
IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES PID UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Francisco Guerra Fernandes Júnior
guerra@dca.ufrn.br

José Soares Batista Lopes
jsoares@dca.ufrn.br

André Laurindo Maitelli
maitelli@dca.ufrn.br

Fabio Meneghetti U. de Araújo
meneghet@dca.ufrn.br

Luiz Affonso H. Guedes de Oliveira
affonso@dca.ufrn.br

DCA-PPGEE-UFRN
Caixa Postal 1524
CEP 59072-970 – Natal, RN, Brasil

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo a implementação de algoritmos de controle do tipo PID com sintonia de seus parâmetros para o controle de nível. O projeto consiste na sintonia de um controle convencional PID para controlar o nível de um sistema de tanques acoplados, no qual o nível a ser controlado é o nível do tanque 2. A simulação da planta foi implementada no LabView (computador 1), já o PID foi implementado num CLP e o supervisório implementado no Intouch (computador 2). Foi feita uma comunicação entre os computadores e o CLP, e depois realizados os experimentos.

Palavras Chaves: Sintonia de controlador PID, Método da Sensibilidade Limite Modificado, Método da Curva de Reação, Método Fuzzy, Controle de nível.

Abstract: The present work has for objective the implementation of PID control algorithms with tuning of its parameters for the level control. The project consists of the tuning of conventional PID controller to the level of a system of coupled tanks, in which the level to be controlled is the level of tank 2. The simulation of the plant was implemented in the LabView (computer 1), already the PID was implemented in an implemented CLP and the supervisory one in the Intouch (computer 2). The communication between the computers and the CLP was made, and later carried through the experiments.

Keywords: Tuning of PID controllers, Method of Sensitivity Modified Limit, Fuzzy Method, level control.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde tempos remotos. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem, e ainda presente em muitos processos, apresenta a necessidade de um operador humano que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade. Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, isso foi possível a partir do desenvolvimento científico e

tecnológico, que dentre os diversos conhecimentos nos trouxe as teorias clássicas de controle. Contudo, com o avanço da tecnologia, os sistemas e processos ficaram ainda mais complexos, tornando ineficaz, ou até mesmo impossíveis, a utilização dos controladores convencionais obtidos a partir da teoria clássica. Isso desencadeou uma busca por novos métodos e estratégias de controle tais como: controle multivariável, controle adaptativo, controle preditivo, e sistemas de controle inteligente.

A utilização de sistemas inteligentes em controle tem despertado grande interesse nos últimos anos. Dentre as técnicas mais utilizadas estão a Lógica Nebulosa (“fuzzy”) e as *Redes Neurais Artificiais (RNA)*.

Existe um grande número de métodos para a sintonia automática, os quais requerem informações variadas sobre o processo. Entre os métodos de sintonia automática dos parâmetros do controlador tem-se: Método da Sensibilidade Limite, Método da Curva de Reação e Método Fuzzy. Os métodos clássicos foram implementados no Matlab por questão didática e análise dos resultados. O método Fuzzy foi implementado no próprio supervisório. Os parâmetros foram inseridos no controlador PID implementado num CLP SLC 5/03 da Allen Bradley. O controlador então faz o controle de nível do sistema simulado no LabView. O projeto também contém um supervisório implementado no Intouch e que se comunica com o CLP, de onde são retirados os valores das variáveis do processo. Com o supervisório pode-se visualizar todo o processo na tela do computador e também a partir dele são inseridos o valor do nível desejado do processo (Set Point) e os parâmetros do controlador PID.

2 MÉTODOS DE SINTONIA DE CONTROLADORES PID

2.1 Método da Sensibilidade Limite

Para o melhor entendimento deste método tem-se a descrição do Método da Sensibilidade Limite propostas por Ziegler-Nichols (1942):

Este método, baseado no ajuste de uma malha fechada até se obterem oscilações com amplitude constante, utiliza um conjunto de fórmulas para determinar os parâmetros do controlador, as quais requerem duas medidas do sistema: o Ganho crítico (G_u : o ganho mínimo que torna o processo criticamente estável), e o período de oscilação correspondente, P_u .

Procedimento para a Calibração dos Parâmetros do Controlador:

1. Reduzir as ações integral e derivativa ao seu efeito mínimo;
2. Iniciar o processo com ganho reduzido;
3. Aumentar o ganho até que a variável controlada (saída do sistema) entre em oscilações com amplitude constante, enquanto se provocam pequenas perturbações no sistema. Anotar o ganho, G_u , e o período de oscilação P_u .

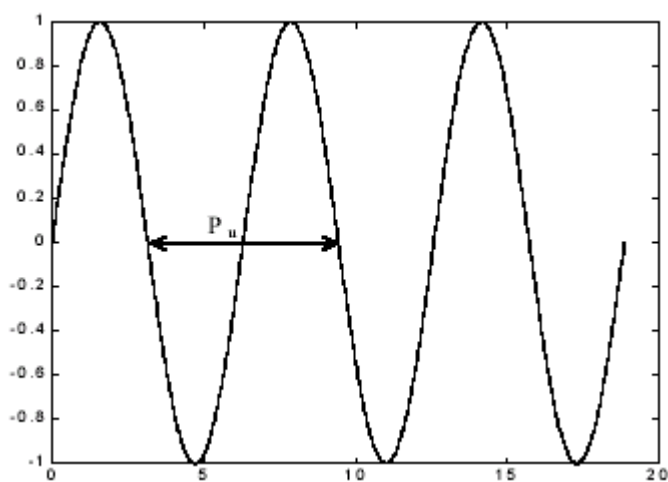


Figura 1 – Simulação da planta em malha fechada pelo método da sensibilidade limite

Com a obtenção destes valores, pode-se calcular os parâmetros do controlador com base nas seguintes fórmulas:

Tabela 1 - Valores do controlador PID pelo método da sensibilidade limite

Controlador	Fórmulas		
P	$K_P = 0.5G_u$		
PI	$K_P = 0.45G_u$	$T_i = P_u/1.2$	
PID	$K_P = 0.6G_u$	$T_i = P_u/2.0$	$T_d = P_u/8$

No entanto, este método de calibração apresenta as seguintes desvantagens:

1. As fórmulas acima descritas não garantem uma resposta ótima;
2. Nem todos os sistemas podem entrar em oscilação, ou não é desejável.

2.2 Método da Curva de Reação

Segundo COUGHANOWR & Koppel (1978) este método consiste, com o sistema em malha aberta, aplicar uma perturbação degrau (amplitude M) na entrada de referência (SP) e obter a curva reação do processo em formato sigmoidal (em situação contrária o método não é aplicável) como ilustrado na figura seguinte.

A curva em S pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso L e a constante de tempo T , sendo estas determinadas se passar uma tangente pelo ponto de inflexão da curva. Nos pontos onde a tangente intercepta o eixo das abscissas e a linha horizontal com ordenada k , obtemos L e T , respectivamente.

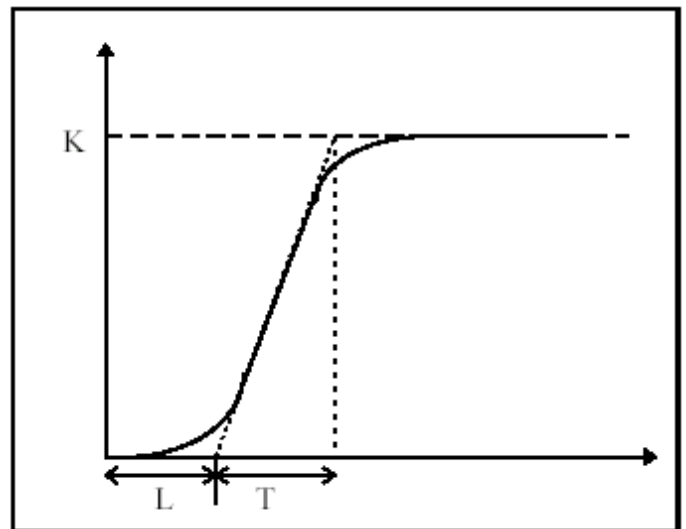


Figura 2 – Simulação da planta em malha aberta pelo método da curva de reação

Uma vez obtidos experimentalmente L , T e N (declive máximo = K/T), podemos recorrer à tabela seguinte, conforme relações propostas na literatura por Cohen & Coon ou por Ziegler-Nichols (ver em Arruda e Barros (2003) e Berto, Sá e Silveira (2004)), para determinar os valores dos parâmetros dos controladores.

Tabela 2 – Valores do controlador PID pelo método da curva de reação

Controlador	Fórmulas		
P	$K_P = M/(NL)$		
PI	$K_P = 0.9 M/(NL)$	$T_i = 3.3L$	
PID	$K_P = 1.2 M/(NL)$	$T_i = 2L$	$T_d = L/2$

2.3 Método Fuzzy

A lógica Fuzzy pode ser utilizada para a implementação de controladores, aplicados nos mais variados tipos de processos. Esta técnica incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle, comportando-se de forma similar a um raciocínio dedutivo, controlando processos industriais com características não-lineares através de experiências e inferências de relações entre as variáveis da planta descritas no controlador. A utilização de regras nebulosas (regras Fuzzy e variáveis linguísticas) confere ao sistema de controle várias vantagens, incluindo:

- 1- Simplificação do modelo do processo;
- 2- Melhor tratamento das imprecisões inerentes aos sensores utilizados;
- 3- Facilidade na especificação das regras de controle, em linguagem próxima à natural;
- 4- Satisfação de múltiplos objetivos de controle e;
- 5- Facilidade de incorporação do conhecimento de especialistas humanos.

Contudo, tanto as leituras de sensores quanto os sinais esperados pelos atuadores do sistema de controle não

pertencem à linguagem desta lógica, fazendo-se necessário que conversões da lógica aritmética para a lógica Fuzzy sejam realizadas. Assim, estes tipos de sistemas possuem elementos adicionais denominados “fuzzificador” e “defuzzificador” e estão posicionados na entrada e saída do sistema de controle, respectivamente.

Estes elementos são responsáveis por transformar as medidas obtidas dos sensores em conjuntos Fuzzy (fuzzificador) e em transformar os conjuntos obtidos na saída do controlador em valores que pertençam a sistemas analógicos de controle para o processo (defuzzificação).

A figura a seguir mostra a estrutura de um sistema Fuzzy:

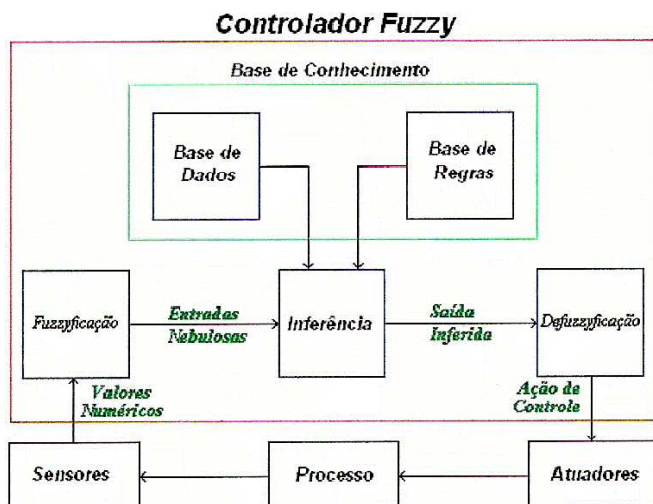


Figura 3 –Estrutura de um sistema Fuzzy

A interface de fuzzificação é responsável pela identificação dos valores numéricos fornecidos pelos sensores, normalizando estes valores em um universo de discurso padronizado formando um conjunto nebuloso (Fuzzy) a ser inserido no bloco seguinte da figura 3. A base de conhecimento consiste de uma base de dados e uma base de regras. É importante que existam uma quantidade de regras prédefinidas necessárias para mapear totalmente as diversas combinações possíveis, garantindo que haverá uma regra específica ativa qualquer que seja a entrada do sistema. O procedimento de inferência verifica o grau de compatibilidade entre os fatos e as regras, determinando o grau de compatibilidade global da premissa de cada regra e, por fim, determinando o valor da conclusão global (ação de controle) a partir da agregação dos valores obtidos em função do grau de compatibilidade da regra com os dados. A defuzzificação obtém uma única ação de controle a partir do conjunto nebuloso obtido, o procedimento compreende a identificação do domínio das variáveis de saída num único universo de discurso e com a ação de controle nebulosa inferida, uma ação de controle não-nebulosa é tomada.

Os modelos de sistemas fuzzy podem ser divididos em dois tipos: os clássicos e os de interpolação. Os clássicos se caracterizam pela conclusão de cada regra especificar um termo nebuloso dentro de um conjunto fixo de termos, sendo estes termos, conjuntos nebulosos convexos representados graficamente por funções com: triângulos, trapézios e funções de sino. Os modelos clássicos mais comuns são o modelo de Mamdani e o modelo de Larsen. O sistema nebuloso por interpolação se caracteriza por apresentar uma conclusão através de uma função estritamente monotônica, usualmente diferente para cada regra. A seguir dois modelos de sistema por interpolação:

- Takagi-Sugeno: a função que caracteriza este modelo é baseada em uma combinação linear de entradas, tendo como parâmetros um conjunto constante;

- Tsukamoto: Geralmente a função é não linear tendo como domínio os possíveis graus de compatibilidade entre cada premissa e as entradas.

Em ambos os modelos de sistema por interpolação, obtém-se para cada regra, um único valor para a variável de controle. Finalmente, uma ação de controle global é obtida, fazendo-se uma média ponderada dos valores individuais obtidos, onde cada peso é o próprio grau de compatibilidade entre a premissa da regra e as entradas, normalizado.

O controlador seguirá o modelo de Takagi-Sugeno e implementa uma rede de 2 controladores PID para pontos de operação estrategicamente pré-definidos de acordo com o sistema a ser controlado.

O modelo de *Takagi-Sugeno* exige que todos os termos nebulosos sejam funções monotônicas e que as conclusões das regras sejam dadas por funções. Assim, o método de interpolação obtém um valor preciso e ponderado relativo à ação de controle para cada PID. Fazendo-se necessário que, para os valores obtidos para cada PID, sejam agregados em uma única saída, através de uma outra média ponderada.

Baseado na teoria do modelo *Takagi-Sugeno* tem-se a seguinte estrutura matemática para o sistema com apenas dois conjuntos nebulosos. E seguindo três regras nebulosas para três pontos de operação, ou seja, escalonamento entre dois controladores PID (PID₁ e PID₂), descritas abaixo:

$$PID_1(s) = Kp_1 + Ki_1/s + Kd_1s \quad (2.1)$$

$$PID_2(s) = Kp_2 + Ki_2/s + Kd_2s \quad (2.2)$$

O PID₁ foi projetado no ponto de operação 5cm de nível do tanque 2 e o PID₂ projetado no ponto de operação 25cm de nível do mesmo tanque.

Os parâmetros para cada ponto de operação foram obtidos a partir do Método da Curva de Reação e ajustes heurísticos.

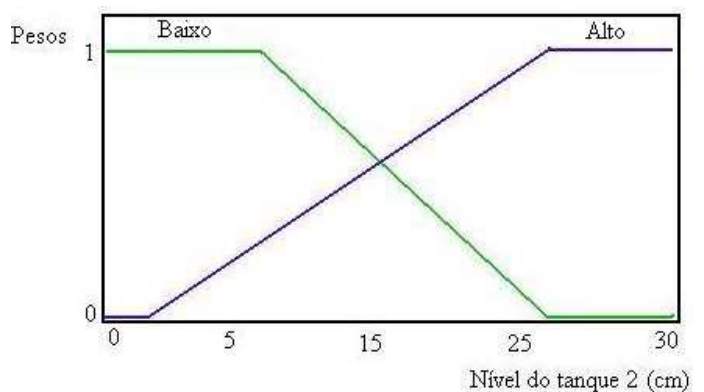


Figura 4 - exemplo de dois conjuntos nebulosos (baixo e alto).

O conjunto nebuloso foi obtido heurísticamente, resultando num conjunto que deu um resultado melhor que os dos métodos descritos nas seções anteriores.

A função de transferência do controlador é dada, no domínio da frequência, por:

$$D(s) = U(s)/E(s) = (\alpha PID_1 + \beta PID_2) / (\alpha + \beta) \quad (2.3)$$

Sendo α o peso do conjunto nebuloso baixo e β o do conjunto nebuloso alto.

As regras nebulosas são descritas a seguir:

1. Se Nível = baixo então α = ativar e β = desativar;
2. Se Nível = alto então α = ativar e β = ativar;

Assim, pode-se afirmar que ao final do processo de formulação matemática houve o desenvolvimento de um controlador PID com escalonamento de ganhos, que seus parâmetros se ajustam de forma inteligente de acordo com as funções de ponderações pré-definidas. Ou seja, uma rede de controladores lineares locais com ponderações *fuzzy* é matematicamente equivalente a um controlador linear de mesma estrutura em que os ganhos seguem as mesmas regras de ponderação *fuzzy*.

3 INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL

O crescente avanço tecnológico nas mais diversas áreas do conhecimento humano tem se mostrado, nos últimos anos, surpreendente. A utilização de automação nas indústrias tem sido cada vez maior, proporcionando um aumento na qualidade e quantidade da produção e, ao mesmo tempo, oferecendo preços atrativos. Ou seja, a utilização da automação aumenta a eficiência, tornando as empresas competitivas no mercado. Portanto, trata-se de um caminho de uma única mão. Para se fazer frente à concorrência procura-se aumentar a produtividade (razão entre o volume produzido e os recursos empregados), reduzir custos de produção e aumentar a qualidade dos produtos oferecidos. Ao mesmo tempo, para atender às exigências de diversidade do mercado consumidor e a gradativa redução da vida útil dos produtos, procura-se ampliar a flexibilidade na utilização dos sistemas produtivos.

A automação industrial pode ser definida como um conjunto de técnicas destinadas a tornar automáticos vários processos na indústria, substituindo o trabalho muscular e mental do homem por equipamentos diversos. O conceito de automação varia com o ambiente e experiência da pessoa envolvida. São exemplos de automação:

- Para uma dona de casa, a máquina de lavar roupa ou lavar louça.
- Para um empregado da indústria automobilística, pode ser um robô.
- Para uma pessoa comum, pode ser a capacidade de tirar dinheiro do caixa eletrônico.

Com o advento dos dispositivos microprocessados, vieram os Controladores Lógicos Programáveis (CLP), onde a forma básica de programação é oriunda da lógica de programação dos diagramas elétricos a relés. Próprio para ambientes industriais, os controladores realizam uma rotina cíclica de operação, o que caracteriza seu princípio de funcionamento, e operam apenas variáveis digitais, efetuando controle discreto, portanto. Quando tais equipamentos manipulam variáveis analógicas, são muitas vezes chamados de Controladores Programáveis.

Já o controle do tipo analógico desenvolveu-se, inicialmente, com o surgimento dos amplificadores operacionais, por meio das malhas específicas de ação de controle. Controladores de processos contínuos evoluíram juntamente com a microeletrônica e passaram a utilizar circuitos mais complexos, microprocessados, de forma a poderem utilizar poderosos

recursos e efetuarem técnicas de ação de controle dos mais diversos tipos, tais como: Proporcional-Integral-Derivativo-PID, PID adaptativo (não linear), Lógica Fuzzy (lógica nebulosa), Preditiva, entre outros.

O CLP para a implementação de controle discreto ainda se configura como o principal equipamento utilizado pelas indústrias, e deve continuar a ser largamente utilizado, pois a cada dia novos recursos lhe são adicionados, tornando-os cada vez mais práticos e eficientes nas tarefas a que se destina. Dentre esses novos recursos, é principalmente em nível de comunicação que se observam as principais inovações. Tanto na comunicação entre os operadores e os sistemas (interfaces homem-máquina) como na comunicação entre máquinas (redes de campo), as facilidades atuais são inúmeras, com uma grande diversidade de opções de mercado.

Existe uma tendência em definir padrões entre fabricantes, que permitam ao projetista dispor de tecnologias abertas, possuindo alto grau de intercomunicabilidade de vários fabricantes. Neste sentido, algumas experiências vêm se concretizando recentemente, como é o caso do OPC (Object Linked and embedding for Process Control – o mesmo que o OLE do Windows, o qual permite realizar transferências de objetos entre diferentes aplicações) cujo desenvolvimento foi encabeçado pela *Microsoft*, e tende a se tornar o padrão de relacionamento entre os diversos módulos de *software* ou *hardware* de diferentes fabricantes.

Para uma redução de custos, o sistema promove junto aos computadores, controladores e dispositivos digitais com capacidade de processamento autônomo de uma forma geral, uma intercomunicabilidade por meio físico adequado, de forma a obter grandes topologias dentro de regras gerais e procedimentos definidos para a transmissão de dados. Cria-se sistema de comunicação em rede e os computadores passam a trocar dados entre eles e a compartilhar recursos.

Quando informações de um sistema de controle são tratadas, a partir de dados coletados por meio de dispositivos sensores ou de qualquer dispositivo indicador de estado de um equipamento, por meio do processamento de dados feito por um sistema de supervisão, segundo um grande banco de dados, todos os níveis acima, como o de coordenação, planejamento e gerenciamento, são beneficiados de tal modo a melhor coordenar a programação e o controle de produção, planejando o processo de fabricação como um todo e estabelecendo uma nova gestão de gerenciamento dos negócios.

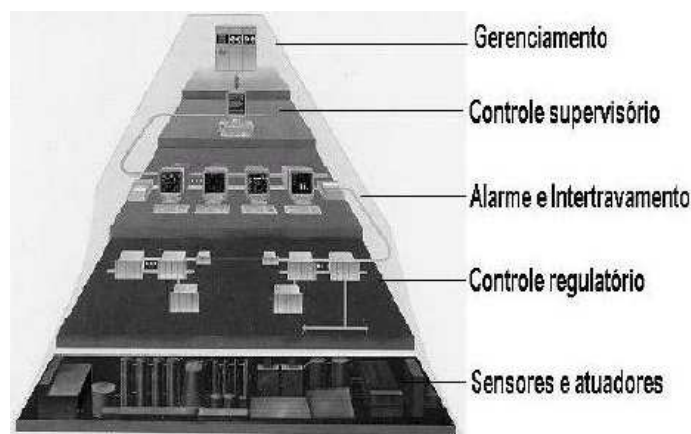


Figura 5 – Integração de um Sistema Industrial

Ou seja, ao estabelecer a integração dos dados digitalmente por meio de uma rede de computadores entre os mais diferentes

níveis hierárquicos dentro de uma indústria, reduz-se o custo de fabricação, pela eficiência da manipulação do produto, aumenta-se a produtividade e se estabelece um novo conceito em automação industrial, a integrabilidade de seus componentes nos mais diferentes níveis. A figura 5 mostra a integração dos diferentes níveis hierárquicos de um sistema industrial, desde os sensores até a gerência.

Redes Industriais de Computadores:

Com a necessidade de integração de todo o conjunto de informações contido na indústria, aliada à utilização do número crescente de dispositivos digitais de controle, bem como à evolução dos computadores e seus periféricos, é que surgiram as redes industriais.

O processamento distribuído é uma solução eficaz no compartilhamento de informações e recursos dispostos por um conjunto de máquinas processadoras. Vários usuários podem trocar informações em todos os níveis dentro da fábrica e viabilizar economicamente um padrão de comunicação, de modo que: ficam garantidas as aplicações típicas de processamento na engenharia de produção e aplicações específicas na área de controle de processos.

Uma rede de computadores é composta basicamente por:

- a) unidade de processamento: lugar onde será executado o *software* do usuário. Aplicativo gerenciador dos dados que serão compartilhados.
- b) sistema especialista: conhecido como sistema gerenciador, é composto por *hardware* (equipamento de rede, placa, etc) e *software*.
- c) meio físico: linha transmissora de dados, podendo ser par trançado, coaxial ou fibra ótica. Outros meios utilizados são radiofrequência, microondas, satélites, etc..

Controladores Lógicos Programáveis (CLPs)

Um CLP é um aparelho digital que usa memória programável para armazenar instruções que implementam funções como: lógica, sequenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para controlar através de módulos de entrada e saída (digital e analógica) diversos tipos de máquinas e processos.

São sistemas modulares compostos basicamente de: fonte de alimentação, CPU, memória, módulos de entradas e saídas, linguagens de programação, dispositivos de programação, módulos de comunicação e módulos especiais (opcionais).

Além de dispensar o uso de computadores de grande porte, tornando-a uma unidade isolada, o CLP apresenta como principais vantagens: maior confiabilidade, flexibilidade, velocidade, permitir funções avançadas, permitir comunicações e diagnóstico

Supervisório

O supervisório é um software destinado a promover a interface homem/máquina, proporcionando a supervisão de um processo através de telas devidamente configuradas. Possui telas que representam o processo que podem ser animadas em função das informações recebidas pelo CLP, controlador, etc. Por exemplo: no acionamento de uma bomba, a representação na tela mudará de cor informando que a mesma está ligada; se um determinado nível varia no campo, a representação na tela

mudará informando a alteração de nível. O supervisório lê e escreve na memória do CLP ou controlador para a atualização das telas.

Quando fala-se de supervisão tem-se a idéia de dirigir, orientar ou inspecionar em um nível hierárquico superior. Através do sistema supervisório é possível de ligar ou desligar bombas, abrir ou fechar válvulas, ou seja, escrever na memória do CLP.

Atualmente o mercado disponibiliza vários programas supervisórios, tais como INTOUCH, ELIPSE, AIMEX, FIX-32, VIEW, CIMPLIST e outros. Neste trabalho foi utilizado o Intouch, um dos mais populares supervisórios na indústria.

3.1 Comunicação e descrição do sistema

A comunicação utiliza a infra-estrutura do “Projeto Controle Avançado Aplicado a Processos Industriais de Petróleo e Gás”, aprovado no Edital CTPETRO/CNPq 01/2003. Os softwares utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram o LabView, Intouch da Wonderware FactorySuite e o RSLinx junto com o RSLogix da Rockwell. O Controlador Logico Programavel - CLP utilizado é o SLC 5/03 da Allen Bradley com dois cartões digitais e três analógicos para a comunicação com a planta.

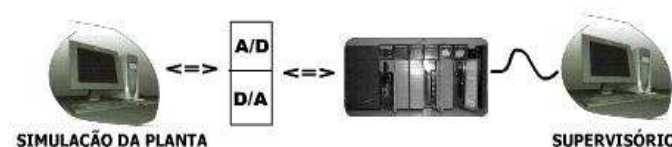


Figura 6 - Diagrama do Sistema de Comunicação.

O Diagrama da Figura 6 explicita a comunicação entre o Supervisório, o CLP e a Planta para a simulação do processo. O planta se comunica com o CLP através de rotinas de programação em modo diferencial de tensões.

A planta que será descrita na próxima seção foi simulada no Labview instalado num computador que se comunica com o CLP SLC 5/03 da Allen Bradley, através da placa de aquisição de dados (DAQ PCI-6024E) AD/DA da National Instruments. No CLP foi implementado o controlador PID que envia o sinal de controle para controlar o nível do tanque 2 da planta. A planta envia para o CLP o valor do nível do tanque 2 para o cálculo do erro entre a referência e o nível do tanque 2.

O RSLogix foi utilizado para a programação na linguagem Ladder do CLP. O LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering WorkBench) é uma ferramenta que não necessita de conhecimentos aprofundados em programação para o desenvolvimento de programas. Utiliza-se uma Linguagem G que é uma linguagem gráfica de programação de alto nível baseada no fluxo de dados através de um diagrama de blocos. Este Software permite criar processos virtuais que simulam entradas físicas que podem emular contatos e interagir com o CLP ou qualquer outro dispositivo que trabalhe com tensões ou correntes.

O Supervisório implementado no Intouch, instalado em um outro computador, se comunica com o CLP através do padrão de comunicação serial RS-232 e dele obtém os valores dos níveis dos tanques, o sinal de controle e os parâmetros do PID para fazer a supervisão do sistema. E ao mesmo tempo o Supervisório envia dados da referência (Set Point) e dos parâmetros do PID para o CLP. Os parâmetros do PID são calculados pelos métodos descritos na seção 2.

4 MODELO DA PLANTA

A planta é um sistema de tanques acoplado à uma bomba d'água. Os dois tanques são ligados em cascata, ou seja, o tanque 1 recebe água da bomba e o tanque 2 recebe a água do tanque 1. O objetivo deste trabalho é controlar o nível do tanque 2 através de um controlador PID utilizando os métodos descritos nas seções anteriores para fazer a sintonia do PID.

Neste trabalho foi utilizado este modelo de planta, mas o sistema descrito na seção 3.1 pode ser facilmente adaptado e aplicado em outras plantas.

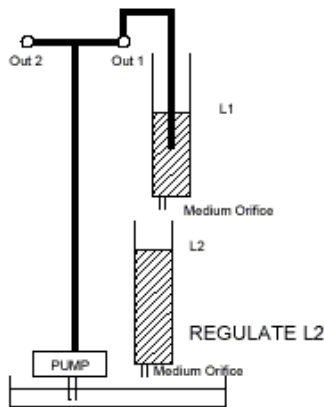


Figura 7 - Modelo da Planta

Este modelo trata-se de um sistema de segunda ordem já que cada tanque em separado é um sistema de primeira ordem. O modelo matemático linearizado para o sistema descrito na Figura 7 é o seguinte:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (3.1)$$

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} L_2 + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 \quad (3.2)$$

Na tabela a seguir identificamos cada parâmetro acima:

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros

Parâmetros	Descrição
$L1$ e $L2$	Nível dos tanques 1 e 2
$A1$ e $A2$	Áreas das bases dos tanques 1 e 2
$a1$ e $a2$	Orifícios de saída dos tanques;
L_{10} e L_{20}	Pontos de operação para linearização do modelo
K_m	Constante da bomba;
V_p	Tensão aplicada na bomba
g	Aceleração da gravidade

Para obtenção do modelo matemático foram utilizados os valores descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição dos Valores

Parâmetros	Valores
$A1 = A2$	15,518 cm ²
$a1 = a2$	0,178 cm ²
$L_{10} = L_{20}$	5cm e 25 cm
K_m	4,6 cm ³ /s.V
g	9,81 m/s ²

Aplicando estes parâmetros nas equações 3.1 e 3.2 obtém-se os modelos em variáveis de estado para os pontos de referência 5cm e 25cm.

Foram utilizados os modelos obtidos e projetados os controladores PID1 e PID2 para os pontos de operação 5cm e 25cm respectivamente.

Com os controladores PID1 e PID2 obtidos foi então aplicado o método fuzzy para o controle da planta não linearizada descrita pelo modelo matemático a seguir:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (3.3)$$

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gL_2} + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{2gL_1} \quad (3.4)$$

O resultados são mostrados a seguir.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Os ensaios realizados no processo de controle de nível visam manter o nível do tanque 2 durante 200 segundos, em cada uma das três referências propostas de 5cm, 20cm e 15cm, respectivamente, com um mínimo de *overshoot* e menor tempo de estabilização.



Figura 8 – Resposta da planta em malha fechada a mudanças de referência utilizando o PID1, o PID2 e o método Fuzzy

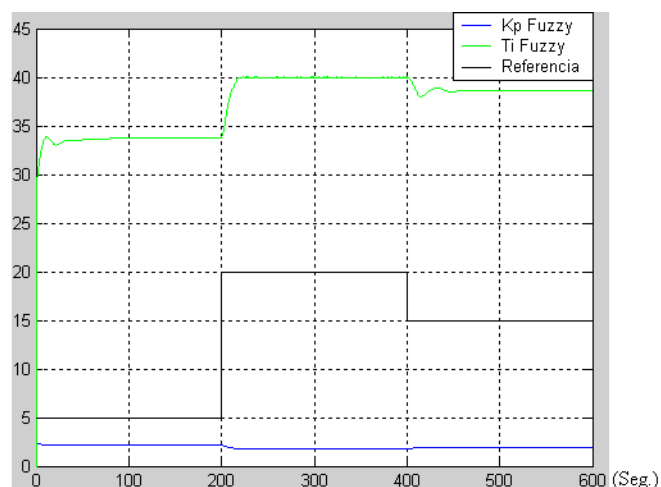


Figura 9 – Valores Kp e Ti do PID aplicado na planta utilizando o método Fuzzy

Analisando a figura 8 verifica-se que na referência de 5cm o PID1 obteve um melhor tempo de estabilização e apresentou um maior overshoot que o PID2 e o Fuzzy. O Fuzzy apresentou um resultado melhor que o PID2, obtendo um tempo de estabilização menor.

Em 20cm houve uma inversão, o PID2 obteve o melhor resultado com menores overshoot e tempo de estabilização. O Fuzzy obteve um resultado melhor que o PID1 com melhor tempo de estabilização e menor overshoot.

Já em 15cm os resultados dos PID2 e Fuzzy obtiveram resultados bem semelhantes e melhores que o do PID1, com menores tempo de estabilização e overshoot.

De um modo geral o método Fuzzy apresentou um melhor resultado, já que em todos os pontos de referência obteve resultado melhor que o PID1 ou PID2, dependendo da referência.

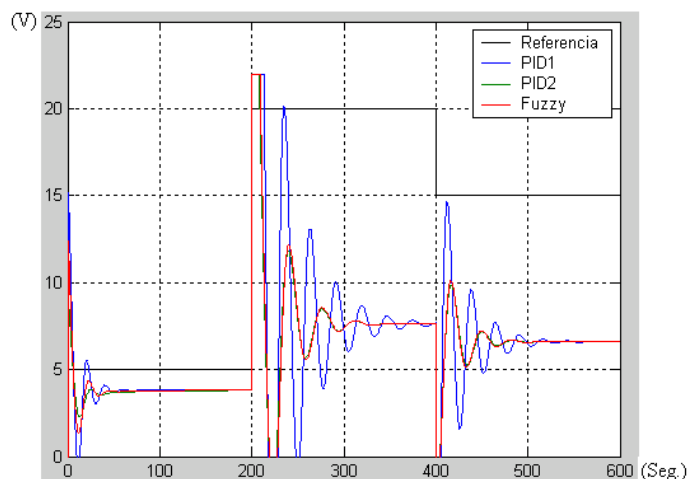


Figura 10 – Valores dos controladores PID1, PID2 e Fuzzy aplicados na planta.

Na figura 9 verificam-se as variações dos valores K_i e T_i do método Fuzzy aplicado na planta. E a figura 10 apresenta os valores dos controladores PID1, PID2 e Fuzzy aplicados na planta para a obtenção dos resultados obtidos na figura 8. O controlador do PID1 é o que apresenta maior variação de valores para controlar a planta. A bomba que envia água para a planta recebe como tensão máxima 22 Volts. Se o controlador retorna um valor maior que 22 então este valor é reduzido para 22, como verificado na Figura 10.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentados métodos de sintonia de controladores PID para o controle de nível. Foi utilizado o método fuzzy para a realização dos experimentos. Sendo este ultimo o que apresentou o melhor resultado, obtendo menores *overshoot* e tempo de estabilização. Os experimentos foram realizados com o sistema em malha fechada. O controlador PID foi implementado num CLP para que fosse simulado um processo de uma forma mais próxima do que é utilizado no controle de processos industriais. Resultados experimentais obtidos com um sistema de controle de nível são apresentados para ilustração das técnicas de identificação dos parâmetros do controlador PID.

O sistema apresentado pode ser aplicado em plantas mais complexas fazendo-se suas adaptações. Este é o primeiro artigo feito com essa estrutura, utilizando a planta de tanques, e foi observado um bom funcionamento do sistema. Para trabalhos futuros este sistema será aplicado em outras plantas, dentre as quais está uma coluna de destilação que apresenta um modelo mais complexo. E outros métodos de sintonia de PID também serão estudados e aplicados nos processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LabVIEW Basics I Course Manual 6.0, September 2000
Edition Part Number 320628G-01;
- LabVIEW Basics II Course Manual 6.0, September 2000
Edition Part Number 320629G-01;
- Lima, Fabio Soares de ,Introdução à Linguagem G LabView, Novembro 2002;
- Berto, Maria Isabel & Sá, Fabiana Rodrigues & Silveira, Vivaldo. Avaliação de Controle PID Adaptativo para um Sistema de Aquecimento Resistivo de Água. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, jul.-set. 2004;
- DAQ 6023E, 6024E, and 6025E User Manual, Multifunction I/O Devices for PCI, PXI , CompactPCI, and PCMCIA Bus Computers, Desember, 2000;
- Lima, Fabio Soares de ,Estratégia de Escalonamento de Controladores PID Baseado em Regras Fuzzy para Redes Industriais Foundation Fieldbus Usando Blocos Padrões, Dissertação de mestrado do PPGE da UFRN. Setembro 2004;
- Coelho, L.S. & A.A.R. Coelho. Algoritmos Evolutivos em Identificação e Controle de Processos: uma Visão Integrada e Perspectivas. SBA Controle & Automação Vol. 10 no. 01 / Jan., Fev., Mar, Abril de 1999;
- Coelho, Leandro dos Santos. Aprendizado dos Fundamentos de Sistemas Dinâmicos Usando o Software Maple. Cobengo, 2001;
- Arruda, Gustavo H. M. de & Barros, Pérciles R. Estimação da função de sensibilidade baseada em experimento com relé em malha fechada. Sba Controle & Automação v.14 n.3 Campinas jul./set. 2003;
- Maitelli, A. L. Apostila de Controladores Lógicos Programáveis.UFRN, Natal-RN, 2003. (<ftp://ftp.dca.ufrn.br/pub/users/maitelli/clp/>);
- Bailey, D. & Wright, E. Practical SCADA for Industry. Elsevier, 2003;
- Boyer, S. A. Supervisory Control and Data Acquisition. International Society for Measurement and Control. Carolina do Norte, 1993;
- NATALE, F. Automação Industrial. Siemens, 1989;
- OLIVEIRA, J. C. P. Controlador Lógico Programável. Makron Books do Brasil, 1990;

7 AGRADECIMENTOS

FINEP, Petrobras, CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.