não é ajustada em relação ao *setpoint* no tempo como pode ser observado na Figura 49, 50, 51, 58, 59 e 60. Outro fato é que o Controlador Simples, neste caso, é um modelo ON/OFF, isto é, sempre que é acionado ele utiliza o valor máximo do equipamento em que está atuando, que no caso são os dois motores do SP1. Então ativado pelos sensores, e transcorrido o tempo de resposta entre o sensor e ativação do controlador, ele sempre irá funcionar na potência máxima das motobombas.

O controlador PID tem estabilidade oscilatória e por este motivo os *outsurges* de 2,68 L/min (Figura 52) e os *insurges* de 2,27 L/min (Figura 61) são quase imperceptíveis. Pode se notar na Figura 52, 53, 54, 61, 62 e 63 que a precisão do PID na média é melhor que a do Controlador Simples, pois mesmo oscilando está sempre buscando atingir o *setpoint* definido. Também, o PID não faz uso a todo instante da potência máxima das motobombas do SP1, o que significa menos desgaste e mais precisão, apesar da estabilidade oscilatória.

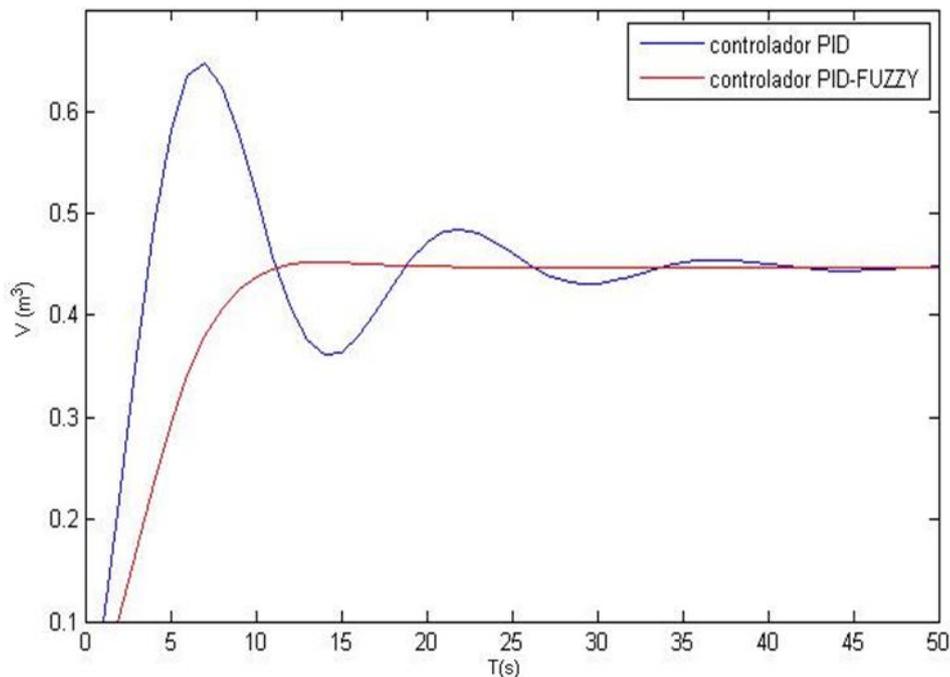
O Controlador PID-Fuzzy, dentre os 3 controladores, é o que apresenta maior precisão (Figura 55, 56, 57, 64, 65 e 66), ou seja, é o que mais se aproxima do *setpoint*. Devido a sua estrutura é o que menos exige da potência das motobombas, pois quando o nível de água está próximo do valor de referência, utiliza a resposta mínima para corrigir o erro. Ainda se nota que o Controlador PID-Fuzzy oscila, mas por se tratar de um sistema real experimental, isso se deve ao tempo de resposta entre os sensores de nível e o controlador fazendo com que este tenha que oscilar, mesmo que com baixa amplitude. Porém esta oscilação é menor que a do Controlador PID. Então, uma melhor precisão e um desgaste ainda menor em relação ao PID.

5.3 Resultados da Aplicação do Controlador PID-Fuzzy ao Código MODPRESS

No controlador PID convencional as variáveis K_p , K_i e K_d são constantes durante um transiente e no caso do PID-Fuzzy desenvolvido estas variáveis são adaptáveis em função do erro e da variação do erro em função do tempo.

Os valores constantes definidos normalmente para o K_p , K_i e K_d de um controlador PID convencional para a válvula do pressurizador do reator nuclear, serão apenas valores iniciais para o Controlador PID-Fuzzy que irá ajustar esses valores a faixa de operação desejada. Diante disso pode ser observada na Figura 67 que reproduz um experimento preliminar simples, que o Controlador PID-Fuzzy desenvolvido dá uma resposta melhor do que a obtida pelo PID convencional.

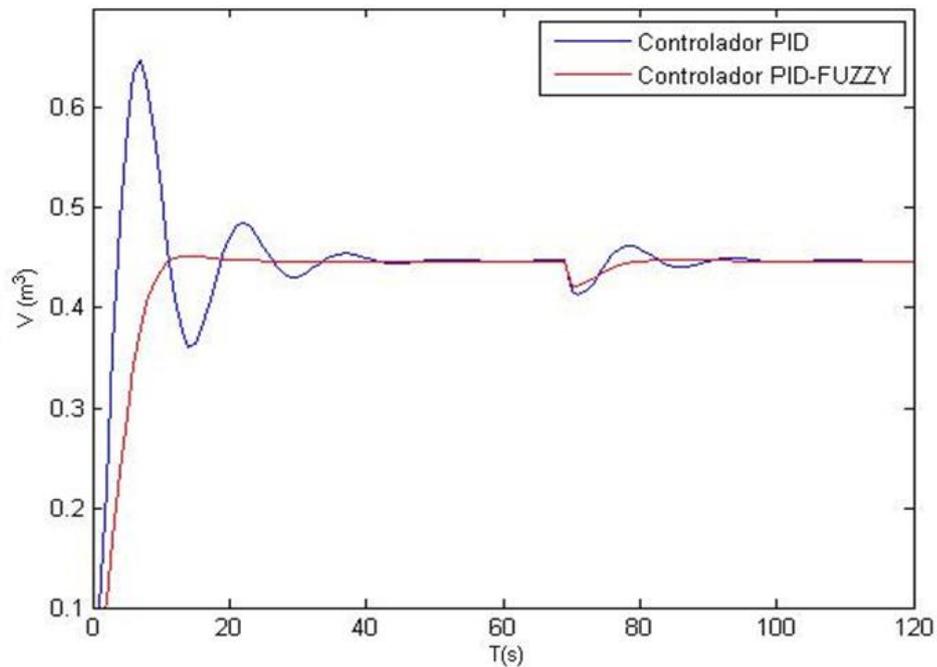
Figura 67 Resposta dos Controladores PID e PID-Fuzzy no início da operação do pressurizador.



Fonte: Autor.

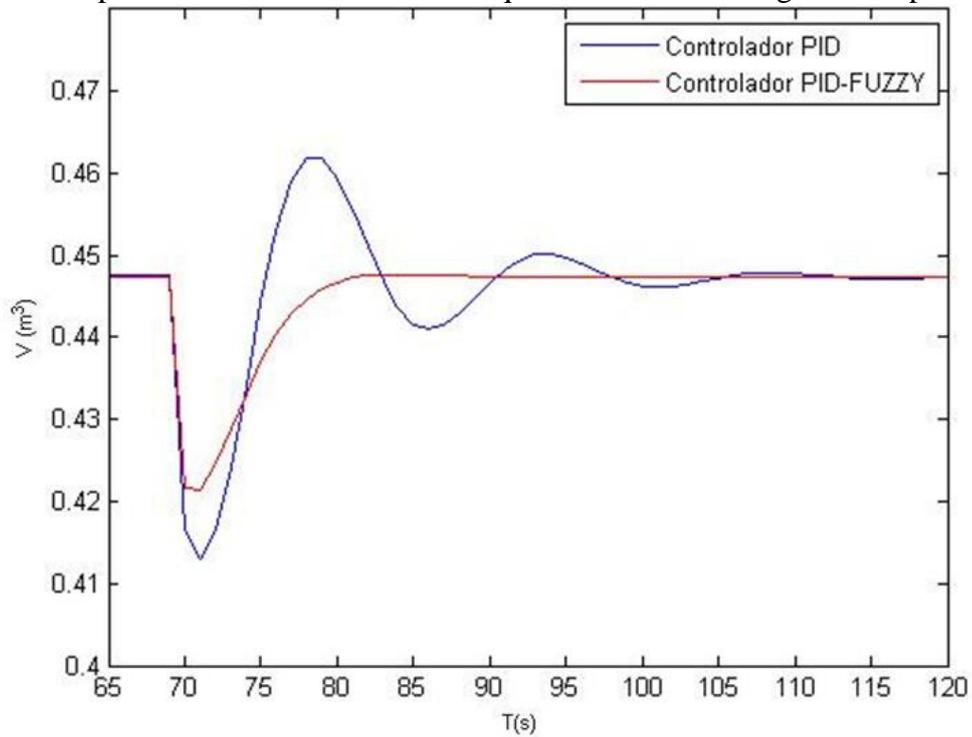
Para testar o sistema desenvolvido, foram simulados dois transientes durante a faixa de operação: um transiente com uma queda no volume da fase líquida de 5 % e outro com 50% para simular a resposta a um nível de alerta e ao nível simulado pelo código MODPRESS, respectivamente. Os resultados das simulações podem ser observados na Figura 68, 69 e 70 para um tempo de 120s.

Figura 68 Simulação da resposta do controlador a um transiente simulado.



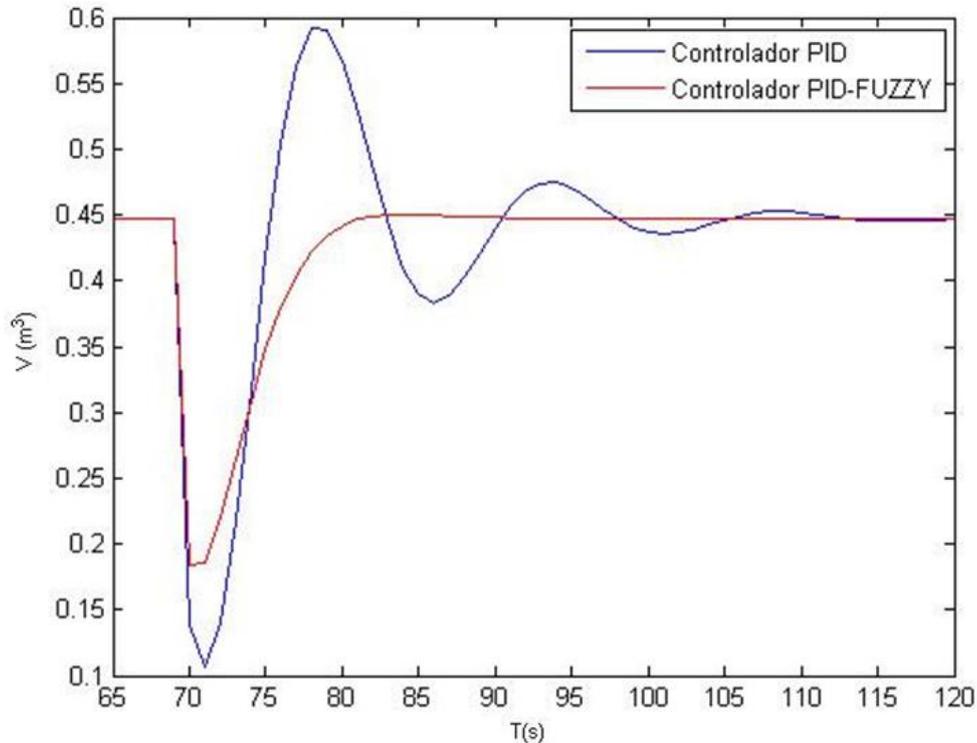
Fonte: Autor.

Figura 69 Resposta dos controladores a uma queda de volume de água correspondente a 5%.



Fonte: Autor.

Figura 70 Resposta dos controladores a uma queda de volume de água correspondente a 50%.



Fonte: Autor.

O valor definido como o *setpoint* foi de $0,44736 \text{ m}^3$, o valor da primeira queda simulada foi de $0,42499 \text{ m}^3$ o equivalente a 5% e outra foi de $0,22344 \text{ m}^3$ equivalente a 50%, em ambos os casos que a resposta do PID-Fuzzy é mais rápida ao trazer a estabilidade do sistema quando comparado ao sistema convencional que atualmente é utilizado no pressurizador de um reator PWR.

5.4 Análise do Controlador PID-Fuzzy no Código MODPRESS

Observando da Figura 67 à Figura 70 nota-se que o controlador PID-Fuzzy responde com maior rapidez em retomar o valor de referência. O Controlador PID oscila várias vezes antes de atingir o *setpoint*, pois sua resposta é muito brusca, e, por este motivo, se corrige diversas vezes até que o erro seja zerado. No caso do PID-Fuzzy, este já age de forma mais eficiente e responde de forma assintótica até atingir o valor estabelecido. Este tipo de resposta deixa o sistema mais estável e com menos *stress* mecânico, o que contribui significativamente para um pressurizador mais seguro de um reator PWR. Portanto o Controlador PID-Fuzzy é uma ferramenta poderosa para o gerenciamento e controle, contribuindo para uma maior segurança do sistema.

6 CONCLUSÕES

Levando em consideração as perturbações aplicadas ao Vaso Cilíndrico do SP1 e as respostas do Controlador Simples, Controlador PID e Controlador PID-Fuzzy, pode-se concluir que o PID-Fuzzy obteve melhor resposta e maior precisão nos *insurges* e *outsurges*. Isto é, dentre os controladores, ele apresentou melhor desempenho, permitindo que o sistema tenha mais estabilidade e menos stress mecânico devido ao fato de usar apenas a potência necessária para corrigir as variações de nível. Como foi dito, sua precisão é superior aos demais o que incorpora a este tipo de controlador uma maior confiabilidade e segurança nas aplicações.

Nas perturbações aplicadas ao Código MODPRESS a conclusão obtida foi que, mais uma vez, o Controlador PID-Fuzzy demonstrou ser a melhor opção, fornecendo uma resposta mais rápida e suave, atingindo os valores de referência de forma menos brusca, e, permitindo um melhor controle do pressurizador. Então, após toda esta verificação, o Controlador PID-Fuzzy aplicado ao pressurizador mostrou ser uma técnica simples, robusta e uma ótima escolha para uma melhor condução e segurança de um Reator PWR.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMENDOLA, M.; SOUZA, A. L.; BARROS, L. C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no MATLAB 6.5**. FEAGRI & IMECC/ UNICAMP, p. 1-44, 2005.

ARRUDA, L. V. R.; SWIECH, M. C. S.; NEVES-JR., F.; DELGADO, M. R. **Um método evolucionário para sintonia de controladores PI/PID em processos multivariáveis**. Sba Controle & Automação, v.19, n.1, 2008.

BARROSO, A. C. O. **Notas pessoais**, IPEN/CNEN, 2004.

BRUEL, R. N. **Análise de sensibilidade de um modelo teórico do pressurizador**, **Dissertação de Mestrado em tecnologias energéticas nucleares**, IPEN (USP), 1997.

CHANG, T. F. **A Thermal Hydraulics System Simulation Model for Reactor, Boiler and Heat Transport System (SOPHT)**, CNS-37-2, University of Chicago Metallurgical Laboratory, 1977.

COSTA, S. P. **Estudo de Sensibilidade no Pressurizador do Reator IRIS Utilizando Redes Neurais Artificiais**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. PROTEN - DEN (UFPE), 2010.

CFOL - Curso de Formação de Operadores Licenciáveis. **Sistema de Refrigeração do Reator – Módulo III, Controle de Pressão e Nível do Pressurizador e Análise de Falhas de Instrumentação**. Gerência de Treinamento – GTR. O, Apostila. ELETRONUCLEAR, 1999.

DRIANKOV, D.; HELLENDORN, H.; REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**. New York, USA, Publisher Springer-Verlag, p. 316, 1993.

FERRARIN, M.; PALAZZO, F.; RENIER, R.; QUINTERN, J. **Model-based control of FES-induced single joint movements**. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, v. 9, n. 3, p. 245-247, 2001.

GOEMANS, T. **Netherlands Experimental Pressure vessel Tecnological**. University Neratoon industries, tese de Doutorado, em Delf University of Tecnological Labotory for Nuclear Power Engineering, Netherlands, 1987.

GUERRA, R. **Projeto e simulação do controle de atitude autônomo de satélites usando lógica nebulosa**. (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 190 p. 1998.

ISMAEL, M.-M.; YU, T. **An effective fuzzy PD control for high precision servo mechanisms**. In: Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), v. 1, p. 134–138, 2006.

KOLAVENNU, S., PALANKI, S., COCKBURN, J.C. **Robust controller design for multimodel H2/Hinfinity synthesis**. Chemical Engineering Science, v. 56 (August (14)), p. 4339–4349, 2001.

LEE, C. C. **Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller (part i)**. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v. 20, n.2, p. 404-418, 1990.

LIU, C., PENG, J., ZHAO, F.; LI, C. **Design and optimization of fuzzy-PID controller for the nuclear reactor power control**. Nuclear Engineering and Design, v. 239, p. 2311–2316, 2009.

LUO, W., PAN, S., MA, Z., LAN. **Identification-free adaptive optimal control based on switching predictive models**. In: Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, vol. 7129, Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration, p. 71291J, 2008

LUPU, C.; PETRESCU, C.; TICLEA, A.; DIMON, C.; UDREA, A.; IRIMIA, B. **Multi-model system with nonlinear compensator blocks**. Polytechnic University of Bucharest Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering, v. 70, n. 4, 2008.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. A. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. International Journal Man - machine Studies, v. 7, p. 1-13, 1975.

NAVAHANDI, A. M.; CHIABBANDY, R.E.;AMINDON, J.L. **A comparison of equilibrium models in a Water Reactor Pressurizer**. Trans. Am. Nucl. Soc., Winter Meeting: 659,1967.

SABOYA Jr., F.; ALVES, M. G.; PINTO, W. D. **Assessment of failure susceptibility of soil slopes using fuzzy logic**. Engineering Geology, 86, p. 211-224, 2006.

SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica nebulosa**. In: ESCOLA DE REDES NEURAIIS, 5., 1999, São José dos Campos. Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais. ITA - SP, 1999.

SILVA, G. L. **Análise de sensibilidade no comportamento dinâmico de pressurizadores de reatores PWR**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. PROTEN - DEN (UFPE), 2007.

TANSCHKEIT, R. **"Sistemas Fuzzy"**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI'03), 6. Bauru. Minicurso,p.35, 2003.

TEIXEIRA Jr., C. A. **Análise comparativa entre os controladores fuzzy PD+I e PID convencional**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação. UFRSA, 2014.

U.S.NRC, United States Nuclear Regulatory Commission. **Backgrounder on the Three Mile Island Accident**. NRC Library, Document Collections, Fact Sheets, February, 2013. Disponível em: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>>. Acesso em: 04 ago. 2015.

WOISKI, E. R. **Simulação do modelo termodinâmico de pressurizador típico do PWR em regime transiente por meio do programa CSMP**, Dissertação de Mestrado, IPEN – SP, 1981.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZOU, T.; WANG, X.; LI, S.Y.; ZHU, Q.M. **A mixed logic enhanced multi-model switching predictive controller for nonlinear dynamic process**. *Control and Intelligent Systems*, v. 35, n. 2, p. 154–161, 2007.