



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Eletrônica

Laboratório de Controle e Automação II

Sistemas Digitais de Controle Distribuído

Professor: Alexandre Rodrigues Mesquita

Baseado no roteiro da professora Maria Auxiliadora Muanis Persechini

Laboratório de Controle e Automação II

Sistemas digitais de controle distribuído

1 Introdução

Sistemas distribuídos, como o próprio nome indica, são aqueles cujas funções de controle estão distribuídas espacialmente. Um sistema distribuído é composto por diversos elementos (sensores, atuadores, malhas de controle, computadores, etc) que trabalham de forma simultânea e independente para controlar e monitorar um processo. Além disso, o sistema distribuído precisa estar interligado via uma rede de comunicação de dados para que haja troca de informações entre os elementos do sistema.

O objetivo deste conjunto de aulas é conhecer e utilizar o SETC-NVT (Sistema de tanques para estudo de controle de nível, vazão e temperatura) que foi concebido para trabalhar de forma distribuída utilizando-se para isso de uma rede com tecnologia *Foundation Fieldbus H1*. Dessa forma, os alunos ficarão familiarizados com uma das tecnologias de sistemas distribuídos, sendo capazes de projetar e implementar sistemas com características similares. Além disso, essa prática possibilita o projeto de controladores em sistemas onde existe acoplamento entre as malhas.

Para atingir estes objetivos, o trabalho prático, que será desenvolvido na disciplina de Laboratório de Controle e Automação II, está previsto para ser realizado durante quatro semanas, assim distribuídas:

- Primeira semana: Estudar e compreender o processo para conhecer e entender o sistema de tanques interativos.
- Segunda semana: Estudar os documentos da rede *Foundation Fieldbus* (FF) para conhecer e entender as ferramentas para configuração e operação.
- Terceira semana: Realizar experimentos a fim de obter um modelo dinâmico de uma das malhas da planta e do acoplamento mais significativo que a afeta.
- Quarta semana: Testar e validar um novo controlador PID com desacoplamento por *feedforward* para a malha em questão.

2 Primeira Semana: Instrumentação e Controle do STEC-NVT

2.1 Processo

O STEC-NVT, conforme a mostra Figura 1, é um sistema composto de três tanques interligados com as seguintes denominações: tanque reservatório, TR, tanque de aquecimento, TAQ, tanque de produto, TP.

O Tanque Reservatório é alimentado pela água fria vinda da Rede Hidráulica e recebe água quente que sai do Tanque de Produto. A saída do Tanque Reservatório alimenta com água fria o Tanque de Aquecimento e o Tanque de Produto. O Tanque de Aquecimento recebe água fria do Tanque Reservatório, a aquece, por meio do contato com um resistor aquecedor, e alimenta o Tanque de Produto com a água já aquecida. O Tanque de Produto recebe água quente do Tanque de Aquecimento e água fria do Tanque Reservatório. A água que sai do Tanque de Produto retorna ao Tanque Reservatório.

Tanto o Tanque de Produto como o Tanque Reservatório têm um circuito hidráulico que permite fazer a recirculação da água no tanque. O Tanque de Produto tem ainda quatro válvulas manuais que permitem mandar a água para a saída de esgoto, podendo, ser usadas para simular perturbações.



Figura 1: Sistema de tanques STEC-NVT

2.2 Instrumentação

A Figura 2 representa a instrumentação do sistema de tanques detalhada a seguir.

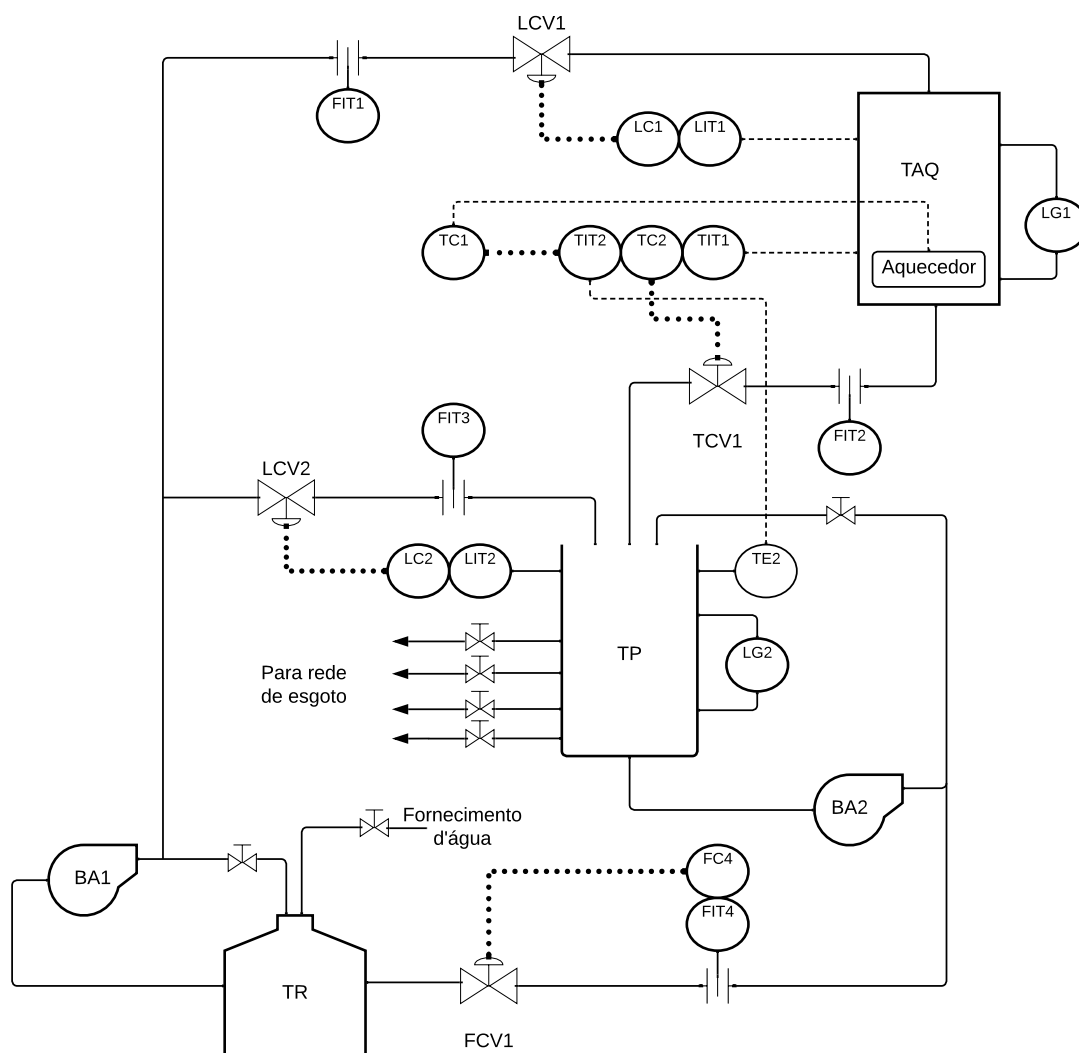


Figura 2: Fluxograma de processo e instrumentação

Atuadores

Bombas Centrífugas:

O sistema possui duas bombas: B1 e B2, ambas de $\frac{1}{4}$ cv.

B1 está ligada à saída do TR e permite a transferência da água do TR para o tanque TAQ, por meio da válvula automática LCV1, e para o tanque TP, por meio da válvula automática LCV2. Essa bomba também é instalada de forma a recircular a vazão excedente dentro do próprio TR, por meio da válvula manual de recirculação do TR.

B2 está ligada à saída de TP e permite a transferência da água de TP para TR por meio da válvula FCV1, e/ou a recirculação dentro do próprio TP, por meio da válvula manual de recirculação de TP.

Nota-se que a vazão de água na saída do TAQ é impulsionada pela força de gravidade. Desse modo, esta vazão poderá variar significativamente em função do nível do TAQ (será proporcional à raiz quadrada do nível).

Válvulas de Controle:

O Sistema possui quatro válvulas de controle industrial:

TCV1- atua na vazão do TAQ para o TP;

FCV1- atua na vazão do TP para o TR;

LCV1- atua na vazão do TR para o TAQ;

LCV2- atua na vazão do TR para o TP.

As quatro válvulas são esféricas com atuadores de cilindro pneumático e posicionadores eletro-pneumático com sinal de comando na faixa de 4-20 mA. A variação do sinal de comando (4 a 20 mA) corresponde à abertura das válvulas de 0 a 100%.

Resistor Aquecedor:

O aquecimento da água é feito por meio de um resistor trifásico de 12kW instalado no fundo de TAQ. A potência média entregue ao resistor é controlada por um circuito tiristorizado e é uma função do ângulo de disparo dos tiristores.

Sensores:

Temperatura:

Existem dois sensores de Temperatura, TE1 e TE2, ambos do tipo Pt100 (bulbo resistência de 100 ohms a 0°C). O sensor TE1 está instalado no TAQ e o sensor TE2 está instalado no TP. Estes sensores variam sua resistência elétrica de acordo com a temperatura. A informação de cada sensor é lida pelo transmissor de temperatura TT302 interligado à rede FF. Cada transmissor/controlador de temperatura TT302 conecta até dois sinais vindos de termorresistências ou termopares.

Vazão:

São medidas quatro vazões:

FT1- mede a vazão do TR para o TAQ;

FT2- mede a vazão do TAQ para o TP;

FT3- mede a vazão do TR para o TP;

FT4- mede a vazão do TP para o TR.

Os sensores usados são do tipo orifício integral, adequado para pequenas vazões. Cada sensor de vazão está acoplado a um transmissor diferencial de pressão LD302. Todos os quatro transmissores LD302 estão interligados à rede FF.

Nível:

São medidos os níveis LT1 e LT2 que correspondem aos níveis dos tanques TAQ e TP, respectivamente. A medição é realizada por meio de dois transmissores/controladores LD302 conectados à rede FF.

2.3 Concepção do Controle

O projeto de controle para o STEC-NVT tem cinco malhas independentes de controle, sendo duas (nível e temperatura) para o tanque TAQ e três (nível, temperatura e vazão) para o tanque TP.

Malhas de controle de nível:

- O nível do tanque TP é medido pelo sensor de nível LT2 e é manipulado por meio da válvula LCV2 que atua na vazão do TR para o TP.
- O nível do tanque TAQ é medido pelo sensor de nível LT1 e é manipulado por meio da válvula LCV1 que atua na vazão do TR para o TAQ.

Malha de controle de vazão:

A vazão na saída do TP é medida com o auxílio do sensor de vazão instalado nessa saída e é manipulada por meio da válvula FCV1 que atua diretamente nesta vazão.

Malhas de controle de temperatura:

- A temperatura do tanque TP é medida pelo sensor de temperatura TE1 e é manipulada por meio da válvula TCV1 que atua na vazão do TAQ para o TP.
- A temperatura do tanque TAQ é medida pelo sensor de temperatura TE2 e é manipulada por meio do circuito de aquecimento tiristorizado que atua na taxa de transferência de calor.

2.4 Estrutura da rede *Foundation Fieldbus*

Os instrumentos conectados à rede FF são: 2 transmissores de nível, 4 transmissores de vazão, 1 transmissor de temperatura conectado a 2 sensores de temperatura instalados nos tanques, e 2 conversores de *Fieldbus* para 4-20 mA. Além disto, a rede FF interage com o CLP (LC700 da Smar) através de um cartão FB700, conectado ao *rack* do CLP. O CLP é responsável pelo intertravamento do sistema, garantindo assim a segurança operacional. A configuração da rede FF é feita em um computador por meio de um software específico (SYSCON) e enviada aos instrumentos. A comunicação entre o computador e a rede FF é realizada através de um módulo específico para gerenciamento da rede DFI302 (Fieldbus Universal Bridge). Este dispositivo permite a comunicação da rede FF como os aplicativos por meio da rede Ethernet HSE e protocolo OPC.

A configuração da rede FF para o processo representado pela Figura 2 pode ser observada na Figura 3.

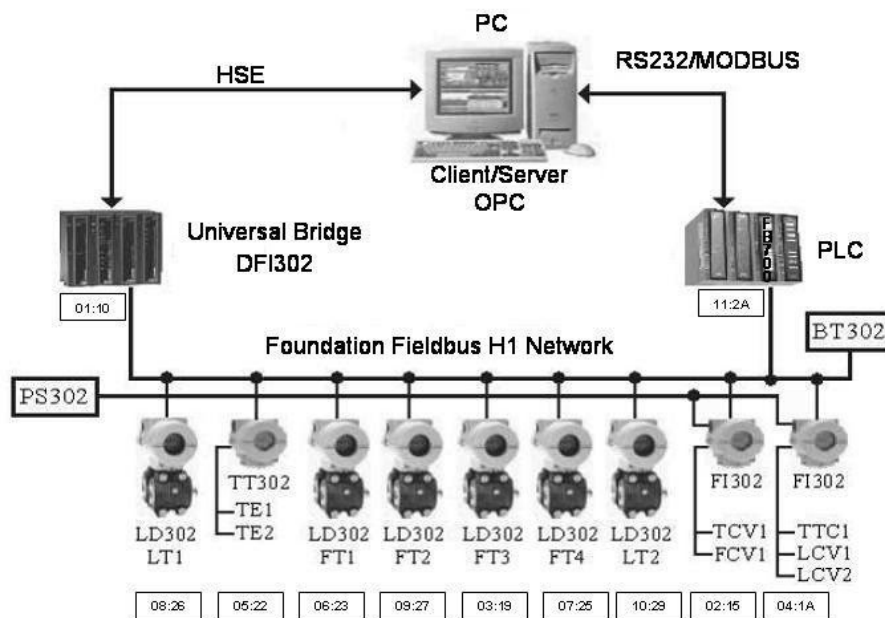


Figura 3: Configuração da rede Fieldbus

Os dispositivos interligados à rede FF são:

LD302 - LT1 – transmissor/controlador de nível do TAQ;
 LD302 - LT2 – transmissor/controlador de nível do TP ;
 TT302 - TT1 – transmissor/controlador de temperatura do TP e transmissor do TAQ;
 LD302 - FT1 – transmissor de vazão de entrada do TAQ;
 LD302 - FT2 – transmissor de vazão de entrada de água quente do TP;
 LD302 - FT3 – transmissor de vazão de entrada de água fria do TP;
 LD302 - FT4 – transmissor/controlador de vazão de saída do TP;
 FI302 - FI1 e FI2 – conversores de *fieldbus* para 4 a 20 mA (3 canais de saída cada).
 FB700 - Interface para o controlador lógico programável.

DFI302- (Fieldbus Universal Bridge) utilizado para gerenciamento da rede e interface entre as redes H1 e HSE. Este dispositivo também permite a comunicação da rede com os aplicativos de software por meio da rede Ethernet e protocolo OPC.

2.5 Implementação da estratégia de controle na rede FF

As malhas de controle são implementadas utilizando-se os blocos funcionais dos instrumentos da rede FF. Cada transmissor/controlador possui internamente um bloco para execução de um controlador PID.

As variáveis de processo (LT1, LT2, TT1, TT2 e FT4) são medidas por instrumentos conectados à rede. No entanto, os instrumentos para as variáveis manipuladas, ou seja, as válvulas de controle de vazão e o circuito de aquecimento, não estão conectados diretamente à rede.

O STEC-NVT possui cinco variáveis manipuladas (TCV1, FCV1, LCV1, LCV2, TC2) cujos instrumentos utilizam sinal de 4-20 mA ou 0 a 10 V para atuação. No caso das válvulas para restrição das vazões, a atuação de 4-20 mA corresponde à variação na abertura da válvula de 0 a 100%, e no caso da temperatura a atuação de 0 a 10 V corresponde à variação no ângulo de disparo de 180 a 0 graus. Como os valores dessas variáveis manipuladas são calculados pelos blocos funcionais PID dos instrumentos *Fieldbus*, é preciso utilizar os dispositivos FI302, denominadas FT1 e FT2, para converter o sinal gerado pela rede FF para um sinal de corrente na faixa de 4-20 mA.

Para o Tanque de Aquecimento, o controle da dissipação de energia no resistor de aquecimento é feito por meio de três pontes tiristorizadas, uma para cada elemento resistivo. O sinal de variável manipulada disponível na rede FF é convertido por meio do dispositivo FI2, para um sinal de 4-20 mA que é novamente convertido para um sinal de 0 a 10 V. Um sinal de 10 V implica em um ângulo de disparo de zero grau, que, por sua vez, irá produzir uma dissipação máxima de energia no resistor. Para um sinal de 0 V, o ângulo de disparo será de 180 graus e a dissipação de energia será zero. O resistor foi projetado para aquecer a água do tanque cheio de 20°C a 60°C em 9 minutos.

O dispositivo FI1 é responsável pela conversão dos sinais LC1 e TCV1, enquanto o dispositivo FI2 é responsável para conversão dos sinais LCV2, TC2 e FCV1.

A malhas de controle estão distribuídas da seguinte forma:

Malhas de nível:

Para controlar o nível dos tanques TAQ e TP são utilizados os controladores PID dos transmissores/controladores LD302, LT1 e LT2 respectivamente. Portanto, o controle é executado pelo mesmo instrumento onde é feita a leitura da variável controlada. O valor gerado para a variável manipulada é enviado para o dispositivo conversor FI302, que converte o valor em sinal de corrente e envia para as válvulas LCV1 e LCV2, respectivamente.

Malha de vazão:

Apenas a vazão de saída de TP é controlada, para isto é utilizado o controlador PID do transmissor/controlador FT4, que é responsável pela transmissão desta vazão. Os demais transmissores de vazão são usados apenas para monitor as respectivas vazões. O valor gerado para a variável manipulada é enviado para o dispositivo conversor FI302, que converte o valor em sinal de corrente e envia para a válvula FCV1.

Malhas de temperatura:

A temperatura do TP é lida pelo sensor de temperatura TE1 do transmissor/controlador TT1 e controlada pelo PID do próprio TT1. O valor gerado para a variável manipulada é enviado para o dispositivo conversor FI302, que converte o valor em sinal de corrente e envia para a válvula TCV1. Já a temperatura do TAQ é lida pelo sensor de temperatura TE2 e, apesar de também ser transmitida pelo TT1, é controlada pelo controlador PID do conversor *fieldbus* para corrente, FI2 (cada transmissor/controlador de temperatura, TT302, conecta até dois sinais vindos de termorresistências ou termopares, porém só faz um controle PID). O valor gerado para a variável manipulada, depois de convertido em sinal de corrente é enviado para o circuito de aquecimento.

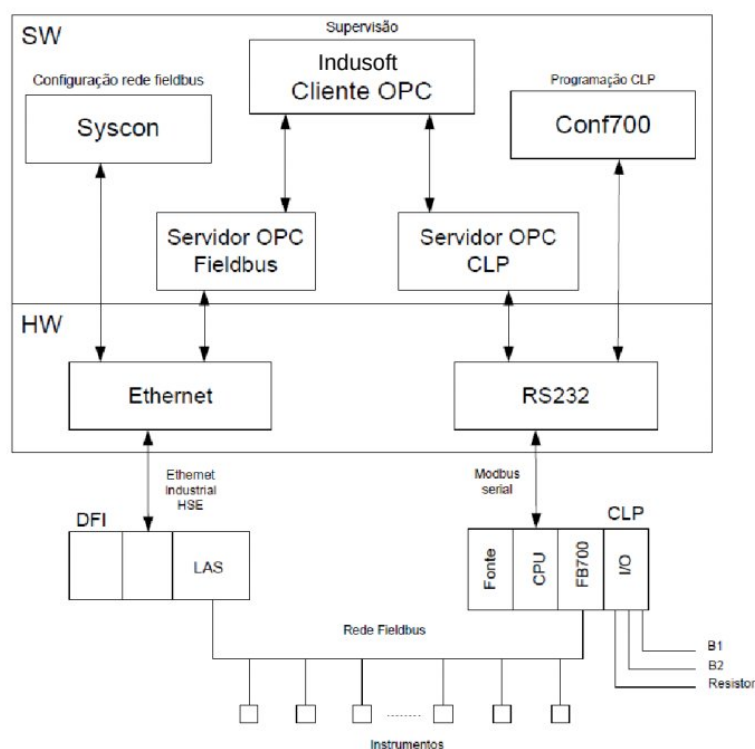


Figura 4: Fluxo de informação no STEC

2.6 Sistema de supervisão

O sistema de supervisão utilizado no STEC/NVT é o Indusoft Web Studio em ambiente Windows. O Indusoft é um aplicativo do tipo SCADA que, neste sistema, está configurado para executar as funções de visualização do processo por meio de telas sinóticas e gráficos de tendência. A comunicação entre o sistema de supervisão e a rede FF é via rede Ethernet e protocolo OPC, da mesma forma que o aplicativo de configuração.

A Figura 4 mostra o fluxo de comunicação durante a configuração e supervisão do sistema.

2.7 Pontos de Discussão

- i) Por que o nível dos tanques pode ser medido a partir da diferença de pressão entre o fundo do tanque e a atmosfera? Qual a relação matemática entre o nível e a pressão?
- ii) Por que a vazão entre os tanques pode ser medida pela diferença de pressão entre dois pontos usando uma placa de orifício? Qual o tipo de relação matemática entre diferencial de pressão e vazão?
- iii) Por que a platina é comumente utilizada na confecção de sensores de temperatura? Por que e como a resistência de um filamento metálico varia com a temperatura?
- iv) Por que é necessário haver um caminho de recirculação para a água bombeada? Que tipo de dano poderia ocorrer se não houvesse a recirculação? Por que a água não volta sempre pelo caminho de recirculação?
- v) Qual a vantagem de se ter um circuito de aquecimento com resistores trifásicos? Qual deve ser a corrente máxima em cada fase?
- vi) O que é o ângulo de disparo de um tiristor? Qual a relação entre o ângulo de disparo e a potência média dissipada?
- vii) Por que o padrão analógico de comunicação 4-20mA tem como corrente mínima 4mA? Por que é desejável ter um padrão em corrente em vez de tensão?
- viii) Como deve funcionar o intertravamento da planta promovido pelo CLP? Em que situação de alarme se deve desligar a Bomba 1? Em que situação se deve desligar a Bomba 2? Em que situação se deve desligar o sistema de aquecimento?
- ix) A bridge DFI302 é responsável pelo controle de acesso ao meio no barramento Fieldbus. Por que é importante haver um mecanismo de controle de acesso ao meio numa rede de controle? Por que algo como CSMA/CD não seria satisfatório?
- x) O sistema de controle implementa de forma distribuída 5 malhas SISO em vez de implementar 1 malha MIMO centralizada com 5 entradas e cinco saídas. Quais as vantagens e desvantagens da abordagem distribuída com relação à abordagem centralizada?
- xi) Quais as variáveis manipuladas e variáveis de processo de cada uma das cinco malhas de controle? Seria possível ter escolhido diferentes pares de variável manipulada e variável de processo?

xii) Quais são os possíveis acoplamentos entre as malhas, i.e., quando a entrada de uma malha afeta de forma indesejada a saída de outra malha?

xiii) Por que é possível controlar a temperatura do TAQ se a malha de controle de temperatura do TAQ comanda apenas a potência média fornecida, ou seja, ela só pode fornecer calor e não pode retirar? De forma análoga, por que é possível controlar a temperatura do TP apenas injetando água quente? Por que é possível controlar os níveis dos tanques atuando apenas na vazão de entrada de água fria? Lembre que o controle é feito por PIDs e cada PID só pode comandar uma variável.

xiv) Para colocar a planta em operação, é necessário que o operador inicie em modo manual e atue de forma a aproximar a planta do equilíbrio desejado. Por que os PIDs conseguem executar bem a tarefa de regulação (estabilidade local) mas não permitem obter estabilidade global, isto é, se iniciarmos a planta com todas as malhas em automático, os PIDs não serão capazes de levar a planta à referência desejada?

O que deve constar no próximo relatório: Identifique e explique itens de interesse como sensores, atuadores, controladores, dispositivos Fieldbus. Explique a estratégia de controle e identifique as variáveis manipulada e de processo de cada malha. Identifique os acoplamentos existentes entre as malhas. Tente incluir os pontos de discussão de forma implícita no seu relatório. Entregue seu relatório na tarefa da turma Moodle antes do início da próxima aula.

3 Segunda Semana: Software do STEC-NVT

Na primeira aula estudamos o STEC do ponto de vista do seu *hardware*, demos ênfase à instrumentação e ao controle do processo. Nesta segunda aula estudaremos o STEC do ponto de vista de software, com foco nos principais aspectos de configuração de uma rede Fieldbus através de um projeto já configurado.

Antes de nos determos sobre a configuração da rede Fieldbus propriamente dita, examinaremos dois elementos de software mais simples mas também fundamentais para a operação da planta: o sistema supervisório e o CLP.

3.1 Sistema supervisório

Ligue a chave intitulada “Instrumentação” no quadro de energia. Isso alimentará os instrumentos da rede Fieldbus, que, dentro de alguns instantes, estarão prontos para comunicação com o supervisório. Para iniciar a tela supervisória, no Desktop, clique em RunStartUp.

Observe como a tela supervisória possui uma representação gráfica da planta e possui botões para operação das cinco malhas de controle utilizadas. Clique nos botões e

identifique os parâmetros da malha de controle que podem ser alterados e monitorados via supervisão.

Se a comunicação com a planta estiver estabelecida, já será possível observar as leituras informadas pelos sensores. Tente observar de forma geral as variáveis monitoradas e seus valores.

Em seguida, encontre as chaves para ligar as bombas e o aquecedor. Clique nas chaves e observe o funcionamento dos contatores. As bombas e o aquecedor não serão ligados neste momento pois as chaves no quadro de energia se encontram desligadas.

Por fim, clique nos botões dos gráficos de tendência e observe seu funcionamento. Feche o Indusoft (supervisão).

3.2 Configuração do CLP no CONF700

O CLP LC700, que possui o papel de realizar o intertravamento da planta, é configurado a partir do programa Conf700. Para abrir esse programa, no Desktop, clique em WindowsXP Mode e em seguida clique em Conf700. Selecione “Run in Demo Mode” e abra o arquivo STEC_DIST.PL4.

Para compreendermos o programa utilizado, examinaremos a sua estrutura de memória e o programa em Ladder utilizado. Para isso, na barra de ferramentas, clique e examine as telas: Documentation Page, Module Page, Virtual Module Page, Network Page, Global Table, Virtual Global Table e Modbus Address.

Você deve tentar identificar os cartões integrantes do CLP e deverá entender a lógica de intertravamento. Será possível notar que algumas variáveis são provenientes da rede Fieldbus, através do cartão FB700. Outras variáveis são modificadas via protocolo Modbus usando o PC e o cliente OPC Kepware.

Note-se que o nome das variáveis virtuais SW_BOMBA01 e SW_BOMBA02, que correspondem aos sinais recebidos do cliente OPC, estão com os números erroneamente trocados, devendo de forma mais apropriada se chamar respectivamente SW_BOMBA02 e SW_BOMBA01.

3.3 Programação da rede Fieldbus Foundation

A configuração de software da rede Fieldbus é feita por meio de blocos de função e é descrita num projeto no software Syscon da Smar.

Abra o Studio302 e na barra de ferramentas localize e abra o software Syscon. No Syscon, abra o projeto Stec.ffp (C:\LABII\SYSCON\STEC\STEC.FFP). A tela principal, como na Figura 5, mostra que o projeto consiste numa descrição do software e do hardware

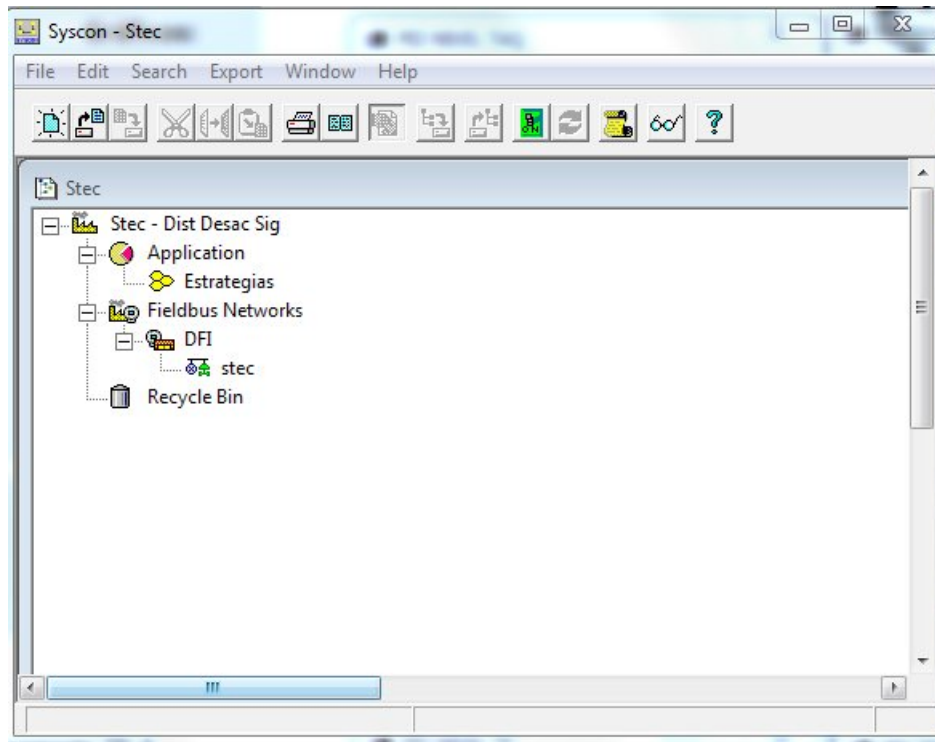


Figura 5: Tela principal exibindo estrutura do projeto

correspondente na rede Fieldbus. Na árvore das redes Fieldbus vemos que existe apenas uma bridge *DFI* e que sob esta bridge existe apenas uma rede H1, denominada *stec*.

Dê um clique duplo no ícone da rede *stec* e, como na Figura 6, observe os instrumentos Fieldbus que estão conectados ao barramento dessa rede H1. Identifique os transmissores de nível, vazão e temperatura estudados na aula passada.

Expanda a árvore e observe que, sob cada instrumento, representados pelos ícones em amarelo, estão os blocos de função instanciados naquele instrumento. Dessa forma estão descritos os programas a serem executados em cada instrumento. Busque identificar os tipos dos blocos de função em cada instrumento (entrada analógica, saída analógica, PID, transdutor, alarmes, etc.)

Aqui é possível compreender como se dá parte da programação da rede. Ao se criar um projeto, os instrumentos são incluídos a partir de uma biblioteca e posteriormente são marcados com o identificador do instrumento físico. De forma semelhante, os blocos de função são incluídos em cada dispositivo a partir de uma lista de opções e configurados como veremos mais adiante.

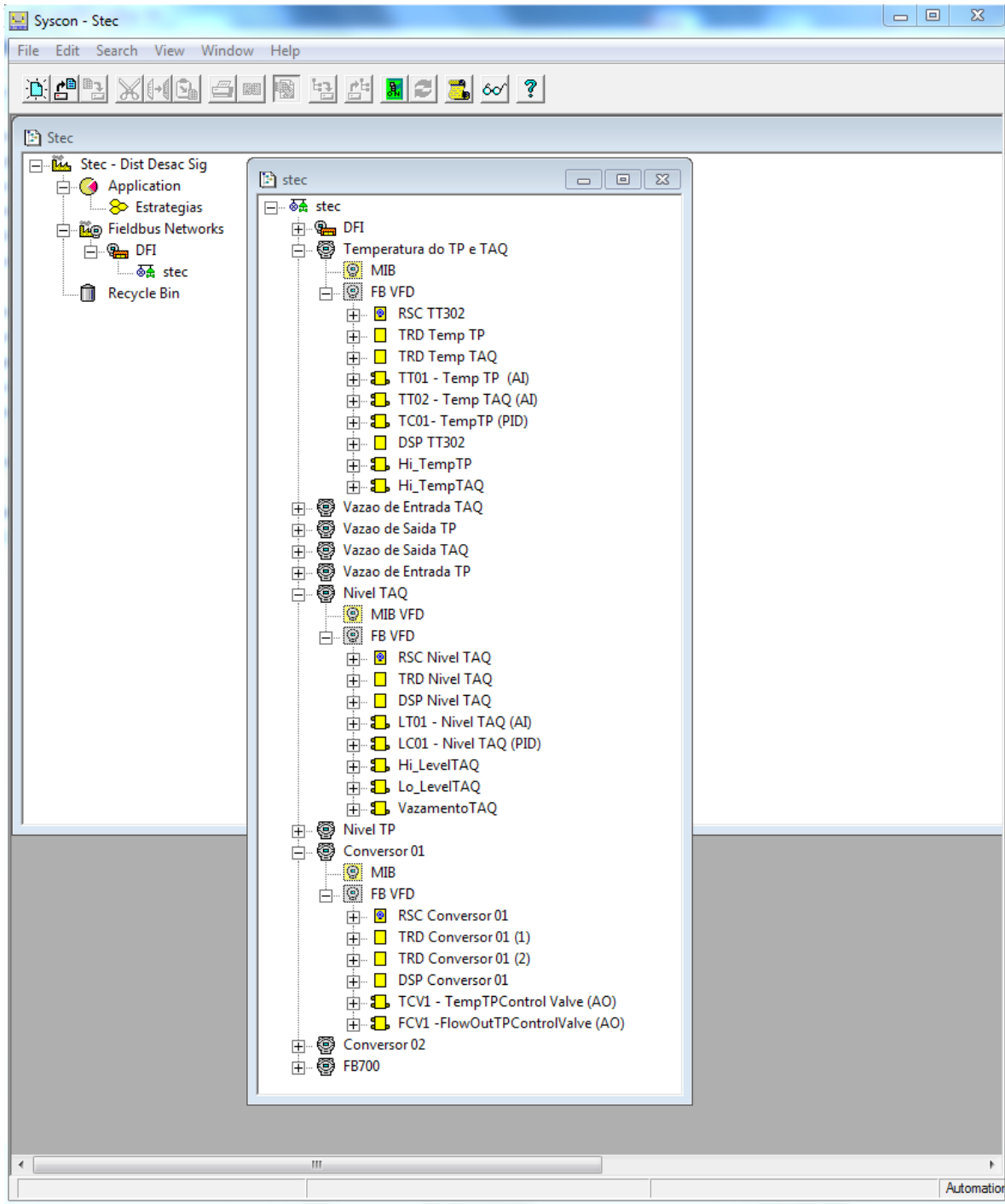


Figura 6: Dispositivos da rede stec e blocos de função correspondentes

Os sinais de entrada e saída dos blocos de função são descritos na parte lógica em *Estratégias*. Retorne à tela principal do projeto e dê um clique duplo em *Estratégias* e em seguida dê um clique duplo em um dos três ícones das malhas. Você observará uma tela como a da Figura 7. Nela vemos a programação das duas malhas de controle presentes no TAQ.

Cada elipse representa um bloco de função e as setas representam uma conexão entre a saída de um bloco e a entrada de outro. Dessa forma as setas representam uma comunicação entre dois blocos. Quando essa ligação ocorre entre blocos implementados em instrumentos diferentes, a comunicação ocorre pelo barramento da rede H1 (observe que essas ligações aparecem com linha tracejada no Syscon). Note na figura que os retângulos em cinza representam os instrumentos em que cada bloco é executado.

Numa implementação típica de uma malha de controle, temos que a saída de um bloco AI (Analog Input) é ligada à entrada de um bloco PID e que a saída do bloco PID é ligada à entrada de um bloco AO (Analog Output).

Vemos também na Figura 7 o uso de blocos de alarmes como o *Hi_TempTAQ*, que fazem parte do mecanismo de intertravamento da planta. Também vemos que há um caminho de volta do bloco AO para o bloco PID. Para entender esta funcionalidade, o estudante deve consultar o manual dos blocos de função. Também nos manuais deve-se buscar uma explicação para o uso das entradas FF_VAL nos blocos PID.

Existe uma diferença importante na implementação da malha de controle de temperatura do TAQ com relação às outras malhas: o PID é implementado no conversor e não no transmissor. Isso ocorre porque cada transmissor possui capacidade para executar apenas

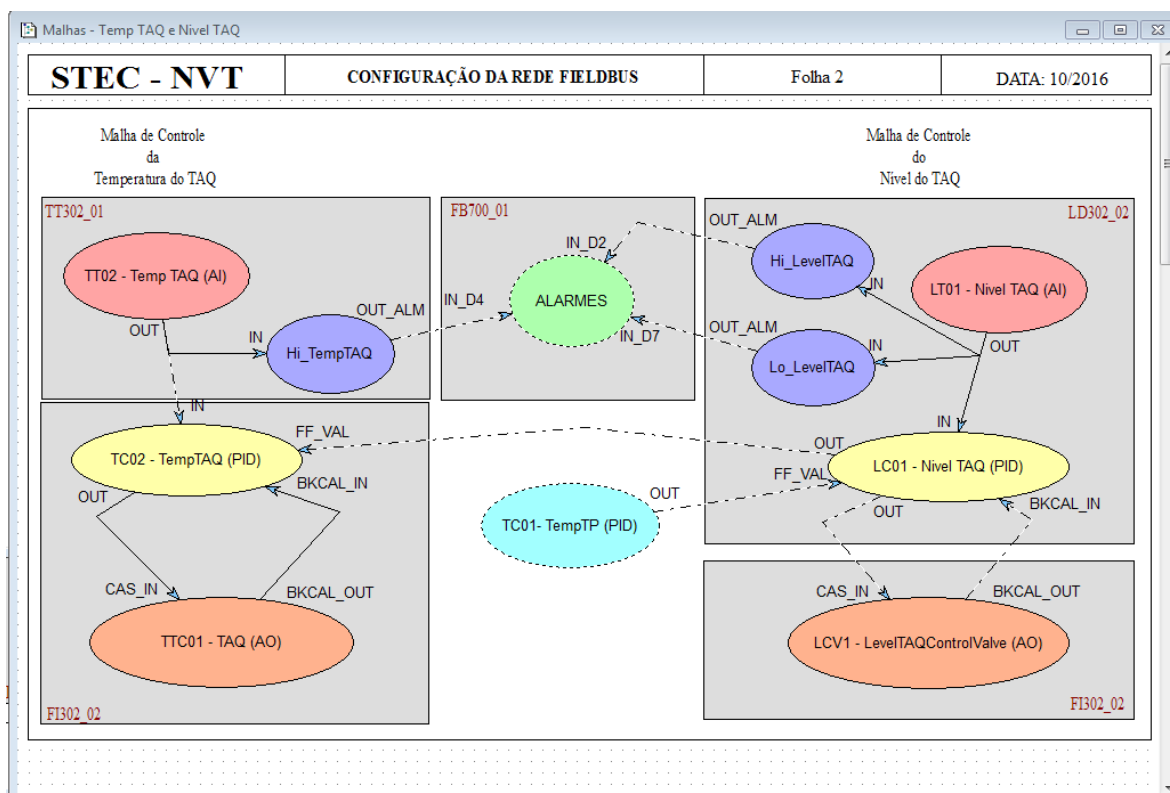


Figura 7: Malhas de controle de temperatura e nível do TAQ

um bloco PID. Como há apenas um transmissor de temperatura e duas malhas de controle de temperatura, o segundo controlador foi implementado em um dos conversores.

Dê um clique duplo sobre alguma das elipses e observe como novamente aparecerá a tabela de variáveis do bloco de função.

3.3.1 Blocos de Função e sua Configuração

Um dos principais objetivos desta aula é compreender como é feita a programação em blocos de função no STEC. Retorne ao projeto físico e abra a tabela de variáveis de algum bloco do tipo Analog Input. Cada bloco de função pode ter uma dezena de posições de memória. Essas posições de memória armazenam parâmetros e variáveis. As variáveis são alteradas a cada ciclo de execução e possuem um valor e um status (que é útil quando há troca de mensagem entre os blocos). Observe essa distinção por exemplo na variável *PV* e no parâmetro *XD_SCALE* na tabela de variáveis. Os parâmetros podem ser alterados em tempo de execução por alguma aplicação cliente.

Feche a tabela de variáveis e, com a chave Instrumentação ligada no quadro de energia, clique no botão verde com texto “ON” na barra de ferramentas (On-line Mode). Com isso o Syscon se comunicará com os instrumentos da rede Fieldbus. Desta vez, clique com o botão direito sobre o mesmo bloco de função e selecione “Online Characterization”. A tabela de variáveis será aberta em modo online e será possível visualizar (ou até mesmo alterar) seus valores em tempo de execução.

Voltando ao modo offline, explore todos os blocos de função do projeto tomando nota dos parâmetros que estão configuradas no modo offline. A ideia aqui é identificar quais parâmetros são essenciais para o correto funcionamento dos blocos numa dada aplicação. Note ainda que diferentes instâncias do mesmo bloco podem ter configurações distintas a depender do tipo de grandeza sendo trabalhada. Por isso será importante examinar todos os blocos de função do projeto para formar um entendimento mais completo da configuração da rede.

Estude os principais blocos de função da rede Foundation Fieldbus pelo seu manual no arquivo *FBLOC-FFME.pdf*. Recorra ao índice do manual para localizar a descrição dos blocos *Analog Input*, *PID*, *Pressure Transducer*, *Temperature Transducer*, *Analog Output* e *Display Transducer*. Estude os diagramas de cada bloco e tente compreender o seu funcionamento, identificando suas entradas, saídas e o processamento realizado, e identificando o seu papel na configuração descrita no projeto.

Leia a seção *Scaling Parameters* do manual e busque compreender o princípio de conversão de escalas utilizado. Em particular, para o bloco *Analog Input*, descreva a relação entre PV, FIELD_VAL e OUT.

3.4 Pontos de Discussão

- i) Qual o papel dos parâmetros XD_SCALE e OUT_SCALE no correto tratameto do dado dos sensores?
- ii) Qual parâmetro do bloco AI especifica a filtragem de ruído?
- iii) Por que a aplicação de raiz quadrada se faz necessária em alguns blocos?
- iv) Qual a utilidade do parâmetro MODE_BLK nos diversos blocos de função?
- v) Nos blocos PID, por que é importante limitar os valores de *setpoints*?
- vi) A que variáveis correspondem os parâmetros Kp, Ti e Td no bloco de função PID?
- vii) Na expressão matemática para a saída do PID, por que há um pólo na parte derivativa? Por que o sinal de erro não é derivado?
- viii) Qual o papel dos sinais BKCAL_OUT e BKCAL_IN na resolução de problemas de *windup* e na suavização da transição de modos de manual para automático?
- ix) Qual o papel do sinal FF_VAL aplicado aos blocos PID?
- x) Tente associar os principais acoplamentos entre as malhas com as ligações de FF_VAL que podem ser vistas no projeto lógico do Syscon (Estratégias de Controle).

O que deve constar no relatório para a próxima aula: identifique os principais **componentes de software**, os principais **blocos de função** utilizados no projeto e seus **parâmetros** mais importantes, e a estratégia de controle utilizada. Tente incluir os pontos de discussão acima no seu relatório de forma orgânica. Entregue seu relatório na tarefa da turma Moodle antes do início da próxima aula.

4 Terceira Semana: Modelagem da Planta

O objetivo desta aula é o de obter um modelo uma das malhas do STEC em torno de um ponto de operação específico. A modelagem terá como objetivo permitir uma nova sintonia do controlador PID responsável por aquela malha e do desacoplamento por *feedforward* utilizado na mesma malha.

O procedimento de modelagem deverá considerar o alto grau de acoplamento e não-linearidade das malhas. Como não há malhas instáveis, os experimentos serão realizados em malha aberta, o que evita realimentação de ruído e permite obter melhores relações sinal/ruído para a modelagem.

Os seguintes passos deverão ser seguidos:

- a) Ligue a instrumentação no quadro de energia e inicie a tela supervisória.

b) Configure os parâmetros de sintonia e referência das cinco malhas com base na tabela afixada na lateral da planta.

c) Coloque o STEC em operação seguindo os procedimentos de partida afixados em sua lateral. Se a estabilização demorar muito, o grupo pode operar a planta em modo manual para acelerar o processo.

d) Escolha uma das cinco malhas para realizar o projeto. Atente-se para o fato de que, com o passar do tempo, a vazão entre TAQ e TP tende a zero. Isso ocorre pois a água de TP é retornada para TR, o que acaba homogeneizando a temperatura dos dois tanques. Por essa razão, nos experimentos envolvendo o TAQ, pode ser necessário forçar manualmente uma vazão de saída não nula para este tanque.

e) Enquanto aguarda a estabilização, configure o aplicativo *ClienteOPC.exe* para coletar os dados referentes à malha escolhida e inicie a coleta. Você deve coletar a variável manipulada ($U1$) da malha a ser controlada, a variável de processo (Y) da malha a ser controlada e a variável manipulada ($U2$) de outra malha que mais interfira na malha a ser controlada (tem maior acoplamento).

f) **Depois que todas as malhas estiverem estabilizadas**, coloque a malha de controle que comanda $U1$ em modo **manual** e registre o valor de equilíbrio encontrado para $U1$. Altere o valor de $U1$ de modo a obter dados para a modelagem da função de transferência entre $U1$ e Y , levando o seguinte em consideração:

- o sistema pode ser bastante não-linear, por isso as entradas aplicadas **não devem ter grandes variações** de modo a excitar não-linearidades mais fortes;
- explore entradas de diferentes **amplitudes** para avaliar o grau de não-linearidade (pelo menos 3);
- por outro lado, as entradas não podem ser demasiado pequenas de modo que não seja possível distingui-las de ruído;
- em malhas de temperatura e vazão, devem-se aplicar degraus;
- em malhas de nível, como a dinâmica do nível é marginalmente estável, não podemos aplicar um degrau na entrada pois o tanque transbordaria ou se esvaziaria; por isso devem-se aplicar pulsos, i.e., mude $U1$ para um valor um pouco acima do equilíbrio, espere um tempo (20 segundos deve ser o bastante), e retorne $U1$ para o valor de equilíbrio (ou para um valor abaixo de modo a restaurar o antigo valor do nível);
- a largura dos pulsos não deve ser demasiado grande de modo afetar a linearidade do modelo;
- **os valores dos setpoints nunca devem ser alterados! Os testes são em malha aberta, não em malha fechada.**

g) Retorne $U1$ para o modo **automático** e aguarde nova estabilização. Coloque $U1$ e $U2$ em modo **manual** e atue em $U2$ de modo a obter dados para a modelagem da função de transferência entre $U2$ e Y . Feche o ClienteOPC e guarde o arquivo de dados gerado.

h) Utilize os dados coletados para estimar funções de transferência para $G_{YU1}(s)$ e $G_{YU2}(s)$. Leve em consideração que

- respostas a degrau de primeira ordem podem ser bem identificadas a partir de inspeção visual;

- a física do processo implica que as dinâmicas de nível devem possuir funções de transferência do tipo:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{s}$$

- assim, as respostas a degrau de sistemas marginalmente estáveis podem ser identificadas por inspeção visual a partir da inclinação das rampas obtidas; alternativamente, a derivada da resposta poderia ser utilizada para identificar um sistema de primeira ordem ou ordem zero;
- o ganho acima pode variar dependendo do ponto de operação que for utilizado; para fins de projeto de controle, o mais prudente será considerar o maior ganho medido;
- os modelos também podem ser obtidos a partir de software como o Identification Toolbox do Matlab; neste caso, é preciso cautela com dois pontos:
 - sempre subtrair a média dos sinais de entrada e saída antes de realizar a identificação; isso pode ser feito no workspace ou pelo processo de *detrending* no próprio Identification Toolbox (não seguir este passo levará a modelos catastróficos!)
 - sempre comparar o modelo obtido com o que esperamos da física do processo; por exemplo, se o modelo para o nível não apresenta um pólo em zero, houve algum erro na metodologia.

i) Valide o seu modelo comparando a resposta simulada com a resposta experimental.

j) Projete um controlador PID para a malha com $G_{YU1}(s)$. **Primeiro defina os requisitos de projeto** e utilize o método que desejar para obter um controlador que atenda aos requisitos. Obtenha a resposta em malha fechada simulada no Matlab para validar seu controlador. Não deixe de observar o comportamento da **variável manipulada** e confirmar se a mesma ficará dentro da região de linearidade para um degrau da amplitude desejada.

l) A estratégia de desacoplamento consiste em somar um sinal proporcional à perturbação na saída do controlador:

$$U1 = \bar{U}1 + K_f U2.$$

Dessa forma, o ganho *feedforward* K_f que cancela o efeito da perturbação $U2$ na saída Y é dado por:

$$K_f = \frac{-G_{YU2}(s)}{G_{YU1}(s)}$$

Utilize as funções de transferência estimadas para calcular o ganho acima. Na maioria dos casos os pólos das duas funções de transferência devem se cancelar.

O que deve constar do relatório para a próxima aula: Documentação do procedimento experimental, resultados obtidos, memória de cálculo da modelagem, validação dos modelos, documentação do projeto do controlador, validação do controlador.

5 Quarta Semana: Validação do Controlador

a) Coloque o STEC em operação, aguarde a estabilização das malhas, e realize um experimento de validação do seu novo controlador obtendo a **resposta a degrau em malha fechada**. Utilize o *ClienteOPC.exe* na coleta dos dados.

b) Realize um experimento de validação da estratégia de desacoplamento por *feedforward*. Com $K_f=0$ e a partir do equilíbrio, aplique **um degrau na referência** da malha de controle que comanda U_2 e registre o efeito sobre Y . Repita o experimento para o valor de K_f obtido no item 3.3.

O que deve constar do relatório final: Documentação do procedimento experimental e análise crítica dos resultados. Correções dos relatórios passados.

BIBLIOGRAFIA

Carvalho, Nely, L., "Projeto e implementação de um sistema de tanques para controle de nível, vazão e temperatura, usando tecnologia *Fieldbus*". Tese de Mestrado, PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais, 1998

Miklovic, T. Daniel. "Real-Time Control Networks", Instrument Society of America, 1993. National Instruments.

Persechini, M. A. M. "Redes Industriais para Automação", notas de aula , setembro 2002

Torres, Bernardo, S., "Sintonia de Controladores PID em um sistema Multimalha" , Tese de Mestrado, PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

"Industrial Automation Tutorial"

<http://www.raunvis.hi.is/~rol/Vefur/%E9r%20Instrupedia/CIATUTO.pdf>

Como implementar projetos com Foundation Fieldbus, Elaborado pelos Departamentos de Engenharia de Aplicações da Área Nacional e Internacional Departamento de Treinamento Smar Equipamentos Industriais Ltda, Agosto/98 revisão 2.0.

<http://www.smar.com/brasil/system302/>