

Controle de Nível de Tanque Cônico em uma Rede *Foundation Fieldbus*

Notas de Conclusão de Projeto

Alan Diego Pontizelli
Felipe Fernandes Thomé
Tiago Peruzzo

1 Introdução

A tecnologia Foundation Fieldbus (FF) teve início na década de 90 e diferencia-se das anteriores, DDC (*Direct Digital Control*) e DCS (*Distributed Control System*), por apresentar arquitetura e processamento divididos em vários instrumentos inteligentes.

O protocolo FOUNDATION Fieldbus foi desenvolvido baseado no padrão ISO/OSI, embora não contenha todas as suas camadas. Desta forma, ele pode ser dividido em três partes: camada física, *Communication Stack* e camada de usuário [7].

A figura 1 apresenta de maneira esquemática a diferença no processamento das estratégias de controle existentes da arquitetura FCS (*Field Control System*) em relação as demais.

Devido ao incremento no emprego do protocolo FOUNDATION Fieldbus nas diversas atividades industriais uma planta didática foi montada no Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em parceria com a Smar. O intuito é dar suporte à formação de engenheiros com conhecimento do protocolo.

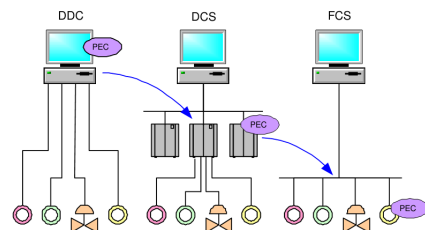


Figura 1: Arquiteturas DDC, DCS e FCS ([6])

A figura 2 apresenta esquematicamente os elementos presentes em uma rede FOUNDATION Fieldbus.

A DFI - *fieldbus universal bridge* - é o gerenciador de comunicação, ou seja, um componente de hardware integrado ao sistema que é capaz de gerenciar, monitorar, controlar, manter e operar a planta.

Além de interligar os canais, a DFI conecta todo o sistema a uma rede Ethernet utilizando para isso um *switch*. O pacote System 302 da Smar contém um servidor OPC para variáveis contínuas (SmarDFIOLEServer) que foi utilizado durante a atividade para troca de informações entre os dispositivos de campo e o supervisão implementado ao final do projeto.

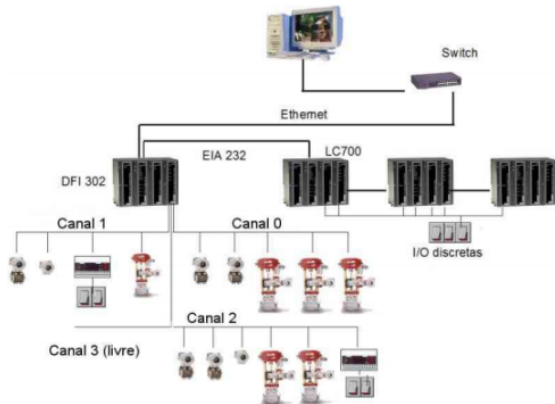


Figura 2: Elementos de uma rede FF

No controlador lógico programável (LC700) são realizadas as ações de liga e desliga de válvulas solenoides, bombas e a aquisição do sinal de sensores do tipo chave de nível.

A rede fieldbus é gerenciada através do aplicativo Syscon. Este é o programa responsável pela criação da rede e elaboração da estratégia de controle.

No Syscon são selecionados os dispositivos que irão compor a rede e acrescentado aos instrumentos todos os blocos funcionais necessários para a elaboração da estratégia desejada.

Cada instrumento recebeu uma denominação (*tag*) de acordo com as normas ISA. Todos possuem como sinal de entrada o protocolo digital fieldbus FOUNDATION ($31,25 \text{ kbit.s}^{-1}$)

1.1 Descrição da Planta Didática

Conforme indicado na figura 3 a planta é composta por dois tanques sendo o primeiro cilíndrico (T1) e o segundo cônico (T2). O abastecimento de líquido (água) do tanque T1 é regulado através da abertura de uma válvula

pneumática. No caso do tanque T2 a entrada de líquido é proveniente do transbordo do tanque T1. Ambos apresentam válvulas manuais para realizar o esvaziamento gravitacional do tipo *manifold*.

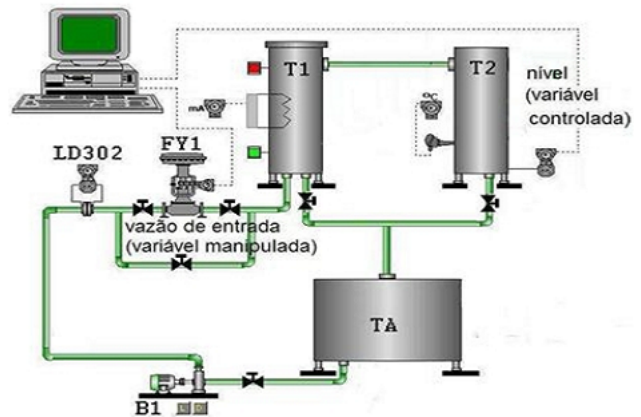


Figura 3: Elementos de uma rede FF

Interpreta-se o modelo da planta como híbrido possuindo dois *macro-estados* ou conjunto de estados. O primeiro macro-estado caracteriza-se pelo enchimento do tanque T1 e o segundo macro-estado apresenta o tanque cilíndrico T1 cheio e o tanque cônico T2 recebendo o excesso de volume de líquido que transborda do primeiro. O termo estado será usado daqui em diante para denotar o macro-estado ao qual deseja-se referir.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é utilizar os dispositivos inteligentes presentes na planta didática mencionada - os quais implementam o protocolo FF - para a realização do controle de nível do tanque cônico T2.

Visto que o sistema a ser controlado foi interpretado como híbrido, já que em dado mo-

mento a dinâmica de um certo tanque recebe destaque frente a outra, optou-se por utilizar uma abordagem de controle híbrido, realizando comutação do controle a ser aplicado dado o estado do sistema.

Visando ainda explorar a capacidade das redes FOUNDATION Fieldbus optou-se pela tentativa de implementar toda a estratégia de controle na camada mais baixa presente na rede (camada H1), utilizando apenas os blocos disponibilizados pelos dispositivos. Desta forma, o único processo que executaria remotamente seria o de supervisão da planta.

Dentre os requisitos de projeto enumera-se

- Seguimento de referência de nível no tanque cônico;
- Eliminação das perturbações no tanque cônico;
- Dinâmica para seguimento de referência com tempo de estabilização $t_{5\%} < 20s$ e sobressinal $s < 20\%$.

2 Metodologia de Trabalho

O sistema contendo dois tanques, onde o primeiro tanque, tanque T1, é um tanque de seção circular constante, correspondendo a um tanque cilíndrico, e o segundo tanque é um tanque de seção circular variável em função da altura, correspondendo a um tanque cônico, necessitava ser representado de forma a permitir uma abordagem de análise de sistemas e design de controle.

De acordo com [4] encontrar modelos abstratos é essencial em muitas áreas da engenharia sendo interessante a complexidade avançada dos modelos, pois assim são capazes

de representar suficientemente bem as características do sistema e também a sua simplicidade para que permitam a aplicação de métodos de análise e design existentes. Essa é a grande vantagem de sistemas híbridos, eles permitem uma abordagem onde se extrai as propriedades desejadas de um sistema enquanto ignoram-se detalhes irrelevantes. Nessa modelagem o sistema é formado por dois grupos diferentes de estados, onde no primeiro deles percebe-se a dinâmica relativa à variação do nível de água no tanque cilíndrico com maior atenção devido ao fato de que a água ainda não chega ao tanque cônico e no segundo grupo de estados percebe-se a dinâmica relativa à variação do nível de água no tanque cônico com maior atenção, já que o tanque cilíndrico está completamente cheio, a água começa a transbordar por ele e cai no tanque cônico.

O próximo passo para tornar eficaz a implementação do controle é a escolha da estratégia a ser tomada. A estratégia de controle híbrido forma uma classe mais abrangente do que as estratégias de controle comumente utilizadas. O fluxo do cálculo das ações de controle não são influenciados somente pelo controle contínuo, mas são também influenciados pela dinâmica discreta do sistema. Dessa forma, a escolha da abordagem em controle híbrido foi praticamente direta a partir do momento em que se escolheu modelar o sistema em sistemas híbridos.

A partir dessa análise, desenvolveu-se as etapas para guiar a implementação de controle, para a qual foi dado o nome de metodologia de trabalho. As seguintes etapas definem essa metodologia de trabalho:

- I. Busca pela melhor estratégia;
- II. Identificação do sistema;

III. Detalhamento da estratégia;

IV. Implementação

2.1 Busca pela Melhor Estratégia

Como o objetivo do projeto é controlar o nível do tanque cônico para obter o seguimento de referência, a rejeição de perturbações constantes, a manutenção da dinâmica desejada para a variável controlada, a implementação de todo o controle no nível H1 da rede FOUNDATION FIELDBUS e também levando em consideração as opções de modelagem e abordagem de controle adotadas era preciso concomitantemente escolher como tratar o sistema híbrido utilizando essa estratégia de controle e observar quais eram as técnicas fornecidas pela camada de aplicação da rede FOUNDATION FIELDBUS da SMAR, a qual foi utilizada para a implementação do controle.

Sendo assim essa primeira etapa consistiu em um estudo aprofundado dos blocos funcionais disponibilizados nos dispositivos que seriam utilizados para o controle de nível do tanque cônico através da rede (DFI32, FY302, LD302) seguindo o número de suas revisões. Esse estudo levou a definição da estratégia apresentada na figura 4.

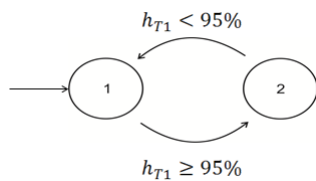


Figura 4: Estratégia do Controle Híbrido

Onde h_1 representa o nível do tanque T1 normalizado conforme a escala originária da medição de nível na base do tanque cilíndrico

e no topo do mesmo tanque. Essa máquina de estados representa a comutação entre duas leis de controle diferentes, cada uma delas atuando sobre um sistema dinâmico linear, sendo assim capaz de ser implementada na rede FOUNDATION FIELDBUS e também uma estratégia válida para o controle do sistema híbrido. O detalhamento de cada uma das leis de controle utilizada em cada um dos grupos de estados é realizada na etapa (III) da metodologia de trabalho adota.

2.2 Identificação do Sistema

A necessidade de possuir uma representação de um sistema se explica pelo fato de que não é possível propor qualquer tipo de controle sem ao menos conhecer superficialmente o funcionamento desse sistema. Existem duas maneiras tradicionais de modelar sistemas: a modelagem fenomenológica e a modelagem experimental.

A modelagem fenomenológica é aquela que estuda as características físicas do sistema e levanta um modelo matemático para o mesmo analisando estas relações. Já a modelagem experimental divide-se geralmente em passos [2]:

1. Planejamento experimental;
2. Seleção da estrutura do modelo;
3. Estimação dos parâmetros do modelo;
4. Validação.

A metodologia para identificação utilizada nesse trabalho foi uma modelagem experimental aliada a informações que não se encontram no conjunto de dados experimentais. Essas informações são provenientes de um modelo fenomenológico levantado para o sistema.

Sendo assim pode-se classificar a identificação utilizada como identificação “caixa-cinza” [2].

Da modelagem fenomenológica obtiveram-se as seguintes representações para as dinâmicas de cada tanque:

1. Tanque cilíndrico, T1:

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{\pi R_1^2} (q_{E1} - q_{S1})$$

Onde h_1 representa o nível do tanque T1, R_1 representa o raio de uma seção do tanque T1, q_{E1} representa a vazão de entrada no tanque T1 e q_{S1} representa a vazão de saída no tanque T1.

2. Tanque cônico, T2:

$$\dot{h}_2 = \frac{H_2^2}{\pi R_2^2 h_2^2} (q_{E2} - q_{S2})$$

Onde h_2 representa o nível do tanque T2, H_2 representa a máxima altura do tanque T2, R_2 representa o máximo raio do tanque T2, q_{E2} representa a vazão de entrada no tanque T2 e q_{S2} representa a vazão de saída do tanque T2.

3. Vazões de saída

$$q_{S_i} = \pi r_{pi}^2 \sqrt{2gh_i}$$

Onde q_{S_i} representa a vazão de saída do tanque i , r_{pi} representa o raio da seção do duto de saída do tanque i e h_i representa o nível de líquido presente no tanque i , para $i = 1, 2$.

Concluída a modelagem fenomenológica iniciou-se o processo de identificação experimental. Como já eram conhecidas previamente as equações físicas que representam a dinâmica do nível em relação à vazão de entrada e saída para ambos os tanques foi possível adotar a seguinte estratégia:

1. Considerar como sinal de entrada as vazões q_{E_i} ;
2. Considerar como perturbação as vazões q_{S_i} ;
3. Como a intenção é controlar a vazão do tanque cônico, não é interessante modelar o tanque cilíndrico (basta enchê-lo com a máxima vazão de entrada quando o controle híbrido selecionar a primeira lei de controle).
4. Considerar a estrutura da função transferência a ser identificada como sendo uma função integradora, do tipo:

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{K_v}{s}$$

Onde $H(s)$ e $Q(s)$ representam as transformadas de Laplace da entrada (vazão da válvula) e da saída (nível do tanque cônico) e K_v representa o ganho de velocidade.

5. E por último, considerar a não-linearidade do tanque cônico, planejando assim a obtenção de um ganho de velocidade, K_v , para várias posições de nível do tanque cônico, tentando assim representar fielmente a variação da magnitude desse ganho.

Dada as considerações expostas acima realizou-se o seguinte ensaio:

1. Fechamento das válvulas de saída;
2. Enchimento do tanque T1;
3. Abertura constante da válvula FY302, ou seja, entrada constante de líquido, em 50% da vazão máxima;

4. Variação fixa da saída, nível, em 10%.

Assim os ganhos puderam ser calculados da seguinte forma:

$$K_{\nu j} = \frac{\Delta h_j}{\Delta t_j \Delta q_j} = \frac{10\%}{\Delta t_j 50\%}$$

Onde $K_{\nu j}$ representa o ganho de velocidade no nível j e Δt_j o tempo necessário para se variar o nível em 10% no nível j . Após a realização deste experimento obteve-se a curva apresentada na figura 5, representando a variação do ganho de velocidade em função do nível no tanque cônico T2.

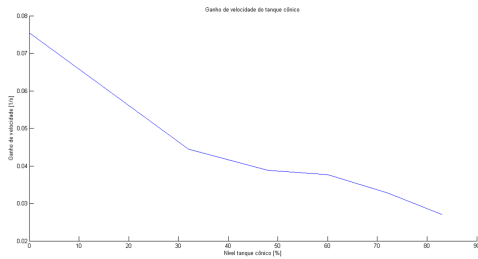


Figura 5: Ganho de Velocidade no Tanque Cônico em Função do Nível

2.3 Detalhamento da Estratégia

O próximo passo da metodologia de trabalho é o detalhamento da estratégia. Como apresentado no início da seção 2.1 após o estudo concomitante entre estratégias possíveis para a realização dos objetivos do trabalho e das ferramentas disponíveis na camada de aplicação dos dispositivos que seriam utilizados para o projeto chegou-se a estratégia de controle híbrido apresentada na figura. Essa estratégia divide a lei de controle em duas, sendo que dependendo do critério exposto acontece uma comutação entre as leis que determinarão o sinal

de controle a ser encaminhado para a válvula. Quando o nível do tanque T1 estiver abaixo de 95% a seguinte lei de controle é utilizada:

$$q_{E_1} = 100\%$$

Quando o evento $h_1 \geq 95\%$ acontece a lei de controle que passa a calcular a ação de controle e enviá-la para a válvula é a representada no diagrama de controle da figura 6.

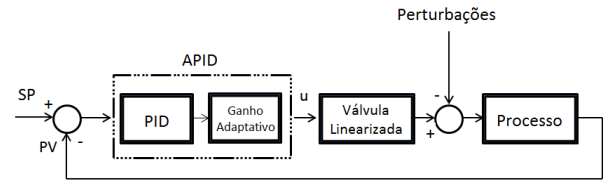


Figura 6: Malha de Controle Realimentado para o Tanque Cônico

Ou seja, quando o nível do tanque T1 for maior ou igual a 95% será implantado um controle realimentado onde o erro entre a referência de nível e o nível atual do tanque cônico é levado em consideração no cálculo da abertura da válvula de vazão e a não-linearidade relativa à variação do ganho de velocidade em função do nível do tanque T2 é parcialmente eliminada através da aplicação de um ganho escalonado.

Para a determinação da estrutura do controlador observou-se o fato do modelo da planta se tratar de uma função integradora e do objetivo do projeto ser seguir a referência em degrau e eliminar a perturbação em degrau. Por isso o controlador escolhido foi o de estrutura PI (proporcional e integrador). Para a determinação dos parâmetros do controlador utilizou-se a técnica lugar nas raízes, que é um

método gráfico para se determinar a localização de todos os pólos de malha fechada a partir do conhecimento da localização dos pólos e zeros da malha aberta à medida que o valor de um parâmetro (usualmente o ganho) é variado. O método conduz a uma indicação clara dos efeitos do ajuste dos parâmetros, [5], figura 7. E a estrutura final do controlador está apresentada na equação 1.

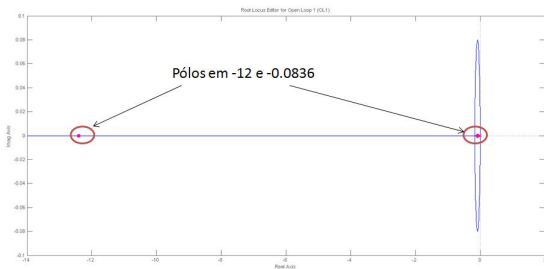


Figura 7: Pólos em Malha Fechada para o Controle no Tanque Cônico

$$PI(s) = \frac{12s + 1}{s} \quad (1)$$

Para eliminar parcialmente a não-linearidade relativa à variação do ganho de velocidade em função do nível do tanque T2 foi utilizada a técnica de ganho escalonado. Essa é uma abordagem em controle de sistemas não-lineares que leva em consideração o ponto de operação para determinar algum parâmetro do controlador, [3]. Nesse caso o ganho do PI será multiplicado pelo inverso do ganho de velocidade identificado no passo anterior da metodologia de trabalho, para o nível em questão, figura 8, com a intenção de eliminar a influência desse ganho variável na resposta do sistema realimentado.

A estratégia de controle adotada desconsidera a dinâmica de abertura da válvula

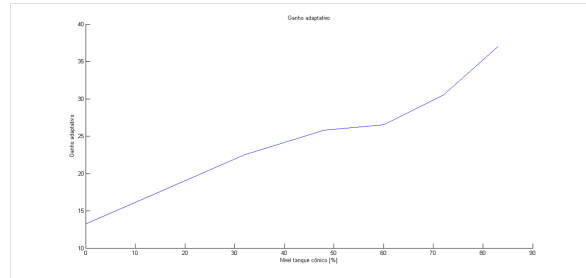


Figura 8: Ganho Escalonado

da malha de controle, na maioria dos casos isso é plausível já que a dinâmica de abertura de uma válvula é muito rápida em comparação com a dinâmica de processos industriais. No entanto, existem aspectos construtivos das válvulas que devem ser levados em consideração. No caso da válvula utilizada na planta em estudo percebeu-se que a vazão de saída não acompanha de forma linear a abertura do posicionador desta válvula, tendendo a atingir o seu valor máximo antes do posicionador estar totalmente aberto (válvula de abertura rápida). Por isso antes de implementar toda a estratégia de controle elaborada foi necessário descobrir a relação entre a abertura da válvula e a vazão de saída e propor uma linearização para esta relação. A figura 9 apresenta em azul a relação entre a abertura da válvula e a vazão medida e em vermelho a curva da abertura e da vazão desejada.

Essa curva permite então propor uma linearização da válvula, na medida que pode-se enviar um sinal de abertura para a ela sabendo que essa abertura retornará a vazão desejada, esse mecanismo de linearização ficará mais claro quando for apresentada a implementação na seção 2.4.

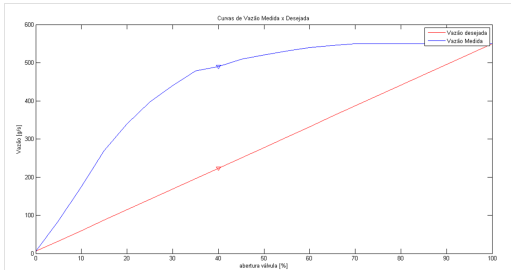


Figura 9: Linearização da Válvula

2.4 Implementação

A implementação de uma estratégia de controle em rede FOUNDATION Fieldbus é centrada em três blocos funcionais principais: AI, AO e PID. O bloco AI é instanciado no dispositivo responsável pela medição da variável de processo. O valor da variável de processo é repassado do bloco transdutor ao bloco AI, o qual disponibiliza o dado a outros blocos funcionais em sua saída. O bloco AO é instanciado no dispositivo responsável por atuar na variável manipulada. O bloco AO recebe de outro bloco funcional (normalmente PID onde há controle em malha fechada) o valor a ser aplicado na variável manipulada. Este valor é então transferido ao transdutor do dispositivo de atuação. O bloco PID é responsável pela implementação do controlador em aplicações com retro-alimentação.

Afim de implementar a estratégia de controle definida na seção 2.3 e cujo esquema está esboçado na figura 6 é necessária a aplicação de outros blocos funcionais além dos acima mencionados. Basicamente isto se deve ao fato de o controle projetado não ser simplesmente linear, mas híbrido e que faz uso de ganho adaptativo não-linear. Tal controle é passível de ser implementado através do uso do bloco funcional

Advanced PID (APID) combinado com outros blocos funcionais que tem um papel auxiliar na comutação dos controles.

Para a implementação da estratégia de controle pretendida é necessário que o nível de ambos os tanques seja conhecido. Portanto os dispositivos transdutores de nível de cada tanque devem conter um bloco AI para disponibilizar o valor mensurado aos blocos da estratégia de controle. O valor de controle calculado é enviado ao posicionador da válvula através de um bloco AO instanciado neste dispositivo.

Conforme discutido na seção 2.3 definiu-se que no primeiro estado do controle híbrido o valor de abertura percentual enviado ao posicionador da válvula é um valor fixo (definido como 100% neste caso). No segundo estado o algoritmo interno do cálculo de saída do controlador deve ser executado normalmente.

O bloco PID possui a propriedade de seguimento de referência (*tracking*). Se o valor lógico recebido por TRK_IN_D for 0 o algoritmo interno do PID é habilitado. Se o valor lógico recebido por TRK_IN_D for 1 o algoritmo interno do PID é desabilitado e o valor de saída é o valor recebido no parâmetro de entrada TRK_VAL. Por sua vez o bloco APID apresenta a mesma *feature*. Esta propriedade é o ponto chave para a comutação dos controles.

Portanto, no primeiro estado o *tracking* é habilitado e o valor 100% é enviado ao parâmetro TRK_VAL do APID por um bloco funcional constante (CT). No segundo estado o *tracking* é desabilitado e o APID calcula a saída de modo a controlar o nível no tanque cônico.

Pode-se dizer então que o parâmetro TRK_IN_D reflete o macro-estado do sistema (TRK_IN_D = 0 \rightarrow estado = 1, TRK_IN_D = 1 \rightarrow estado = 2). Para a determinação correta do valor de TRK_IN_D usa-se o bloco funcional

alarme (AALM). Tal bloco pode ser configurado para gerar um sinal lógico 1 na saída se o valor de entrada excede determinados valores limites inferiores e superiores. Este bloco permite ainda que apenas certos limites sejam considerados. Na aplicação atual o alarme foi setado para disparar apenas se o valor de entrada for menor que 95, sendo o valor de entrada conectado ao AI que fornece a medida de nível no tanque T1.

Com esta configuração a comutação de controles ocorre conforme a especificação da estratégia: Se nível no tanque T1 é menor que 95% alarme dispara, fazendo com que o APID abra a válvula completamente. Quando o nível de T1 ultrapassa 95% o alarme é desligado e o APID volta a executar o cálculo da saída com base no erro entre a variável de processo (nível T2) e a referência.

O ganho adaptativo ilustrado na figura 8 é facilmente implementável no bloco APID através de uma tabela de 20 pontos que definem a faixa de valores da variável pela qual o ganho varia e 20 pontos que definem a curva do valor do ganho.

O último ponto importante referente à implementação da estratégia de controle é o método usado para linearização da válvula. O processo de linearização é semelhante ao usado para especificação do ganho adaptativo. Conforme apresentado na seção 2.3 definiu-se qual seria a abertura real da válvula em função da abertura desejada para que o comportamento da vazão fosse aproximadamente linear. Através de uma tabela configurada diretamente no bloco funcional transdutor da válvula relacionou-se 20 pontos de abertura real \times abertura desejada.

Os parâmetros do controlador referentes ao ganho proporcional e tempo integral foram configurados conforme definidos na estratégia de

controle, permitindo que a dinâmica desejada fosse obtida.

O diagrama completo de blocos funcionais utilizados para implementação da estratégia de controle é apresentado na figura 10.

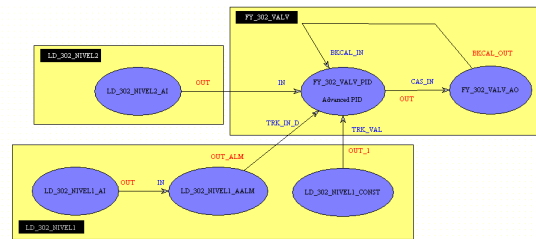


Figura 10: Diagrama de blocos funcionais utilizados para controle.

Por fim o software EDUSCA foi utilizado para a criação de um supervisão destinado ao monitoramento das variáveis relevantes ao processo, como níveis dos tanques, percentual de abertura da válvula e estado do sistema. Também é possível através do supervisão criado, modificar a referência de nível no tanque cônico T2. O aspecto visual deste supervisão é apresentado na figura 11.

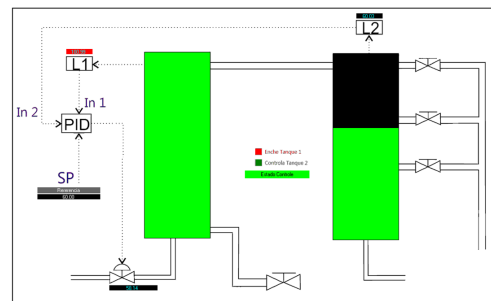


Figura 11: Supervisão criado para monitoração do processo.

3 Resultados e Conclusão

A fim de avaliar o controle implementado na planta realizou-se uma bateria de testes submetendo o sistema a diferentes situações.

A figura 12 apresenta a inicialização do sistema. Inicialmente os tanques encontravam-se vazios. Fica evidenciado que a abertura da válvula é máxima (100%) enquanto o nível do tanque T1 é menor que 95%. Instantes depois o nível do tanque T2 começa a subir e consequentemente o valor do controle cai visto que o erro diminui. Percebe-se que com um pequeno sobre-sinal alcançou-se seguimento de referência. O controle apresenta oscilação face às não-linearidades do processo e a dificuldade em se linearizar a válvula para pequenos valores de abertura. As perturbações em ambos os tanques foram mantidas fechadas durante este teste.

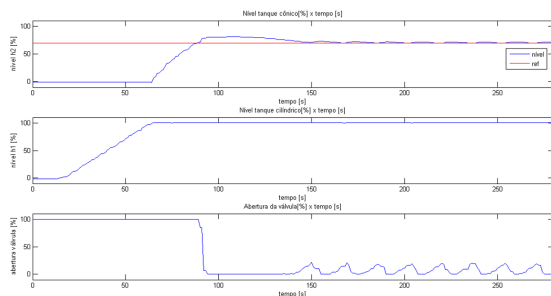


Figura 12: Inicialização do sistema.

A figura 13 expõe os dados obtidos para diferentes valores de referência testados. Houve seguimento de referência para todos os valores testados. No entanto é possível notar que para pequenos valores de referência o nível oscila em volta do valor do primeiro. Isto pode ser explicado pelos grandes valores de ganho do processo para pequenos valores de nível, os quais

são difíceis de serem efetivamente corrigidos. Além disso a água que entra pela parte superior do tanque sofre aceleração da gravidade e se choca com o volume existente perturbando a superfície e dificultando a estabilização do nível em um certo ponto.

O nível do tanque T1 manteve-se máximo permitindo a entrada de líquido no tanque T2. O controle mantém-se oscilando pela mesma razão mencionada no caso da inicialização da planta, mas é possível notar que o valor médio varia de acordo com o nível que se está buscando. Nota-se ainda que a válvula manteve-se saturada momentaneamente após as mudanças de referência. As aberturas das válvulas de perturbação em ambos os tanques foram mantidas constantes.

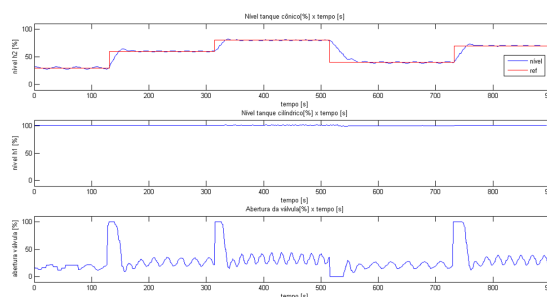


Figura 13: Seguimento de diferentes referências.

Por fim testou-se o aspecto de rejeição à perturbações. A figura 14 apresenta a resposta do sistema à diferentes perturbações no tanque T1 geradas por aberturas manuais na válvula de saída deste tanque. Esta perturbação é linear sob o ponto de vista de controle do tanque T2.

As perturbações geradas por volta de 120s e 300s foram rejeitadas. Para que isto acontecesse foram necessários aumento e diminuição da média do sinal de controle respectivamente. Por volta do tempo 400s abriu-se totalmente a

válvula de perturbação, a válvula de controle então abriu-se totalmente na tentativa de contornar o problema, mas a vazão de perturbação máxima no tanque T1 é aproximadamente igual a vazão máxima de entrada propiciada pela válvula de controle. Desta maneira o transbordo de água para o tanque T2 cessa e o nível do tanque diminui rapidamente. Somente com fechamento parcial da válvula de perturbação foi possível voltar a controlar o nível em T2. Para este teste as aberturas das válvulas de saída do tanque T2 foram mantidas constantes.

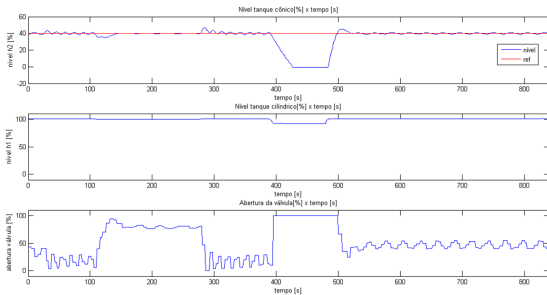


Figura 14: Rejeição às perturbações no tanque T1.

A figura 15 apresenta a resposta do sistema quando as aberturas das válvulas de perturbação no tanque T2 variaram. O sistema rejeitou satisfatoriamente as perturbações geradas por volta dos tempos 0s e 500s. A variação do sinal de controle necessária para a rejeição é evidente. A perturbação gerada por volta de 230s é referente a abertura total das válvulas de saída. Mesmo com a abertura máxima da válvula não foi possível manter o nível controlado. Isto mostra novamente a dificuldade de controlar este sistema sob certas circunstâncias devido a limitação da vazão de entrada. A válvula de saída foi parcialmente fechada e deu-se continuidade ao teste.

Entre 600s e 750s gerou-se uma série de perturbações em sequência através da variação da abertura de todas as 4 válvulas de esvaziamento do tanque T2. Ao cessar-se as variações de abertura o sistema voltou a seguir referência.

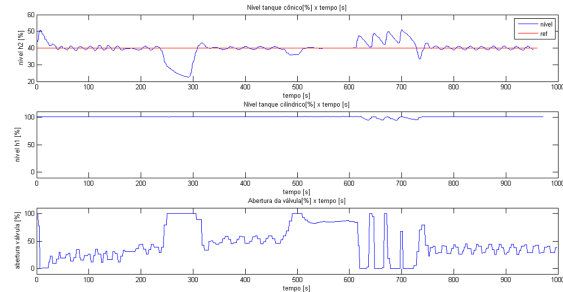


Figura 15: Rejeição às perturbações no tanque T1.

O uso da tecnologia Fieldbus foi determinante para a implementação bem sucedida do controle. A possibilidade de projetar o controlador sem se preocupar demasiadamente com o *hardware* é bastante atraente. Outra vantagem é o fato de poder adicionar/retirar dispositivos da estratégia de controle com facilidade. Além disso, a tecnologia Fieldbus garante o funcionamento correto do sistema em situações que seriam problemáticas sob o uso de outras tecnologias, como queda da conexão com uma central de processamento.

Conclui-se portanto que o controle PI com ganho adaptativo projetado foi satisfatório para o controle de nível do tanque cônico T2, mesmo na presença de vários fatores dificultantes, como a não linearidade da planta e das perturbações, ou mesmo a impossibilidade de atuar diretamente na vazão de entrada do tanque T2.

A abordagem de comutação de controles também mostrou-se viável já que o enchimento

do tanque T1 era um requisito para o controle de nível do tanque cônico.

Bibliografia de Referência

- [1] A foundation fieldbus technology overview.
- [2] L. A. AGUIRRE. *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG, Belo Horizonte, 2 edition, 2004.
- [3] K. M. HANGOS, J. BOKOR, and G. SZEDERKÉNYI. *Analysis and Control of Nonlinear Process Systems*. Springer, Londres, Inglaterra, 2004.
- [4] K. H. JOHANSSON. *Hybrid Control Systems*. Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia, 2003.
- [5] K. OGATA. *Engenharia de Controle Moderno*. Universidade de Minnesota, Editora LTC, Rio de Janeiro, 3 edition, 2000.
- [6] G Pasetti. Controle e supervisão de uma coluna de destilação piloto. Dissertação de mestrado (eng. elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. 153p.
- [7] SMAR Equipamentos Industriais Ltda, <http://www.smar.com/PDFs/Catalogues/FBTUTCE.pdf>.